3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.1 Basic optics and frontier of optics

[7a-N106-1~11] 3.1 Basic optics and frontier of optics

[7a-N106-1]

Light-Activated Self-Viscophoresis as Self-Brownian Ratchet Mechanism

○(PC)bokusui nakayama[1], Ryoya Hirose[1], Yusuke Takagi[2], Masatoshi Ichikawa[1], Marie Tani[1], Ibuki Kawamata[1], Eiji Yamamoto[2], Akira Kakugo[1] (1.Grad. Sch. of Sci., Kyoto Univ., 2.Grad. Sch. pf Sci. and Tech., Keio Univ.)

[7a-N106-2]

Second harmonic generation of NLO polymer/AuNP/SiO_2/Si structures

○Reito Suzuki[1], Masayoshi Kamiya[1], Atsushi Sugita[1] (1.Shizuoka Univ.)

[7a-N106-3]

Development of an Ultrabroadband Near-Perfect Absorber Covering the THz to DUV Spectral Range Based on Carbon Coated Moth-Eye Structure

○(D)Yuki Hakamada[1], Maria Cojocari[2], Mizuho Matoba[1], Shotaro Kawano[1], Haruyuki Sakurai[1], Kuniaki Konishi[1], Daniil Pashnev[3], Surya Revanth Ayyagari[3], Vytautas Janonis[3], Andrzej Urbanowicz[3], Saulius Tumenas[3], Justinas Jorudas[3], Irmantas Kasalynas[3], Janna Pennanen[2], Adigun Deborah Amos[2], Aleksandr Saushin[2], Georgy Fedorov[2], Yuri Svirko[2], Polina Kuzhir[2] (1.UTokyo, 2.UEF, 3.FTMC)

[7a-N106-4]

Manipulation of object movement in liquid by the Marangoni effect using a laser

○Sosuke Omata[1], Hiroto Yamada[1], Yuta Futamata[1], Lan Chen[2], Pengnian Zhao[2], Satoshi Honma[1], Hironori Ito[1] (1.Univ. of Yamanashi, 2.Hangzhou Dianzi Univ.)

[7a-N106-5]

Analysis of spherical heat conduction characteristics and bubble trapping position for marangoni-driven phenomena

○Hiroto Yamada[1], Sosuke Omata[1], Yuta Futamata[1], Pengnian Zhao[2], Lan Chen[2], Satoshi Honma[1], Hironori Ito[1] (1.Univ. of Yamanashi, 2.Hangzhou Dianzi Univ.)

[7a-N106-6]

Investigaion of Micro-Motion Sensor Using Volume Holographic Optical Element

○Riku Saito[1], Daisuke Barada[1,2] (1.Utsunomiya Univ., 2.UU CORE)

[7a-N106-7]

Characteristics of Volume Holographic Optical Elements for Cylindrical Waves Fabricated via Shifted Multiple Exposure

○Ryotaro Moritomo[1], Barada Daisuke[2] (1.Utsunomiya Univ., 2.Utsunomiya Univ. CORE)

[7a-N106-8]

Investigation of a Photofabrication Method Using Volume Holographic Optical Elements

○Koichiro Yurugi[1], Daisuke Barada[2] (1.Utsunomitya Univ., 2.UU CORE)

[7a-N106-9]

Mie Void Sensing of Refractive Index Change in a Liquid under High Pressure

○HIROMASA NIINOMI[1], HIROKI NADA[2], YUMIKO KODAMA[3], TETSUYA HAMA[4], TOMOYA OSHIKIRI[1,5], MASARU NAKAGAWA[1], YUKI KIMURA[6] (1.IMRAM, Tohoku Univ., 2.Grad. Sch. Eng., Tottori Univ., 3.IMR, Tohoku Univ., 4.KIS, The Univ. Tokyo, 5.RIES, Hokkaido Univ., 6.ILTS, Hokkaido Univ.)

[7a-N106-10]

Evaluation on ITO patterning via cloaking and invisibility method in crystalline phase-only spatial modulation

○Tsubasa Watanabe[1], Hiroto Sakai[1], Hiroshi Tanaka[1] (1.Hamamatsu Photonics)

[7a-N106-11]

Visualization of Electric Polarization in Electric Optic Polymer Films by Field Modulation Imaging

○Satoshi Matsuoka[1], Itsuki Miyamoto[2], Tatsuo Hasegawa[2], Yasufumi Enami[1] (1.Nagasaki Univ., 2.Univ. of Tokyo)

セルフブラウンラチェット機構としての光駆動自己粘性泳動

Light-Activated Self-Viscophoresis as Self-Brownian Ratchet Mechanism

京大院理[1]，慶大院理工[2] ○(PC)中山牧水[1]，廣瀬了哉[1]，高木悠丞[2]，市川正敏[1]，谷茉莉[1]，川又生吹[1]，山本詠士[2]，角五彰[1]

Graduate School of Science, Kyoto University[1]，Graduate School of Science and Technology, Keio University[2] ○(PC)Bokusui Nakayama[1]，Ryoya Hirose[1]，Yusuke Takagi[2]，Masatoshi Ichikawa[1]，Marie Tani[1]，Ibuki Kawamata[1]，Eiji Yamamoto[2]，Akira Kakugo[1]

E-mail: nakayama.bokusui.6f@kyoto-u.ac.jp

ときにマイクロスケールにおける輸送は、ありふれた熱揺らぎをエネルギー源として実現される。代表的な機構にブラウンラチェットがあり、空間的非対称性をもつ外部ポテンシャルの時間変調により揺らぎを整流する。しかし従来のブラウンラチェットでは、非対称性が外部に固定されており、運動体は受動的である。これに対し、粘性場を自ら変調し拡散の空間非対称性を能動的に形成する微生物も存在し、これは「セルフブラウンラチェット」と呼べる新たな運動様式(Fig. A)である。

本研究では、この概念を人工系で実現するため、「自己粘性泳動」という新たな自己駆動様式を提案する。Fig. B に示すように、温度応答性 Pluronic F127 溶液中で、金キャップおよびポリスチレンボディからなるヤヌス粒子をレーザ加熱することで非対称な温度分布が形成される。F127 の粘性は転移温度 T_c 近傍で高い温度依存性を示すため(Fig. C)、拡散場に空間勾配が生じ、外力なしに熱揺らぎが整流されて自己駆動運動が誘起される(Fig. D)。レーザパワーやベース温度に応じて、運動極性(キャップ先行/ボディ先行)や運動次元(2D/3D)の切り替えも確認された。さらに、ランジュバン方程式と熱拡散場の数値解析に基づくシミュレーションモデルを構築し、運動創発の物理的理解を試みた。

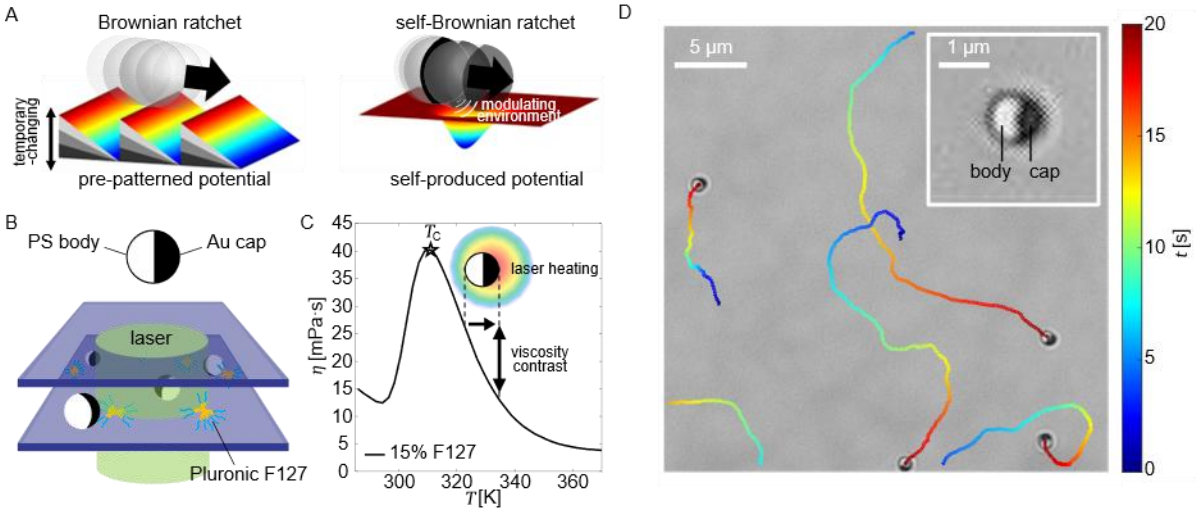


Fig. A: Schematic image of Brownian and self-Brownian ratchet. Fig. B: Experimental setup for laser-heated Janus particles in a Pluronic F127 solution. Fig. C: Temperature dependence of viscosity in F127 solution. Compared to PEG, F127 exhibits a pronounced temperature sensitivity. Fig. D: Representative trajectories of Janus particle motion. Trajectory color represents time.

© 2025年 応用物理学会

NLO ポリマー/AuNP/SiO_2/Si 構造の第二高調波発生に関する研究

Second harmonic generation of NLO polymer/AuNP/SiO_2/Si structures

静岡大工，○(M2)鈴木 麗人，神谷 眞好，杉田 篤史

Shizuoka Univ., ○Reito Suzuki, Masayoshi Kamiya, Atsushi Sugita

E-mail: suzuki.reito.20@shizuoka.ac.jp

プラズモニック金属ナノ粒子の非線形光学では、いかに波長変換効率を増大化するかがこの技術を実用化する上での鍵である。本研究では我々が先行研究で報告した光学干渉膜を用いた手法 [1]と非線形光学感受率の大きなポリマー材料を用いた手法 [2]を同時に取り入れたシステムを構築し、その有意性を検討した。

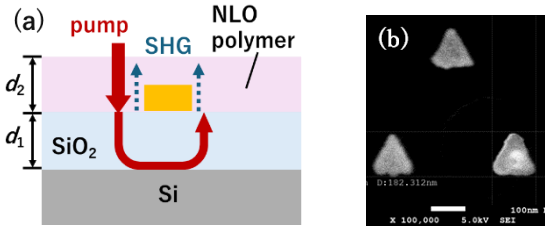


Fig. 1 (a) Schematics of NLO polymer/AuNP/SiO_2/Si structure. (b) SEM image of AuNPs.

Fig. 1(a)に提案したモデル構造の構成とその動作原理を示す。基板は表面を熱酸化したシリコンとし、その上に正三角形プリズム形状の金ナノプリズム(AuNP)(Fig. 1(b))を配置し、更にその上に NLO ポリマー薄膜を成長した。この構造では SiO_2/Si 界面で大きな表面反射することに注目する。SiO_2 層の膜厚を調整することで、AuNP への直接入射光と Si 表面からの反射光を光学干渉させ、光電場を増大する。通常の非線形プラズモニクスでは金属表面の非線形光学感受率を利用するが、この構造では LSP 増強光電場が NLO ポリマーと相互作用することで実効的な非線形光学感受率を増大化する。

Fig.2 (a)にモデル構造の反射及び SHG スペクトルを示す。Fig.2 (b)に比較のために通常の SiO_2 基板上に AuNP を配置した試料のスペクトルも示す。比較試料の SHG スペクトルは挿入図に 50 倍拡大したスケールでも示した。この構造の 800 nm の反射ピークは表面プラズモン共鳴効果によるものである。SHG スペクトルは反射スペクトルと良く対応していた。

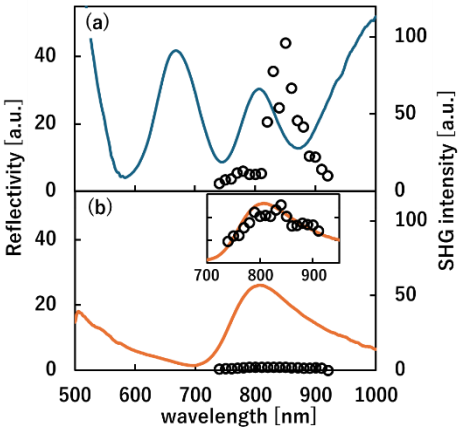


Fig. 2 Reflection and SHG spectrum of (a) NLO polymer/AuNP/SiO_2/Si structure and (b) reference AuNP/SiO_2 structure

モデル構造の反射スペクトルにも表面プラズモン共鳴によるピークが 800 nm 付近に見られたが、スペクトル幅は比較試料のそれよりも狭かった。これは、SiO_2 層と NLO ポリマー層で光学干渉効果により、スペクトルが変調を受けたことによるものである。SHG 信号は、比較構造よりも 50 倍も高強度で、期待通りに SHG 信号を増大化することに成功した。SHG ピークは反射ピークよりも 50 nm ほど長波長側に現れた。これは、SHG 変換動作において SHG 波長帯での光学干渉効果も寄与しており、その影響を受けたものと考察した。

1) A. Sugita et al., Opt. Exp. **30**, 22161 (2022).

2) A. Sugita et al., Phys. Rev. B **101**, 045303 (2020).

© 2025年 応用物理学会

カーボン薄膜コートされたモスアイ構造による THz-DUV 超広帯域完全吸収体

Development of an Ultrabroadband Near-Perfect Absorber Covering the THz to DUV Spectral Range Based on Carbon Coated Moth-Eye Structure

東大院理[1]，UEF[2]，FTMC[3]
（D）袴田祐生[1]，Maria Cojocari[2]，的場 みづほ[1]，川野 将太郎[1]，櫻井 治之[1]，小西 邦昭[1]，Daniil Pashnev[3], Surya Revanth Ayyagari[3], Vytautas Janonis[3], Andrzej Urbanowicz[3], Saulius Tumėnas[3], Justinas Jorudas[3], Irmantas Kašalynas[3], Janna Pennanen[2], Adigun Deborah Amos[2], Aleksandr Saushin[2], Georgy Fedorov[2], Yuri Svirko[2], Polina Kuzhir[2]

Univ. of Tokyo[1], Univ. of Eastern Finland[2], Center for Physical Sciences and Technology (FTMC)[3]
Yuki Hakamada[1], Maria Cojocari[2], Mizuho Matoba[1], Shotaro Kawano[1], Haruyuki Sakurai[1], Kuniaki Konishi[1], Daniil Pashnev[3], Surya Revanth Ayyagari[3], Vytautas Janonis[3], Andrzej Urbanowicz[3], Saulius Tumėnas[3], Justinas Jorudas[3], Irmantas Kašalynas[3], Janna Pennanen[2], Adigun Deborah Amos[2], Aleksandr Saushin[2], Georgy Fedorov[2], Yuri Svirko[2], Polina Kuzhir[2]

E-mail: kkonishi@ipst.s.u-tokyo.ac.jp

広帯域かつ高効率な電磁波吸収体は、エネルギー収集、電磁波遮蔽、熱放射源など多岐にわたる分野で必要とされている。様々な材料の開発が進められてきている中で、熱分解炭素（Pyrolytic Carbon; PyC）薄膜は、テラヘルツから近赤外の広い帯域での吸収を実現できる広帯域吸収体としての応用が期待されている[1]。しかし、平面上に製膜された PyC 薄膜の吸収率は、原理的に 50%程度に制限されてしまう[2]。我々は、広い周波数範囲でのインピーダンス整合を示す突起状の構造が整列したモスアイ構造を成膜の基板として用いることにより、この問題の解決を試みた。

本研究では、モスアイ構造に PyC 薄膜をコートすることで、テラヘルツから深紫外領域に及ぶ超広帯域な高効率吸収体を実現した[3]。厚さ 700 μm の高抵抗シリコン基板にフェムト秒レーザー加工を用いて周期 67 μm、高さ 240 μm モスアイ構造[4]を作製し、さらにその表面に厚さ 100 nm の PyC を化学気相成長法により均一に被覆することで、PyC コートされたモスアイ構造を作製した(Fig. 1)。作製されたサンプルを複数の透過及び反射スペクトル測定手法を用いて吸収特性を評価した結果、1 THz～1200 THz の周波数領域において 98%以上の吸収率を示すことが明らかになった(Fig. 2)。また、本構造で超広帯域な吸収特性が生じるメカニズムについて、有限要素法による数値シミュレーションおよび光線近似モデルを用いた考察を行った。

このような超広帯域な完全吸収体は、通信や電波天文学の分野で用いられる電磁波遮蔽材に加えて、理想的な黒体放射源としての応用も期待される。発表当日は、作製・測定手法に関する詳細な説明のほか、広帯域吸収のメカニズムに関する解析結果についても報告する予定である。

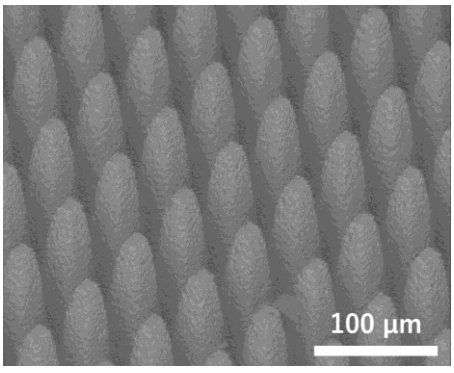


Fig. 1: SEM image of the fabricated moth-eye/PyC structure.

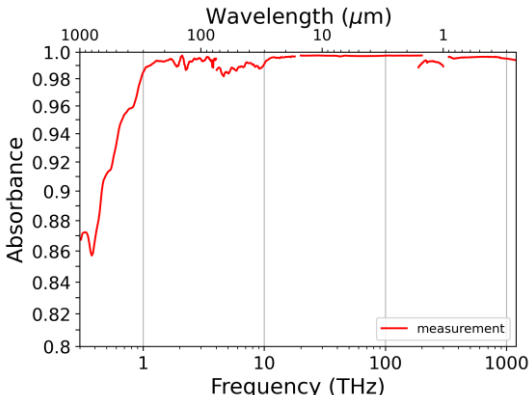


Fig. 2: Measured absorption spectrum of the fabricated moth-eye/PyC structure.

[1] J. Jorudas et al., Nanotechnology **35**, 305705 (2024).
[2] H. Bosman et al., Appl. Phys. Lett. **82**, 1353 (2003).
[3] Y. Hakamada et al., Adv. Opt. Mater. **2025**, 2500948 (2025).
[4] R. Koike et al., Appl. Opt. **63**, 7442 (2024).

© 2025年 応用物理学会

レーザーを用いたマランゴニ効果による液体中での物体移動操作

Manipulation of object movement in liquid by the Marangoni effect using a laser

山梨大工[1]，杭州電子科技大[2]，○(M1)小俣颯祐[1]，(M1)山田大翔[1]，(B)二俣勇大[1]，
(M1)Lan Chen[2]，(M1)Pengnian Zhao[2]，本間聡[1]，伊藤宙陛[1]
Univ. of Yamanashi[1], Hangzhou Dianzi Univ.[2], ○Sosuke Omata[1], Hiroto Yamada[1], Yuta Futamata[1],
Lan Chen[2], Pengnian Zhao[2], Satoshi Honma[1], Hironori Ito[1],
E-mail: hito@yamanashi.ac.jp

1. 背景と目的

マイクロメータ領域における非接触での物体移動は細胞操作など，生体・医療分野への応用が期待される．その実現に向けレーザー加熱によるマランゴニ効果が注目されているが，従来手法においては移動範囲が液面に限定されている[1]．本研究では，レーザー加熱にて光吸収体表面に意図的に発生させた気泡を起点とするマランゴニ対流[2]を利用して，液体中の非接触物体移動を実現する新手法を提案する．直径500 μmのSUS440C球と表面プラズモン吸収のための金属ナノ粒子を塗布した直径1 mmのガラス球の2種類の球体を準備し，細胞を始めとする対象物を押して動かすための駆動媒体としての性能を評価することを目的とする．

2. 実験結果

図1に示す実験系により，アセチルアセトンで満たした光学セル内の駆動体表面に波長532 nmのCWレーザーをレンズで集光し，液流と駆動体の動きをハイスピードカメラで観察した．図2はレーザー強度0.35 Wにおける，SUS440C製駆動体での結果で，駆動体表面の気泡を起点とした安定的な層流が発生し，314 msで778 μm移動した．図3は同一条件下でのガラス製駆動体の結果で，176 msで1.01 mm移動した．SUS440Cよりも熱伝導率の低いガラスの方が球体表面の熱勾配が急峻となり，結果として発生したマランゴニ力が増大しより大きな駆動力が得られた．

本講演ではガラス球による前後の移動制御例，駆動中の気泡の位置安定性，各条件下での気泡発生および駆動発生のレーザー強度閾値駆動力についても紹介する．

参考文献

[1] R. Yang, et al., *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **7**, 15, 13226, (2019)
[2] K. Namura, et al., *Sci Rep* **7**, 45776, (2017)

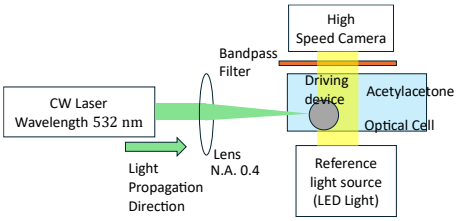


Fig. 1 Optical setup for laser focusing and observation

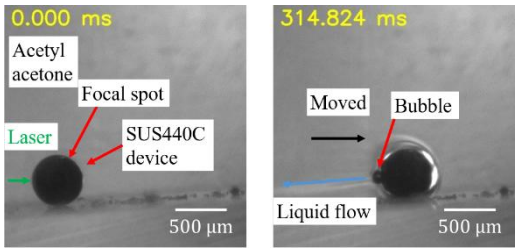


Fig. 2 Results of SUS440C sphere

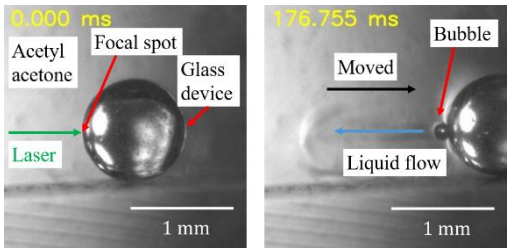


Fig. 3 Results of glass sphere

© 2025年 応用物理学会

マランゴニ光駆動に向けた球体熱伝導特性と気泡捕捉位置の解析

Analysis of spherical heat conduction characteristics and bubble trapping position for photo-marangoni-driven phenomena

山梨大工 [1], 杭州電子科技大 [2], ○(M1)山田 大翔 [1], (M1)小俣 颯祐 [1], (B)二俣 勇大 [1], Pengnian Zhao[2], Lan Chen[2], 本間 聡 [1], 伊藤 宙陛 [1],

Univ. of Yamanashi[1], Hangzhou Dianzi Univ.[2], ◦Hiroto Yamada[1], Sosuke Omata[1], Yuta Futamata[1], Pengnian Zhao[2], Lan Chen[2], Satoshi Honma[1], Hironori Ito[1],

E-mail: hito@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

レーザー加熱によるマランゴニ効果[1]を利用した非接触の物体移動は，マイクロメータ領域の精密制御手法として注目されている．従来では，マランゴニ力を利用した物体移動はすべて平坦な気液界面でのみ実現され[2]，液体中での 3 次元的な移動が困難である．そこで，液体中の光吸収体にレーザーを照射し，気泡を生成することで，意図的に気液界面を作り出し，強力なマランゴニ流を生じさせることができることに着目し，この流れを駆動力として利用すれば，物体を自由に移動させることができる可能性がある．駆動力の起点となる気泡は高温部に移動するため，物体移動の制御をするためには球体表面の温度分布を把握し，気泡の位置を予測することが重要である．

2. 目的

本研究の目的は，球体の熱伝導特性がレーザー照射によって発生する気泡の挙動に及ぼす影響を明らかにし，熱伝導シミュレーションにより駆動力の起点となる気泡の捕捉位置を予測することである．球体表面のレーザースポット位置を熱源とした熱伝導シミュレーションにより，球体内部と表面および周囲液体の温度分布を解析し，異なる材料における熱拡散の違いを評価するとともに，その結果を基に気泡位置の予測を行う．

3. 解析手法

レーザー照射中に形成される最高温度地点が気泡捕捉点，すなわち駆動力の起点になると考え，熱伝導シミュレーションで球体の温度分布を解析した．球体表面に定常熱源を与え，材料ごとの熱拡散の違いが最高温度地点に及ぼす影響を評価し，気泡捕捉位置の予測を行った．

4. 解析結果

Fig.1 にステンレス球体表面に 420 mW の定常的な熱源を与え, 0.002 秒後の温度分布を求めた結果を示す．熱は照射位置から拡散し，球体全体に広まったものの最高温度地点は照射位置に固定された．異なる材料における熱拡散の違いが最高温度地点の広がりに影響し，駆動力起点の位置を決定する．

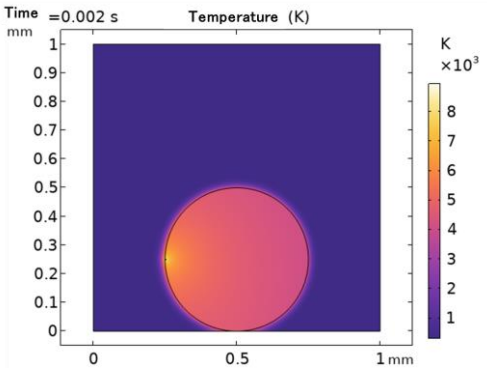


Fig.1 Stainless Steel Sphere Heat Diffusion

参考文献

[1] K. Namura, et al., Sci Rep **7**, 45776, (2017)

[2] R. Yang, et al, ACS Sustainable Chem. Eng., **7**, 15, 13226-13235, 2019

© 2025年 応用物理学会

体積ホログラフィック光学素子を用いた微細モーションセンサーの検討

Investigaion of Micro-Motion Sensor Using Volume Holographic Optical Element

齋藤　陸[1], 茨田　大輔[1,2] ○ 宇大光工学[1] 宇大 CORE[2]

Opt. Eng.,Utsunomiya Univ.[1], CORE, Utsunomiya Univ.[2], ○Riku Saito[1], Daisuke Barada[1,2]

E-mail: mc256523@s.utsunomiya-u.ac.jp

1　研究背景

近年情報化社会の発展に伴い，仮想現実 (Virtual Reality) はより注目を集めている．VR 技術については，仮想空間上に自分自身が実際に入り込んだかのように感じる技術であり，現実世界の動きを仮想現実上で表すことが可能である．仮想現実上にある物体に重さや形が似ている物体を用いて現実世界で重さや感覚を再現することで，より高い没入感を実現することができる．この技術を用いて，医療など微細な動きが必要になる職人技のトレーニングができると考えられる．現在，医者の手術や職人技と呼ばれる技術においては，0.1mm/s から 0.01mm/s ほどの精度が必要になる．このトレーニングを行うにあたって，一般のセンサーでは，ドリフトなどのずれが生じることからこの精度で検知することが難しい．そこで，本研究では，体積ホログラフィック光学素子を用いて, 二つの回折光のドップラー効果による周波数差から, 微細な動きを検知するモーションセンサーを作製することを目的とする．

2　実験方法と結果

本研究で使用した光学系を Fig,1 に示す．波長 532nm のレーザー光を用いて，偏光ビームスプリッタにより，参照光 a,b，信号光 c に分ける．参照光 a と信号光 c を用いた干渉縞と参照光 b と信号光 c を用いた干渉縞をフォトポリマーに露光し，参照光 a,b を入射することで，回折光を得る．参照光 a,b を入射しながらフォトポリマーを横方向に動かすことで，ドップラー効果によりうなりが発生する．本実験では，0.01mm/s で動かした．この変化を高速 CMOS カメラで撮影し，周波数差から動かした速度を $v = \frac{\omega\lambda}{\sqrt{2}}$ で求め，実際に動かした速度と比較する．

実際に撮影した 2000 枚の写真をもとに縦軸を光強度，横軸を時間で表したグラフを Fig.2 に示す．グラフよりうなりの周期が約 0.1s と分かるので，光のドップラー効果の式とうなりの式から速度は 0.0037mm/s という結果が得られた．

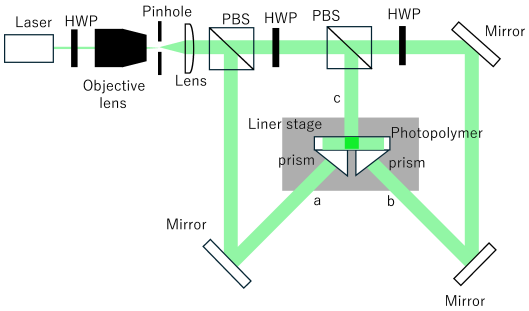


Fig. 1: Optical setup

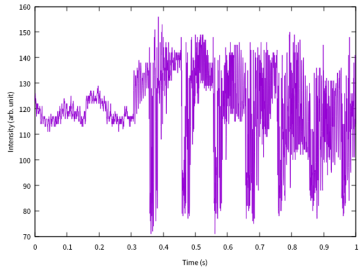


Fig. 2: Intensity variation by optical Doppler effect

© 2025年 応用物理学会

シフト多重露光を用いた円筒波体積ホログラフィック光学素子の特性

Characteristics of Volume Holographic Optical Elements for Cylindrical Waves Fabricated via Shifted Multiple Exposure

宇大光工学 [1]，宇大 CORE[2]　○ 守友 遼太郎 [1]，茨田 大輔 [1,2]

Opt. Eng., Utsunomiya Univ.[1], CORE, Utsunomiya Univ.[2], ○Ryotaro Moritomo[1], Daisuke Barada[1,2]

E-mail: mc256544@s.utsunomiya-u.ac.jp

1　はじめに

透過型のヘッドマウントディスプレイでは，現実世界の情報を確保するために高い透過性が要求される．また，頭部に装着して使用するため，小型・軽量化が求められる．効率的な作業を行うためには広い視野やアイボックスを確保する必要がある．

ヘッドマウントディスプレイのコンバイナとしてハーフミラーを用いることができるが，透過率が 50 %程度であり，多様な環境下で使用するには十分とは言えない．また，十分なアイボックスを確保するには大型の投影光学系が必要となり，小型化とトレードオフの関係になる．

体積ホログラフィック光学素子は，多重性によって異なる照射条件で別の光学機能を持たせることができる特徴を持つ．この特徴を活かし，これまで AR 導光板への応用を検討してきた．先行研究では，水平方向の視野角・アイボックスの拡大が成功している [1]．本研究では，上下方向の視野角とアイボックスの拡大の機能を付与することを目的として，シフト多重露光を検討した．

2　上下方向における視野角拡大実験

Fig.1 に実験光学系を示す．光源には波長 532nm の Nd-YAG レーザーを用いた．平面波と円筒波を干渉させ，ゴニオステージを ± 5 ° の範囲で動かし，上下方向にシフト多重露光を行って円筒波体積ホログラフィック光学素子を作製した．円筒波生成には円筒レンズを用いた．

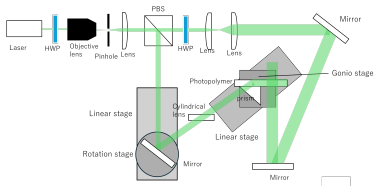
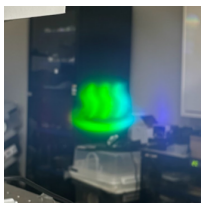


Fig. 1: Optical setup

作製した光学素子に画像を投影した結果を Fig.2 に示す．Fig.2a が投影した画像で，Fig.2b が回折した画像である．回折した画像を用いて視野角とアイボックスを測定した結果を Tabel.1 に示す．シフト多重露光の有用性を示すためにシフト多重露光を行わずに作製した光学素子でも同様の測定を行った．この結果により，上下方向にシフト多重露光を行うことで上下方向の視野角・アイボックスともに拡大されたことがわかる．



(a) Original image



(b) Observed image

Fig. 2: Experimental result

Table 1: Measurement Results of Field of View and Eyebox

多重露光の有無	アイボックス	視野角
無し	8mm	25.54 °
有り	18mm	48.78 °

本研究の一部は，JST JIE-GAP の支援を受けて実施された．

[1] 木原，岡田，茨田，Optics and Photonics Japan 28pP33 (2023) .

© 2025年 応用物理学会

体積ホログラフィック光学素子を用いた光造形方法の検討

Investigation of a Photofabrication Method Using Volume Holographic Optical Elements

宇大光工学[1]，宇大 CORE[2]　○万木 宏一郎[1]，茨田 大輔[1,2]
Opt. Eng., Utsunomiya Univ.[1], CORE, Utsunomiya Univ.[2], ○Koichiro Yurugi[1], Daisuke Barada[1,2]
E-mail: mc256522@s.utsunomiya-u.ac.jp

1　研究背景

近年，3D プリント技術は急速に発展し，医療・エレクトロニクス・マイクロマシン分野などへの応用が拡大している．中でも，フォトポリマーを用いた光造形方式は，光照射による選択的硬化のシンプルな原理により高精細な構造形成が可能で，広く利用されている．現在，二光子吸収を利用して数百ナノメートルの解像度で 3D プリンティングを行なうことも可能であるが [1]，高強度のパルスレーザー光源が必要となる．本研究では，体積ホログラフィック光学素子を使った 3D プリンティングを検討している．体積ホログラフィック光学素子では近接場光を選択的に回折可能であると考えられており [2]，レジンへの照射によりナノスケールの構造形成が期待される．本研究では，これまでのホログラフィック光学素子の知見を活かし，複数のスポット状近接場光を同時に発生させ，これを用いた微小 3D プリンターの実現を目指している．本報告では，その前段階としてフォトポリマーから得られる回折光を用いてレジンの硬化が可能かを検証した結果を示す．

2　実験結果

フォトポリマー上で二光束を干渉させ露光を行う．Fig.1 に実験に用いた光学系を示す．波長 405nm のレーザー光を用いて，偏光ビームスプリッターで分岐させた．参照光はそのままフォトポリマーに照射し，信号光は半波長板を通すことで s 偏光にしフォトポリマーに照射することで，二光束をフォトポリマー上で干渉させ干渉縞を露光した．フォトポリマーは 30 秒間露光後に 1 分程度白色光に晒すことで屈折率分布の固定化を行なった．その後，参照光のみをフォトポリマーに照射し，得られた回折光をレジンに照射した．Fig.2 に実験結果を示す．この結果よりフォトポリマーの回折光を用いてレジンを硬化させられることがわかった．今後はフォトポリマーにプリズムを取り付け，フォトポリマー内を導波させた参照光と平行光の信号光で露光を行い，得られた回折光でレジンが硬化可能かを調査する．

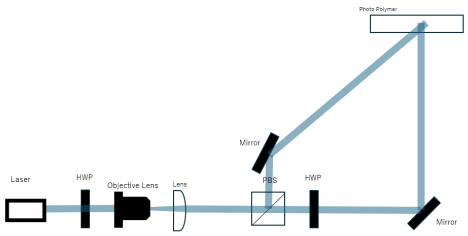


Fig. 1: Optical system

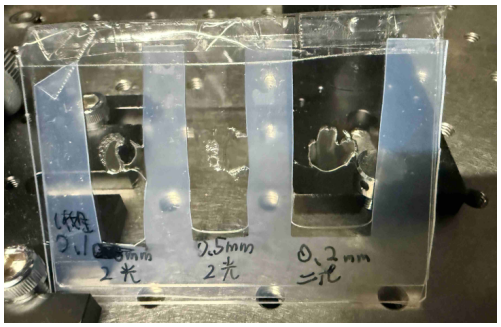


Fig. 2: Cured resin

[1] J. Fischer, et al., Laser & Photonics Reviews, 7 (2013) 22-44.
[2] 茨田大輔, 谷田貝豊彦, ”FDTD 法を用いた近接場光回折ホログラムの光伝搬解析”，第 72 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 03-104 (2025).

© 2025年 応用物理学会

Mie 空孔共鳴による高圧液体の屈折率変化検出

Mie Void Sensing of Refractive Index Change in a Liquid under High Pressure

東北大多元研 [1]，鳥取大院工 [2]，東北大金研 [3]，東大先進機構 [4]，北大電子研 [5]，北大低温研 [6]
○新家 寛正 [1]，灘 浩樹 [2]，兒玉 裕美子 [3]，羽馬 哲也 [4]，押切 友也 [1,5]，中川 勝 [1]，木村 勇気 [6]
IMRAM, Tohoku Univ. [1], Grad. Sch. Eng. Tottori Univ. [2], IMR, Tohoku Univ. [3], KIS, The Univ. Tokyo [4], RIES, Hokkaido Univ. [5], ILTS, Hokkaido Univ. [6] ○Hiromasa Niinomi [1], Hiroki Nada [2], Yumiko Kodama [3], Tetsuya Hama [4], Tomoya Oshikiri [1,5], Masaru Nakagawa [1], Yuki Kimura [6]
E-mail: hiromasa.niinomi.b2@tohoku.ac.jp

近年，高屈折率誘電体表面へのナノ陥没構造の形成により陥没空間内において誘起される光の共鳴が Mie 空孔共鳴として見出され，その応用が期待されている.[1] Mie 空孔共鳴の波長は空孔内の媒質の屈折率に応じて鋭敏に変化するため，微小量液体の屈折率測定に応用されている.[2] そこで，本研究では，高圧物性研究に広く用いられるアンビルセルのアンビルにはしばしば高屈折率誘電体が用いられることに着目し，アンビルに Mie 空孔を形成することで高圧下の液体の屈折率変化検出技術を開発することを目的とした．集束イオンビーム加工により直径，深さおよび周期が約 900 nm, 480 nm, 1500 nm の円柱状陥没構造を約 30 μm 四方の面積で作製することで Mie 空孔共鳴体を炭化ケイ素(4H-SiC)単結晶アンビル表面に形成した．このアンビルを用いて，超純水を室温(22ºC)で加圧することで高圧氷を結晶化させた後，減圧による高圧氷の融解により生成する水で満たされた共鳴体の，光学スペクトルの減圧に伴う変化をハイパースペクトルカメラで測定した．図 1 に減圧に伴う共鳴体の反射光学スペクトル変化と対応する反射光学顕微鏡像を示す．減圧前の光学スペクトルはおよそ 640 nm と 440 nm にピーク示した一方，大気圧まで減圧した後はおよそ 620 nm と 405 nm にピークを示した．このことから，長・短波長側のピークではそれぞれおよそ 20 nm, 25 nm の波長シフトが減圧に伴い観測されることがわかった．このシフトは，減圧に伴う水の屈折率変化に起因すると考えられる．減圧前の水の屈折率を高圧氷への相転移直前の 1.446 と仮定した場合，屈折率変化の検出能は，長・短波長側のピークシフトでそれぞれおよそ 172 nm/RIU, 216 nm/RIU であった．これまでの研究で，金ナノロッドの長・短軸方向の局在型表面プラズモン共鳴の波長シフトに基づいた高圧下の水の高感度な屈折率検出が報告されている.[3] その検出能は，それぞれ 66.7 nm/RIU, 251 nm/RIU であり，[3] 本手法の検出能は表面プラズモン共鳴に匹敵すると考えられる．

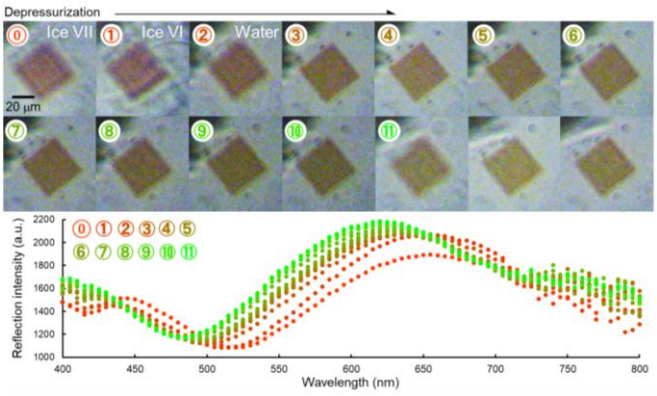


図 1. 4H-SiC アンビルの Mie 空孔共鳴体の反射光学顕微鏡像(上)と対応する共鳴体の反射光学スペクトル(下).

参考文献 1) Hentschel et al., *Light Sci. Appl.* 2023, 12, 3. 2) Arslan et al., arXiv:2407.02331. 3) Runowski et al., *Nanoscale* 2019, 11, 8718.

© 2025年 応用物理学会

結晶型位相オンリー空間変調における ITO パターンクローキング法の検証

Evaluation on ITO patterning via cloaking and invisibility method in crystalline phase-only spatial modulation

浜松ホトニクス株式会社 中央研究所 ○渡邊 翼，酒井 寛人，田中 博

Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K.,

○Tsubasa Watanabe, Hiroto Sakai, and Hiroshi Tanaka

E-mail: tsubasa.watanabe@crl.hpk.co.jp

【はじめに】我々は光変調器の高速化を目的に、空間光変調を考慮して電気光学結晶の有用性について調査している。電気光学結晶は、電界効果によって屈折率変化が生じるが、比誘電率が高い結晶では様々な影響が現れる。既存の電気光学結晶の中でも最大級の比誘電率を有するタンタル酸ニオブ酸カリウムは、光スキャナーや波長掃引光源に適用した例が報告されている[1]。一方で、我々はアウトオブプレーンで回折光を読み出すデバイス構造を作製し、スイッチング特性の評価[2]や、表面構造が空間解像度に与える影響をシミュレーション評価[3]してきた。今回、解像度評価に有用な透明電極としてインジウムスズ酸化物 (ITO) をパターン化した場合の空間的な透過率差を最小化する反射防止膜を設計し、計算上でその効果を調査した。

【研究方法・結果】位相オンリーの光変調を目的とするため、ある 2 点の透過率差 Δ は 2%以下が望ましい。Δ の混在により不要な回折光が発生し、変調時の光利用効率や評価精度が低下する。Fig. 1 に 633 nm で設計した反射防止膜の Position 1, Position 2 の (a) 2 点の透過スペクトルと Δ が(b) 15%、(c) 2%のときのストライプパターンを示す。薄膜の設計計算上で、Fig. 1 (a)の印 x 付近に Δ が 2%以下となる波長域 (590-680 nm) が探索され、その波長域はある程度調整可能であることを確認した。今後の光学的な評価結果から本手法の実効性を示す。

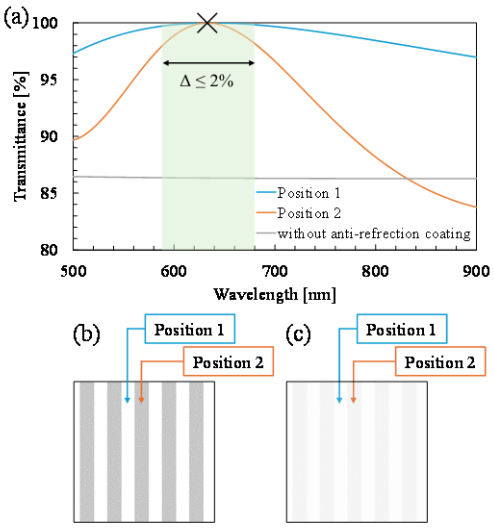


Fig. 1 Design of anti-reflection coating to minimize the transmittance difference. (a) Transmittance spectrum. Cloaking effect of ITO patterns (b) Δ=15% and (c) Δ=2%.

参考文献

[1] J. Kobayashi et al., NTT Tech. Rev. **12** (2014).

[2] H. Sakai et al., Opt Rev **32** (2025).

[3] T. Watanabe et al., Proc. SPIE 1336003 (2025).

© 2025年 応用物理学会

電界変調イメージングによる電気光学ポリマー膜内の分極分布観察

Visualization of Electric Polarization in Electric Optic Polymer Films by Field Modulation Imaging

長崎大総合生産[1]，東大工[2]　○松岡 悟志[1]，宮本 樹[2]，長谷川 達生[2]，榎波 康文[1]

Nagasaki Univ.[1], Univ. of Tokyo[2]

○Satoshi Matsuoka[1], Itsuki Miyamoto[2], Tatsuo Hasegawa[2], Yasufumi Enami[1]

E-mail: matsuoka-s@nagasaki-u.ac.jp

光変調器は、光導波路内の電気光学（EO）応答を利用して電気信号を光信号に変換する光デバイスであり、光を媒体として情報データを伝送する光通信において中心的な役割を担う。光変調器の高性能化に向けて、色素分子とポリマー分子を混合した EO ポリマーを光導波路に用いた EO ポリマー光変調器が、従来の $LiNbO_3$ などの無機材料に比べて広帯域化、低電圧化に有利であることから注目されており、近年研究開発が進められている。色素分子の分極モーメントが主な分極成分となる EO ポリマーでは、導波路内の分極配向を一様に揃えるために、外部電界印加によるポーリング処理をガラス転移点を超える温度下にて行う必要がある。しかしアモルファスな構造内での分子配向制御は容易ではなく、デバイス構造や接合界面に依存して分極配向が局所的に不均一になることが想定される。実際のデバイスにおいても材料本来の性能を下回ることが経験的に知られ、光導波路内の分極配向分布の定量的な評価が必要とされている。そこで本研究では、電界変調イメージング測定による分極配向評価技術を用いて EO ポリマー膜内の分極分布観察を行った。

電界変調イメージング測定は、分極成分を有する試料に入射した直線偏光を CMOS カメラで撮像し、同時に外部から正と負の電界を交互に印加して、その差分画像から分極配向分布を取得する手法である。本研究では、EO ポリマー膜に Au 電極を配置した単純な素子構造においてポーリング処理後の分極配向分布を評価した（Fig. (a)）。EO ポリマーには NEO−823（東京化成工業）を 20wt%混合した PMMA を用い、電極間距離を 10 μm とした。測定は可視光域で行い、EO 応答に含まれる吸光度成分と屈折率成分を分離するために無偏光状態での測定結果と組み合わせて、分極配向および EO 係数を解析した。Fig. (b)に、入射光波長 565 nm、電圧 20 $V_{p\text{-}p}$ で測定し、上記の解析を行った後の電極スリット近傍の信号分布画像を示す。電極間の中央部は正（赤色）、電極近傍は負（青色）の信号が現れており、電極近傍で分極分布が反転していることを示唆する結果となった。講演では、入射光波長を変えて測定した EO 係数の波長分散と併せて、EO ポリマー膜内の分極分布について議論する。

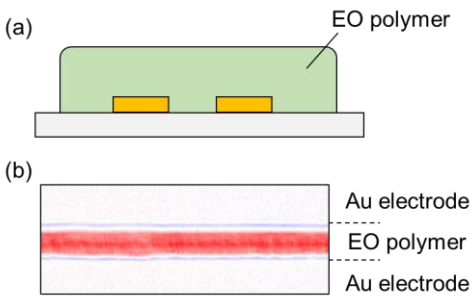


Fig. (a) Schematic of sample structure and (b) field modulation image at 565 nm at around electrode slits.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.1 Basic optics and frontier of optics

[7p-N106-1~14] 3.1 Basic optics and frontier of optics

[7p-N106-1]

A Geometric Model of the Generalized Higher-Order Poincaré Sphere for Spatial Control of Polarization and Intensity

○Chihiro Tago[1], Toshiki Matsumoto[1], Takashi Kakue[1], Ken Morita[1] (1.Chiba Univ.)

[7p-N106-2]

Twisted Scaffolds Fabricated by Optical Vortex-Induced Forward Transfer (OV-LIFT)

○Masahito Okida[1,2], Yohei Kawano[1,2], Takashige Omatsu[1] (1.MCRC, Chiba Univ., 2.HSG K.K.)

[7p-N106-3]

Measurement of Polarized Emission from Fluorescent Molecules on a Bull's Eye Type-Plasmonic Chip

○Yuma Yoshida[1], Yasunori Nawa[1], Keiko Tawa[1] (1.Kwansei Gakuin Univ.)

[7p-N106-4]

Generation of optical skyrmions from a ring-resontor laser with an S-shaped coupler

○ZHIWEI DAI[1], WENBO LIN[2], SANGMIN JI[1], HIROYA SAKUMOTO[3], MITSURU TAKENAKA[3], SATOSHI IWAMOTO[1] (1.RCAST and IIS, Univ. of Tokyo, 2.Science Tokyo, 3.Graduate School of Engineering, Univ. of Tokyo)

[7p-N106-5]

Numerical Exploration for Controlling Light-Induced Deformation of Azopolymer Microstructures

○Mamoru Tamura[1] (1.Kwansei Gakuin Univ.)

[7p-N106-6]

Focusing of Optical Skyrmions in a High Numerical Aperture Optical System

○(D)Rudrashis Panda[1], Rakesh Mohan Das[1], Sushanta Kumar Pal[2] (1.KIIT, Bhubaneswar, 2.Chiba Univ., Japan)

[7p-N106-7]

Invesitication of Incoherent Light Propagation Calculation Method Using Mean-Poynting Vector

○Haru Sato[1], Daisuke Barada[1,2] (1.Utsunomiya Univ, 2.CORE Utsunomiya Univ)

[7p-N106-8]

Polarization Volume Hologram Fabrication Using Azobenzene-Doped Polymer

○Manato Shoji[1], Daisuke Barada[1,2] (1.Utsunomiya Univ., 2.UU CORE)

[7p-N106-9]

Lasing characteristics of structure-controlled ZnO random lasers

○(M1)Nozomi Yoshida[1], Tomoaki Nishimura[1], Toshihiro Nakamura[1] (1.Hosei Univ.)

[7p-N106-10]

Control of Three-Dimensional Spin Angular Momentum Orientation in Space-time Surface Plasmon Wave-packets

○Kotaro Kihara[1], Kei Motoi[1], Naoki Ichiji[2], Atsushi Kubo[1] (1.Univ. of Tsukuba, 2.The Univ. Tokyo)

[7p-N106-11]

Fabrication of Titanium Nitride Nanostructures Exhibiting Chiral Localized Surface Plasmons and Their Photothermal Responses

○Kenji Setoura[1], Tomoya Oshikiri[2], Mamoru Tamura[3,7], Hideki Fujiwara[4], Yasutaka Matsuo[5], Takuya Iida[6,7] (1.Univ. Hyogo, 2.Tohoku Univ., 3.Kwansei Gakuin Univ., 4.Hokkai-Gakuen Univ., 5.Hokkaido Univ., 6.OMU(Sch. Sci.), 7.OMU(RILACS))

[7p-N106-12]

Optical Responses of Supraball Composed of Mie-Resonant Silicon Nanoparticles (II)

○(M1)Shintaro Kono[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1] (1.Kobe Univ.)

[7p-N106-13]

Inkjet printing of silicon nanoparticles exhibiting structural colors

○(M1)Hiroto Yamana[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1] (1.Kobe Univ.)

[7p-N106-14]

Exploration of Two-Dimensional Electron Gas in AlGaN/AlN Waveguides for Electro-Optic Modulation

○(PC)Hannaneh Hana Dortaj[1,3], Sinan Gundogdu[1,2], Domenica Romina Bermeo Alvaro[1,2], Tommaso Pregnolato[1,2], Tim Schroeder[1,2] (1.Humboldt Univ, 2.Ferdinand-Braun Inst, 3.Tabriz Univ)

偏光と強度の空間制御を可能にする一般化高次ポアンカレ球の幾何学的モデル

A Geometric Model of the Generalized Higher-Order Poincaré Sphere for Spatial Control of Polarization and Intensity

千葉大院理工，○(M1) 田子 千裕，松元 俊基，角江 崇，森田 健
Chiba Univ., ○Chihiro Tago, Toshiki Matsumoto, Takashi Kakue, and Ken Morita

E-mail: morita@chiba-u.jp

光子は波長・偏光・モードといった内部自由度を持ち、その中でも偏光は量子ビットとしての応用が進んでおり、量子通信や量子暗号の分野で重要な役割を果たしている。偏光状態はポアンカレ球（PS）上の一点として表現され、光の状態の可視化・制御に広く用いられている。また、SAM に加えて軌道角運動量（OAM）を併せ持つ高次光子と呼ばれる光は、無限次元の状態を持つことから高次元量子情報処理への応用が期待されている[1]。高次光子の状態を可視化・理論的に記述する枠組みとして、PS を拡張した高次ポアンカレ球（HOPS）が提案されていた[2]。しかし、従来の構築法では、SAM・OAM の基底として十分に一般的な直交状態を採用しておらず、SAM・OAM 基底のとる状態に制限があった。

本研究では SAM の状態を表す PS および OAM の状態を表す軌道角運動量ポアンカレ球（OPS）において、それぞれの球面座標（θ_s,φ_s）および（θ_o,φ_o）による重ね合わせ基底を定義し、それらの直積状態を一般化基底として用いることで一般化高次ポアンカレ球（GHOPS）を構築した（Fig. 1）。この枠組みにより、SAM と OAM の重ね合わせを用いることで、偏光および強度が方位角に依存して変化するような、従来の HOPS では記述できなかった複雑な空間構造をもつ光の状態が実現可能となった（Fig. 2）。さらに、基底に含まれる幾何学的パラメータを変化させることで、SAM と OAM の構成比率や空間構造を柔軟に制御することができ、GHOPS の球面上（θ_{so},φ_{so}）でより柔軟な構造化光の設計が可能となった（Fig. 3）。本研究により、従来の HOPS を拡張した GHOPS を提案し、高次光子の新たな状態の制御と設計が可能であることを示した。本手法は量子情報通信や光多重化技術など、次世代の光応用技術への展開が期待される[3]。

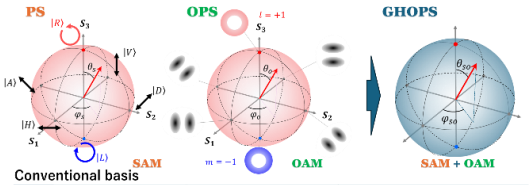


Fig. 1 Illustration of the GHOPS, constructed as a tensor product of superposed basis states from the PS and the OPS. The accompanying table shows the correspondence between conventional basis states and the generalized basis states formed from them.

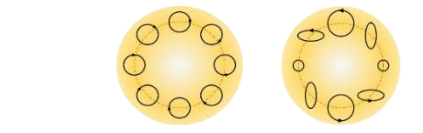


Fig. 2 Comparison between a conventional higher-order photon (left) and a generalized higher-order photon (right). The lower table summarizes the differences in azimuthal dependence of polarization and intensity.

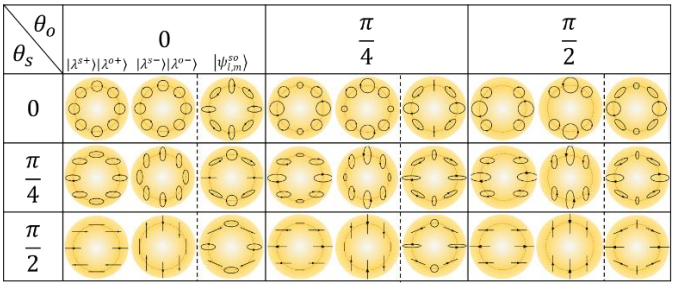


Fig. 3 Each panel shows the polarization vectors (arrows) and intensity (magnitude) of beam cross-sections corresponding to the SAM and OAM basis states, as well as their superpositions. The displayed states correspond to a fixed azimuthal parameter and a superposition angle $\theta_{so} = \pi/4$, $\varphi_s = 0$ on the GHOPS.

[1] L. Allen et al., Phys. Rev. A 45, 8185 (1992).
[2] G. Milione et al., Phys. Rev. Lett. 107, 053601 (2011).
[3] C. He et al., Light Sci. Appl. 11, 205 (2022).

© 2025年 応用物理学会

光渦誘起前方転写法による螺旋足場構造の創成

Twisted Scaffolds Fabricated by Optical Vortex-Induced Forward Transfer (OV-LIFT)

千葉大分子キラリティー研[1]，HSG 株式会社[2]　○沖田　昌仁[1,2]，河野　陽平[1,2]，尾松　孝茂[1]

MCRC, Chiba Univ.[1], HSG K.K.[2], ○Masahito Okida[1,2], Yohei Kawano[1,2], Takashige Omatsu[1]

E-mail: omatsu@faculty.chiba-u.jp

螺旋構造は生体組織に顕在化している[1]。その機能を再現し理解するには、螺旋を描く３次元足場構造の創成が不可欠となる。われわれは、光渦を利用した非接触材料転写技術である光渦誘起前方転写法 (Optical Vortex Light Induced Forward Transfer, OV-LIFT) を提案し、多様なドナー材料を高精細・高分解能に転写してきた[2, 3]。OV-LIFT の最大の特徴は、光渦の軌道角運動量によって転写するドナー材料が回転しながら直線飛翔することにある。この OV-LIFT の特性を利用し、本研究ではバイオインク材料を螺旋足場として直接転写することを着想し、その可能性を探索した。

実験条件を以下に示す。ドナー材料には、光学接着材料 NOA63(Norland Products 社製)を用いた。金膜コートされたスライドガラス基板上にバーコーターでドナー材料を薄膜塗布し、サンプルとした。波長 532 nm のナノ秒パルスレーザー光 (パルス幅 ~ 2 ns) を螺旋位相板(Spiral Phase Plate, SPP) によって光渦 (トポロジカルチャージ ℓ=±1) に変換し、サンプルに集光照射した。光渦照射により吐出したドナー材料は、レシーバー基板であるカバーガラス上に着弾する。その結果、サンプルとレシーバー基板間をつなぐ柱状の構造体が形成される。その後、紫外線照射により構造体を硬化し、顕微鏡観測した。サンプルとレシーバー基板間の作動距離は~200 μm である。また、ドナー材料が飛翔する様子は、高速度カメラにより動画記録された。

図 1 は紫外線硬化後の構造体を顕微鏡で観察した結果である。数 10 μm のピッチで捻れた柱状の構造体が確認できた。実験の詳細については、当日報告する。

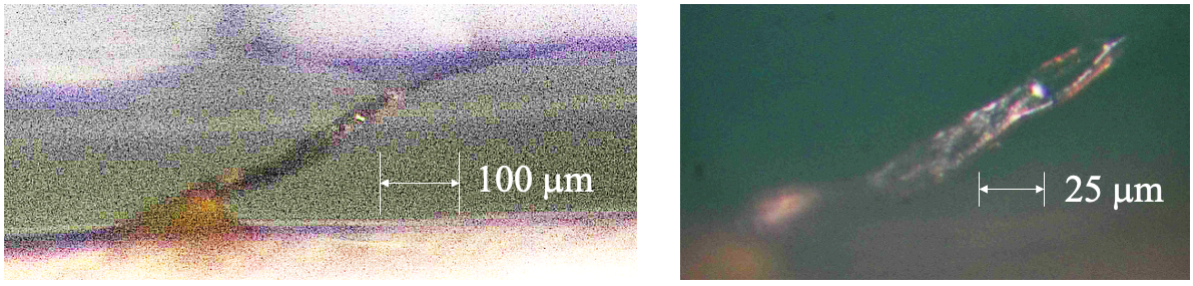


図 1 (左)構造物全体図, (右)部分拡大図

[1] M. D. Shoulders and R. T. Raines, Annual review of biochemistry, 78.1 929-958 (2009)

[2] R. Nakamura, H. Kawaguchi, M. Iwata, A. Kaneko, R. Nagura, S. Kawano, K. Toyoda, K. Miyamoto, and T. Omatsu, Opt. Express 27, 26, 38019 (2019)

[3] K. Yuyama, A. S. Rao, H. Yamazaki, S. Kawano and T. Omatsu, AIP Advances 15, 045037 (2025)

© 2025年 応用物理学会

Bull's eye 型プラズモニックチップ上の蛍光分子の偏光発光測定

Measurement of Polarized Emission from Fluorescent Molecules on a Bull's Eye Type-Plasmonic Chip

関西学院大 院理工[1]，○(M2)吉田悠真[1]，名和靖矩[1]，田和圭子[1]

Graduate School of Science and Technology, Kwansei Gakuin Univ.[1],

○Yuma Yoshida[1], Yasunori Nawa[1], Keiko Tawa[1]

E-mail: ktawa@kwansei.ac.jp

当研究室では、金属薄膜で成膜された波長サイズの周期構造をもつプラズモニックチップにおいて、格子結合型表面プラズモン共鳴による蛍光分子の増強偏光発光に関する研究を進めてきた。これまでに Line and Space (L&S) 型プラズモニックチップに裏面から左右円偏光（LCP, RCP）をそれぞれ照射すると、L/R に依存して透過光の偏光軸が入射面に平行な方向からそれぞれ異なる方向に回転することや、チップのピッチに依存して回転方向が異なることを報告した。本研究では、同心円状の Bull's eye 型プラズモニックチップに固定化された蛍光分子の偏光発光特性を発光増強条件下と励起増強+発光増強条件下で調べた。

ピッチ 480 nm の L&S 型と Bull's eye 型レプリカを UV ナノインプリント法で作製し、RF スパッタ法で Ti / Ag/ Ti / SiO_2 を成膜し、銀膜厚は 80 nm で調製した。表面をアミノ化したチップに NHS-PEG-ビオチンを修飾し、166 nM に調製した Cy5 ストレプトアビジン（Cy5-SA）溶液を注入して界面に結合した。*p* 偏光レーザー光（λ = 635 nm）をそのまま直線偏光で、もしくは λ/4 波長板をチップ前に挿入して円偏光に変換し、チップ裏面から入射した。入射角は 5°(非共鳴角＝発光増強)または 8°(共鳴角＝励起増強＋発光増強)で入射し、チップの法線方向に蛍光検出器として光電子増倍管（PMT）をセットした。PMT 前に挿入した検光子の偏光軸を回転させてチップ上の Cy5-SA の偏光発光強度 I_α を計測した。検光子の偏光軸は入射偏光軸(＝入射面)との平行配置をα＝0°と定義した。L&S 型チップは、格子ベクトルと入射面が平行になるようステージに置いた。

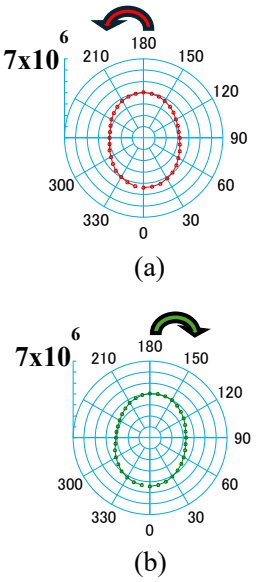


Figure 1. Polarized emission properties of Cy5 excited by the laser with a (a) RCP and (b) LCP at incident angle of 8 degree.

入射角 8°(励起増強+発光増強)では、Bull's eye 型チップ上の Cy5-SA 偏光発光は楕円偏光を示し、LCP 照射下で偏光軸は時計回りに回転し、RCP 照射下で反時計回りの回転が観察できた(Fig. 1)。一方、入射角 5°（発光増強）では、LCP・RCP 照射いずれにおいても円偏光を示し、偏光軸は見られなかった。これより、発光の偏光軸の回転は励起増強効果に起因するものと考えられる。

【謝辞】光硬化性樹脂をご提供いただいた東洋合成工業に感謝いたします。本研究は、日本学術振興会 科学研究費(新学術研究領域(A) JP22H05131)の助成を受け実施しました。

© 2025年 応用物理学会

S字導波路を有するリング共振器レーザからの光スキルミオン生成

Generation of optical skyrmions from a ring-resontor laser with an S-shaped coupler

東大先端研/生研[1], 東京科学大[2], 東大工[3],
○戴 知微[1], 林 文博[2], 池 尚玟[1], 作本宙彌[3], 竹中 充[3], 岩本 敏[1]
RCAST and IIS, Univ. of Tokyo[1], Science Tokyo[2], Graduate School of Engineering, Univ. of Tokyo[3],
°Z. Dai[1], W. Lin[2], S. Ji[1], H. Sakumoto[3], M. Takenaka[3] and Satoshi Iwmaoto[1]
E-mail: dai-zw@iis.u-tokyo.ac.jp

Optical skyrmion beams are a subset of the broader class of optical skyrmions [1]. These beams exhibit a topological polarization pattern that spans all possible polarization directions across their cross-section, thereby enabling high-capacity [2] and robust [3] free-space optical communication. The generation of such beams based on nanophotonic platforms has been demonstrated [4], though only with passive devices. Here, we experimentally observe optical skyrmion features in the emission from an active nanophotonic laser device.

Figure 1(a) shows the *L-L* curves of the device under 785-nm pulsed excitation at 5 K. The inset presents an SEM image of the device, a 6-μm diameter, 0.5-μm wide ring with a central S-shaped coupler. The ring and coupler were comprised of a 0.3-μm thick InGaAsP MQW active layer. Circular gratings (31 inner, 34 outer) with ~60 nm diameter and 40 nm depth are placed along the chiral lines on the top resonator surface. The *L-L* curves show the competition between clockwise (CW)- and anticlockwise (CCW)-dominant whispering gallery modes (WGMs), leading to unidirectional single-mode lasing at 1481 nm well above threshold (at ~ 1 mW). Polarization-resolved far-field profiles are analyzed by reconstructing the profiles of Stokes vector components (Fig. 1(b)), revealing vortex-like textures and full Poincaré sphere coverage. The skyrmion number is calculated as $N_{sk} = -1.0098$, close to the designed skyermion number, -1. The experimental results show moderate similarities with some discrepancies, which could be attributed to backscattering introduced by the hard mask on top, the S-shaped coupler, and fabrication imperfections.

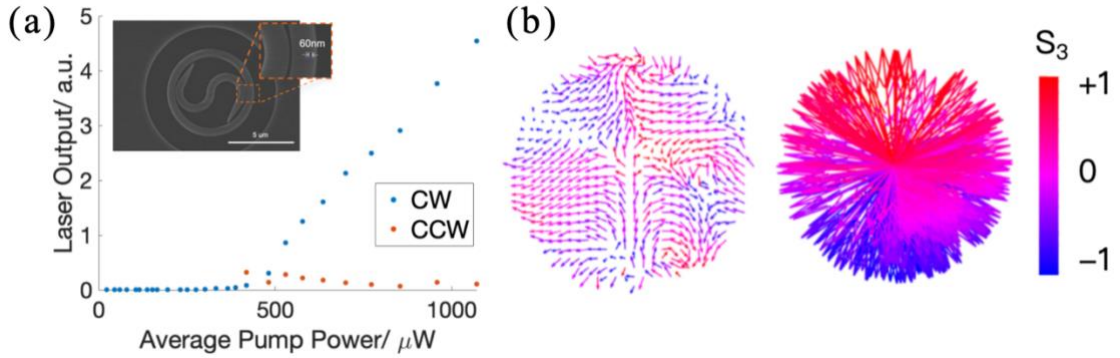


Fig. 1 (a) Light–out versus light–in (L–L) characteristics of a ring-resonator laser with an S-shaped coupler in the centre, showing single-mode lasing well above the threshold. The inset shows an SEM image of a device. (b) Far-field Stokes vector distribution of the laser output at a pump power of approximately 1 mW, along with its representation on the Poincaré sphere.

References: [1] Y. Shen *et al*., Nature Photonics, **18**, 15 (2024). [2] M. Liu *et al*., Nat. Commun. **12**, 2230 (2021). [3] A. A. Wang *et al*., Light Sci. & Appl. **13**, 314 (2024). [4] W. Lin *et al*., Optica **11**, 1588 (2024).
Acknowledgments: This work was supported by JST CREST(JPMJCR19T1) and JSPS KAKENHI (JP23H00172).

© 2025年 応用物理学会

アゾポリマーマイクロ構造の光誘起変形における構造制御の数値的探究

Numerical Exploration for Controlling Light-Induced Deformation of Azopolymer Microstructures

関学大理　○田村 守
Sch. Sci. Kwansei Gakuin Univ., Mamoru Tamura
E-mail: mamoru.tamura@kwansei.ac.jp

アゾポリマーは光異性化に起因して流動性を有し、照射される光の強度分布や偏光状態に応じて多様なレリーフ構造を形成することが知られている。最初期に報告されたガウスビームによる構造形成[1]を初めとし、円偏光光渦の下で全角運動量に依存して生じる螺旋構造[2]、更には光スキルミオンやホプフィオンを転写した構造[3][4]など、多岐にわたる構造制御が報告されてきた。一方で、初期に平坦な状況以外にも、例えばアゾポリマー製のマイクロピラー配列に関しても、光異性化による構造制御が可能であることが示されており[5][6]、均一な光照射下でも各ピラーがそれぞれ変形することで、大規模かつ高精度な構造制御が実現可能である。特に、光源の特性に加えて、あらかじめ設計したマイクロ構造の形状や、更には周囲の環境に依存して、アゾポリマーの構造制御の自由度が格段に拡がる可能性がある。そこで本研究では、数値流体力学と電磁気学の手法を融合し、アゾポリマーによるマイクロ構造の光照射による変形を追跡可能な解析手法を構築するとともに、その構造を任意に制御するための原理を探索する。特に、アゾポリマー変形の駆動力の一つとして光圧が大きく寄与している可能性に着目し、光圧を駆動力とした変形過程を数値的に再現・解析する。更に、強度分布や角運動量などを制御した光源を用いることで、アゾポリマー構造制御における自由度とその限界を解明することを目指す。

アゾポリマーの光照射下での変形を数値的に追跡するために、数値流体力学のソルバーとしてOpenFOAM を採用した。アゾポリマーを流体と見なし、Volume of Fluid 法に基づいて、自由界面を有する流体の時間発展を計算可能である。一方、光学応答の評価には離散双極子近似（DDA）法を用い、光照射によって誘起される分極と応答電場を自己無撞着に解いたうえで、時間平均したローレンツ力の一般的表式に基づき光圧を評価した。この光圧を Navier-Stokes 方程式の体積力として導入し、DDA と流体力学の計算を連携させた独自の解析手法を構築した。具体的な計算対象として、文献[5][6]に対応するマイクロピラー構造の解析に加え、ピラー以外のさまざまな初期形状に対し、直線偏光および円偏光光源などを照射した場合の変形挙動を解析し、構造制御の可能性を探索する。得られた結果の詳細については、講演にて報告する。

参考文献

[1] S. Bian, J.M. Williams, D.Y. Kim, L. Li, S. Balasubramanian, J. Kumar, and S. Tripathy, *J. Appl. Phys.* **86**, 4498 (1999).
[2] D. Barada, G. Juman, I. Yoshida, K. Miyamoto, S. Kawata, S. Ohno, and T. Omatsu, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 051108 (2016).
[3] R. Tamura, P. Kumar, A.S. Rao, K. Tsuda, F. Getzlaff, K. Miyamoto, N.M. Litchinitser, and T. Omatsu, *APL Photonics* **9**, 046104 (2024).
[4] R. Tamura, S.R. Allam, N.M. Litchinitser, and T. Omatsu, *ACS Photonics* 11, 4958 (2024).
[5] M. Salvatore, F. Borbone, F. Reda, P. Maddalena, and S.L. Oscurato, *JPhys Photonics* **3**, 034013 (2021).
[6] I.K. Januariyasa, F. Borbone, M. Salvatore, and S.L. Oscurato, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15**, 43183 (2023).

© 2025年 応用物理学会

Focusing of Optical Skyrmions in a High Numerical Aperture Optical System

○Rudrashis Panda[a], Rakesh Mohan Das[a], Sushanta Kumar Pal[b,c]

[a]Department of Physics, School of Applied Sciences, Kalinga Institute of Industrial Technology, Patia, Bhubaneswar, Odisha 751024, India

[b]Graduate School of Engineering, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan

[c]Molecular Chirality Research Center, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan

E-mail: sushanta1985@gmail.com

Optical skyrmions, known for exhibiting all polarization states mapped on a 3D Poincaré sphere within a 2D space, have been studied as emerging structured light fields. Optical skyrmions have potential in creating novel fundamentals and complex applications including unique light-matter interactions [1], high-resolution imaging [2], and data processing [3].

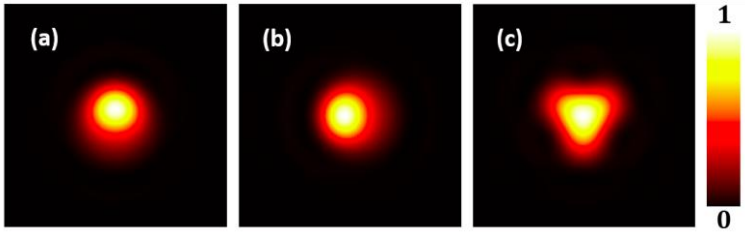


Fig. 1: Spatial intensity profiles of tightly focused: (a) Neel, (b) Bloch, and (c) Anti-type optical skyrmions.

This study explores the intensity patterns of three basic optical skyrmions at the focal plane of a high-numerical-aperture (0.95) optical lens system. In the high numerical aperture optical system, Richards-Wolf vector diffraction integral [4] theory is used instead of scalar-diffraction theory to calculate the field distributions. Figure 1 shows the spatial intensity distributions for the tightly focused first-order optical skyrmions: (a) Néel-type, (b) Bloch-type, and (c) Anti-type. This study may find significant interest for the exploration of three-dimensional optical manipulation as well as the advancement of three-dimensional super-resolution microscopy techniques.

[1] R. Tamura, A. S. Rao, N. M. Litchinitser, T. Omatsu, “Three-dimensional projection of optical Hopfion textures in a material,” ACS Photonics **11**(11), 4958-4965 (2024).

[2] L. Du, A. Yang, A. V. Zayats, X. Yuan, “Deep-subwavelength features of photonic skyrmions in a confined electromagnetic field with orbital angular momentum,” Nat. Phys. **15**, 650-654 (2019).

[3] Z. Wan, H. Wang, Q. Liu, X. Fu, Y. Shen, “Ultra-Degree of freedom structured light for ultracapacity information carriers,” ACS Photonics **10** (7), 2149-2164 (2023).

[4] S. K. Pal, L. A. Rusch, “Tailoring focal plane component intensities of polarization singular fields in a tight focusing system,” Sci. Reports **14**, 13565 (2024).

© 2025年 応用物理学会

平均場ポインティングベクトルを用いたインコヒーレント光伝播計算方法の検討

Invesitication of Incoherent Light Propagation Calculation Method Using Mean-Poynting Vector

宇大光工学[1]，宇大 CORE[2]　○佐藤 晴[1]，茨田 大輔[1,2]

Opt. Eng., Utsunomiya Univ.[1], CORE, Utsunomiya Univ.[2]

○Haru Sato[1], Daisuke Barada[1,2]

E-mail: mc246513@s.utsunomiya-u.ac.jp

1　はじめに

近年，AR や VR 技術の発展により，仮想空間が身近な存在となっている．仮想空間では物体を立体的に視覚化することが可能であり，LiDAR 等の深度情報を取得可能なカメラを用いて実空間にある物体の立体的形状および色情報をデータ化すれば，2 次元の画像では得られなかった情報をインターネット上で共有することができる．しかし，実空間で取得した物体の色情報には，照明光による陰影が含まれており，仮想空間ではそれが物体固有の色として誤って認識される可能性がある．さらに，仮想空間では仮想空間の光源によって照明されるため，不自然な見え方になると考えられる．そこで本研究では，ある面に投影された照明光の分布から別の面における平均場ポインティングベクトルを推定し，陰影を除去することを検討している．本稿では，平均場ポインティングベクトルを用いたインコヒーレント光伝播計算方法を検討する．

2　光伝播計算方法

平均場ベクトルポテンシャル $\langle \boldsymbol{S} \rangle$ は，発光や吸収のない空間では，

$$\nabla \cdot \langle \boldsymbol{S} \rangle = 0 \tag{1}$$

と書ける．ここで，ポテンシャル ϕ を導入し，このポテンシャルを用いて平均場ベクトルポテンシャルを

$$\langle \boldsymbol{S} \rangle = -\nabla \phi \tag{2}$$

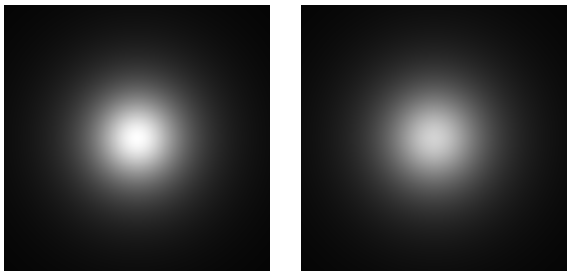
と表現する．すると，このポテンシャルは

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{3}$$

のようにラプラス方程式が成り立つので，これを数値的に解くことによって，インコヒーレント光伝播解析を行なう．このラプラス方程式をある z 面で x-y 面で二次元フーリエ変換すると，

$$\Phi(k_x, k_y; z) = \Phi_1(k_x, k_y) \exp\left(\sqrt{k_x^2 + k_y^2} z\right) + \Phi_2(k_x, k_y) \exp\left(-\sqrt{k_x^2 + k_y^2} z\right) \tag{4}$$

という解が得られ，適当な z 面における Φ と，その面における平均場ポインティングベクトル z 成分の二次元フーリエ変換より，Φ_1 と Φ_2 を決めることができる．この方法で，$z = 2\mathrm{m}$ の面における点光源の光強度分布から $z = 2.2\mathrm{m}$ の面における光強度分布を求めた結果を Fig.1 に示す．範囲は $10 \times 10\mathrm{m}$ である．今後は，この計算方法の適用範囲の調査と，3D モデルに照明したときの陰影計算を行なう．



(a)　(b)

Fig. 1: Light distribution at (a) 2 m (original) and (b) 2.2 m (propagated)

© 2025年 応用物理学会

アゾベンゼン添加ポリマーを用いた偏光体積ホログラムの作製

Polarization Volume Hologram Fabrication Using Azobenzene-Doped Polymer

宇大光工学[1]，宇大 CORE[2]　○庄子　茉名斗[1]，茨田　大輔[1,2]
Opt. Eng.,Utsunomiya Univ.[1], CORE, Utsunomiya Univ.[2], ○Manato Shoji[1], Daisuke Barada[1,2]
E-mail: mc256521@s.utsunoiya-u.ac.jp

1　はじめに

体積ホログラムは，三次元的な情報を記録・再生することができる技術であり，3D 技術や医療，AI や機械学習など多くの分野において，優れた情報保存手段として注目を集めている．

一般的な体積ホログラムは，光の振幅と位相情報を記録するだけであるが，偏光体積ホログラムは，光の偏光情報も記録することができるため，より高密度かつ高精度な情報保存手段として研究が進められている．また，偏光感受性記録媒体としてアゾベンゼン系材料と光反応性分子添加ポリマー，光架橋性高分子液晶がある．

本研究では，偏光体積ホログラム作製の材料としてアゾベンゼン系材料を使用する．アゾベンゼンの性質として，強い偏光依存性があり，偏光状態に応じてアゾベンゼンの分子の配向方向が変化することが知られている．また，アゾベンゼンの光異性化は可逆的に起こるため，書き換え可能特性も持つ．それにより AI の学習データの更新等に使用可能であると考えられる．さらに，弱い光でも十分反応可能であるという性質を持っているため多重露光，長時間露光時の材料劣化の軽減も可能であると考えられる．

2　実験方法・結果

Table 1: Weight ratio of MY-PMMA

	目標値 [g]	実測値 [g]
Methyl methacrylate	7	7.0178
Azobisisobutyronitrile	0.028	0.0289
Methyl yellow	0.056	0.0563

本研究では，体積ホログラムとして，MY-PMMA(メチルイエロー-ポリメタクリル酸メチル) を作製した．重量比は Table 1 に示す．

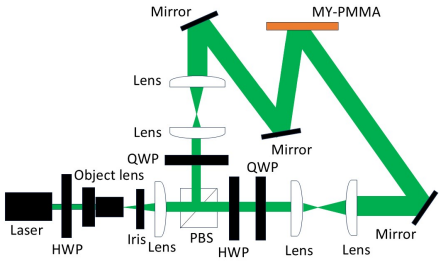


Fig. 1: Optical setup

実験方法としては，Fig.1 に示す光学系を使用し，波長 532nm のレーザー光を信号光と参照光に分け，その後 1/4 波長板と 1/2 波長板を調節して信号光と参照光の偏光状態を変化させたのち MY-PMMA 上で干渉させる．偏光状態については同一直線/円偏光，直交直線/円偏光の場合についてそれぞれ記録を行う．その後参照光のみを当て，回折光が得られるか調べ, 得られた場合，回折光の偏光状態の確認を行った．

同一直線/円偏光，直交直線/円偏光，いずれの場合でも回折光が得られた．Fig.2 に直交円偏光での再生時の回折光を示す．得られた回折光は参照光と異なる偏光状態であったため，直交円偏光での記録ができることが確認できた．

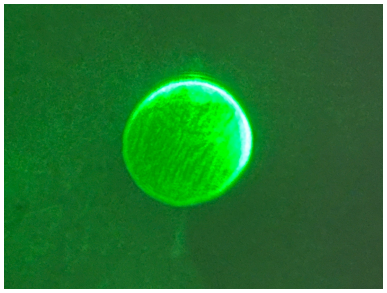


Fig. 2: Diffracted light

© 2025年 応用物理学会

構造制御 ZnO ナノ粒子ランダムレーザーの発振特性評価

Lasing characteristics of structure-controlled ZnO random lasers

法政大院理工，○(M1)吉田　望海，西村　智朗，中村 俊博

Hosei Univ., ○Nozomi Yoshida, Tomoaki Nishimura, Toshihiro Nakamura

E-mail: nakamura@hosei.ac.jp

1. はじめに：ランダムレーザーは散乱体と光利得媒質のみで構成されており、散乱体による多重散乱によってレーザー共振が生じる。これは、従来のレーザーのような精密に設計された共振器を必要とせず簡便に作製可能なレーザー光源として注目されている。ランダムレーザーでは、散乱体構造の界面特性や形状制御によって発振しきい値の低減[1]やモード制御[2]が可能であることが報告されている。本研究では基板上の、形状を制御した凹構造に ZnO ナノ粒子の充填層形成した新たなランダムレーザー構造を提案し、充填層の厚さや境界の光学特性を変化させた際のランダムレーザー発振特性の評価を行った。

2. 試料作製：FIB（Focused Ion Beam）装置を用いて、Si 基板に縦横 50 μm、深さ 5～50 μm の直方体の凹構造を形成後、平均粒径 200 nm の ZnO 粒子を充填し、充填層厚さの異なる ZnO ランダムレーザー構造を作製した。また構造界面の光学特性を変化させるため、底面に金薄膜を蒸着した試料も用意した。試料に対して波長 355 nm のパルスレーザーポンピング光源を用いた顕微分光装置によりレーザー発振スペクトルおよびレーザー光強度マッピングを測定した。ポンピング光スポットサイズは 4.5 μm とした。

3. 実験結果と考察：Fig. 1 に構造内のある点で測定した厚さ 5 μm および 50 μm の発振スペクトルを示す。ポンピング光強度は 3.5 μW とした。図よりレーザー光ピーク強度は 5 μm の試料の方が高いことがわかる。Fig. 2 に示した対応する試料の発振波長バンド 380～390 nm におけるマッピング測定結果から、深さ 5 μm の試料では構造全体から広範囲にわたってレーザー光が確認された。各試料の複数の箇所で発振しきい値を測定し、その平均値を算出した結果、充填層深さ 5, 10, 50 μm の試料それぞれでレーザー発振しきい値が 1.3, 1.5, 1.7 μW となり、レーザー構造の厚さとともにしきい値が増加することが確認できた。以上の結果は凹構造の底面の光学特性（光反射や吸収）がレーザー発振特性に影響を与えていることを示唆している。この底面の光学特性の影響をより顕著に確認するために、底面に金薄膜を蒸着した 5 μm におけるしきい値を測定したところ、2.3 μW となり、未蒸着の 1.3 μW に比べて大幅に増加した。これは界面での金薄膜による光吸収損失増加が原因と考えられ、厚さ 5 μW のランダムレーザー構造では界面の影響が顕著であることが確認された。

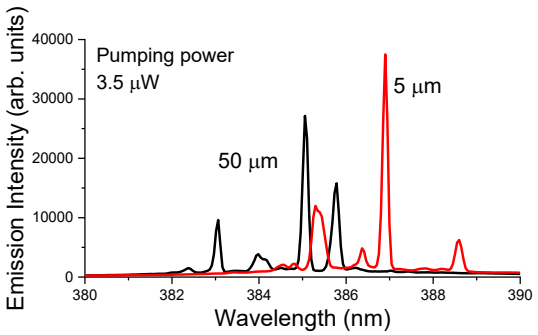


Fig. 1: Lasing emission spectra of structure-controlled ZnO random lasers with different thicknesses of 5 and 50 μm.

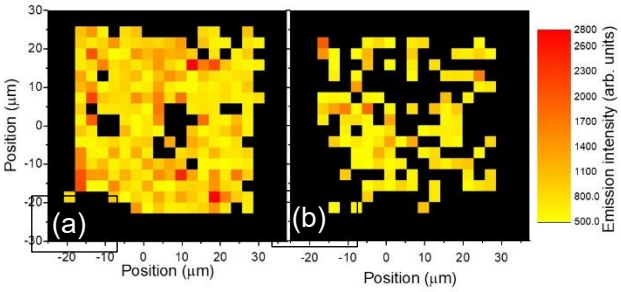


Fig. 2: Spatial mapping of lasing intensity of structure-controlled ZnO random lasers with different thicknesses of (a) 5 and (b) 50 μm. Pumping power is 3.5 μW.

参考文献：[1] Song et al., Phys. Rev. Lett. 96, 033902 (2006). [2] H. Fujiwara et al., Appl. Phys. Lett 102, 061110 (2013).

© 2025年 応用物理学会

Space-time 表面プラズモン波束における三次元スピン角運動量の配向制御

Control of Three-Dimensional Spin Angular Momentum Orientation in Space-time Surface Plasmon Wave-packets

筑波大物理[1]，東大生産研[2] ○木原　孝太郎[1]，元井　慧[1]，伊知地 直樹[2]，久保　敦[1]

Univ. of Tsukuba[1], The Univ. Tokyo[2], ○Kihara kotaro[1], Kei Motoi[1] , Naoki Ichiji[2], Atsushi Kubo[1]

E-mail: s2420164@u.tskuba.ac.jp

単色表面波のスピン角運動量 (Spin Angular Momentum : SAM)は運動量密度 $\boldsymbol{p}$ を用いて$\boldsymbol{S} \propto \nabla \times \boldsymbol{p}$と書ける[1]。これは、運動量密度の空間変化がスピンを誘導することを示している。表面波である表面プラズモンポラリトン(Surface Plasmon Polariton : SPP)は、界面垂直方向に急峻に減衰する運動量密度分布により、進行方向に対して横向きのスピン角運動量(transverse-SAM : *t*-SAM)を持つ[2]。ところで、超短パルス SPP を構成する各周波数成分の波数ベクトルを独立に制御し、強固な時間-空間周波数相関をあてはめることで、structured light の一種である space-time SPP (ST-SPP)が形成される。ST-SPP は、運動量密度が面内方向にも変化することから、3 次元的に配向した SAM 構造を持つ。我々は、ストライプ型の ST-SPP に対し、電磁場解析による 3 次元 SAM の導出を最近報告している[3]。

本研究では、金-真空界面を伝搬する、パルス幅 10 fs のレーザー（波長 : 700–880 nm）によって励起される伝搬不変型 ST-SPP（図 1(a)）について、SPP ライトコーンを切断するスペクトル平面（図 1(b)）の傾きを変えながら SAM テクスチャを計算し、各成分の最大値を評価した。結果を図 1(c)に示す。領域 2 ではスペクトラルプレーンとライトコーンとの接点が波長 700-880 nm の間にあり、領域 1 では接点が 700 nm、領域 3 では接点が 880 nm にある。面内横向きの成分である S_xは領域 2 で最大となり、領域 1,3 で減少する一方、S_y, S_zは領域 2 で最小となり、領域 1,3 で増加する。これは領域 1,3 では *x-z* 平面上でより狭い領域に運動量が閉じ込められていることに由来する。[1] P. Shi, *et al.*, PNAS, **118**, e2018816118 (2021). [2] K. Y. Bliokh, *et.al.*, Phys. Rev. Lett., **119**, 073901, (2017). [3] K. Kihara, *et. al.*, Opt. Commun., *submitted*.

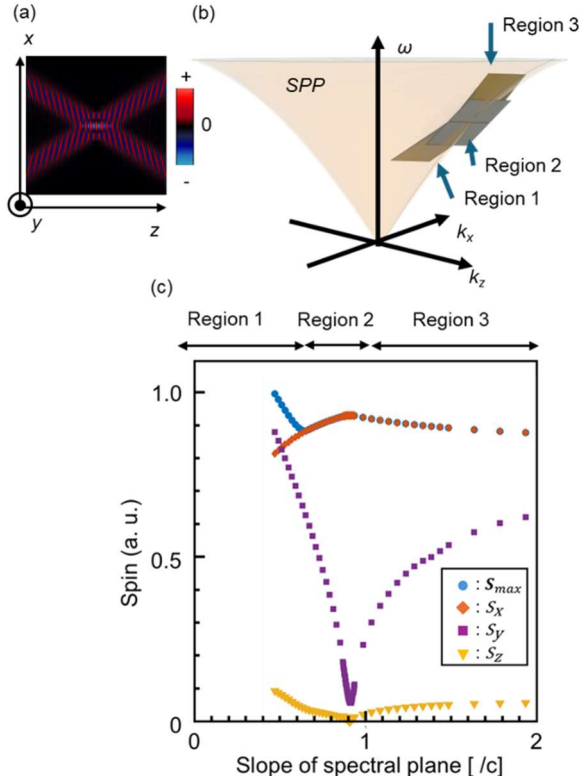


Figure 1 (a) The E_y-field distribution of ST-SPP. (b) Schematic of a SPP-light cone with spectral planes. (c) Group velocity dependence of the maximal values of $|\boldsymbol{S}|$, $|S_x|$, $|S_y|$ and $|S_z|$. The intensities of SAM components are normalized by $|\boldsymbol{S}|$. The slope of spectral plane is normalized by speed of light in a vacuum *c*.

© 2025年 応用物理学会

キラルな局在プラズモンを示す窒化チタンナノ構造の作製と光熱応答の評価

Fabrication of Titanium Nitride Nanostructures Exhibiting Chiral Localized Surface Plasmons and Their Photothermal Responses

兵県大工[1], 東北大多元研[2], 関学大理[3], 北海学園大工[4], 北大電子研[5], 阪公大理[6], 阪公大 LAC-SYS 研[7] ○瀬戸浦 健仁[1], 押切 友也[2], 田村 守[3,7], 藤原 英樹[4], 松尾 保孝[5], 飯田 琢也[6,7]

Univ. Hyogo[1], Tohoku Univ.[2], Kwansei Gakuin Univ.[3], Hokkai-Gakuen Univ.[4], Hokkaido Univ.[5], Osaka Metropolitan Univ. (Sch. Sci.)[6], Osaka Metropolitan Univ. (RILACS)[7], ○Kenji Setoura[1], Tomoya Oshikiri[2], Mamoru Tamura[3], Hideki Fujiwara[4], Yasutaka Matsuo[5], Takuya Iida[6,7]

E-mail: setoura@eng.u-hyogo.ac.jp

金属ナノ構造は、局在表面プラズモンが特定の波長の光を共鳴的に吸収して熱に変換するため、エネルギー変換効率の高いナノヒーターとして用いられている[1]。我々の研究グループでは、比較的熱伝導率が低い窒化チタンなどのナノ構造の光熱変換特性に注目して研究を進めている。一般に、光熱変換の過程は i) 光照射による局在プラズモンの励振、ii) プラズモンの分極に誘起されるナノ構造内部での分極電流の駆動、iii) 分極電流によるジュール熱の発生、そして iv) ジュール熱を源とする定常熱伝導によるナノ構造の温度上昇、の四段階である。我々のグループでは、iii)から iv)の過程で、ナノ材料の熱伝導が低い場合には、ジュール熱の空間パターンがナノ構造の表面温度分布に転写されることを数値計算によって見出している[2, 3]。ジュール熱の空間パターンはプラズモンのモードによって支配的に決定されているため、換言すると、窒化チタンなどの低熱伝導率なプラズモニック材料を用いることで、プラズモンモードによってナノ構造の表面温度分布を自在に制御できる可能性がある。

本研究では、上記の原理で右回り・左回り円偏光照射に対してキラルな表面温度スイッチングを示す窒化チタンナノ構造を作製し、その光熱応答を実証実験によって評価した。ナノ構造の形状は、全長約 700 nm の S 字構造とした。まずスパッタリングによってサファイア基板上に厚さ 40 nm の窒化チタンを成膜した。この薄膜に対して、電子線レジストを塗布して電子線描画を行い、S 字ナノ構造をパターニングした。その後、クロムをスパッタリングしてから各種のエッチングプロセスを経て、Figure 1 の電子顕微鏡画像に示す S 字窒化チタンナノ構造が完成した。講演では、このナノ構造のキラル光学応答と、近赤外波長域の右回り・左回りのレーザー光を照射して観測された光熱応答について報告する。

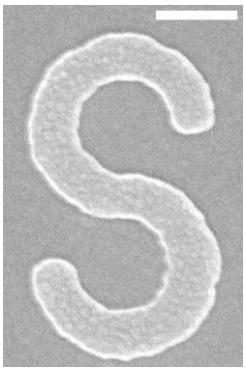


Fig. 1. S-shaped TiN nanostructure. Scale bar: 200 nm.

[1] G. Baffou et al., *Nature Mater.*, 19, 946, **2020**. [2] M. Tamura et al., *Nanoscale*, 14, 12589, **2022**. [3] K. Setoura et al., *RSC Adv.*, 13, 34489, **2023**.

© 2025年 応用物理学会

Mie 共鳴シリコンナノ粒子からなる Supraball の光学応答（Ⅱ）

Optical Responses of Supraball Composed of Mie-Resonant Silicon Nanoparticles (Ⅱ)

神戸大院工[1]，○(M1)河野 晋太郎[1]，杉本 泰[1]，藤井 稔[1]

Kobe Univ.[1], ○Shintaro Kono[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1]

E-mail: sugimoto@eedept.kobe-u.ac.jp

数百 nm のコロイド粒子を自己組織化することで形成されるマイクロメートルスケールの球状構造は Supraball と呼ばれ、一般的に構成粒子の周期配列に基づいた光学特性を示すことが知られている。一方で、高い屈折率(n~4)を有する結晶シリコンナノ粒子は、Mie 共鳴に起因した光学特性を示す。当グループでは、真球性の高い結晶シリコンナノ粒子を開発しており[1]、前回の講演では Supraball における構成粒子サイズおよび粒子間距離の 2 つのパラメータを制御することで反射特性が変化することを実験と計算の両面から明らかにした(図 1)[2]。しかし、反射特性の具体的な起源については明らかになっていない。本研究では、シリコンナノ粒子を球状に配列させた際の光学応答について、電磁場シミュレーションを用いて考察した。

Supraball の構造モデルとして、正二十面体から始めて各面を 4 分割する操作を 3 回繰り返して得られる多面体(1280 面体)の頂点にシリコンナノ粒子を配置した単層モデル(monolayer)と粒子を密に充填するためにこの構造を 10 層の入れ子構造とした多層モデル(10 layers)を仮定し、電磁場シミュレーションを行った(図 2(a))。図 2(b,c)は、それぞれ実験と計算によって得られた反射スペクトルである。実験および 1 層、10 層のモデルにおいて、650 nm 付近のピークはほぼ一致している。このピークは内部構造に関わらず現れていることから、最表面のシリコンナノ粒子層に起因していると言える。このピークに加えて、計算では長波長側に Q 値の高いピークが多数みられるが、実験では現れていない。これらは、層状に配列した粒子の干渉と全体の球構造に起因する Whispering-Gallery モードによるものであり、実験で得られた Supraball 表面の配列の乱れやラフネスにより消失していると考えられる。講演では、電磁場分布を示しながら詳細に議論するとともに、構成粒子間距離を制御した際の光学応答について実験結果を報告する。

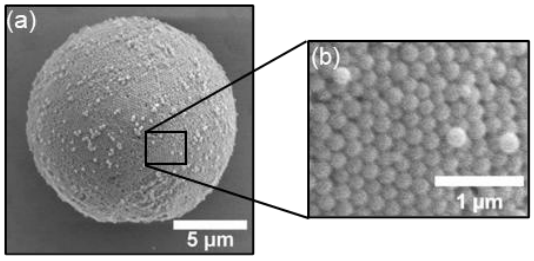


Figure 1. (a) SEM image of a suprball composed of silicon nanospheres. (b) Enlarged image around the surface. (The average diameter of silicon nanospheres (D_{Si}): 199 nm)

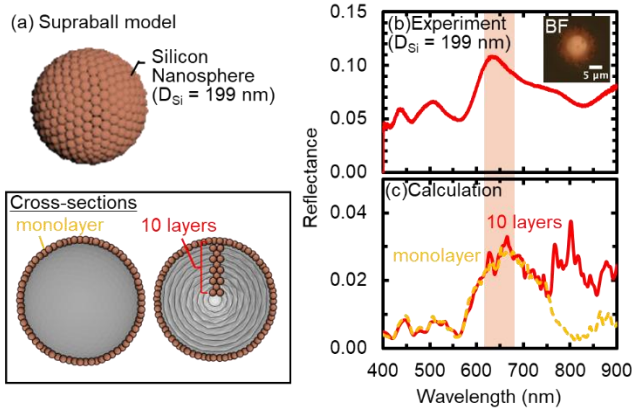


Figure 2. (a) Schematic of a supraball model. Cross-sections of the supraball models with an outmost monolayer (left) and 10 concentric nested silicon nanosphere layers (right). (b) Measured reflectance spectrum. Inset is an optical microscope image under bright-field (BF) illumination. (c) Calculated reflectance spectra for a monolayer (dashed curve) and 10 nested layers (solid curve).

[1] Sugimoto, *et al., Adv. Opt. Mater.*, 8, 12, 2000033 (2020).
[2] 河野他, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 16p-A32-12

© 2025年 応用物理学会

構造発色シリコンナノ粒子のインクジェット印刷技術

Inkjet printing of silicon nanoparticles exhibiting structural colors

神戸大院工　○(M1)山名 裕斗，杉本 泰，藤井 稔

Kobe Univ. ◦Hiroto Yamana, Hiroshi Sugimoto, Minoru Fujii

E-mail: sugimoto@eedept.kobe-u.ac.jp

高い屈折率をもつ誘電体のナノ粒子は、Mie 共鳴により特定波長の光を強く散乱し、粒径により散乱波長を制御できるため、散乱発色型の構造色材料として注目されている。当研究グループでは高屈折率誘電体として結晶シリコン（$n \sim 4$）の球状ナノ粒子（粒径 80 ~ 250 nm）を作製し、粒径制御とコロイド分散性を実現している。これにより、本材料を透明ポリマー材料と混合し、汎用的なインクジェット法により基材上に塗布・印刷することで高精細なパターニングや構造色加飾への応用が期待できる。一方、シリコンナノ粒子を含むポリマー膜では、膜厚および粒子濃度に依存して多重散乱が起こるため、構造色の彩度が低下するという課題がある。

本研究では、モンテカルロ法を用いて多重散乱現象を考慮した反射・透過スペクトルのシミュレーションを行い、ポリマー膜におけるシリコンナノ粒子の濃度と反射・透過特性の関係を調べる。シミュレーション結果から多重散乱を抑制できる最適な濃度を決定し、実験的にインクジェット法による印刷を行う。また、インクジェットで形成されたドット形状のシリコンナノ粒子薄膜について反射・透過特性を定量的に評価する。

図(a)は、平均粒径が 100-190 nm のシリコンナノ粒子コロイド溶液である。本材料は 0.1 wt.%という極めて低い濃度で明るい発色が得られている。次に、水を溶媒とするシリコンナノ粒子分散液（~2 mg/mL）と~20 wt.%の水性アクリル樹脂を混合し、インクを作製した。図(b)にインクジェット印刷で形成したドットの断面 SEM 像を示す。中心が凹み、外周が盛り上がった構造ではあるが、円形の薄膜を形成できていることが分かる。図(c), (d), (e)に平均粒径がそれぞれ 142 nm, 160 nm, 178 nm のシリコンナノ粒子インクをインクジェット印刷したドットの光学顕微鏡像を示す。円形のドット 1 発で明瞭な発色を得られていることが分かる。図(f), (g), (h)にインクジェットで描画した基板の画像を示す。それぞれ黄緑、黄、橙と粒径に依存した発色を示していること、またインクジェット描画により細部まで再現できていることが分かる。講演では、シミュレーションと実験の両面から薄膜中でのシリコンナノ粒子の反射・透過特性について議論する。

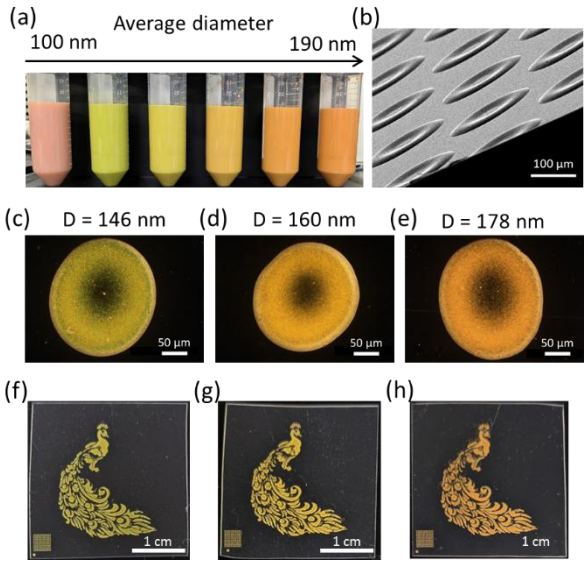


Figure (a) Photo of the size-separated colloidal silicon nanoparticles (Si NPs) with different average diameters. (b) SEM image of inkjet printed dots. The substrate is tilted by 80°. (c, d, e) Optical microscope images of inkjet printed dots on PET transparent substrates. The average diameter of Si NPs is 146 nm (c), 160 nm (d), and 178 nm (e), respectively. (f, g, h) Photos of inkjet printed patterns. The average diameter of Si NPs corresponds to figure c, d and e.

© 2025年 応用物理学会

Exploration of Two-Dimensional Electron Gas in AlGaN/AlN Waveguides for Electro-Optic Modulation

Hannaneh Dortaj[1,3,*], Sinan Gündoğdu[1,2], Domenica Romina Bermeo Alvaro[1,2], Tommaso Pregnolato[1,2], Tim Schröder[1,2]

1. Department of Physics, Humboldt-Universität zu Berlin, 12489 Berlin, Germany.
2. Ferdinand-Braun-Institut (FBH), Gustav-Kirchhoff-Straße 4, 12489 Berlin, Germany.
3. Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, 5166614761 Tabriz, Iran.
* Email: hannaneh.dortaj@physik.hu-berlin.de

The AlGaN/AlN material platform has emerged as a promising candidate for integrated photonics due to its relatively low optical losses, moderate electro-optic coefficients, and compatibility with heterointegration of diamond-based quantum photonic devices. The investigation of two-dimensional electron gas (2DEG) formation in AlGaN/AlN heterostructures has significant implications for electro-optic modulation and high-frequency device applications. This study explores the spontaneous polarization effects in n-polar heterostructures, where the 2DEG modifies the local refractive index and optical losses due to charge redistribution under an applied electric field. This 2DEG mode likely overlaps with the optical mode and could impact its effective refractive index. By employing computational simulations using Poisson equation and Drude-Lorentz model, we quantify the impact of 2DEG on waveguide performance. Our simulations confirm that the refractive index undergoes measurable changes when the electric field is applied, although the modulation effect remains weak in the current geometry. The shielding effect of 2DEG reduces the Pockels and Kerr electro-optic effects but introduces an alternative mechanism through free carrier modulation. Optimizing the waveguide design such as modifying electrode placement or repositioning the 2DEG within the waveguide can enhance modulation efficiency and reduce optical losses. Furthermore, this study explores potential applications in nonlinear optics, where 2DEG-based structures could be utilized for high-Q resonators and anomalous dispersion engineering [1–5].

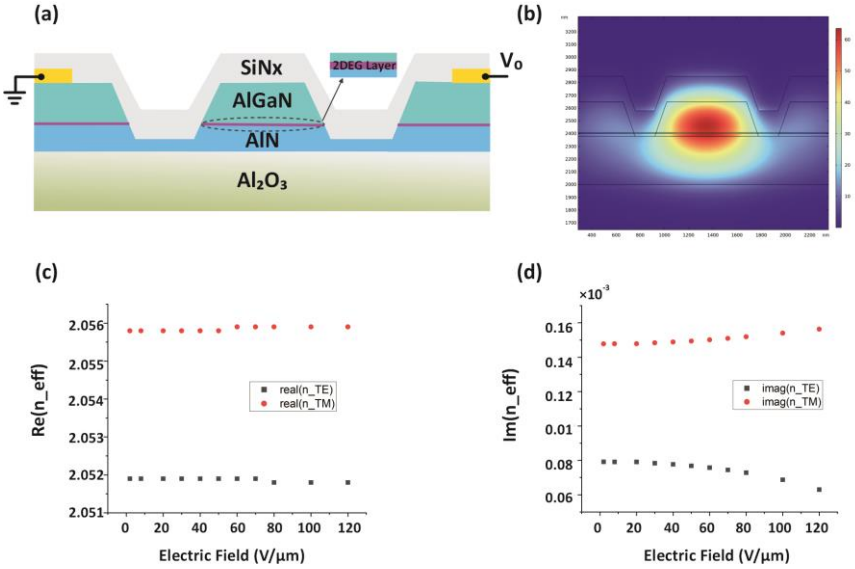


Fig. 1: (a) Waveguide structure with the formation of a 2D electron gas (2DEG) at the AlN/$Al_{0.7}Ga_{0.3}N$ junction. (b) Simulated electric field norm for fundamental mode by using Drude-Lorentz model. Effective refractive index with respect to the electric field for TE and TM modes: (c) real part, and (d) imaginary part.

References

[1] S. Gündoğdu, S. Pazzagli, T. Pregnolato, T. Kolbe, S. Hagedorn, M. Weyers, and T. Schröder, “AlGaN/AlN heterostructures: an emerging platform for integrated photonics,” npj Nanophotonics 2, 2 (2025).

[2] Ito. Tadatoshi, et al., “Growth and characterization of nitrogen-polar AlGaN/AlN heterostructure for high-electron-mobility transistor,” Physica Status Solidi (b), vol. 257, no. 4, pp. 1900589, 2020, doi: 10.1002/pssb.201900589.

[3] J. Mehta et al., “High Al-content AlGaN channel high electron mobility transistors on silicon substrate,” e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy, vol. 3, p. 100114, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100114.

[4] L. Ardaravičius et al., “Electron transport in 2DEG AlGaN/GaN, AlGaN/AlN/GaN and 3D GaN channels under a strong electric field,” Appl. Phys. A, vol. 130, no. 10, p. 725, 2024, doi: 10.1007/s00339-024-07882-0.

[5] N.-N. Feng et al., “High speed carrier-depletion modulators with 1.4V-cm VπL integrated on 0.25μm silicon-on-insulator waveguides,” Opt. Express, vol. 18, no. 8, pp. 7994–7999, 2010, doi: 10.1364/OE.18.007994.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation : 3.1 Basic optics and frontier of optics

[8a-P01-1~8] 3.1 Basic optics and frontier of optics

[8a-P01-1]
Observation of Coherent Perfect Absorption in a transparent thin film doped with TPPS J-aggregates

○(D)Mayu Hasegawa[1], Kazuaki Nakata[1], Kyohei Yamashita[1], Takayoshi Kobayashi[2], Eiji Tokunaga[1] (1.Tokyo Univ. Sci., 2.National Yang Ming Chiao Tung Univ.)

[8a-P01-2]
Theory of superfluorescence affected by stimulated emission

○(M1)Yuki Numada[1], Kensuke Miyajima[2], Akira Ishikawa[1] (1.Univ. of Yamanashi, 2.Tokyo Univ. of Science)

[8a-P01-3]
Observation of photo curing of ultraviolet curable resin including azobenzene particles

○(D)Yusuke Fujimoto[1], Kazunari Shinbo[1], Yasuo Ohdaira[1] (1.Niigata Univ.)

[8a-P01-4]
Dynamic Optical Binding of Gold Nanoparticles on Fabricated Gold Nanodisk Array with Single- and Double-Wavelength Periodicity

○(M2)Tien Hsi Tsai[1], Mu-En Li[1], Xu Shi[2], Kosei Ueno[2], Boris Louis[4], Roger Bresoli-Obach[5], Hiroaki Misawa[1,2,3], Johan Hofkens[4], Hiroshi Masuhara[1] (1.National Yang Ming Chiao Tung Univ., Taiwan, 2.Hokkaido Univ., Japan, 3.Okayama Univ., Japan, 4.KU Leuven, Belgium, 5.Universitat Ramon Llull, Spain)

[8a-P01-5]
Mid-infrared optical tweezers of microparticles using molecular vibrational resonance

○Yuto Shimizu[1], Takao Fuji[1], Tetsuhiro Kudo[1] (1.Toyota Tech. Inst.)

[8a-P01-6]
Gold nanoparticle-assisted formation of multiple ring-like lysozyme assembly at air/solution interface

○(M1)Ming-Lung Lau[1], Ke-An Kuo[1], Mu-En Li[1], Keisuke Yuzu[1,2], Eri Chatani[2], Hiroshi Masuhara[1] (1.National Yang Ming Chiao Tung Univ., 2.Kobe Univ.)

[8a-P01-7]
Formation of liquid micro grating on azo thin films and vibration response of diffracted light

○(M1)Norihiro Koganemori[1], Yusuke Fujimoto[1], Shogo Muramatsu[1], Kazunari Shinbo[1], Yasuo Ohdaira[1] (1.Niigata Univ.)

[8a-P01-8]
Phase and material design for plasmon field shaping

○Rumika Uchida[1], Koyo Watanabe[1] (1.Hamamatsu Photonics K.K.)

TPPS J会合体をドープした透明薄膜のコヒーレント完全吸収の観測

Observation of Coherent Perfect Absorption in a transparent thin film doped with TPPS J-aggregates

東理大理[1]，陽明交大[2] ○(D)長谷川 真優[1]，中田 和明[1]，山下 恭平[1]，小林 孝嘉[2]，徳永 英司[1]

Tokyo Univ. Sci.[1], National Yang Ming Chiao Tung Univ.[2],

○Mayu Hasegawa[1], Kazuaki Nakata[1], Kyohei Yamashita[1], Takayoshi Kobayashi[2], Eiji Tokunaga[1]

E-mail: 1225705@ed.tus.ac.jp

我々は透明に近い試料でも波長選択的に強い吸収が得られる、「Coherent Perfect Absorption (CPA) 」に着目し、CPA の条件を満たすポリマー膜試料を用いて、全透明の全反射を利用した簡便で安価なシングルチャンネル CPA の原理検証を行ってきた[1][2]。本発表では色素分子である TPPS J 会合体をドープした透明薄膜の白色光源を用いた CPA の観測について報告する。

試料は、可視で透明な MgF2 基板（屈折率 1.38）上にポルフィリン分子(Tetra Phenyl Porphyrin tetra Sulfonic acid, TPPS)をドープした透明 PVP(Poly Vinyl Pyrrolidone, 屈折率 1.53, 消光係数 0.003)膜をディップコーティング成膜したものを使用した。TPPS は透過率計測から J 会合体を形成していた。

上記の試料にランプ白色光を側面から膜への入射角が 88 度（90 度に近い条件）で入射させた。その結果、膜内に入った光は空気との境界面で全反射し、基板との界面では 90%近い反射率を持つため光は共振し、試料側面から出射した特定の波長は膜内で効率的に吸収され 370-800 nm の範囲の反射スペクトル（図 1(a)）に鋭いディップが生じた。これがシングルチャンネル CPA である。

図 1(a)では CPA の計算とも 0 度入射(垂直入射)の計算(図 2)とも異なる形状のピークが観測された。図 1(b)で示すように、TPPS J 会合体のディップ位置と CPA の S 偏光のディップ位置が重なっており、450-650 nm で分裂幅 0.161 eV の巨大な真空のラビ分裂を観測した。また、垂直入射に比べ、88 度入射では PVP 膜の光路長は長くなるが、吸収が抑えられており、干渉によって吸収が抑えられたと考えられる。

当日は実験結果とシミュレーションの結果から、透明薄膜に色素分子をドープした時のシングルチャンネル CPA と、巨大な真空のラビ分裂について詳細に議論する。

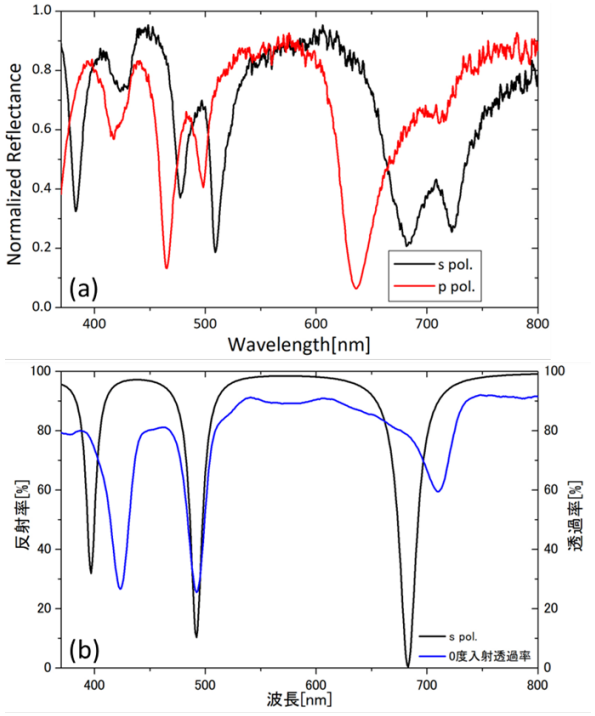


図1（a）CPA スペクトルの観測値（1000回積算）
（b）0度入射の透過率とPVPのみのs偏光計算結果
（CPA計算：入射角 88.0°，膜厚 ~ 1230nm）

[1] Hasegawa, M.; Oi, J.; Yamashita, K.; Seto, K.; Kobayashi, T.; Tokunaga, E.; Appl. Sci. **12**, 3633 (2022).

[2] Hasegawa, M.; Oi, J.; Yamashita, K.; Seto, K.; Kobayashi, T.; Tokunaga, E.; Langmuir **39**, 5678 (2023).

© 2025年 応用物理学会

誘導放出の効果をともなう超蛍光の理論

Theory of superfluorescence affected by stimulated emission

山梨大院工[1]，東理大院先進工[2] ○(M1)沼田 悠暉[1]，宮島 顕祐[2]，石川 陽[1]

Univ. of Yamanashi[1], Tokyo Univ. of Science[2], ◦Y. Numada[1], K. Miyajima[2], A. Ishikawa[1]

E-mail: g25tz013@yamanashi.ac.jp, aishikawa@yamanashi.ac.jp

超蛍光は、複数分極が光を介して位相をそろえることで起こる協力的な自然放出現象である[1]。超蛍光では指向性をもつパルス状の光が放出されるが、近年では量子ドットなどの半導体ナノ構造において観測されており[2, 3]、誘導放出を起源とするレーザーに代わる新しい超短パルスコヒーレント光源の候補として研究が進められている。超蛍光が発生するためには複数分極が光の波長より小さい領域に分布することが必要であるが、光の波長より大きな領域に分布する場合は誘導放出を無視できない。実験では、分極が光の波長より大きい領域に分布している場合でも超蛍光のパルス発光が観測されており、超蛍光における誘導放出の効果を解明することが重要である。

本研究では、図 1 のような超蛍光と誘導放出を分けて記述するための理論モデルを設定する。複数 2 準位系が光の波長以下に集まった層を考え、その層が光の波長程度離れて多数並んだ系を考える。1 つの層では複数 2 準位系から超蛍光が実現され、層間では誘導放出の効果が働くので、超蛍光に対する誘導放出の効果を議論するのに適したモデルになっている。系の時間変化は、層l内の 2 準位系の励起密度$n_{\mathrm{ex}}(l,t)$、層l内の 2 準位系間の相関$f(l,t)$、層l、l'間における光の伝搬関数$D(l,l',t)$によって記述される。また、これらの物理量から発光強度$I(t)$を求めることができる。発光強度$I(t)$と相関$f(l,t)$の時間発展方程式は次のように求められる。

$$I(t)=\frac{1}{\tau_0}\sum_l N_l\left[n_{\mathrm{ex}}(l,t)+(N_l-1)f(l,t)+\sum_{l'}D(l,l',t)\{2n_{\mathrm{ex}}(l,t)-1\}\cos\left[K_{\mathrm{ex}}[x_l-x_{l'}]\right]\right]$$

$$\frac{\partial f(l,t)}{\partial t}=\frac{1}{\tau_0}\{2n_{\mathrm{ex}}(l,t)-1\}\left[n_{\mathrm{ex}}(l,t)+(N_l-1)f(l,t)+\sum_{l'}D(l,l',t)\{2n_{\mathrm{ex}}(l,t)-1\}\cos\left[K_{\mathrm{ex}}[x_l-x_{l'}]\right]\right]$$

発光強度は、$\mathrm{n}_{\mathrm{ex}}(l,t)$、$f(l,t)$、$D(l,l',t)$を含む項が表す 1 個の 2 準位系の自然放出、協力的な光放出、誘導放出で決まっており、超蛍光の起源である相関$f(l,t)$は誘導放出の影響を受けている。当日の講演では、多数の層の配置などに対して超蛍光がどのように依存するかを示し、超蛍光に対する誘導放出の効果を明らかにする。本研究は科研費（24K06929、25K07601）の支援を受けて行われたものである。

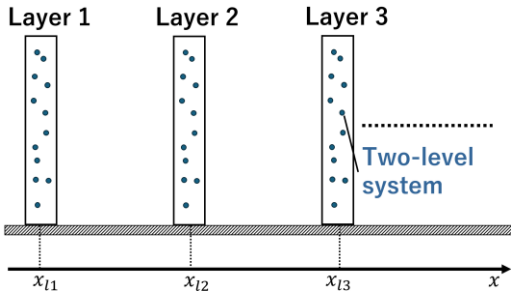


Fig. 1. 複数 2 準位系から構成された層を多数配列させたモデル

[1] R. H. Dicke, Phys. Rev. 93, 99 (1954).

[2] K. Miyajima et al., J. Phys.: Condens. Matter **21**, 195802 (2009).

[3] K. Miyajima et al., J. Phys. Chem. C 121, 27751 (2017).

© 2025年 応用物理学会

アゾベンゼン微粒子を含有させた紫外線硬化樹脂の光硬化過程の観測

Observation of photo curing of ultraviolet curable resin including azobenzene particles

新潟大[1]，○(D)藤本 悠佑[1]，新保 一成[1]，大平 泰生[1]

Niigata Univ.[1], ○Yusuke Fujimoto[1], Kazunari Shinbo[1], Yasuo Ohdaira[1]

E-mail: ohdaira@eng.niigata-u.ac.jp

【概要】アゾベンゼン微粒子は，光の偏光方向と強度分布に応じた光異性化反応を用いることで，微粒子の形状と異方性を光場により制御することができる[1,2]。紫外線硬化樹脂にアゾベンゼン微粒子を複合すれば，アゾ微粒子の光異性化反応を利用することで，紫外線硬化樹脂の硬化過程における形状変化や固体・液体の相状態を光場で操作できるものと考えられる。紫外線硬化樹脂の形状操作の新たな手法の開発が期待できる。本研究は，アゾ微粒子を含有させたマイクロサイズの紫外線硬化樹脂の短波長光励起における光硬化過程とその特徴について調べた。

【実験方法】実験系の概要を図 1 に示す。アゾベンゼン共重合体の PMMA-co-DR1 をコロイド法で粒子化しガラス基板上に分散させ，高屈折率タイプの紫外線硬化樹脂を約 30 μL 滴下した。レンズで集光した波長 473 nm，直線偏光および入射角度 45 deg.の短波長レーザーの集光スポットにより，アゾ微粒子近傍の紫外線硬化樹脂を部分的に励起した。倒立型光学顕微鏡により樹脂の硬化過程とアゾ分子の分布変化をリアルタイム観察した。

【結果と考察】アゾ粒子を含まない紫外線硬化樹脂に短波長レーザーの集光スポットを照射すると，照射領域は硬化をはじめ，約 10 秒間後に，照射スポットに対応した円形の境界をもつ硬化領域が形成された。図 2 にアゾ粒子を配置した紫外線硬化樹脂に短波長レーザーの集光スポットを約 20 秒照射したサンプル表面の倒立型光学顕微鏡像を示す。アゾ粒子は紫外線硬化樹脂滴下後に溶解し円形状の領域に分布した（図 2(a)）。その後，アゾ分子領域の中心付近に短波長レーザーの集光スポットを照射すると（図 2(b)），樹脂は約 15 秒後に直径約 20 μm の円形状に硬化した。さらに光の後方散乱の領域では樹脂の硬化とアゾ分子が混在する領域が生じた。遠方領域ではアゾ分子が放射状に分布した。これらから，微粒子化したアゾ分子の光異性化を伴う樹脂硬化では，形成される構造による光散乱や温度の勾配分布など複数の要因が作用することが予測される。

【参考文献】[1] Y. Ohdaira et al., Applied. Phys. 103104 (2019), [2] 藤本他，応物秋，18a-P01-9（2024）

【謝辞】本研究の一部は科研費（24K00896）により行われた。

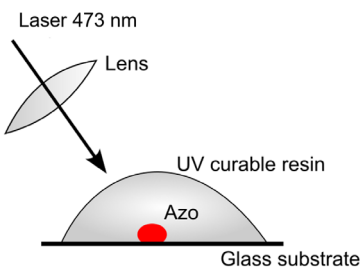


Fig.1. Experimental setup

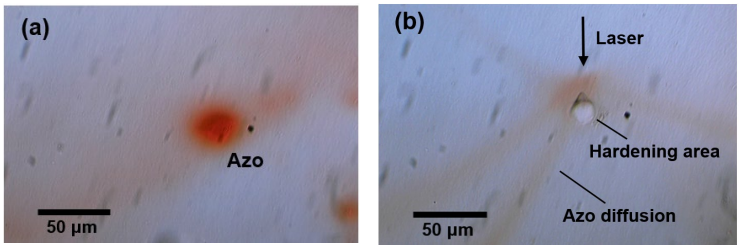


Fig.2. Photo curling of UV curable resin including azobenzene particle (a) before and (b) after irradiation of focused spot of 473 nm laser

© 2025年 応用物理学会

Dynamic Optical Binding of Gold Nanoparticles on Fabricated Gold Nanodisk Array with Single- and Double-Wavelength Periodicity

National Yang Ming Chiao Tung Univ., Taiwan [1], Hokkaido Univ., Japan[2], Okayama Univ., Japan[3], KU Leuven, Belgium [4], Universitat Ramon Llull, Spain[5]

◦Tien-Hsi Tsai [1], Mu-En Li[1], Xu Shi[2], Kosei Ueno[2], Boris Louis[4], Roger Bresolí-Obach[5], Hiroaki Misawa[1,2,3], Johan Hofkens[4], Hiroshi Masuhara[1]

E-mail: nana611036@gmail.com

Optical manipulation is a unique technique that enables the trapping of micro- and nanoparticles at the focal point of a tightly focused laser beam. Our group demonstrated the trapping of 200 nm gold nanoparticles (Au NPs) at the glass/solution interface, forming a single dumbbell-shaped assembly with linearly aligned and fluctuating Au NPs within and outside the focus, respectively.[1,2] To control this swarming morphology, we employed microchannels, dual beams, and a lithographically fabricated Au nanodisk (ND) array with single-wavelength periodicity to mimic particle arrangements at the focus.[3] The morphology was switched from bi- to uni-directional assemblies by shifting the laser focus on the array.

In this study, we expect that an Au ND array with double-wavelength periodicity generates an unconventional behavior of swarming. Figure 1 illustrates how swarm morphology varies with the laser focus position. By shifting the irradiation focus along the array, distinct assembly patterns emerge. Focusing the laser at the midpoint between two adjacent NDs (Figure 1a) results in a symmetric distribution, whereas focusing directly on a single ND (Figure 1b) produces a bi-directional, asymmetric assembly. Notably, center arrangement and swarming assembly on both sides of the ND array are different from those ND array with single-wavelength periodicity. [3] These results will be detailed and discussed in this presentation.

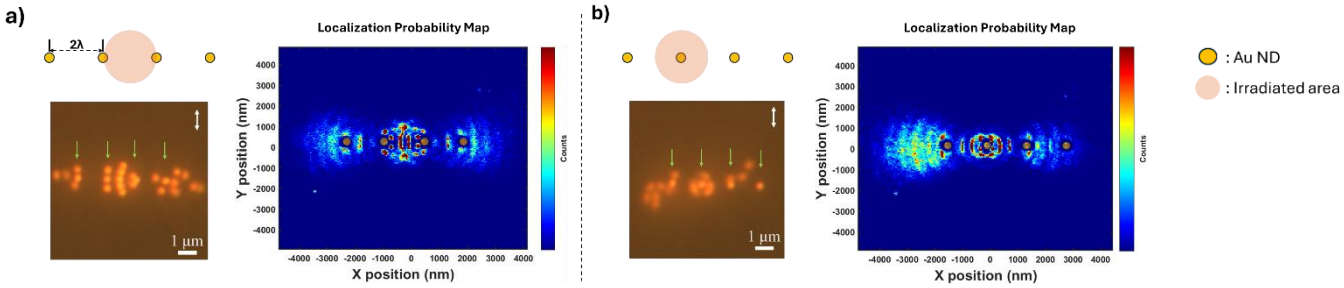


Figure 1. Schematic illustration (Left upper) shows laser irradiation on an Au ND array with double-wavelength periodicity. The white arrow indicates laser polarization direction. The image (Left lower), extracted from recorded videos, corresponds to the localization probability map (Right) displaying the spatial distribution of particles accumulated over all frames. The green arrows correspond to the NDs.

[1] Kudo, T., Yang, S. J., Masuhara, H., *Nano Lett.*, 2018, 18 (9), 5846–5853.

[2] Huang, C. H., *et al., Nat. Commun.*, 2022, 13 (1), 5325.

[3] Huang, C. H., *et al., J. Phys. Chem. C.*, 2023, 127 (38), 19044–19054.

© 2025年 応用物理学会

分子振動共鳴を用いたマイクロ微粒子の中赤外光ピンセット

Mid-infrared optical tweezers of microparticles using molecular vibrational resonance

豊田工業大学, ○(M2)清水 宥登, 藤 貴夫, 工藤 哲弘

Toyota Tech. Inst. ,○Y. Shimizu, T. Fuji, T. Kudo

E-mail: sd24432@toyota-ti.ac.jp

光の輻射力により微小物質を動かす技術を光マニュピレーションと呼ぶ。生体組織や分子などを非接触・非破壊に操作する光ピンセット[1]の技術はその代表例である。また、輻射力は光の進行方向に力を加える散乱・吸収力と、電場の空間勾配に沿って働く勾配力に大別することができる。近年、我々の研究室では中赤外レーザーを用いた分子振動共鳴効果に基づく光マニピュレーションの研究を遂行している。ねらった微粒子の分子振動を励起することで、共鳴増大した吸収力により、その微粒子を選択的に光輸送選別できることを見出した[2]。本研究では、吸収力を用いた光輸送技術[2]から、勾配力を用いた光ピンセット技術に展開する。勾配力もレーザー波長に依存することから、ねらった分子種を持つ微粒子を選択的に捕捉できるようになると期待される。

実験で試料として用いる PMMA 微粒子(直径 2.7 μm)は、波数 1725 cm^{-1} 付近に C=O 結合の伸縮振動に由来する共鳴吸収ピークを持つ(図 1(a)参照)。図 1(b)に示すように、下界面に中赤外レーザーを集光(NA 0.5, 3mW)し、微粒子が光の進行方向に浮上する様子の波数依存性を調べた。共鳴ピーク波長(1725 cm^{-1})においては、レーザー照射後約 4 秒、長波長側に離調した 1712 cm^{-1} では、約 11 秒で微粒子は浮上し、顕微観察面から消えていることがわかる(図 1(c)参照)。つまり、浮上に要する時間が吸光度の大きさに依存することがわかった。また、短波長側に離調した 1741 cm^{-1} では、斥力により集光点から離れていく挙動が確認された。集光範囲から離れるため、浮上しなかったと考えられる。他の吸光度の小さい波数(1699, 1760 cm^{-1})では、ブラウン運動と大差ない挙動が確認された。上界面に集光した同様の実験にも着手しており、直径 5.2 μm の PMMA 微粒子が 1712, 1725cm^{-1} のレーザーによって捕捉される様子を確認できた。本発表では、シミュレーションによる輻射力の理論計算とともに、これらの実験結果の詳細を説明する予定である。

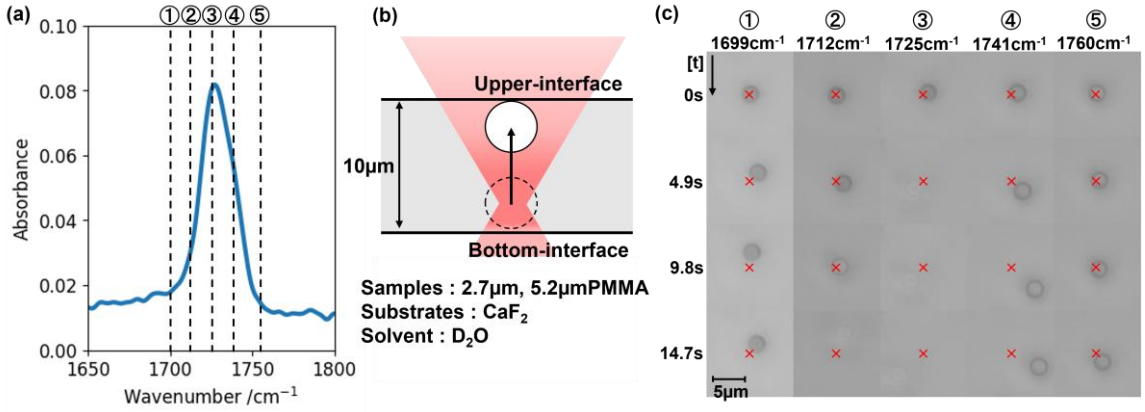


図 1 (a)C=O 伸縮振動の共鳴近傍における PMMA 微粒子の赤外吸収スペクトル。 (b)下界面にレーザーを集光した際の模式図。(c)下界面の 2.7μmPMMA 微粒子にレーザーを集光した様子を表す透過像。

[1] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, Opt. Lett. **11**, 288–290 (1986).
[2] Y. A. Darmawan, T. Goto, T. Yanagishima, T. Fuji, and T. Kudo, J. Phys. Chem. Lett. **14**, 7306 (2023).

© 2025年 応用物理学会

Gold nanoparticle-assisted formation of multiple ring-like lysozyme assembly at air/solution interface

National Yang Ming Chiao Tung Univ., Taiwan [1], Kobe Univ., Japan[2],
○ Ming-Lung Lau[1], Ke-An Kuo[1], Mu-En Li[1], Keisuke Yuzu[1,2], Eri Chatani[2], Hiroshi Masuhara[1]
E-mail: kiyyt25466@gmail.com

Optical trapping is typically performed inside the solutions, while we have been studying optical trapping of polystyrene and gold particles at solution interface, where the trapped particles show characteristic assembling structures extending from the focus to its outside area along the interface. Recently we have been extending this optical trapping to protein solution, discovering the formation of a single large lysozyme (Lys) assembly with the submillimeter diameter and 30 μm depth along the solution surface. To design a new optical trapping method with high speed and more easily controllability, here we introduce gold nanoparticle (Au NP) into the Lys solution. It is expected that the surface plasmon resonance and light scattering may enhance and modulate the Lys assembly.

We irradiated a 1064 nm laser onto a supersaturated Lys solution in D_2O (375 mg/mL) containing Au NP at air/solution interface. Without Au NP, graduate assembling and its domain expansion is observed (Fig. 1 (B)), while with Au NPs a unique multiple ring-like structure of Lys assembly was observed (Fig. 1 (C)). This step-by-step assembling may result from the sequential trapping of Au NPs. To analyze this behavior, we propose a two-step optical trapping procedure. Initially, a lower power laser (20 mW) was used to trap a single Au NP, then irradiate it with 500 mW. This procedure is shown in Fig. 1 (A), where obtained images are arranged. The Lys assembly gave an outer dark ring accompanied by a smaller, bright inner ring (Fig. 1 (D)). Upon turning off the laser, the bright ring disappeared, and the dark ring shrank. These results will be examined in terms of enhanced optical force and photothermal effects.

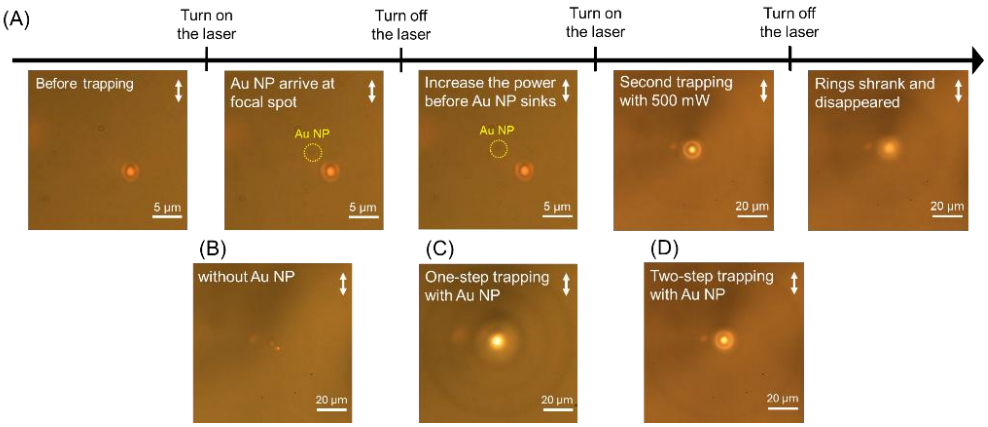


Figure 1. (A) The scheme of two-step optical trapping procedure. For each step, transmission image of Lys sample is shown. (B-D) Transmission images of Au NP-assisted Lys assembly formed under different conditions with 500 mW laser power. (B) without Au NP. (C) One-step optical trapping with Au NP. (D) two-step optical trapping with Au NP.

© 2025年 応用物理学会

アゾ薄膜上への液体マイクロ格子構造の形成と回折光の振動応答

Formation of liquid micro grating on azo thin films and vibration response of diffracted light

新潟大[1] ○(M1)小金森 紀宏[1]，藤本 悠佑[1]，村松 正吾[1]，新保 一成[1]，大平 泰生[1]

Niigata Univ.[1], ○Norihiro Koganemori[1], Yusuke Fujimoto[1], Shogo Muramatsu[1], Kazunari Shinbo[1], Yasuo Ohdaira[1]

E-mail: ohdaira@eng.niigata-u.ac.jp

[概要]マイクロサイズの液体からの散乱光は，液体の形状と構造に大きく依存するため，液体の分布を制御することで，高感度で高機能な振動計測への応用が期待できる。本研究は，光で表面形状を制御できるアゾベンゼン分子薄膜を用いた液体マイクロ格子の形成とその回折光の振動応答について明らかにすることを目的としている。ここでは，二光束干渉場で光加工したアゾ薄膜の格子構造[1]を用いた微小液滴の周期的な配列，および液滴とアゾ薄膜の複合的な格子構造から生じる回折光の振動応答について調べた。

[実験方法]図 1 に実験系の概要を示す。ガラス基板上に PMMA-co-DR1 アゾ薄膜を製膜し，波長 532 nm，強度 90 mW，入射角度 5 deg.のレーザ光で生成した二光束干渉場を照射し，マイクロサイズの格子構造を形成した。さらに，グリセリン液体を格子構造上に蒸着することでグリセリン液滴を付着させ，光学顕微鏡により表面のマイクロ液滴の配列状態を評価した。サンプル表面の垂直方向から波長 612 nm のレーザを入射し，マイクロ液滴を付加したアゾ薄膜の格子構造から発生する回折光を CMOS カメラで観察した。精密ステージでサンプルを走査し，1 次の回折光の空間分布の変化を調べた。また圧電素子により加振し，回折光分布の振動応答について調べた。

[結果と考察]図 2 にグリセリンを蒸着したアゾ薄膜格子の光学顕微鏡像を示す。格子構造上にマイクロサイズの液滴が付着し，アゾ薄膜格子に対応する周期的な分布を形成した。図 3 にサンプルから発生した 1 次回折光を示す。グリセリン蒸着前（図 3(a)）と比較すると，蒸着後（図 3(b)）では回折光のスポットの空間分布が広がっており，液滴による回折光の角度変化に起因するものと考えられる。スポット周囲に縞模様も生じた。サンプルを表面平行方向に 0.5 μm 変位させると，回折光の空間分布が変化した。さらにサンプルを圧電素子により 10 Hz で加振すると，回折光の分布が振動の振幅と方向に依存して変化することが確認された。詳細は当日報告する予定である。

[参考文献][1] S. Bian et al., J. Appl. Phys., 4498 (1999). [謝辞]本研究の一部は科研費（24K00896）により行われた。

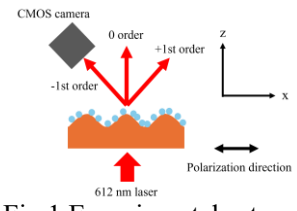


Fig.1 Experimental setup

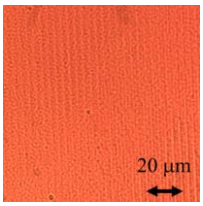


Fig.2 Evaporated micro glycerin on azo molecular grating fabricated by two beam interference fields

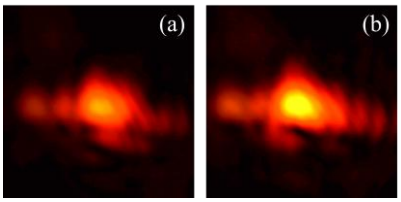


Fig.3 -1st order diffracted light from azo grating (a) without and (b) with evaporated glycerin

© 2025年 応用物理学会

表面プラズモン電場制御のための位相および金属パラメータの最適化設計

Phase and material design for plasmon field shaping

浜松ホトニクス株式会社　中央研究所 [1]　内田 るみか [1], 渡辺 向陽 [1]

Central Research laboratory, Hamamatsu Photonics K.K.[1], Rumika Uchida[1], Koyo Watanabe[1]

E-mail: rumika.tanaka@crl.hpk.co.jp

レーザ加工の高機能化や加工速度の向上には、集光電場分布の精密な制御が極めて重要である。とりわけ、表面プラズモンによる電場を加工に応用することで、基板表面に局在する増強電場の特性を活かし、表面特化型の先進的加工への展開が期待されている。

一般的に、集光電場分布の制御には、空間光変調器（SLM）による位相変調方式が有効であり、反復フーリエ変換アルゴリズム（IFTA）を用いて算出された位相パターンにより、電場を任意に制御可能であることが広く知られている [1]。しかし、表面プラズモン電場の分布制御にこの技術を適用する場合には、表面プラズモンと結合する入力光強度の角度依存性を考慮する必要がある。この角度依存性は、金属の種類や厚み（以下、金属パラメータ）によって変化するため、所望の電場分布を高精度に実現するには、ターゲット電場に応じたテーラーメイドな位相設計および金属パラメータ設計が求められる。

本発表では、金属パラメータ、波長、加工対象材料の屈折率などに基づいて変化する入力光強度の角度依存性を IFTA に組み込み、繰り返し最適化することで、所望のターゲット電場分布に対する最適な位相パターンおよび金属パラメータを探索するシミュレーションを行った。図 1 にその計算結果を示す。本計算では、アクリレート樹脂 (n = 1.5)／金属薄膜／カバーガラス／油浸対物レンズからなる 4 層モデルを用い、金属パラメータおよび波長を変数として探索を実施した。シミュレーションでは、条件 (A) 波長 532 nm ・ アルミ厚 15 nm および条件 (B) 波長 632.8 nm ・ 銀厚 50 nm に対して、図 (a)、(b) に示す瞳面の入力光強度分布と位相変調パターンを計算した。対応する金属表面上の電場分布は図 (c)、(d) に示す。ターゲットに対する RMS 誤差の比較から、両条件で 5% の差がみられ、表面プラズモン電場形状を高精度に制御するには、角度依存性を考慮した IFTA 計算が有効であることがわかった。

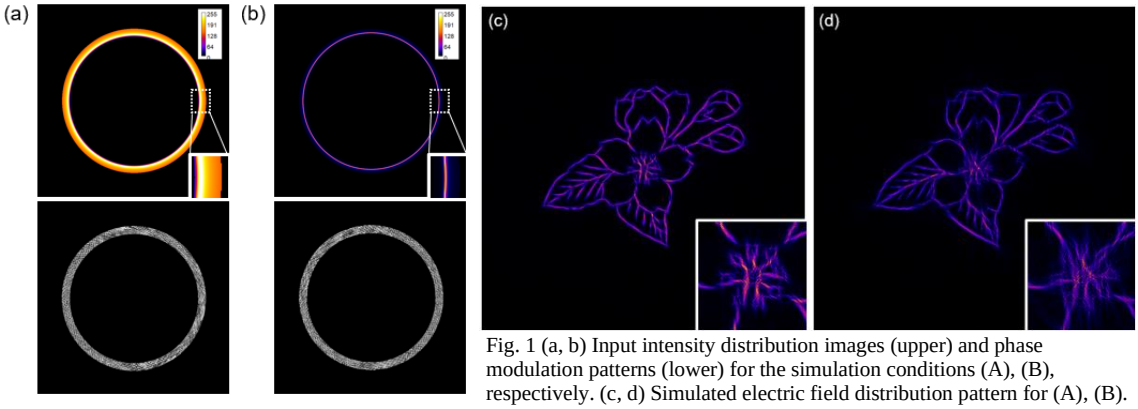


Fig. 1 (a, b) Input intensity distribution images (upper) and phase modulation patterns (lower) for the simulation conditions (A), (B), respectively. (c, d) Simulated electric field distribution pattern for (A), (B).

[1] Gerchberg, R.W. (1972) Optik, 35, 237-246.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.1 Basic optics and frontier of optics

[9a-N221-1~11] 3.1 Basic optics and frontier of optics

[9a-N221-1]

Metaboloid - Metabolizing droplet robot -

○Masayuki Naya[1,2], Jintaro Shiina[1], Shinya Hakuta[1], Hideyuki Mitomo[3], Kuniharu Ijiro[3], Toshiharu Saiki[1] (1.Keio Univ., 2.Naya-lab., 3.Hokkaido Univ.)

[9a-N221-2]

Spontaneous Rotation Mechanism of Droplets Induced by Laser Photothermal Conversion

○(D)Shinya Hakuta[1], Masayuki Naya[1,2], Jintaro Shiina[1], Toshiharu Saiki[1] (1.Keio Univ., 2.Naya lab.)

[9a-N221-3]

Oscillation Mode Control of Two Bubbles via Laser Power Modulation

○Shin Nakajima[1], Kyoko Namura[1], Motofumi Suzuki[1] (1.Kyoto Univ.)

[9a-N221-4]

Numerical analysis of optical torque acting on a twisted bipolar microparticle under optical trapping conditions

○Kenichi Yuyama[1], Makoto Okumura[2], Soh Kushida[2], Yohei Yamamoto[2] (1.Osaka Metropol. Univ., 2.Univ. of Tsukuba)

[9a-N221-5]

Evaluation of thermophoretic-optical tweezers by using Brownian dynamics simulations

○Koki Ide[1], Tetsuro Tsuji[2], Syoji Ito[3], Takayuki Suzuki[1], Kenji Setoura[4] (1.Kobe City Col. Tech., 2.Kyoto Univ., 3.Univ. Osaka, 4.Univ. Hyogo)

[9a-N221-6]

Coherent manipulation of laser-induced shockwaves by multiple excitation

○Kenta Inazawa[1,2,3], Itaru Imayoshi[2,4], Koichiro Tanaka[1,5], Keisuke Isobe[1,2] (1.RIKEN RAP., 2.Grad. Sch. of Biostudies, Kyoto Univ, 3.Hamamatsu Photonics K.K., 4.Inst. for Life and Medical Science, Kyoto Univ., 5.Grad. Sch. of Faculty of Science, Kyoto Univ)

[9a-N221-7]

Optical trapping dynamics of single nanoparticles on lipid bilayers

○Shunya Moriyama[1], Yasushi Tanimoto[1], Kyoko Masui[1], Chie Hosokawa[1] (1.Osaka Metropolitan Univ.)

[9a-N221-8]

Selective Collection of Quantum Nanomaterials by Photothermal Assembly

○Keita Suzuki[1,2,3], Shuichi Toyouchi[1,2], Kota Hayashi[1,2,3], Mamoru Tamura[2,4], Chihiro Suzuki[5], Kiichi Kaminaga[5], Ryuji Igarashi[5,6], Shiho Tokonami[2,3], Takuya Iida[1,2] (1.Sci. in Osaka Metro Univ., 2.RILACS, 3.Eng. in Osaka Metro Univ., 4.Sci. in Kuwangaku Univ., 5.QST, 6.Life Sci. and Tec. in Inst. Sci. Tokyo)

[9a-N221-9]

Development of a laser-assisted electrophoretic deposition system without a liquid cell equipped with a beam scanning mechanism

○Yuki Tamura[1], Kenta Nakazawa[1], Futoshi Iwata[1,2] (1.Shizuoka Univ., 2.RIE. Shizuoka Univ.)

[9a-N221-10]

Numerical verification of dynamic response sampling method toward position-orientation control of particles of arbitrary shape with optical forces

○(D)Ryohei Omine[1], Shuzo Masui[1], Masaki Michihata[1], Satoru Takahashi[1] (1.The Univ. of Tokyo)

[9a-N221-11]

Non-thermal invasive photo-thermoelectrofluidic tweezers using phase-change materials

○Kinnosuke Yasutani[1], Shogo Hatayama[2], Kotaro Makino[2], Toshiharu Saiki[1] (1.Keio Univ., 2.SFRC, AIST)

メタボロイド　ー代謝する液滴ロボットー

Metaboloid　- Metabolizing droplet robot -

慶大理工[1], 納谷ラボ[2], 北大電子研[3]　○納谷昌之[1,2], 白田真也[1], 椎名仁太郎[1]
三友秀之[3], 居城邦治[3], 斎木敏治[1]
Keio Univ.[1], Naya-Lab.[2], Hokkaido Univ.[3]
○Masayuki Naya[1,2], Shinya Hakuta[1], Jintaro Shiina, Hideyuki Mitomo[3],
Kuniharu Ijiro[3], Toshiharu Saiki[1]
E-mail: masa@naya-lab.com

我々は、揮発性かつ低表面張力の液体（エタノール）と、不揮発性かつ高表面張力の液体（PEG200）を混合した溶液を、光熱変換層（金）を有するガラス基板と対向ガラス基板の間に挟み、密閉気相領域を形成した系において、波長 532nm のレーザ光による局所加熱を行うことで、液滴が自発的に生成され、かつアクティブに運動する現象について報告してきた[1-2]。この液滴の挙動は、揮発・拡散による物質の散逸と、マランゴニ対流による物質の流入が動的に釣り合う「代謝（metabolism）」によって維持されている。このような代謝的プロセスによって、自らの構造を形成・変形し、運動する構造体を、「メタボロイド（Metaboloid）」と呼ぶことにする。

メタボロイドは、従来のマイクロロボティクスやアクティブマターでは見られない、「物質的自己修復性」や「代謝的可変形性」といった特性を有する。たとえば Fig. 1 に示すように、金ナノ粒子分散基板上へのマルチレーザスポット照射での実験では、レーザ照射（エネルギー供給）を停止することで一旦崩壊しかけた液滴形状が、レーザ再照射により、履歴を残しつつも次第に元の形態へと回復していく挙動が見られるが、これは、代謝に起因する典型的な現象である。

メタボロイドは、自由変形ロボットへの応用とともに、「非生命的な無秩序な物質系から、いかにして秩序ある構造や機能が創発するのか？」という根源的問い[3]に対し、物理・生命科学・情報科学を横断する新たな実験モデルとして重要な知見を提供するものであると考える。

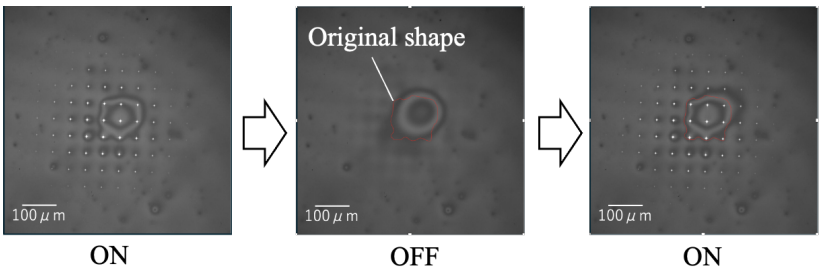


Fig.1 Metaboloid deformation due to laser ON/OFF

本研究は、学術変革領域研究(A)（23H04810）と挑戦的研究(萌芽)（24K21744）、およびに「物質・デバイス領域共同研究拠点」の助成を受けている。

[1] Y. Takamatsu, et al., Micromachines, 14(7), (2023),1460
[2] 納谷昌之他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会(2024)　講演予稿集 17a-A32-3
[3] シュレディンガー,「生命とは何か」, 岩波文庫

© 2025年 応用物理学会

レーザー光熱変換が誘起する液滴の自発回転機構の解明

Spontaneous Rotation Mechanism of Droplets Induced by Laser Photothermal Conversion

慶大理工[1]，納谷ラボ[2] ○(D)白田真也[1]，納谷昌之[1,2]，椎名仁太郎[1]，斎木敏治[1]

Keio Univ.[1], Naya Lab.[2] ○Shinya Hakuta[1], Masayuki Naya[1,2], Jintaro Shiina[1], Toshiharu Saiki[1]

E-mail: shinya.hakuta@keio.jp

自己駆動性を持つマイクロ液滴は生命のような運動をするアクティブマターの基礎モデル系として注目され、さらにマイクロ流体や熱制御のためのロボティクスや攪拌など工学的応用が期待されている。我々は、エタノール (揮発性、低表面張力) と PEG200 (不揮発性、高表面張力) の混合溶液をガラス間マイクロギャップに閉じ込めた系を構築した。液間の気泡部にレーザーを照射すると局所加熱と選択蒸発により液滴が生じ、高いレーザーパワー(例：0.5mW@4μm)では、照射点を中心液滴が回転運動を自発的に開始し、10 分以上安定した運動を継続した[1]。本報告では、自発回転運動の数理モデルを構築し、回転のメカニズムを明らかにすることを目標とした。

運動の起点は、固着液滴形状の蒸発フラックスが液滴の端ほど大きいことに基づき、レーザー加熱に対して蒸発を最大化して熱的に安定な状態とするため、液滴の端部にレーザーが当たるように液滴が変形し続けることである。光学像観察の結果、液滴の変形や運動に際して、エタノール蒸発で濃縮された PEG200 層が尾引きとして残ることが分かった (Fig.1(a))。すなわち、レーザー照射点の濃度マランゴニ起因の引力に加えて、尾引きする PEG200 の高表面張力も液滴にかかると考察し、摩擦も加えた数理モデル化を行った (Fig.1(b))。この非線形方程式モデルは照射点の周りを回転する Stuart-Landau 型のリミットサイクル振動子となることを示した (Fig.1(c))。レーザー加熱が大きいほど軌道半径が小さく周期が短い回転運動を示し、実験結果とよく一致した。

マイクロ混合液滴のオンデマンドな生成と自発回転運動を支配する駆動力の解明はアクティブマター研究やマイクロ流体制御に新たな視点をもたらし、本研究で構築した実験・数値解析ハイブリッド手法は類似する界面駆動現象の基礎研究や応用への波及効果が期待されると考える。

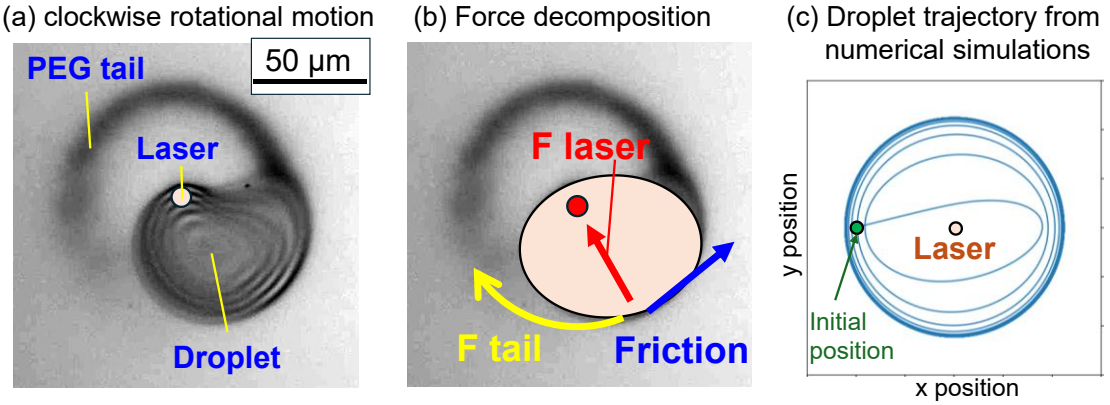


Fig. 1 Optical microscopy image of a rotating droplet with numerical simulation of its trajectory.

本研究は、学術変革領域研究(A) (23H04810)と挑戦的研究(萌芽) (24K21744)の助成を受けている。

[1] S. Hakuta, *et. al*., “Laser-induced microdroplets”, OMC1-02 (OPIC 2025, SPIE).

© 2025年 応用物理学会

レーザー強度変調による 2 個のバブルの振動モードの制御

Oscillation Mode Control of Two Bubbles via Laser Power Modulation

京大院・工　○(M2) 中島 晨，名村 今日子，鈴木 基史

Kyoto Univ., ○Shin Nakajima, Kyoko Namura, Motofumi Suzuki

E-mail: namura.kyoko.2s@kyoto-u.ac.jp

光熱変換薄膜に continuous wave (CW) レーザーを集光すると，薄膜上のレーザースポットがマイクロメートルスケールの熱源となる．この熱源を利用して脱気水を局所加熱すると，主に水蒸気で満たされた水蒸気リッチなマイクロバブルが生成する．この水蒸気リッチバブルはサブ MHz で自励振動しており，周囲には最大 1 m/s にも達する強い対流が発生する[1]．これまでに，張ら[2]はこの自励振動するバブルを 2 つ並べて生成した時の，振動相互作用について詳しく解析を行った．その結果，2 つのバブルの振動が同位相同期する振動モードと逆位相同期する振動モードの重ね合わせで理解できることを示した．モード間の周波数の差は最大で 0.18 MHz もあり，これは単一バブルの振動周波数の 30%にもなる．もし外部から周期的な刺激を与えることでモード間の選択が出来れば，バブルの振動状態をアクティブに選択し，周囲の流体の動きを劇的に変えられると期待される．そこで本研究では，バブル生成のためのレーザー強度を時間的に変調することで，複数バブルの振動モード選択を行うことを目的とした．

まず，ガラス基板上に厚さ 50 nm の β-$FeSi_2$ 薄膜を作製し，脱気水と共にガラスセル内に封入した．この薄膜上に波長 785 nm の CW レーザーを 2 点集光し，27 μm の間隔で 2 つのバブルを同時に生成した．照射するレーザーの強度は 6 mW–41 mW の範囲で方形波状の時間変動を与え，その周波数 f を変化させた．生成したバブルの振動は，5 Mfps の超高速度カメラを用いて観察した．得られた画像からバブルの高さの時間変化を取得し，フーリエ変換することで，各バブルが持つ周波数成分を解析した．

図 1 は，f = 0.6 MHz と f = 1 MHz の場合のバブル振動のフーリエ変換結果である．この結果から，f = 1 MHz の時と異なり，f = 0.6 MHz の時は 2 つのバブルの振動がレーザー強度の変調周波数に同期することがわかった．バブルの自励振動周波数に近い値でレーザー強度を変調することで，2 つのバブルが共通の周波数成分を持つようになったと考えられる．これらの結果より，レーザー強度変調がバブルの振動に影響を与え，特定のモード選択に寄与する可能性が示された．

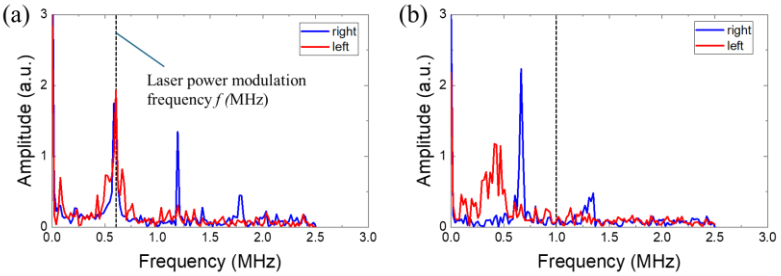


Figure 1. Fourie transform results of the bubble oscillation (a) f = 0.6 MHz. (b) f = 1 MHz.

(1) Kyoko. Namura, et al., Scientific Reports 7（2017）

(2) Xuanwei Zhang, et al., Small, 21 (2025)

© 2025年 応用物理学会

光捕捉されたねじれ双極微粒子に働く光トルクの解析

Numerical analysis of optical torque acting on a twisted bipolar microparticle under optical trapping conditions

阪公大院理 [1]，筑波大院数理物質 [2]　○柚山 健一 [1]，奥村 慎 [2]，櫛田 創 [2]，山本 洋平 [2]

Osaka Metropol. Univ. [1], Univ. of Tsukuba [2], ○Ken-ichi Yuyama[1], Makoto Okumura[2], Soh Kushida[2], Yohei Yamamoto[2]

E-mail: k-yuyama@omu.ac.jp

光ピンセットにおいて光のスピン軌道運動量を利用すると、捕捉した微粒子の自転運動を誘起することができる。これまで、複屈折性の微結晶や円偏光反射を示す微粒子において光捕捉および自転運動が報告されている［1,2］。本研究では、両者の特性を兼ね備えたねじれ双極微粒子を対象に、楕円偏光照射下で生じる光トルクについて数値解析した。

ねじれ双極微粒子内の分子配向を図 1 に、計算モデルを図 2 に示す［3］。ポリマー鎖は、極軸付近では一軸方向に配向しているが、粒子表面に向かって次第に左巻きらせん構造をとる。この微粒子は、光軸に対して極軸を垂直に配向して光捕捉されるため、図 2 の三層構造を計算モデルとした。下層と上層は左円偏光ミラーであり、中間層は双極軸が遅相軸となる一軸複屈折層である。入射光、透過光、および左円偏光ミラーからの反射光 1,2 を考え、光トルクを計算した。

異なる楕円率の左回り楕円偏光を光強度 40 mW で照射した際に生じる光トルクを図 3a に示す。横軸は、楕円偏光の長軸と双極軸との角度である。微粒子は、正および負のトルクにより左および右回転する。楕円率 0.00 と 0.18 では微粒子は特定の角度に配向する。楕円率が 0.47 より大きくなると、全ての角度において正のトルクとなり微粒子は連続的に左回転する。円偏光（楕円率 1.00）の場合、粒子の配向方向によらず一定のトルクが働く。一方、楕円偏光では、粒子の配向方向に依存してトルクが変化する。右回り楕円偏光の場合は負のトルクが生じ、微粒子は右回転するが、トルクの大きさは左回り楕円偏光に比べ小さくなる（図 3b）。楕円率 0.47 の場合、左回り楕円偏光では連続的に左回転するのに対し、右回り楕円偏光では 65 度付近に配向する。楕円率を調整することにより、左回り楕円偏光でのみ選択的に自転運動を誘起することができる。

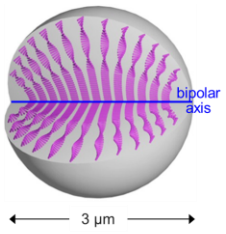


Fig. 1 A schematic illustration of a twisted-bipolar polymeric microsphere

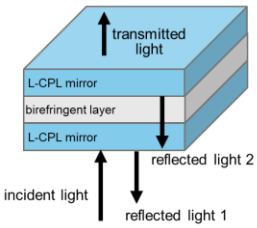


Fig. 2 A model for calculating optical torque

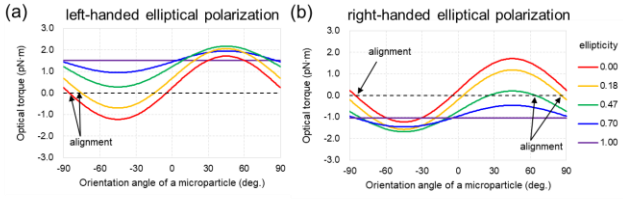


Fig. 3 Optical torque acting on a twisted-bipolar microsphere under elliptically polarized light illumination

References

[1] *Nature* **1998**, *394*, 348, [2] *Nat. Commun.* **2014**, *5*, 3656, [3] *J. Am. Chem. Soc.* **2021**, *143*, 8772.

© 2025年 応用物理学会

ブラウン動力学シミュレーションによる熱泳動光ピンセットの評価

Evaluation of thermophoretic-optical tweezers by using Brownian dynamics simulations

神戸高専 [1]，京大情報 [2]，阪大基礎工 [3]，兵県大工 [4]

○出 康樹 [1]，辻 徹郎 [2]，伊都 将司 [3]，鈴木 隆起 [1]，瀬戸浦 健仁 [4]

Kobe City Col. Tech. [1], Kyoto Univ. [2], Univ. Osaka[3], Univ. Hyogo[4]

○Koki Ide[1], Tetsuro Tsuji[2], Syoji Ito[3], Takayuki Suzuki[1], Kenji Setoura[4]

E-mail: r119111@g.kobe-kosen.ac.jp

コロイド水溶液に近赤外波長レーザーを集光すると，水の光吸収によって非平衡温度場が形成され，自然対流や熱泳動などの熱流動的効果が誘起される．近年ではこの特性を活かし，従来の光勾配力や光散乱力を利用した光操作に，これらの熱流動的効果を組み合わせて微小物体を操作する「光熱操作」の研究が盛んになっている．中でも，熱泳動と光学的効果を利用した操作手法は，実験的報告が散見され，その応用の広がりを見せている．[1),2)] しかし，これらを定量的に評価するためには，熱と光の寄与を切り分けて理論的に議論することが必要となる．そこで，我々は以前の研究で，2 次元空間で液相中コロイド粒子の熱泳動挙動を適切に評価可能なブラウン動力学シミュレーション (Brownian dynamics simulation, BDS) の計算モデルを開発した．[3)] 本研究では，計算モデルを 3 次元空間に拡張し，光勾配力，光散乱力の寄与を追加することで，Figure 1 (a) に示す 2 枚の基板に挟まれた液相中のナノコロイド粒子の光熱操作の捕捉挙動の評価を行った．

計算では，水の吸収係数の異なる 3 波長のレーザーを照射し，液相中ポリスチレンナノ粒子の捕捉挙動を比較した．ここでは，熱泳動による光ピンセットのアシストを得るため，ポリエチレングリコール 6000 (polyethylene glycol 6000, PEG 6000) をコロイド水溶液に添加し，輸送方向が反転した（高温側に輸送する）負の熱泳動が誘起された状況を想定している．計算例として，波長 1560 nm, 入射パワー 5 mW のレーザー照射時の, 捕捉保持確率の時間変化を Figure 1 (b) に示す．図中の線は，光と熱の寄与を考慮した結果 (1560 nm)，熱泳動力のみの結果 (1560 nm (tph))，光圧のみの結果 (1560 nm (opt)) を示している．このように BDS で熱と光の寄与を分離して解析する事で両者の寄与を定量化し，光熱操作では相乗効果によって捕捉が安定化することが予測された．

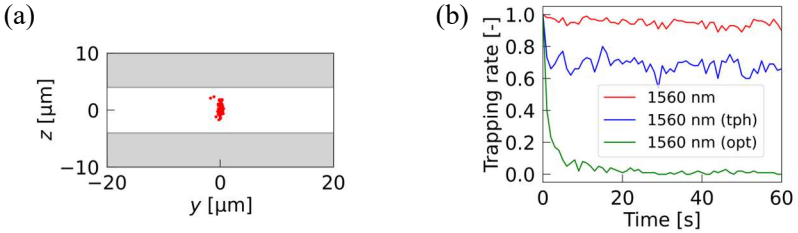


Figure 1. (a) Examnple of particle trapping behavior over 60 s, (b) Time-development of trapping rate

1) K. Setoura, T. Tsuji, S. Ito, S. Kawano and H. Miyasaka, Nanoscale **11** [44], 21093 (2019).

2) Q. Jiang, B. Rogez, J.-B. Claude, G. Baffou and J. Wenger, Nano Lett. **20** [12], 8811 (2020).

3) K. Ide, T. Tsuji, T. Suzuki and K. Setoura, ACS Omega **10** [5], 4526 (2025).

© 2025年 応用物理学会

多点励起によるレーザー誘起衝撃波のコヒーレント制御

Coherent manipulation of laser-induced shockwaves by multiple excitation

稲澤 健太[1,2,3]，今吉 格[2,4] 田中 耕一郎[1,5] 磯部 圭佑[1,2]

理研光量子[1]，京大生命[2]，浜松ホトニクス(株)[3]，京大医生物[4]，京大理[5]

Kenta Inazawa[1,2,3], Itaru Imayoshi[2,4], Koichiro Tanaka[1,5], Keisuke Isobe[1,2]

RIKEN RAP[1], Grad. Sch. of Biostudies, Kyoto Univ.[2], Hamamatsu Photonics K.K.[3], Inst. for Life and Medical Science, Kyoto Univ.[4], Grad. Sch. of Faculty of Science, Kyoto Univ.[5]

E-mail: inazawa.kenta.35d@st.kyoto-u.ac.jp

水溶液に高強度の近赤外のフェムト秒レーザーパルスを集光すると，多光子吸収によって急激な圧力変化が生じ，衝撃波が伝播する．近年，この衝撃力を利用し，細胞分離や遺伝子導入，アクチン細胞の分断などの生体応用が多数報告されている．しかし，衝撃波によって生じる圧力は，衝撃波発生点で最も強く急速に減衰しながら球面上に発散して伝播する．そのため，生体へ圧力を加える場合，レーザー集光点を標的近傍に設定する必要がある．また，標的細胞の近傍に細胞が多数ある場合，それらの細胞に対しても同時に強い衝撃力を与えてしまう問題がある．

そこで本研究では，液晶空間位相変調器を用いてレーザー光を多点集光し，複数の衝撃波を発生させることで，衝撃波のコヒーレント制御を行う．衝撃波は光や波と同様に，波動的な性質を持っており，複数の衝撃波を合成することで，衝撃波に指向性や局所性を与えることができる．Figure 1 の数値解析の結果から，集光点を円弧上に並べることで，円の中心点において衝撃圧力が高くなることが分かった．また，ポンプ・プローブ法で得られた像は数値解析結果と非常に似た結果を示した（Fig.1（右））．このように，衝撃波発生点を円弧上に配置することで，目標点の極微小な領域に衝撃波を集中伝播させることが可能となる. 本発表では, 衝撃波点が 1 点と円弧上，水平に並べられた際の衝撃波の伝播について示し，水中浮遊ビーズへの影響から衝撃波の指向性についての報告を行う．

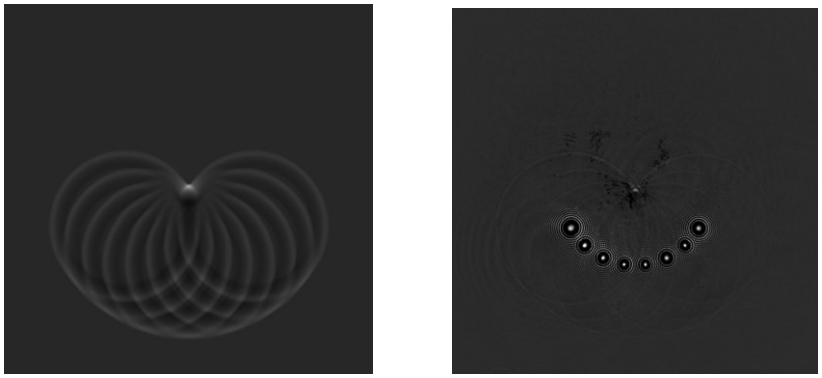


Fig.1 （左）多点励起点を円弧上に８点並べた際の衝撃波の伝搬の数値解析結果，（右）多点励起点を円弧上に８点並べた際の衝撃波の時間分解計測法による結果

謝辞

本研究は科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST (JPMJCR24B2 からの助成を受けて行われました．ここに深く感謝の意を表します．

© 2025年 応用物理学会

脂質二分子膜上の単一ナノ粒子の光捕捉過程

Optical trapping dynamics of single nanoparticles on lipid bilayers

阪公大院理　○森山 俊哉，谷本 泰士，増井 恭子，細川 千絵

Osaka Metropolitan Univ. ○Shunya Moriyama, Yasushi Tanimoto, Kyoko Masui, Chie Hosokawa

E-mail: se23278b@st.omu.ac.jp

神経細胞の細胞膜には神経伝達物質受容体などの膜表在分子が局在し、細胞間のシナプス伝達に関与している。我々は、集光レーザービームの光圧を用いた膜表在分子の分子動態操作により、シナプス伝達効率を可逆的に制御する研究を進めている。流動性を有する脂質二分子膜をガラス基板上に展開した支持脂質二分子膜 (Supported Lipid Bilayer: SLB)は、細胞膜モデルとして有用である。これまでに、SLB に結合したストレプトアビジン修飾量子ドット (粒径: 20 nm)を複数個光捕捉し、光圧によるナノ粒子の拡散運動の抑制を報告している [1]。本研究では、光圧により膜表在分子を単一分子レベルで操作することを目的とし、SLB に結合した蛍光性ポリスチレンナノ粒子 (PS 粒子)の光捕捉過程について検証した。

試料として、リン脂質 (DOPC)にビオチン結合脂質 (Biotin-PE)を 5.0×10^{-1} mol%の割合で添加した SLB を作製した。膜表在分子モデルとして、粒径 40 nm のストレプトアビジン修飾蛍光性 PS 粒子 (吸収ピーク波長: 580 nm、蛍光ピーク波長: 605 nm)を Biotin-PE に結合したものを用いた。波長 1064 nm の cw-Nd:YVO_4 レーザーを倒立型蛍光顕微鏡に導入し、100 倍油浸対物レンズ (N.A. 1.3)を用いて試料に集光した (Fig. 1(a))。PS 粒子の蛍光励起用光源として LED (励起波長 530–550 nm)を用い、qCMOS カメラで蛍光像を取得して一粒子追跡法 (SPT)により粒子動態を解析した。

取得した蛍光像において SLB 上の PS 粒子は並進拡散しており、SLB 上における PS 粒子の流動性が十分であることを確認した。SLB 上の PS 粒子にレーザーを集光したところ、集光領域において単一 PS 粒子が光捕捉される様子が見られた (Fig. 1(b))。SPT 解析により蛍光輝点の中心座標を推定し、粒子の位置揺らぎ幅を測定した (Fig. 1(c))。レーザー出力 100–200 mW において、粒子の位置揺らぎ幅はレーザー出力に依存して減少する傾向が見られた。同じレーザー出力において、水溶液に分散した単一 PS 粒子を光捕捉することは困難であったことから、SLB に結合した PS 粒子は低出力のレーザーで単一粒子の光捕捉が可能であることが示唆された。本成果は、光圧による細胞膜表在分子の動態制御に向けた重要な知見である。

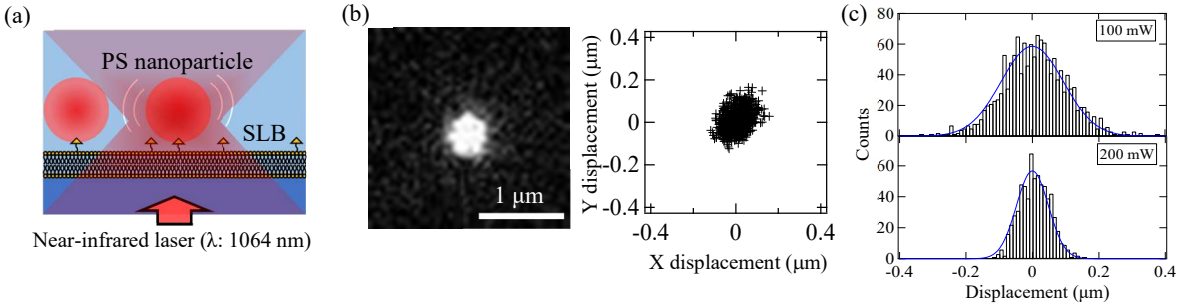


Fig. 1(a) Schematic image of optical trapping of single PS nanoparticles on SLB. (b) Fluorescence image (left) and the particle position plot (right) for a PS nanoparticle at laser power of 200 mW. The scale bar is 1 μm. (c) Particle position histograms of a PS nanoparticle along X–axis for two different laser powers. The laser power is 100 mW (upper) and 200 mW (lower), respectively.

[1] 森山俊哉他, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-K402-4 (2025).

© 2025年 応用物理学会

光発熱集合による量子ナノ材料の選択的捕集

Selective Collection of Quantum Nanomaterials by Photothermal Assembly

大阪公大院理[1]，大阪公大 LAC-SYS 研(RILACS)[2]，大阪公大院工[3]，関学大理[4]，
量子科研(QST)[5]，東京科大生命理工[6]
○鈴木啓太[1,2,3]，豊内秀一[1,2]，林康太[1,2,3]，田村守[2,4]，鈴木智達[5]，神長輝一[5]，
五十嵐龍治[5,6]，床波志保[2,3]，飯田琢也[1,2*]
Grad. Sch. Sci.[1], RILACS[2], Grad. Sch. Eng.[3] in Osaka Metro. Univ., Sch. Sci. in Kuwansei gakuin Univ.[4], QST.[5], Sch. Life Sci. and Tec. in Inst. Sci. Tokyo[6]
○Keita Suzuki[1,2,3], Shuichi Toyouchi[1,2], Kota Hayashi[1,2,3], Mamoru Tamura[2,4], Chihiro Suzuki[5], Kiichi Kaminaga[5], Ryuji Igarashi[5,6], Shiho Tokonami[2,3], Takuya Iida[1,2*]
*E-mail: t-iida@omu.ac.jp

蛍光ナノダイヤモンド(FND)は結晶構造内部の炭素原子の一部が窒素などに置換され、炭素原子が抜けた空孔と隣接して配列することで形成される欠陥により、不対電子のスピンを起源とする光学特性や磁気特性を有する。FND はこの特性を利用し、分子や細胞の状態を計測するナノ量子センサとして量子生命科学や分析化学分野などで重用されている。FND の製造方法の一つには爆轟法と呼ばれる、爆薬による高温高圧条件下で生成されるが、生成物には sp^2 カーボンなどの夾雑物や、欠陥を持たないナノダイヤモンドが一定数含まれており、高純度化のために選別を行う必要がある[1]。共鳴光誘起力による少数ナノダイヤモンド選別が報告されているが[2]、生成した FND の高純度化に向けてより多くのナノ材料を迅速に選別する方法が求められる。一方、光圧と光誘起流体効果を利用して微小物質を迅速かつ高密度に集める光濃縮が近年注目を集めており、例えば、基板上の金属薄膜へのレーザー照射による局所加熱で発生する光誘起対流と光誘起バブルにより分散液中の微小物質を計測部位に集積する光発熱集合はその一種として盛んに研究されている[3]。本研究では、夾雑物存在下のナノ材料を光発熱集合により選別し純度を高める機構解明を目的とし、光学系の調整によるバブルと対流の制御を通して、FND と夾雑物が混合した分散液から FND を選択的に捕集する事を試みた[4]。

NV センターを含有した FND と夾雑物のモデルとしての蛍光マイクロ粒子(FMP)が混合した分散液を、金薄膜平坦基板上に滴下し、その後下方から 1 分間レーザーを照射し光発熱集合を行った。Fig. 1.(a)のようにレーザーを集光する対物レンズの位置を調整することで、発生する光誘起バブルのサイズとそれに伴う周囲の対流が、試料液中の標的ナノ物質の物性によって異なることを明らかにした。結果、Fig. 1.(b)の蛍光像のように赤色蛍光の FND はレーザー照射領域の周囲に、黄緑色蛍光の FMP は光誘起バブルの外側に空間的に分かれて集積した。得られた成果は、レーザー照射条件を変化させるだけで光誘起バブルおよび対流の制御を可能とし、多様なナノ材料を対象とした光発熱集合による選別を行う手法として、ナノ量子材料の高純度化や分光法と組み合わせた高感度な物性分析技術に貢献するものである。

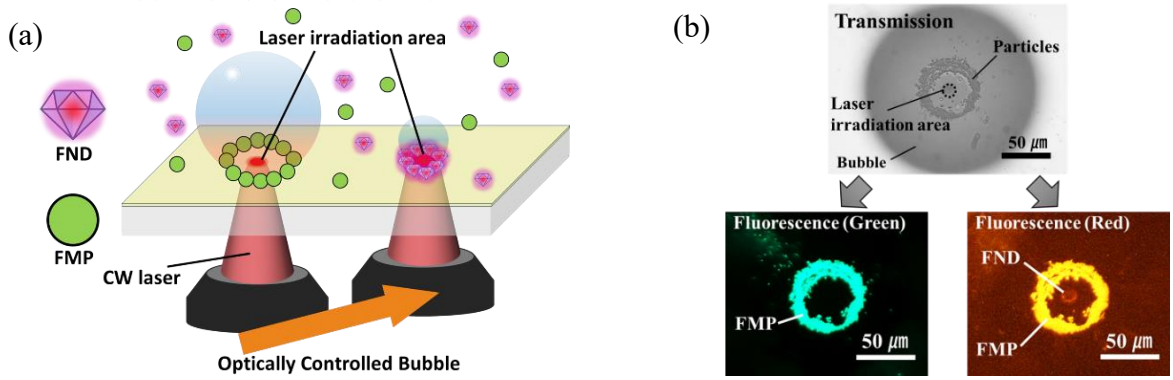


Fig. 1. (a) Schematic diagram of separate collection of nanodiamonds and microparticles by adjusting the laser irradiation area using photothermal assembly. (b) The transmission and fluorescence images of assembled nanodiamonds and microparticles.

[1] D. Terada, et al., *ACS Nano* **13**, 6 (2019). [2] H. Fujiwara, et al., *Sci. Adv.* **7**, 3 abd9551 (2021). [3] 飯田琢也, 応用物理学会<最近の展望>, 94 (5), 244 (2025). [4] K. Suzuki, S. Toyouchi, S. Tokonami, T. Iida, et al., submitted (2025).

© 2025年 応用物理学会

溶液セルを用いないレーザー支援電気泳動堆積システムの開発とビーム走査機構の搭載

Development of a laser-assisted electrophoretic deposition system without a liquid cell equipped with a beam scanning mechanism

静岡大工[1]，静岡大電研[2]　○(M2)田村 優樹[1]，中澤 謙太[1]，岩田 太[1,2]

Shizuoka Univ.[1], RIE. Shizuoka Univ.[2]

E-mail: iwata.futoshi@shizuoka.ac.jp

1. はじめに

近年，マイクロマシンなどの需要増加に伴い，様々な三次元微細造形技術の開発が盛んに行われている．三次元微細造形技術の 1 つに積層造形 (Additive Manufacturing: AM) 技術があり，マスクレスでの部品製造が可能であることに加え，造形の自由度が高く，複雑な三次元微細造形が可能である．我々は加工プロセスがシンプルかつ装置構成が低コストな金属微細立体造形技術であるレーザー支援電気泳動堆積法(laser-assisted electrophoretic deposition: LAEPD)[1-5]を開発している．この手法はレーザートラップと電気泳動堆積法を組み合わせた立体造形技術であり，上下の電極ガラスおよびスペーサで構成された溶液セルを使用することで実現できる．しかしながら，溶液セルを用いるために，使用可能な基板サイズと堆積可能な構造物の高さに制限があることや，堆積後に溶液セルをステージから取り外して乾燥工程を行なう必要があるなど，手法の改善が求められていた．

本研究では，対物レンズに電気泳動堆積を可能にする導電性ガラスを含むユニットを搭載することで溶液セルを使用しない LAEPD 法を開発した．本発表では，本手法の詳細および本システムに搭載したビーム走査機構を用いた立体構造物の堆積評価について報告する．

2. 実験方法と結果

Fig. 1 は本研究で開発した溶液セルを使用しない LAEPD の概略図であり，ユニットは対物レンズ側に搭載される．ユニットにはレーザートラップと電気泳動堆積法を実現するための酸化インジウムスズがスパッタされた導電性ガラス窓が取り付けられている．また，シリンジポンプによって金属ナノ微粒子を含むコロイド溶液をガラス窓と基板間に注入することで，溶液セルを使用せずにナノ微粒子を堆積できる．さらに，光学系にガルバノミラーを用いることで，ビームスポットを走査しながらステージを降下させることで立体造形が可能である．

Fig. 2 に開発した堆積システムで製作したピラミッド形状の構造物を示す．高さ 20 μm と 50 μm の 2 つのピラミッド形状の立体構造物が堆積できていることが分かる．このように本手法は従来の溶液セルによる基板側の制約（サイズの制限，セルからの取り出し作業および基板側ステージの走査など）を低減させた状態で，堆積を実現した．今後は，インプロセスでの熱処理機能[5]を搭載して，さらに高く複雑な構造物でも，変形させることなく堆積可能なプロセスを開発予定である．

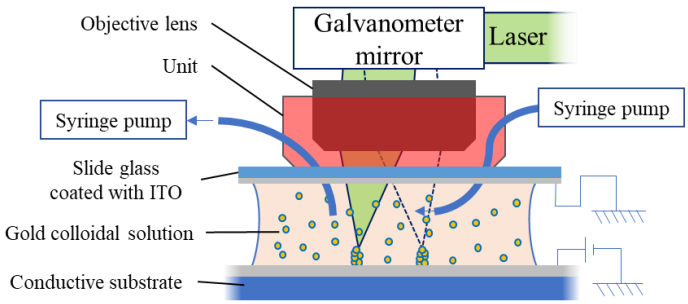


Fig. 1. Schematic of the LAEPD without using a liquid cell.

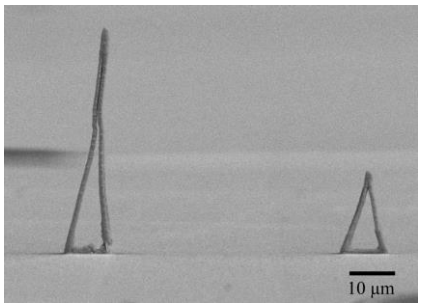


Fig. 2. SEM image of the pyramidal structures with height of; (a) 50 μm and (b) 20 μm.

1) F. Iwata, *et al.*, *Nanotechnology* **20**(23) (2009) 235303
2) T. Takai, H. Nakao, and F. Iwata, *Opt. Express* **22**(23) (2014) 28109-28117
3) T. Matsuura, T. Takai, and F. Iwata, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**(10) (2017) 105502
4) K. Nakazawa, S. Ozawa, and F. Iwata, *Nanomanufacturing and Metrology* **4**(4) (2021) 271-277
5) Y. Yoshimoto, K. Nakazawa, M. Ishikawa, A. Ono, and F. Iwata, Opt. Express 31(25) (2023) 41726-41739

© 2025年 応用物理学会

光圧による任意形状粒子の位置・姿勢制御に向けた力学応答サンプリング法の数値的検証

Numerical verification of dynamic response sampling method toward position-orientation control of particles of arbitrary shape with optical forces

東京大工[1] ○大峰 遼平[1], 増井 周造[1], 道畑 正岐[1], 高橋 哲[1]

The Univ. of Tokyo[1], ○Ryohei Omine[1], Shuzo Masui[1], Masaki Michihata[1], Satoru Takahashi[1]

E-mail: takahashi@nanolab.t.u-tokyo.ac.jp

光ピンセット[1]は微小物体を非接触・精密に操作できる強力な技術であり，位置・姿勢の制御手法について種々の研究がなされてきた[2,3]．一方で，既存手法の大多数は対象の形状が球や棒といった対称性の良いものに限定されており，光学応答が未知となる不規則形状物体には適用が難しい．例外としてホログラフィを用いた手法[4]も報告されているが，物体の 3D 屈折率分布計測・3D 光場生成を必要とし，また散乱体やサブ mm 級の大物体への適用は難しい．

そこで本研究では，力学応答サンプリング法と題する新たな手法を提案する（図 1）．本手法では，まずランダムなパターンの照射と速度・角速度の記録を繰り返すサンプリングステップを実行し，続いて，取得された速度・角速度の組の非負線形和のなかから所望の速度・角速度に最も近い組み合わせを選択し，その線形和の係数で照射パターンを時分割で重ね合わせて照射する制御ステップを実行することで所望の速度・角速度を付与する．本研究ではこの概念実証として，先行研究[5]で開発した光線追跡・動力学シミュレータを用いて，不規則形状粒子[6]に対して目標値に近い速度の付与に成功した（図 2）．発表では，シミュレーションの詳細について報告する．

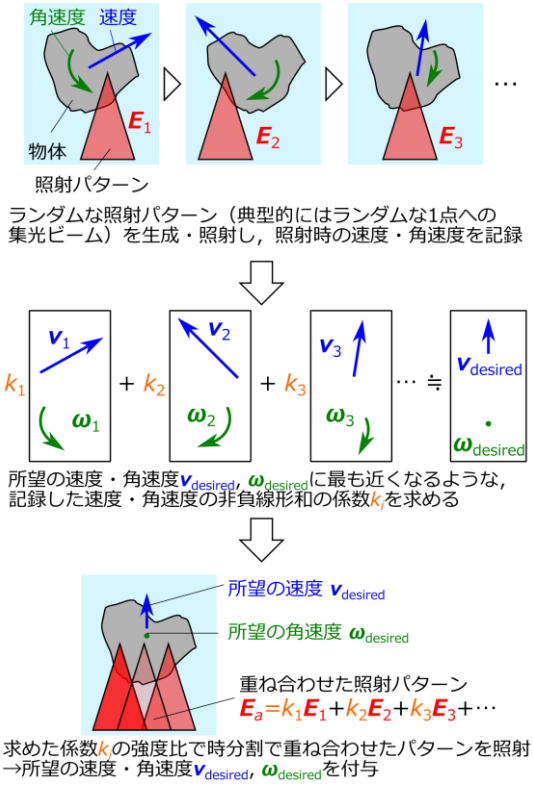


図 1 力学応答サンプリング法の原理

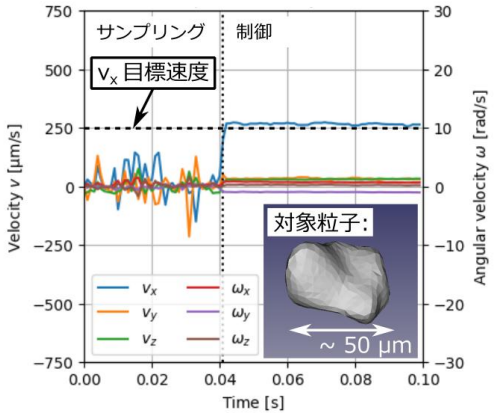


図 2 動解析シミュレーションによる力学応答サンプリング法の試行例

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP25KJ0848 の助成および里見奨学会の支援を受けて行われた．

[1] A. Ashkin *et al.*, Opt. Lett., vol. 11, no. 5, pp. 288–290, 1986. [2] Y. Tanaka *et al.*, Opt. Express, vol. 16, no. 19, pp. 15115–15122, 2008. [3] M. Xie *et al.*, IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 66, no. 1, pp. 199–207, 2019. [4] K. Kim and Y. Park, Nat. Commun., vol. 8, no. 15340, 2017. [5] 大峰遼平ら，第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 2025. [6] K. Muinonen and T. Pieniluoma, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, vol. 112, no. 11, pp. 1747–1752, Jul. 2011.

© 2025年 応用物理学会

相変化材料を用いた非熱侵襲的光熱電気流体ピンセット

Non-thermal invasive photo-thermoelectrofluidic tweezers using phase-change materials

慶大理工[1]，産総研 SFRC[2] ○(M2)安谷 錦之介[1]，畑山 祥吾[2]，牧野 孝太郎[2]，斎木敏治[1]

Keio Univ.[1], SFRC AIST.[2], ○Kinnosuke Yasutani[1], Shogo Hatayama[2], Kotaro Makino[2], Toshiharu Saiki[1]

E-mail: kinnosuke.yasutani@saiki.elec.keio.ac.jp

生体分子の多くはマイクロ～ナノスケールに存在する。そのような物体を自在に操作することができれば、バイオテクノロジー等への応用が期待できる。光ピンセットはマイクロスケール物体を効率的に操作・輸送する技術として盛んに研究されてきた。しかし、回折限界の関係でナノスケール物体の捕捉には制限があり、熱による対象の損傷も課題として挙げられる。そこで近年、交流電気熱流(AC-ElectroThermal)によりナノスケール粒子を長距離・高速輸送し、事前に形成されたプラズモニック構造物で捕捉するシステムが注目されている。ところが、このシステムも事前にプラズモニック構造物を形成する手間や、対象の捕捉箇所が構造物の形成箇所に制限されるため、光ピンセットと比べ対象物体の操作性で劣る欠点がある。加えて、熱損傷の問題は依然として解決できていない。

本研究では、相変化材料 $Ge_2Sb_2Te_5$(GST)に交流電界を印加した際に結晶化領域で生じる交流電気浸透流(AC-ElectroOsmosis)と、ACET の 2 つの流れを活用し、任意の箇所に作成した結晶化領域内で非熱侵襲的に粒子を操作することができる実験系を考察した。Fig.1 のような系において、アモルファス相の GST にパルスレーザーを照射することで部分的に結晶化領域を作成する。その後、交流電界を印加すると、作成した結晶化領域から生じる ACEO によって、粒子は結晶化領域内に捕捉される。同時に、 結晶化領域外部に CW レーザーを照射すると、レーザー照射部に向かう ACET が誘起されることで、Fig.2 のように CW レーザーの動きに追従して、結晶化領域内部で捕捉された粒子を非熱侵襲的に操作することができた。

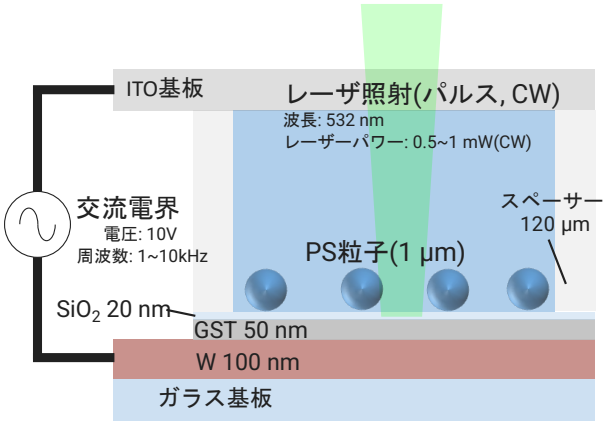


Fig.1 Experimental Setup

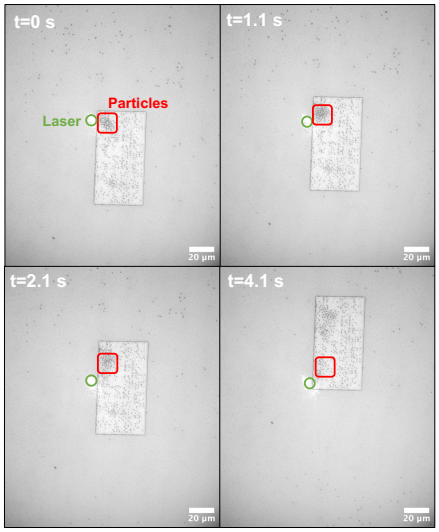


Fig2. Non-thermal invasive particle manipulation

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation : 3.2 Information photonics and image engineering

[8p-P06-1~6] 3.2 Information photonics and image engineering

[8p-P06-1]

Hologram transfer onto both sides of soda-lime silicate glass using DC voltage process

○Tomoya Nakanishi[1], Shintaro Hiratsuka[1], Daisuke Sakai[1], Kenji Harada[1] (1.kitami Inst.)

[8p-P06-2]

Optimization of Incident Angle and Exposure Time in a Volume Holographic Combiner

○Taiyo Kikuchi[1], Barada Daisuke[1,2] (1.Utsunomiya Univ., 2.Utsunomiya Univ Core)

[8p-P06-3]

Color Holographic Display Using Frequency Division Multiplexing

○Ryo Higashida[1], Masato Miura[1], Teruyoshi Nobukawa[1], Yuta Yamaguchi[1], Ken-ichi Aoshima[1], Nobuhiko Funabashi[1], Masahiro Yamaguchi[2] (1.NHK STRL, 2.Science Tokyo)

[8p-P06-4]

Verification of Stereopsis in Multi-View Naked-Eye Stereoscopic Holographic Screen

○Tomoyo Ota[1], Daisuke Barada[1,2] (1.Utsunomiya Univ., 2.CORE, Utsunomiya Univ.)

[8p-P06-5]

Wavefront Measurement by Coaxial Digital Ghost Holography

○Daisuke Hiraiwa[1], Saneto Matsuoka[1], Shuhei Yoshida[1] (1.Kindai Univ.)

[8p-P06-6]

Application of Si Photonics-Based Optical Encoder Device to Encryption Systems

○Ayana Mizuno[1], Makoto Nakai[1], Isamu Takai[1] (1.Toyota Central R&D Labs., Inc.)

直流電圧処理を用いたソーダ石灰ガラス両面へのホログラム転写

Hologram transfer onto both sides of soda-lime silicate glass using DC voltage process

北見工大　°(M2)中西 智也 (D1)平塚 心太朗, 酒井 大輔, 原田 建治
Kitami Inst. of Tech.
°Tomoya Nakanishi, Shintaro Hiratsuka, Daisuke Sakai, and Kenji Harada
E-mail: m3245300193@std.kitami-it.ac.jp

はじめに

ガラスは高い透過率を有し、さらに耐環境性に優れるため、現在では様々な製品に使われている。本研究室では、ソーダ石灰ガラスをホログラムの記録材料として用いるための研究を行ってきた。ガラスには一般的に感光性がないため、従来のホログラム記録方法を利用することは困難であるが、我々は従来の CW レーザー照射と、コロナ放電処理や直接電圧印加などの直流電圧処理を用いることで、ガラスにホログラムを転写可能であることを報告してきた[1]。本研究では、直流電圧処理を用いたガラスへのホログラム転写法により、ガラスの表面と裏面両方へのホログラム記録を行えるかについて研究を行った。ガラスの両面にホログラムを記録することで、転写される 2 種類のホログラムにより奥行き感を得ることを目的とする。

実験方法

はじめに、感光性材料であるアゾポリマーをソーダライムガラス上に製膜した。次にアゾポリマー上に Fig. 1(a)のマスクを施し、波長 532 nm の CW レーザーによる二光束干渉露光を行うことで、表面レリーフ型ホログラムを記録した。その後、加熱しながら+6 kV の直流電圧を加え、コロナ放電処理を行い、ガラスにホログラムを転写した。転写後はアセトンを用いた超音波洗浄によりアゾポリマーを除去した。その後、回折効率を増強するため、水酸化カリウム水溶液に浸し、エッチング処理を行った。次に、サンプルの裏面に Fig. 1(b)のマスクを施し、前述と同様の処理を実施した。

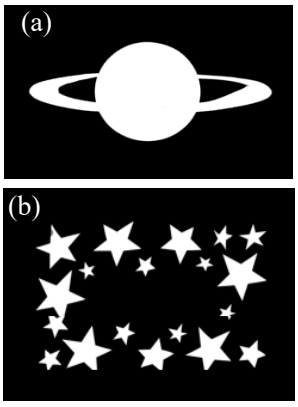


Fig. 1 Mask Pattern for the (a)surface and (b)reverse side.

実験結果

本実験で作製したホログラムを Fig. 2 に示す。表裏への 2 度の処理により、ガラスの両面にホログラムを転写できることが明らかとなった。両面に転写したホログラムはガラスの厚さにより、空間的な前後関係があるため、奥行き感を得られることが確認できた。

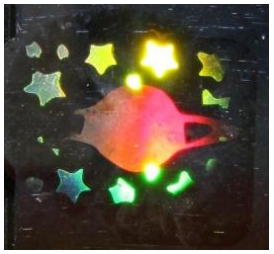


Fig. 2 Holograms transferred onto the glass substrate.

参考文献

[1] Daisuke Sakai. et al. PLoS ONE 14(1): e0210340 (2019).

© 2025年 応用物理学会

体積ホログラフィックコンバイナにおける入射角度と露光時間の最適化

Optimization of Incident Angle and Exposure Time in a Volume Holographic Combiner

宇大光工学[1]，宇大 CORE[2]　○菊地太陽[1]，茨田 大輔[2]

Opt., Eng, Utsunomiya Univ.[1] CORE, Utsunomiya Univ[2], ○Taiyo Kikuchi[1], Daisuke Barada[2]

E-mail: mc246558@s.utsunomiya-u.ac.jp

1.　はじめに

近年, AR や VR といった xR 技術が注目され, 発展してきている．AR は，実世界に仮想現実を重ね合わせ表示する技術のことである．　AR グラスもその一つで, 研究開発に携わる企業も増えてきている．今回は, この AR 技術に注目した．

先行研究では，「テーブル型体積ホログラフィックスクリーンの作製」という題で，コンバイナ部分をテーブル型にし, 角度多重露光やシフト多重露光を行うことで, 多視点からのホログラムの観察を可能にした[2].

しかし, 視点によって回折光の光強度に差があり視認性にばらつきが生じた．　そこで回折効率に影響を与える要素である入射角度と露光時間を調節することで, 全方向に同じ光強度で回折するコンバイナの作製を本研究の目的とした．

2.　実験方法

Fig.1 に実験光学系を示した. 波長が 532nm の ND:YAG laser を光源に用いた．　本研究では，感光材料としてフォトポリマーを用いた．　フォトポリマーと信号光の成す角を θ とする．　ミラー2 の位置と角度を調節することでフォトポリマーに対する入射角度を制御, フォトポリマーの上下左右方向の調整をすることでフォトポリマーへの位置と角度を調節することでフォトポリマーに対する入射角度を制御, フォトポリマーの上下左右方向の調整をすることでフォトポリマーへの入射位置を制御し露光を行う．

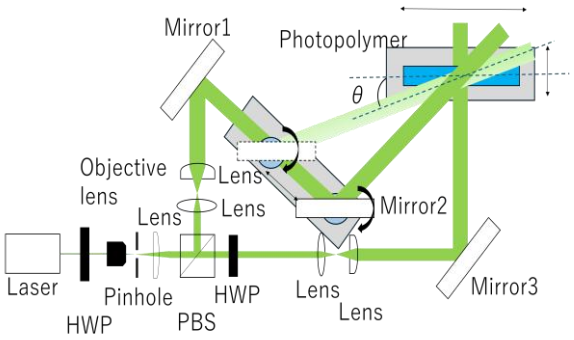


Fig. 1: Optical setup

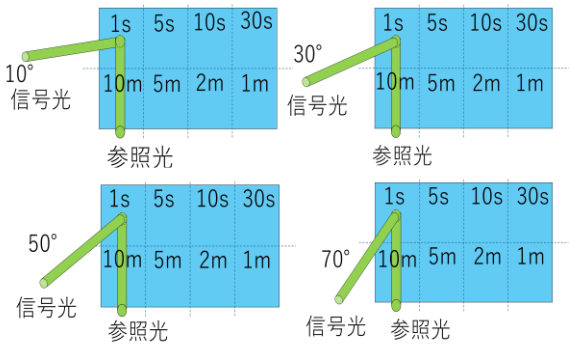


Fig. 2: Exposure method

Fig.2 のように位置ごとに露光時間を変えシフト多重露光を行う．　露光後のフォトポリマーに参照光のみを照射し, 回折光の光強度を測定する．

Table 1 Exposure time and light intensity for each incident angle

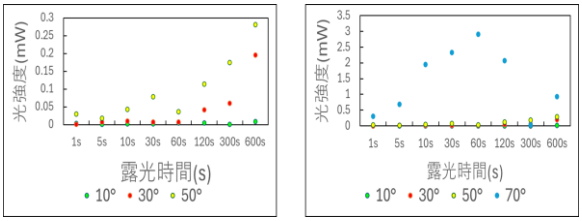


表 1 より露光時間と入射角度を増加させることで光強度が増加する傾向にあることが分かる．光強度が一様になる露光時間を角度ごとに選定し，光強度の均一化を実現した．

本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K06255 の助成によって行われました．

参考文献

[1]. T. Kikuchi D. Barada Isom 2024 Tu-PP-01 (2024)

© 2025年 応用物理学会

周波数分割多重によるカラーホログラフィックディスプレー

Color Holographic Display Using Frequency Division Multiplexing

NHK 技研 [1]，東京科学大学 [2] ○東田 諒 [1]，三浦 雅人 [1]，信川 輝吉 [1]，山口 祐太 [1]，
青島 賢一 [1]，船橋 信彦 [1]，山口 雅浩 [2]

NHK STRL [1], Science Tokyo [2], ○Ryo Higashida[1], Masato Miura[1], Teruyoshi Nobukawa[1],
Yuta Yamaguchi[1], Ken-ichi Aoshima[1], Nobuhiko Funabashi[1], Masahiro Yamaguchi[2]

E-mail: higashida.r-ii@nhk.or.jp

ホログラフィーにおける記録過程を計算機上でシミュレーションすることにより生成したホログラム(CGH)を、光の空間的な分布を制御可能な空間光変調器(SLM)に表示することで、動的なホログラフィック 3D ディスプレーを実現することができる。SLM に表示する CGH は、SLM 上での干渉縞の 2 次元分布であり、このようなホログラムには波長選択性がない。したがって、カラー映像の再生には、RGB 各チャネルの CGH をそれぞれ再生し、像を合成する必要がある。

本研究では、空間周波数領域において、各チャネルの CGH の帯域を制限し、それぞれ異なる周波数帯域に割り当てることで、視域を制限することを犠牲に、再生像をカラー化する技術を提案する。本手法は、追加の光学素子が不要で、1 枚の CGH でカラー化が可能である。一方で、視域が 1/3 に減少し、RGB 各光源から出る光を異なる角度から厳密に入射する必要がある。

提案手法について、CGH 生成時の各計算ステップにおける、空間周波数領域での信号の帯域を用いて説明する (Fig. 1) 。はじめに、CGH 面上での物体光の分布を各チャネルで計算する (Fig. 1(a)) 。ここで、CGH は共役像が発生する符号化であることを想定し、カラー化のために帯域を 1/3 に制限することに加え、共役像分離のために帯域をさらに 1/2 に制限する。また、波長によって最大回折角が異なるため、赤と緑の波長については、青色の波長の帯域に合わせて制限する。次に、チャネルに応じて異なる入射角の参照光の共役を乗算することで、信号をシフトする (Fig. 1(b)) 。つづいて、CGH の符号化により、複素数を実数に変換する (Fig. 1(c)) 。最後にすべてのチャネルの総和をとる (Fig. 1(d)) 。このように生成した CGH に、各波長の再生照明光を決められた角度から入射すると、中心位置にはカラー化された正しい像が再生される。発表では、提案手法によってカラー化した表面レリーフ CGH の再生像を示す。

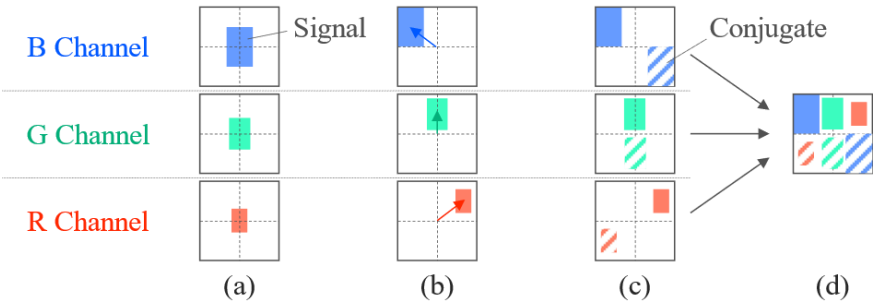


Fig. 1 Overview of the proposed method

(a) Propagation (b) Shift (c) Conversion (d) Summation

© 2025年 応用物理学会

多視点裸眼立体視ホログラフィックスクリーンにおける立体視の検証

Verification of Stereopsis in Multi-View Naked-Eye Stereoscopic Holographic Screen

宇大光工学[1]，宇大 CORE[2]　○太田 朋代[1]，茨田 大輔[1,2]

Opt. Eng., Utsunomiya Univ.[1], CORE, Utsunomiya Univ.[2], ○Tomoyo Ota[1], Daisuke Barada[1,2]

E-mail: mc246540@s.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

複数人同時視聴や様々な角度から表示された物体を観察することが可能なディスプレイの開発が行われている．両眼視差とは，両目の網膜に映る像のわずかな位置ずれにより奥行きを知覚することである．これを利用し，異なった角度から見た物体の複数枚画像を適切な位置で目に届くようにすることで立体視を得る（Fig.1）．これまでの研究で，体積ホログラフィックスクリーンを用いて 3 枚の画像を表示し，ある視点では画像 1 と画像 2，別の視点では画像 2 と画像 3 のように二つずつ両眼で同時に視認できるようにした．しかし，使用した 3 枚の画像は視差画像ではないため，単に別の画像の重ね合わせが視認できただけであり，立体視を得るには至っていなかった．そこで本研究では，適切な視差画像を作成し，立体視が得られるか検証することを目的とし，異なる角度から見た物体の複数枚画像の作成方法の検討を行う．

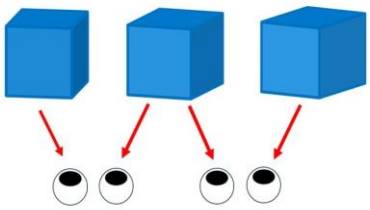


Fig. 1: Naked-eye stereopsis using binocular parallax

2. 視差画像作成

視差画像を生成するためには 3D モデルが必要になるが，本研究では LiDAR 機能付きカメラで距離計測することによって視差画像を作成した．カメラからの距離を変えて 3 個の箱を並べた．左側の箱が一番遠く，中央の箱が中間，右側の箱が一番カメラに近い位置に配置した.この 3 個の箱の深度データを LiDAR で取得し，深度データから点群を生成した．取得した点群の正面および側面から見た様子を Fig.2 に示す．この方法で取得した 3D モデルを視点を変えて画像化し，プロジェクターで体積ホログラフィックスクリーンに投影する．

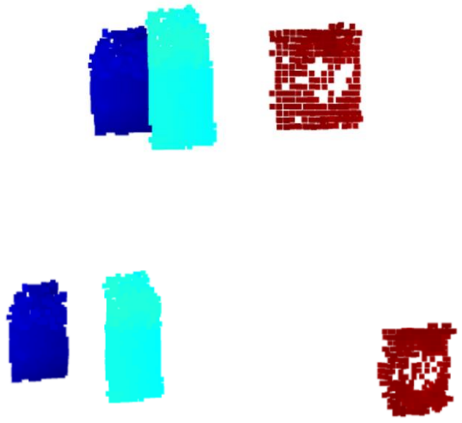


Fig.2: Point clouds generated from multiple views

本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K06255 の助成によって行われた．

参考文献

[1] T. Ota and D. Barada, ISOM’24, Tu-B-03 (2024)

© 2025年 応用物理学会

同軸型ディジタルゴーストホログラフィによる波面計測の検討

Wavefront Measurement by Coaxial Digital Ghost Holography

近畿大学大学院　○(M2)平岩大輔, (M2)松岡真杜, 吉田周平

Kindai Univ., ○Daisuke Hiraiwa, Saneto Matsuoka, Shuhei Yoshida

E-mail: 2433340456c@kindai.ac.jp

1. 序論

ゴーストイメージング(GI)はノイズ耐性と広い波長帯域への応用可能性から注目されている。特にディジタルホログラフィ(DH)の手法を応用したディジタルゴーストホログラフィ(DGH) [1]は、GI が有する様々な利点を生かした波面計測が可能である。しかし、DGH は光学系の複雑さから、その安定性に問題がある。本研究では、光学系の安定性向上を目的として、同軸型 DGH を検討した。

2. 方法

本研究で提案する同軸型 DGH の光学系を以下の Fig. 1 に示す。

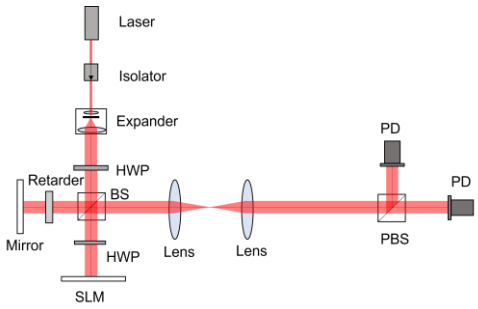
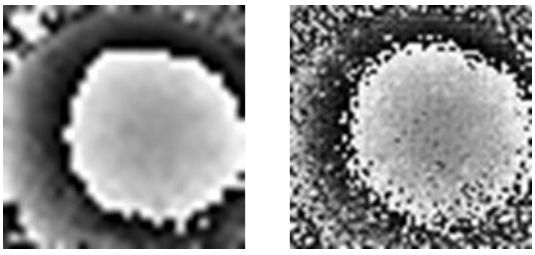


Fig. 1 Optics of coaxial DGH

提案手法では空間直交パターンにより位相変調された 45° 直線偏光と円偏光をビームスプリッタ(BS)により合波し、試料に照射する。試料を透過した光を偏光ビームスプリッタ(PBS)により分割し、それぞれの光強度をフォトダイオード(PD)により計測する。PBS で分割された干渉光の位相は互いに 90° ずれているため、それぞれを波面の実部と虚部の成分とすることで、波面を再構成することができる。本研究では原理検証を目的とし、光学系に試料を挿入せずに波面の計測を行った。

3. 結果

Fig. 2 に提案手法による波面の計測結果を示す。



(a)　　(b)

Fig. 2 Measurement results

Fig. 2(a), (b)はそれぞれ解像度を 32×32、64×64 とした位相の計測結果である。光学系の収差に由来する球面位相が測定できていることがわかる。

4. 結論

本研究では、同軸型 DGH の光学系を提案し、その有効性を実験により検証した。実験により、提案手法により安定した波面の計測が可能であることを示した。提案手法は従来の DGH 光学系と比較して安定した計測が可能となるため、様々な分野での応用が期待される。

参考文献

[1] P. Clemente, V. Durán, E. Tajahuerce, V. Torres-Company, J. Lancis, “Single-pixel digital ghost holography,” Phys. Rev. A 86 (4), 041803 (2012).

© 2025年 応用物理学会

Si フォトニクスによる光エンコーダ素子の暗号化システムへの応用検討

Application of Si Photonics-Based Optical Encoder Device to Encryption Systems

豊田中央研究所[1] ○水野 文菜[1], 中井 真琴[1], 高井 勇[1]

Toyota Central R&D Labs., Inc.[1], ○Ayana Mizuno[1], Makoto Nakai[1], Isamu Takai[1]

E-mail: ayana.mizuno.zy@mosk.tytlabs.co.jp

1. はじめに

近年、光の自然物理現象を計算資源として直接活用する光計算技術が注目されている[1]。この技術では、計算処理が高速かつ低消費電力で実施される。そのため、電子デバイスが直面している計算速度の限界や消費電力の増大といった課題を解決し得る、有望な次世代計算技術の一つと期待されている。

我々はこれまでに、Si フォトニクス技術を用いたエッジコンピュータ用の光計算（光エンコーダ）素子を試作し、基礎的な分類タスクに対する有効性を確認してきた[2, 3]。現在は、本素子の非線形な情報変換能力に注目し、新たな応用先への展開を検討している。本講演ではその応用先一つとして、試作した素子の暗号化システムへの適用可能性について検討した結果を報告する。

2. 試作素子と暗号化実験

試作した光エンコーダ素子の顕微鏡画像および暗号化実験システムの概要を Fig.1 に示す。暗号化のための送信信号（64bit デジタル信号）は、それぞれのビットが対応する 64 チャネルの位相変調器で光の位相へと変換され、光信号として素子に入力される。入力された光は、素子中央の干渉場において複雑に干渉し合い、入力とは全く異なる信号へと変換されて出力される。この結果、送信信号は暗号化される。暗号化信号は、DNN（Deep Neural Network）ベースのデコーダにより復号され、受信信号（64bit デジタル信号）として再構成される。DNN デコーダは暗号化信号を入力データ、送信信号を教師データとして学習されている。

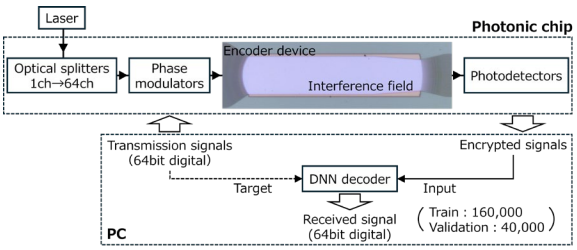


Fig.1 A schematic diagram of the experimental system with a microphotograph of the fabricated optical encoder.

本実験では検証用の送信データに対する復号成功率を評価することにより、本素子の暗号化システムへの適用可能性を見極めた。ASCII コードで表現できる文字列（種類数 : 10, 26, 32, 52, 94）を送信信号とした場合の復号成功率を Table 1 に示す。種類数の増加に伴い復号成功率は低下したものの、最も種類数が多い条件でも約 95 %という良好な結果が得られた。以上より、本素子の暗号化に対する有効性が確認され、暗号化システムへの適応可能性が示された。

Table1 The decoding success rate of ASCII codes.

Number of character types	Decoding success rates [%]
10（Digits）	99.9997
26（Lowercase letters）	99.9225
32（Printable symbols）	99.5554
52（Uppercase + lowercase letters）	98.7463
94（All ASCII charactors）	94.8594

参考文献

1) 砂田哲, “光ニューラルネットワーク”, 応用物理, 93, 336-341 (2024)
2) M. Nakai and I. Takai, CLEO2024, STh1K.4. (2024)
3) 高井勇, 中井真琴, 水野文菜, OPJ2024, 29aMS8 (2024)

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation : 3.3 Biomedical optics

[9p-P01-1~10] 3.3 Biomedical optics

[9p-P01-1]
Evaluation of reactive oxygen species generation by Au-TiO_2 composite nanoparticles for photodynamic therapy applications

○Junnosuke Azuma[1], Akihiro Furube[1] (1.Tokushima Univ.)

[9p-P01-2]
Label-free visualization of stress responses in cancer cells by photothermal microscopy

○Jun Miyazaki[1], Koji Okamoto[2] (1.Wakayama Univ., 2.Osaka Univ.)

[9p-P01-3]
Optical–thermal–mechanical energy conversion efficiency in photoacoustic spectroscopy

○Kira Nishino[1], Ryoichi Akiyoshi[1], Satoshi Ikeda[2], Kastuhiro Mikami[2] (1.Graduate School of Kindai Univ., 2.Kindai Unuv.)

[9p-P01-4]
Investigation of Pseudo-White Excitation in Laser Resonance Frequency Analysis

○Satoshi Ikeda[1], Kira Nishino[2], Katsuhiro Mikami[1] (1.Kindai Univ., 2.Grad. School of Kindai Univ.)

[9p-P01-5]
In Vivo Evaluation of Periacetabular Bone Density Using Laser Resonance Frequency Analysis in Total Hip Arthroplasty

○Katsuhiro Mikami[1], Takuto Hatakeyama[2], Asahi Sujino[2], Takeo Nagura[2], Daisuke Nakashima[2] (1.Kindai Univ., 2.Keio Univ.)

[9p-P01-6]
Frictional force evaluation of orthopedic implants using laser ultrasound

○(M1)Shogo Hashimoto[1], Katsuhiro Mikami[2], Asahi Suzino[3], Takeo Nagura[3], Daisuke Nakashima[3] (1.Graduate School of Kindai Univ., 2.Kindai Univ., 3.Keio Univ.)

[9p-P01-7]
Non-invasive blood component analysis by mid-infrared photoacoustic spectroscopy– Analysis of the type 1 diabetic spectra and its application to healthy subjects –

○Kosei Sasaki[1], Saiko Kino[1], Yuji Matsuura[1] (1.Tohoku Univ., Graduate School of Engineering)

[9p-P01-8]
The Effect of Anticoagulants on Disease Diagnosis Based on mid-Infrared Absorption Spectra of Plasma

○(M1)Yuta Yoshida[1], Saiko Kino[1], Masayuki Kanamori[2], Yuji Matsuura[1] (1.Tohoku Univ., Graduate School of Engineering, 2.Tohoku Univ., Graduate School of Medicine)

[9p-P01-9]
Measurement of Multiple Vibrational Modes of Resonance Raman Spectra Using a Femtosecond Pulse Oscillator

○Mariko Ishii[1], Takayuki Suzuki[1] (1.Meiji Univ.)

[9p-P01-10]

Arbitrary Compensation of Spectral Phase of Femtosecond Pulses Referred to Nonresonant Raman Spectra Generated from Biomolecules

○Yusei Kubo[1], Takayuki Suzuki[1] (1.Meiji Univ.)

光線力学療法応用を目指した Au-TiO_2 複合ナノ粒子による活性酸素種の発生評価

Evaluation of reactive oxygen species generation by Au-TiO_2 composite nanoparticles for photodynamic therapy applications

徳島大院理工[1] ○東 純ノ介[1], 古部 昭広[1]

Tokushima Univ,[1] ○Junnosuke Azuma[1], Akihiro Furube[1]

E-mail: c612536007@tokushima-u.ac.jp

【序】癌は世界的な健康問題であり、日本でも死因の第 1 位を占めている。従来の治療法には副作用や再発リスクがあり、新たな治療法が求められている。光線力学療法（PDT）は、光増感剤と光を用いて癌細胞を選択的に死滅させる治療法として注目されている。本研究では、新たな PDT 薬剤の探索のため光触媒特性を持つ酸化チタン（TiO_2）とプラズモン共鳴を持つ金ナノ粒子（AuNP）の複合ナノ粒子を光増感剤モデルとして作製して物性評価、活性酸素(ROS)発生評価を行った。また、粒子サイズは 100 nm 以下に制御することを目標とした。これは、がん細胞周辺の未熟な血管には約 100 nm の隙間が存在し、そこを通じて選択的に薬剤を送達できるためである。

【実験結果と考察】本研究で用いた複合ナノ粒子は、AuNP と TiO_2 の正負の表面電荷差に着目し、静電的相互作用により複合化を行った。FE-SEM 観察（Fig. 1）では、粒径が 100 nm 未満の複合ナノ粒子が確認された。溶液中での複合の有無を確認するために紫外可視吸収スペクトルを測定し（Fig. 2）、吸収ピークがレッドシフトすることを確認した。この変化は AuNP と TiO_2の相互作用によるもので、溶液中での複合化が確認された。TiO_2 が凝集した Au-TiO_2 複合ナノ粒子を用い、ROS 生成量を指示薬の吸光度により評価した（Fig. 3）。その結果、複合ナノ粒子の作製時に用いた TiO_2 の添加量が生成量に影響を及ぼすことが明らかとなった。TiO_2 を 5 mg および 10 mg 添加した 2 条件で比較したところ、5 mg の条件でより高い発生量が得られた。この理由としては、TiO_2 が少ない条件では 1 粒子あたりに複合する AuNP が相対的に多くなり、AuNP から TiO_2 への電子移動が効率的に進行したため、活性酸素種の生成が促進された可能性が考えられる。

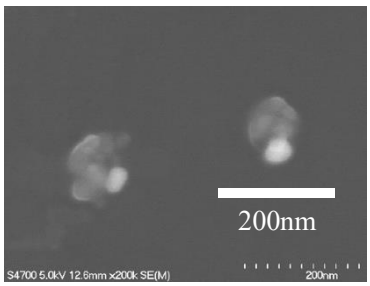


Fig. 1: SEM image of Au-TiO_2 composite nanoparticles

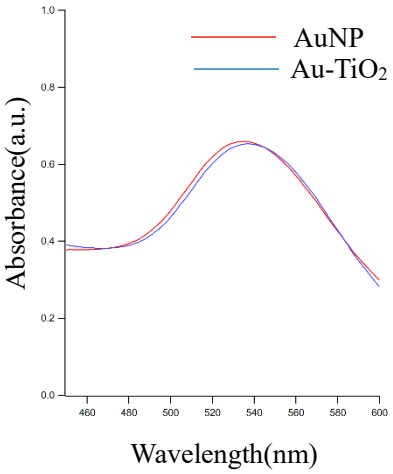


Fig. 2: Absorption spectra of AuNP, Au-TiO_2

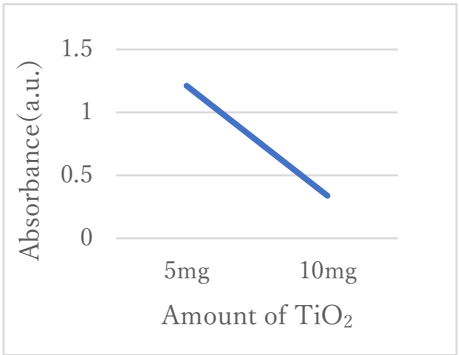


Fig. 3: ROS generation amount depending on TiO_2 addition amount

© 2025年 応用物理学会

光熱変換顕微鏡を用いたがん細胞のストレス応答機構の無標識イメージング

Label-free visualization of stress responses in cancer cells by photothermal microscopy

和歌山大システエ[1]，阪大生命機能[2] ○宮崎 淳[1]， 岡本 浩二[2]

Wakayama Univ.[1]， Osaka Univ.[2] ○Jun Miyazaki[1], Koji Okamoto[2]

E-mail: jmiya@wakayama-u.ac.jp

がん組織は血管新生が不完全であるため低酸素・低栄養などの劣悪な微小環境下に置かれており、多様なストレス応答機構を介して生存している。近年、このようなストレス環境ががんの悪性化および薬剤耐性の獲得に関与していることが報告されており、がん細胞特有のストレス応答機構を標的とする新規治療法の開発が注目を集めている。このような背景から、診断や薬剤スクリーニングに活用可能な、がん細胞のストレス応答を可視化する計測技術の確立が重要な課題とされている。

従来、細胞機能の計測には蛍光顕微鏡が広く用いられてきたが、観察には蛍光分子による標識が必要であり、その過程が細胞にストレスを与える可能性がある。細胞のストレス応答を正確に評価するためには、観察手法自体が細胞機能へ与える影響を最小限に抑える必要があり、より非侵襲的で信頼性の高い観察手法の開発が求められている。

本研究では、光熱変換顕微鏡（PTM）を用いて、分子標識を行うことなく、生きたがん細胞のストレス応答を可視化・評価することを目的とした。PTM は、光熱効果を介して細胞内に含まれる内因性色素の分布を高感度かつ高空間分解能で可視化できる手法であり、エネルギー代謝に関与するミトコンドリアや、細胞内分解機構を担うリソソームの観察が可能である。さらに、多波長計測により、吸収スペクトルに基づく分子種の識別や成分分析も可能である。

図には、グルコース欠乏環境下におけるヒト子宮頸がん細胞（HeLa）を対象に、PTM により生細胞を無標識で経時観察した結果を示す[1]。グルコース欠乏時には、がん細胞は ATP 産生経路を解糖系からミトコンドリア呼吸へとシフトさせることが知られており、それに伴いミトコンドリア内膜（クリステ）の密度が増加することが電子顕微鏡観察により報告されている[2]。本研究においても、グルコース欠乏によりミトコンドリア由来の PTM 信号強度が増加することが確認され、PTM 信号を指標としたミトコンドリア機能の定量評価の有用性が示唆された。加えて、リソソーム由来の信号強度の増加も観察され、PTM を用いることでオートファジー活性の非侵襲的な評価が可能であることが示された。発表では、さらに多波長 PTM 計測によって得られたリソソーム内容物の分子分析結果および、それに基づいて得られたストレス応答に関する新たな生物学的知見についても報告する。

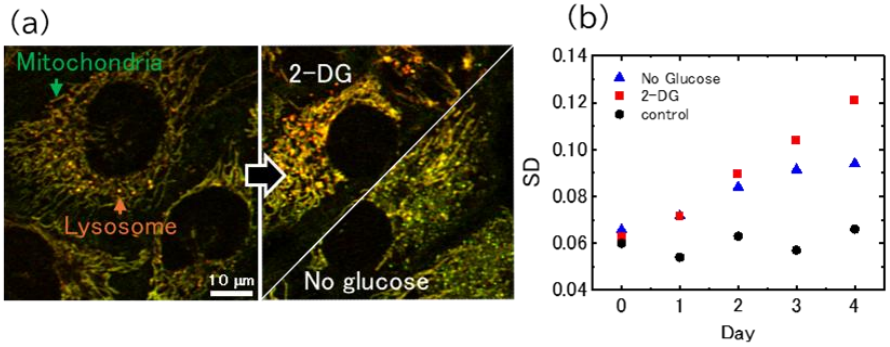


図 (a) グルコース不含培地およびグルコース代謝阻害剤（2-DG）が添加された培地中の HeLa 細胞の光熱変換顕微像。 (b)グルコース欠乏下でのミトコンドリアの PTM 信号強度の経時変化

[1] J. Miyazaki, R. Wagatsuma, and K. Okamoto, RSC Chem. Biol. **6**, 571-582 (2025).
[2] E. Balsa, M. S. Soustek, A. Thomas *et al*., Mol. Cell **74**, 877-890 (2019).

© 2025年 応用物理学会

光音響分光法における光－熱－運動エネルギー変換効率の検証

Optical–thermal–mechanical energy conversion efficiency in photoacoustic spectroscopy

近大院システム工[1]，近大生物理工[2] ○(M1)西野 輝宙[1]，秋吉 諒一[1]，池田 聖[2]，三上 勝大[2]

Graduate School of Kindai Univ.[1], Kindai Univ.[2], ◦Kira Nishino[1], Ryoichi Akiyoshi[1],

Satoshi Ikeda[2], Katsuhiro Mikami[2]

E-mail: 2533730022p@waka.kindai.ac.jp

光音響分光法 (Photoacoustic Spectroscopy : PAS)は、材料に照射されたレーザー光の吸収によって生じる熱弾性波を利用し、物理特性を非接触・非破壊で計測する技術である。我々の研究室では、PAS を利用したレーザー共鳴周波数解析という医療診断技術の開発を進めている。PAS では、光エネルギーが材料に吸収され熱エネルギーに変換され、さらに熱弾性波として運動エネルギーへと変換される。この光－熱－運動エネルギー変換の効率を定量的に把握することは、PAS の性能最適化や応用拡張において重要である。

本研究では、レーザー誘起振動に伴い生じる熱弾性波に着目し、光エネルギーから運動エネルギーへの変換効率を実験的に評価した。さらに、レーザー照射条件(duty 比)や材料の熱物性が変換効率に与える影響を検討し、物理メカニズムの解明を試みた。Fig.1 より、実験には直径 50 mm の金属円板を用い、励起光源として波長 405 nm および 780 nm、出力 50 mW、繰り返し周波数 2 kHz の半導体レーザーを使用した。表面振動はレーザードップラー振動計(LDV)で非接触測定し、速度および変位の信号を同時に取得した。信号はバンドパスフィルタで処理し、励起周波数に対応する成分を抽出、速度データと既知の質量から運動エネルギーを算出した。Fig.2 は、Cu, SUS304, Al を対象に、duty 比(0～100%)を変化させたときのレーザー加振力の変化を示す。さらに、エネルギーと仕事の関係式から発生力を推定した結果、力は数十 μN のオーダーであり、光－運動エネルギー変換が熱を媒介として成立していることが定量的に確認された。Cu および SUS304 では 50～60%付近で最大となり、熱拡散特性や吸収率が加振効率に大きく影響することが確認された。さらに、duty 比の変化に加え、レーザーの平均出力パワーを段階的に制御し、入力エネルギーと発生力の関係を詳細に評価した。さらに、熱物性の異なる材料を用いた実験により、光吸収量や熱拡散特性との関係を解析し、熱伝導率や比熱などのパラメータが変換効率に与える影響を明らかにした。

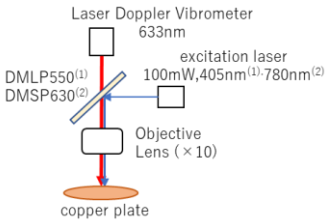


Fig.1 Experimental system

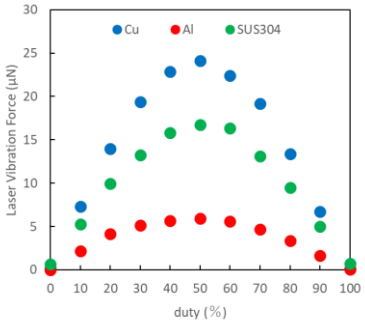


Fig. 2 Laser excitation force measurement results

© 2025年 応用物理学会

レーザー共鳴周波数解析における疑似白色性加振の検討

Investigation of Pseudo-White Excitation in Laser Resonance Frequency Analysis

近大生物理工[1]，近大院生物理工[2] ○(B)池田 聖[1]，西野 輝宙[2]，三上 勝大[1]

Kindai Univ.[1], Grad. School of Kindai Univ.[2] ○Satoshi Ikeda[1], Kira Nishino[2], Katsuhiro Mikami[1]

E-mail: 2118360032e@waka.kindai.ac.jp

我々は，レーザー共鳴周波数解析 (L-RFA) を医療分野に応用した診断技術の開発を進めている． その応用例として，整形外科用インプラントとして用いられる椎弓根スクリューの安定性評価や胃癌における胃壁の硬さ評価を報告している[1,2]．従来の L-RFA ではレーザーアブレーションによる振動を計測していたが，医療分野に応用するためには対象表面のわずかな損傷や生体への侵襲性を考慮する必要がある．そこで，低エネルギーレーザーパルスの繰り返し周波数をステップで掃引させることで固有振動と一致する周波数を増強させて計測する掃引加振方式が報告されている[3]．

この方式では，レーザーの繰り返し周波数をステップ状に時間ごとに変調させている．そのため，外乱ノイズがある時間に入ると特定の周波数の振動が強く検出される恐れがある．本研究では，ノイズに強い低エネルギーレーザーの加振方法を探索するため，複数の加振手法を実験的に評価により検討した． 初期実験として，擬似白色性加振を目指した M 系列信号を用いた変調による共振周波数解析を行った．実験配置図を Fig.1 に示す． 評価試料として直径 50 mm の銅円板を用い，振動源としてピエゾ素子を使用した． ピエゾ素子はクロック周波数 20 kHz，14 bit シフトレジスタによる M 系列信号で駆動した．表面振動はレーザードップラー振動計で速度変位信号を取得し，信号に高速フーリエ変換 (FFT) による解析を行った． Fig.2 に FFT による振動解析結果を示す． Fig.2 より，2200 Hz 付近に明確な固有振動ピークが見られる． この結果より M 系列信号による変調を用いた疑似白色性加振を行うことを実証した．この変調信号をレーザー光源に導入して評価を進めた． 詳細は講演に譲る．

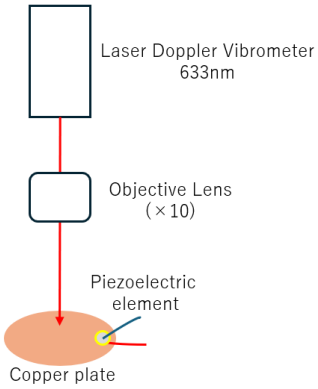


Fig.1 Experimental setup

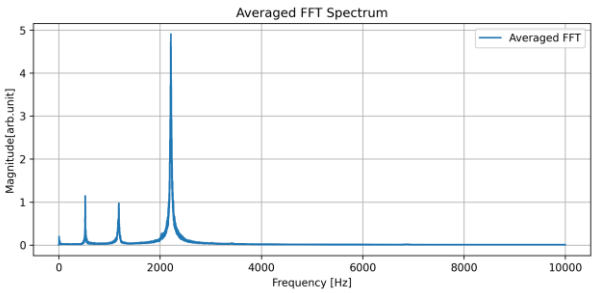


Fig.2 Vibrational spectrum of a copper plate excited by an M-sequence modulated piezoelectric element.

[1] T. Hatakeyama et al. *J. Ortho. Res.* 42(11) 2552 (2024).

[2] T. Furube et al. *Cancer Sci.* 116 143 (2025).

[3] K. Mikami et al. *Sensors* 22(13) 5025 (2022).

© 2025年 応用物理学会

人工股関節カップ周囲骨密度のレーザー共鳴周波数解析による術中評価

In Vivo Evaluation of Periacetabular Bone Density Using Laser Resonance Frequency Analysis in Total Hip Arthroplasty

近大生物理工[1]，慶大医[2] ○三上勝大[1]，畠山拓人[2]，筋野朝陽[2]，名倉武雄[2]，中島大輔[2]

Kindai Univ.[1], Keio Univ.[2], ○Katsuhiro Mikami[1], Takuto Hatakeyama[2], Asahi Sujino[2], Takeo Nagura[2], Daisuke Nakashima[2]

E-mail: kmikami@waka.kindai.ac.jp

高齢化社会の進展に伴い、変形性股関節症に対する人工股関節全置換術（total hip arthroplasty：THA）の施行件数は増加しており、術後の良好なインプラント固定と長期安定性の確保が重要な課題となっている。特に骨粗鬆症を有する患者においては、インプラント周囲骨の脆弱化によりカップの緩みや移動、骨折、骨癒合の遅延といった問題が顕在化しやすく、これらを早期に予測・回避するためには、術中におけるカップ周囲骨の質（骨密度）を正確に評価することが求められる。しかし、現行の骨密度評価法である X 線画像診断や DEXA（dual-energy X-ray absorptiometry）、あるいは術後 CT による評価は、いずれも術中に利用するには困難が伴い、リアルタイムな骨質把握には不十分である。

そこで我々は、非接触・非侵襲・低エネルギーかつ小型化を実現した新規レーザー共振周波数解析（Laser Resonance Frequency Analysis：L-RFA）装置を開発し、これを用いてカップ周囲骨の密度を術中に推定可能とする新たな診断手法の確立を目指した。本装置は、405nm の低出力レーザーを繰り返し周波数 2500‑4500Hz に変調して加振し、応答を小型マイクロフォンで計測した。実験は、模擬骨を用いた原理実証試験および臨床試験の 2 段階で構成され、前者では異なる密度のポリウレタンフォーム製模擬骨に THA 用カップを設置し、レーザーRFA による共振ピーク周波数と模擬骨密度との関係を検証した。後者では、23 名 25 股関節の THA 症例を対象とし、術前にファントム付き定量的 CT を撮像して骨密度を測定した上で、術中に開発装置を用いた RFA 計測を実施し、共振周波数と実測骨密度の相関を評価した。

その結果、模擬骨を用いた試験ではポリウレタンフォーム密度と共振周波数との間に高い正の相関（$r=0.728$, $p<0.001$）、臨床試験においてもカップ周囲骨密度と共振周波数に有意な正の相関（$r=0.619$, $p<0.001$）が確認された。また、骨密度群間における共振周波数の有意差も Kruskal‑Wallis 検定により検出され、術中リアルタイムでの骨質推定の可能性が示唆された。

本研究は、L-RFA によって得られる共振周波数がカップ周囲の骨密度を反映することを臨床で実証したものであり、本手法は、術中におけるスクリュー追加固定の判断材料や、術後のカップ緩みリスク予測の指標として有用である。さらに、非接触・非侵襲で再現性にも優れる本装置は、整形外科手術への実装可能性も高く、今後の臨床応用が期待される。

© 2025年 応用物理学会

レーザー超音波を用いた整形外科インプラントの摩擦力評価

Frictional force evaluation of orthopedic implants using laser ultrasound

近大院システム工学[1], 近大生物理工[2] 慶應医[3] ○(M1)橋本 匠吾[1], 三上 勝大[2], 筋野 朝陽[3], 名倉 武雄[3], 中島 大輔[3]

Graduate School of Kindai Univ.[1], Kindai Univ.[2] Keio Univ[3], Hashimoto Shogo[1], Katsuhiro Mikami[1], Asahi Sujino[3], Takeo Nagura[3], Daisuke Nakashima[3]

E-mail: 2533730021s@waka.kindai.ac.jp

整形外科領域におけるインプラント埋入術は、術者の手技感覚に依存しており、逸脱を防ぐためには定量的な診断技術の導入が求められている。これまで我々は埋入された椎弓根スクリューのネック部にパルスレーザーを照射し、レーザードップラ振動計によって計測した振動信号を高速フーリエ変換することで、共振周波数とスクリュートルクとの間に相関関係を得た[1]。これまで評価指標として用いてきたトルクは、摩擦力と軸力の合力で構成されており、その大半を占める摩擦成分の定量化が重要である。摩擦力の算出には、骨とスクリュー間の摩擦係数が必要となるが、臨床においては個人差もあり評価は困難である。摩擦力はトルク、軸力が既知であれば逆算可能であり、軸力は引張力に伴うボルトの軸長変化が発生するため、軸方向を往復する反射波から算出できる。そこで本研究ではレーザーアブレーションによる超音波領域の衝撃波を用いて軸力を測定し、摩擦の定量化を試みた。レーザー照射位置の制御によって底面からの反射波を強調できることをシミュレーション及びボルトを用いた実験で確認できたため、異なる骨密度を持つ模擬骨に椎弓根スクリューを埋入し、Fig.1 のように水平方向から照射、頭部での計測によって軸力測定および摩擦力の定量化を試みた。

その結果、Fig.2 のように反射波特性と骨密度との相関は認められず、スクリューの軸長変化は確認されなかった。すなわち、埋入時トルクには軸力成分がほとんど含まれておらず、その大部分が摩擦力に起因していることが示唆された。以上の結果よりこれまで安定性の評価指標として用いてきたトルクは摩擦情報を反映しており、インプラント安定性を評価する指標として有用であることが判明した。

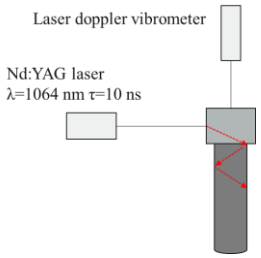


Fig.1 Laser ultrasound measurement methods

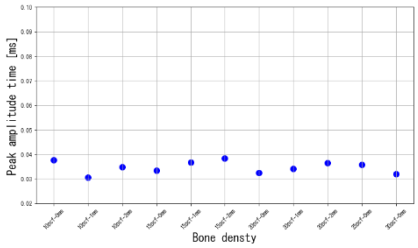


Fig.2 Correlation between reflected waves and bone density.

[1] Nakashima, Daisuke, et al. "Laser resonance frequency analysis of pedicle screw stability: A cadaveric model bone study." *Journal of Orthopaedic Research*® 39.11 (2021): 2474-2484.

© 2025年 応用物理学会

中赤外光音響分光法による非侵襲血中成分分析
－1 型糖尿病患者スペクトルの解析と健常者への応用－

Non-invasive blood component analysis by mid-infrared photoacoustic spectroscopy
－ Analysis of the type 1 diabetic spectra and its application to healthy subjects －

東北大　工，○(M1)佐々木康世，木野彩子，松浦祐司
Tohoku Univ., Graduate School of Engineering, ○Kosei Sasaki, Saiko Kino, Yuji Matsuura
E-mail: sasaki.kosei.r6@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

健常者と比較して，1 型糖尿病患者の血糖値は大きく変動するため，その光学吸収スペクトル上にも顕著な変化が現れる [1]．そこで，1 型糖尿病患者から取得した中赤外光音響スペクトルを解析し，その特徴を明らかにすることにより，そこで得られた知見を健常者に対する血糖値予測モデルの改善に応用できることが期待される．本報告では，スペクトルを部分最小二乗回帰（PLSR）分析する際に得られる重要波長域に着目し，それを健常者の解析に適用した結果について報告する．

2. 方法

図 1 に示す測定系で，波長可変量子カスケードレーザ(λ=8.3-10.8 μm, 出力 20 mW 程度)からの光を示指の腹部に照射し，光音響セル [2]を用いて信号を検出した．図 2 に代表例を示すように，1 型糖尿病患者から取得した光音響スペクトル（n=322）の形状は，脂質ピークを有するスペクトル（n=180）と脂質ピークを有さないスペクトル（n=142）に分類されることがわかった．それぞれの群について PLSR を適用すると，実測血糖値に対する決定係数 R^2 は前者で 0.31，後者で 0.82 となった．そこで，脂質ピークが現れない群について PLSR 解析を行って求めた変数重要度（VIP 値）を図 3 に示す．VIP 値はグルコースの C-H 変角運動に起因する 1085 cm^{-1} 付近で大きくなっていることが確認された．ここで VIP が 1.0 以上となった 32 波長を選定し，健常者の光音響スペクトル（n=10）に対し，この選定した波長のみに説明変数を限定し，PLSR 分析を実施した．なお健常者のデータ拡張のため，ガウスノイズを付加して疑似スペクトルを生成し，線形近似により血糖値を推定した計 50 サンプルを用い，学習データとテストデータの比は 7:3 と設定した．成分数を 2 で固定して PLS 回帰分析を 7 回実施し，決定係数が最大・最小の 2 回を除いた 5 回の平均で評価した結果を図 3 に示す．決定係数 R^2 は 0.56 となり，同じデータセットに対し，波数選定を行わずに同様の条件で得られた R^2=0.44 に対して，推定精度が大きく向上した．この結果は，1085 cm^{-1} 付近の情報が健常者の血糖値測定においても重要であることを示唆している．

<参考文献>

1)S. Shunta, et al., 85th JSAP Autumn Meeting (2024) 19a-P02-9.
2)M. Maeno, et al., Japan. J. Appl. Phys. 62, 072001 (2023).

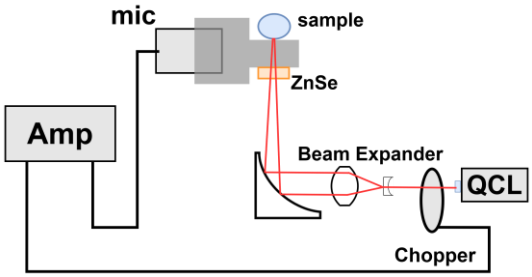


Fig.1 Outline of the measurement system

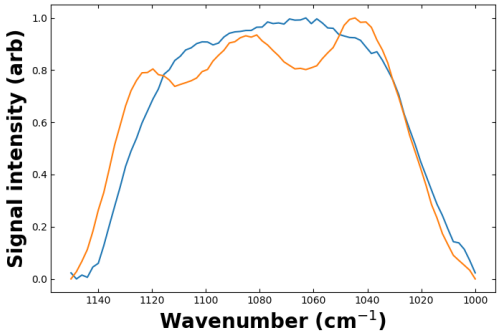


Fig.2 Comparison of photoacoustic spectra with and without lipid peaks

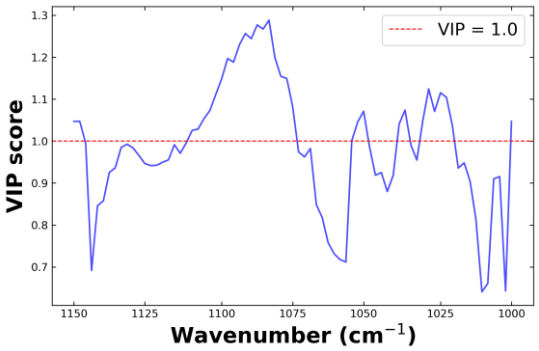


Fig.3 Visualization of VIP scores and thresholds used for wave number selection

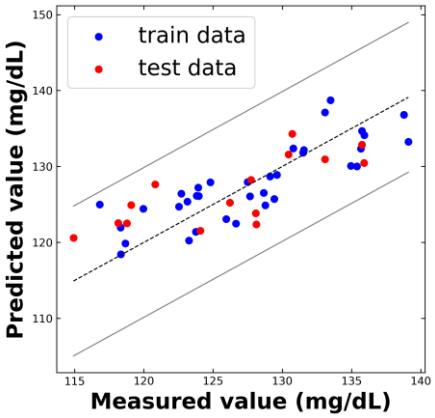


Fig.4 Results of PLS regression analysis (R^2_{test}=0.57)

© 2025年 応用物理学会

血漿の中赤外吸収スペクトルに基づく疾患判別における凝固防止剤の影響

The Effect of Anticoagulants on Disease Diagnosis Based on mid-Infrared Absorption Spectra of Plasma

東北大　工[1]，東北大　医学[2]　○(M1)吉田　優太[1]，木野　彩子[1]，金森　政之[2]，松浦　祐司[1]

Tohoku Univ., Graduate School of Engineering[1], Tohoku Univ., Graduate School of Medicine[2]

○Yuta Yoshida[1], Saiko Kino[1], Masayuki Kanamori1[2], Yuji Matsuura[1]

E-mail: yoshida.yuta.r8@dc.tohoku.ac.jp

1．目的

血液からの病態診断は低侵襲であり，特に脳腫瘍などの脳内疾患において実現が期待されている．中赤外減衰全反射（ATR）スペクトルは血中成分の分子構造を反映し，その多変量解析に基づく罹患/病態判別が可能となる[1]．しかし，血漿試料の調製過程で添加される凝固防止剤の種別が解析に影響を及ぼすことが考えられ，本報告では，凝固防止剤種別の脳腫瘍罹患判別への影響を評価し，その低減方法を検討する．

2．方法・結果

本研究ではフーリエ変換赤外分光光度計，多重反射ATR プリズム，HgCdTe 検出器から構成される測定系を使用した．凍結血漿試料を室温で 30 分以自然解凍したのち，20 µl をプリズム上面に塗布し，20 分以上乾燥後に空気をバックグラウンドとしてスペクトルを取得した．エチレンジアミン四酢酸（EDTA）処理血漿の脳腫瘍群 60 検体に対し，健常対照群としてクエン酸（Citrate Na）処理と EDTA 処理，各 30 検体を準備した．取得された ATR スペクトルの各群の平均を図 1 に示す．罹患の有無のみならず，凝固防止剤の種別によってもスペクトルの随所に差異が現れることがわかる．

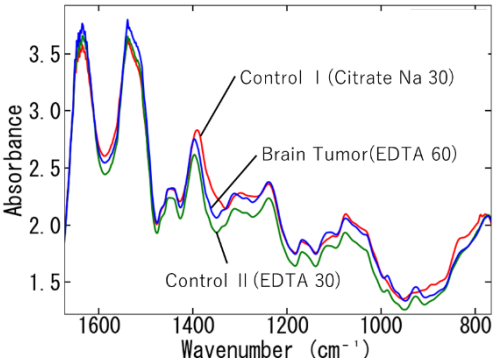


Fig.1 Group average of ATR spectra of plasma

罹患に伴うスペクトルの変化量を[対照群II（EDTA）vs 脳腫瘍群（EDTA）]の相関比 η1，凝固防止剤の種別に伴うスペクトルの変化量を[対照群I（Citrate Na）vs 対照群II（EDTA）]の相関比 η2 として波数ごとに評価し，図 2 に示す．相関比は（群間分散）÷（全体の分散）で定義され，1 に近いほど 2 群が明確に分かれ，スペクトルの変化量が大きいことになる．1400 cm^{-1} 付近のように η1＜η2 となる帯域では罹患より凝固防止剤種別の影響が大きく，罹患判別には適さない．

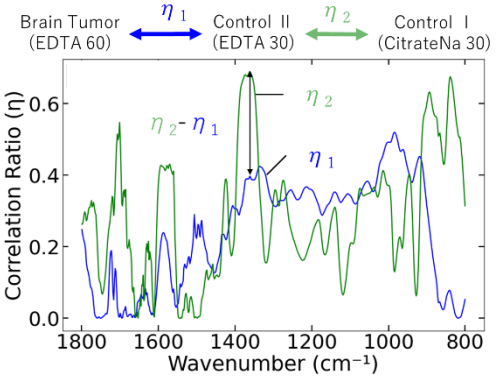


Fig.2 Correlation ratio

対照群I，IIの計 60 検体と脳腫瘍群 60 検体について，指紋領域 1800-840 cm^{-1} 内の各吸光度を説明変数とし，潜在変数 2 で部分最小二乗判別分析（PLS-DA）を行った．Leave-One-Out 交差検証に基づく 2 種類の判別の得点分布を図 3 に示す．(a)は指紋領域全域の 500 点，(b)は凝固防止剤種別の影響を低減するため，図 2 の相関比の差（η2 - η1），上位 50 個の波数を除去した 450 点の説明変数をそれぞれ用いている．(a)の陽性正解率は 88.3%であり，対照群の陰性正解率は Citrate Na が 90.0%，EDTA が 66.7%であったのに対し，(b)の陽性正解率は 96.7%であり，対照群の陰性正解率は Citrate Na が 90.0%と変わらず，EDTA が 70.0%に上昇した．説明変数の削減により陽性正解率が低下することはなくむしろ上昇し，凝固防止剤ごとの対照群の陰性正解率の偏りもわずかであるが軽減できた．凝固防止剤の影響を低減するための有効な手法であると考える．今後も引き続き波数除去の適切な範囲の調査を行いながら，さらなる凝固防止剤の影響の低減を試みる．

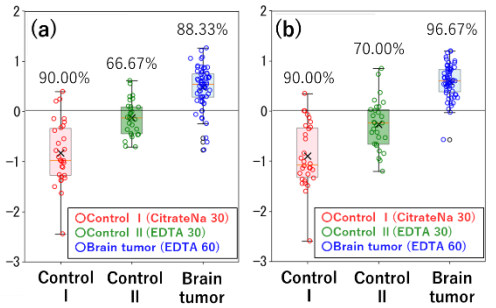


Fig.3 Distribution of diagnosis scores
(a)Before Variables elimination,
(b)After Variables elimination

参考文献 1　Kino *et al. BMC Cancer (2024) 24:222*

© 2025年 応用物理学会

フェムト秒パルス発振器を用いた
共鳴ラマンスペクトルの多振動モード一括測定

Measurement of Multiple Vibrational Modes of Resonance Raman Spectra Using a Femtosecond Pulse Oscillator

明大理工　○(M2)石井 万莉子，鈴木 隆行

Meiji Univ. ○Mariko Ishii, Takayuki Suzuki

E-mail: ce247014@meiji.ac.jp

１．背景・目的

現在、医療や生命科学分野における分子種ごとの濃度分布画像の取得では、対象分子を蛍光剤で染色(ラベル付け)する方法が主流である。この方法では、「小さい分子量の分子の観測が困難」、「長時間の観測が困難」、「同時に複数種類の観測が困難」などといった蛍光剤由来の制約がある。そこで我々は、Multiplex-CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering)分光法を採用し、分子の固有振動スペクトルを指標とすることで、ラベル付けが不要な観測法の実用化を進めてきた。特に広帯域な超短パルス光を用いることにより、あらゆる振動モードを一括励起・観測できる手法の開拓を行っている。しかし、Fig. 1(a)に示すような広帯域CARS過程では、Fig. 1(b)のような分子の振動準位を介さない非共鳴背景光 (Non-Resonant Background, NRB)が同時に発生してしまう。広帯域な超短パルス光を用いると、その尖頭出力の高さのために広帯域 NRB が強く発生し、CARS 信号を埋没させてしまう。そこで本研究では、NRB を除去しながら、ヘテロダイン検出の局部発振器として利用する位相敏感 CARS 分光法 [1]により、単一の光源で CARS スペクトルの観測を目指した。

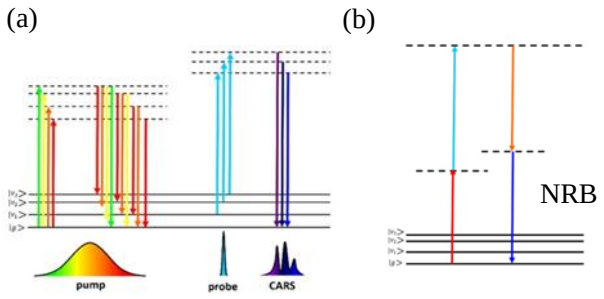


Fig. 1. Energy-level diagram of (a) CARS process. (b) NRB process.

２．方法

本研究の光学系を Fig. 2 に示す。光源は中心波長 820 nm のレーザーパルス発振器である。光源からの出力を 800 nm のショートパスフィルター(SPF)で、分子を振動励起するための pump 光と、CARS 散乱を観測するための probe 光に分割する。分割した probe 光は周期的に駆動させたピエゾ素子のついているミラーで反射することにより pump 光に対して位相変調をかけておく。また、800 nm のロングパスフィルター(LPF)を傾斜配置し、probe 光を 788 nm 付近の狭帯域成分になるようにする。pump 光および probe 光を同軸に調整し、焦点距離 20 mm のレンズで、厚さ 1 mm のガラスセルに集光する。ガラスセルからの透過光は SPF を通過させ、観測対象の波長帯域のみを分光器に導入する。NRB と CARS 信号が重畳したスペクトルデータを 50 回連続取得し、変位の大きい成分のみを抽出することで広帯域な CARS スペクトルを得る。

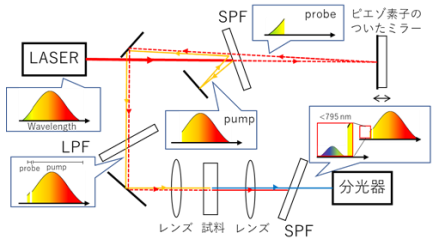


Fig. 2. Schematic of the Phase-Sensitive CARS setup.

３．結果

本研究では、クロロホルムをはじめとした試料を用いた。得られたスペクトルデータから解析を行った結果が Fig. 3 である。probe 光の波長である 788.5 nm を点線、得られたピークを実線で示している。クロロホルムは 261.6 cm^{-1}、366.6 cm^{-1}、667.8 cm^{-1} にラマンピークを持つことが知られており、高波数側の２つに対応する 371 cm^{-1} と 673 cm^{-1} にピークを観測することができた。CARS 信号の増強に利用している NRB の観測帯域は 942 cm^{-1} であり、787 cm^{-1} にラマンピークを持つアセトンも観測可能であると言える。

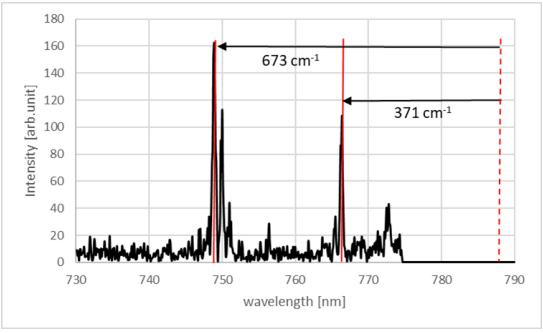


Fig. 3. Observed Raman spectrum of chloroform

参考文献

1) Takayuki Suzuki and Kazuhiko Misawa, Optics Express **19**, pp11463-11470 (2011).

© 2025年 応用物理学会

生体関連分子からの非共鳴ラマンスペクトルを参照したフェムト秒パルスの周波数位相の任意制御

Arbitrary Compensation of Spectral Phase of Femtosecond Pulses Referred to Nonresonant Raman Spectra Generated from Biomolecules

明大理工 ○(M1) 久保 雄誠，鈴木 隆行

Meiji Univ., ○Yusei Kubo[1], Takayuki Suzuki

E-mail: ce257004@meiji.ac.jp

超短パルスレーザー光はコヒーレントな広帯域光であるために、これを活用した広帯域な分光測定への応用が可能である。例えばコヒーレントアンチストークスラマン散乱(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering; CARS) 分光法に応用すれば、広帯域な振動スペクトルを一括で測定する Multiplex-CARS 分光法が可能となる。広帯域光に含まれる異なる 2 つの成分の周波数差が振動周波数に一致すれば対応する振動モードが励起できるが、同じ周波数差を持つ周波数の組は広帯域光の中に無数に存在する。同一の周波数差を与える周波数の組がすべて同じ位相差を持つときに、すべての振動励起が建設的に重なり合って起こるために最も効率的となる。この条件は超短パルスレーザー光がそのスペクトルで得られる最短のパルス幅を持つ状態であり、スペクトル位相の 2 次以降の成分がすべてゼロであると表現できる。現実の実験では、レンズやガラス製のサンプルセルなど様々な透過性媒質が光学路中に存在し、それらの屈折率分散のためにパルスが試料到達時には理想的なスペクトル位相にはなりえない。プリズム対やチャープミラーなどを駆使してある程度の分散を補償することが可能ではあるが、補償可能な量や（分散の次数などの）任意性に乏しく、完全な補償を実現することは困難である。この傾向は、パルス幅が短くなりスペクトル幅が広がるほど顕著であり、分光測定を広帯域化する場合に大きな問題となる。本研究では、任意の分散量をアダプティブに補償するために、4-*f* 配置のパルス整形器に注目した。これは周波数成分を空間的に分割し、空間光変調器(SLM)で個別に位相を変調できるため、広帯域光のスペクトル位相を 2 次以降の高次分散も含めて任意に設定できる。特に今回は、独自にパルス整形器を構成するとともに、そのスペクトル位相の制御の任意性を、パルスの時間波形の相互相関測定および媒質中での CARS 過程の非共鳴背景スペクトルの形状から検証した。

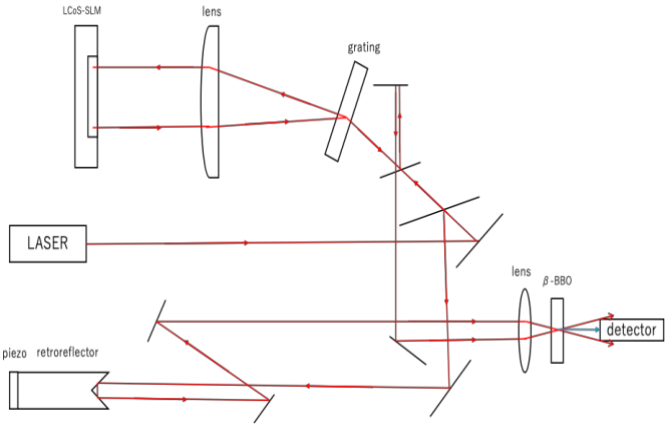


Fig. 1 Schematic diagram of Optical Setup

本研究で用いたパルス整形光学系の概略図を Fig. 1 に示す。まず、入射パルス光を透過型の回折格子に通すことによって周波数成分ごとに空間的に分解する。次に、平凸レンズに通して周波数分解された光を SLM の表面に周波数成分ごとに集光する。周波数成分に対応するピクセルの変調強度を変化させることで周波数成分ごとに独立した位相を付与する。その後、反射させた光を同様にレンズ、透過型回折格子と通し再び空間的に合成することにより入射パルス光の任意の周波数成分の位相を変化させたパルスを得る。フェムト秒領域の光パルスの時間波形を直接観測することは、計測器の応答速度の観点から困難である。そのため、光パルスを予めビームスプリッターで分けて参照パルスとし、整形パルスと参照パルスの和周波発生を利用した相互相関測定によりパルスの概形を測定する。2 つのパルスが時間的かつ空間的に重なったときに和周波光が発生する。参照光に時間遅延をかけていき、この光の強度を経時的に検出器で測定し、相関波形を観測できる。

一方、光パルスを分子試料に照射すると、様々な非共鳴相互作用が起こる。4 光波混合過程である非共鳴のラマン信号はそのうちの一つである。分子の信号モードを介さないこの過程では、得られる信号スペクトルは周波数軸で広がっている。非共鳴ラマン信号は同じ周波数の信号を発生させる複数の周波数の組が同一の位相を持つときに建設的に干渉し強め合う。広いスペクトル全体にわたって強め合うためには入射光パルスの位相が平坦である必要がある。Fig. 2 にクロロホルムを試験分子としたときの典型的な非共鳴ラマンスペクトルを示す。図は 2 次分散量としておよそ 150 fs2 違う光パルスを入射した際に観測されたスペクトルである。実際 760~780 [nm] 付近に明瞭な強度変化が観測できている。このスペクトルを参照し、分散量を最適化する。

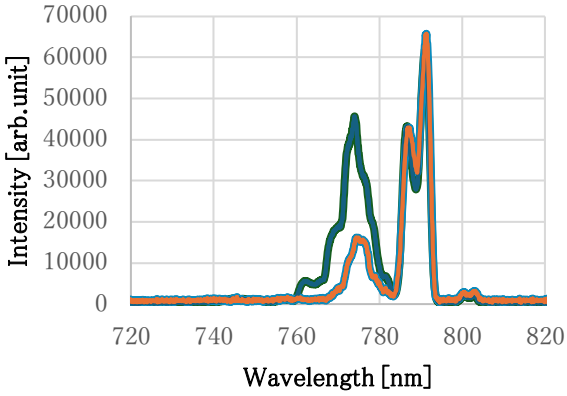


Fig. 2 Nonresonant Raman spectrum generated by pulses with different spectral

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.3 Biomedical optics

[10a-N104-1~9] 3.3 Biomedical optics

[10a-N104-1]

Imaging-formulation-based numerical speckle reduction for optical coherence tomography

○Xibo Wang[1], Shuichi Makita[1], Suzuyo Komeda[1], Nobuhisa Tateno[1], Cunyou Bao[1], Atsuko Furukawa[2], Satoshi Matsusaka[2], Makoto Kobayashi[3], Yoshiaki Yasuno[1] (1.COG Univ. Tsukuba, 2.I.C.M Univ. Tsukuba, 3.I.M Univ. Tsukuba)

[10a-N104-2]

Computational aberration correction and de-speckling for high-resolution, high-speed optical coherence tomography volumetric retinal imaging

○Shuichi Makita[1], Wang Xibo[1], Komeda Suzuyo[1], Yoshiaki Yasuno[1] (1.COG, Univ. Tsukuba)

[10a-N104-3]

Speckle reduced OCM using 1.7um quasi-supercontinuum laser source

○Ritna Shibayama[1], Futa Osaki[1], Shotaro Kitajima[1], Norihiko Nishizawa[1] (1.Nagoya Univ.)

[10a-N104-4]

Monitoring the effects of metal oxide nanoparticles on plant growth by using biospeckle Optical Coherence Tomography (bOCT)

○Riku Yabuki[1], Hirofumi Kadono[1] (1.Saitama Univ.)

[10a-N104-5]

Biospeckle optical coherence tomography (bOCT) visualizing the impact of silver nanoparticle size on internal activity of lentil seeds

○(D)Lavista Tyagi[1], Hirofumi Kadono[1], Uma Maheswari Rajagopalan[2] (1.Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Japan, 2.Innovative Global Program, Shibaura Institute of Technology, Japan)

[10a-N104-6]

Cross-sectional study on development of *in vivo* zebrafish by optical coherence tomography

○(M2)Cunyou Bao[1], Aiyi Sui[3], Ibrahim Abd El-Sadek[1,2], Rion Morishita[1], Shuichi Makita[1], Makoto Kobayashi[3], Yoshiaki Yasuno[1] (1.COG, Univ.Tsukuba, 2.Damietta Univ., 3.Inst. Med., Univ.Tsukuba)

[10a-N104-7]

Comprehensive *in vivo* polarization-sensitive imaging of zebrafish for ultrastructural assessment

○(D)Shadil Basheer[1], Yiheng Lim[1], Bao Cunyou[1], Ibrahim Abd El-Sadek[1,2], Makoto Kobayashi[3], Yoshiaki Yasuno[1] (1.COG, Univ. Tsukuba, 2.Damietta Univ., 3.Univ. Tsukuba Med)

[10a-N104-8]

Experimental investigations of dependence of the diameter of scatterers on circularly polarization of light scattered from biological tissues

○Mike Raj Maskey[1], Yoshimasa Ito[1], Kyosuke Murata[1], Koki Kasama[1], Asato Esumi[1], Takahiro Kuchimaru[2], Nozomi Nishizawa[1] (1.Kitasato Univ., 2.Jichi Med. Univ.)

[10a-N104-9]

Distribution measurement of squamous cell carcinoma using circularly polarized light scattering method

○(M2)Asato Esumi[1], Mike Raj Maskey[1], Yoshimasa Ito[1], Kyosuke Murata[1], Koki Kasama[1], Nozomi Nishizawa[1] (1.Kitasato Univ.)

Imaging-formulation-based numerical speckle reduction for optical coherence tomography

COG Univ. Tsukuba[1], Inst. Clin. Med. Univ. Tsukuba[2], Inst. Med., Univ. Tsukuba[3], °Xibo Wang[1], Shuichi Makita[1], Suzuyo Komeda[1], Nobuhisa Tateno[1], Cunyou Bao[1], Atsuko Furukawa[2], Satoshi Matsusaka[2], Makoto Kobayashi[3], Yoshiaki Yasuno[1]

E-mail: xibo.wang@cog-labs.org

1. Introduction

Due to the coherent nature of optical coherence tomography (OCT), speckle inevitably appears in OCT as a granular pattern. Speckle obscures the sample structure and effectively reduces the resolution of OCT. To address this issue, we proposed a numerical speckle reduction method for full-field swept-source OCT (FF-SS-OCT).

Our speckle reduction method is based on a new OCT imaging formulation which was introduced by Tomita et al [1]. In this formulation, an OCT is mathematically decomposed into an “incoherent OCT image” and “speckle.” The incoherent image is a convolution of the real-positive point spread function and the sample, while the speckle is described as a separate integral term. This model enables a clear definition of speckle and allows it to be manipulated independently of the incoherent image.

Based on this theory, we present a fully numerical speckle reduction method using complex image processing. By generating multiple OCT images with modulated speckle and averaging them, the speckle is reduced while preserving the resolution. We demonstrate this method using FF-SS-OCT data.

2. Method

The proposed speckle reduction method is fully numerical and based on complex image processing of OCT images. First, computational refocusing is applied to a complex *en face* OCT signal. Next, we compute the real part of the product between the in-focus complex OCT signal and its digitally shifted complex conjugate to obtain real-part of "shifted complex conjugate product" (SCCP). Because different shift amounts and directions cause varying speckle patterns in the real part of SCCP images while the incoherent OCT image is not modulated, averaging multiple real part of SCCPs effectively suppresses speckle without degrading resolution.

3. Experiment and Result

We adopted this speckle method for FF-SS-OCT with an 840-nm center wavelength of the probe. The lateral resolution is 1.4 μm according to Abbe’s criterion. To validate the effectiveness of the speckle reduction method, we used two biological samples: an MCF-7 human cancer spheroid and the eye of a fixed zebrafish.

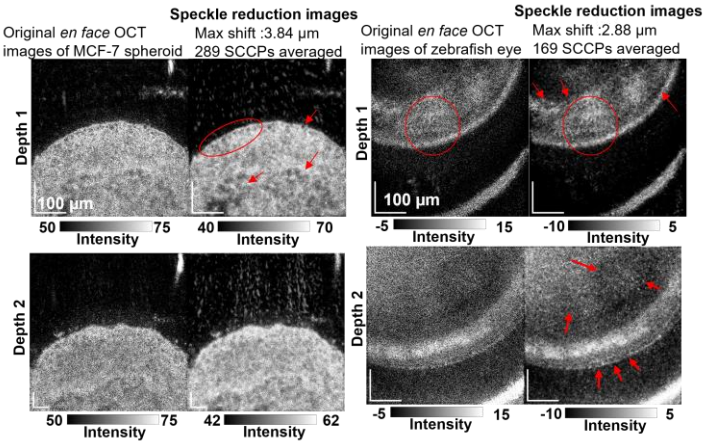


Figure 1: Original and speckle reduction images of spheroid and zebrafish eye.

Figure 1 demonstrates the speckle reduction. It shows the OCT images of spheroid and zebrafish eye at two different depths. The original images exhibit cellular structure but are obscured by speckle. In contrast, the speckle appearance is suppressed in speckle reduction images. And as highlighted by red circles and arrows, the speckle reduction image shows many microstructures becoming visible, which are not recognizable in the original image. In particular, the center part of the spheroid exhibits very clear dark cystic structures, which were indistinct in the original image. And small hole-like structures become visible at the edge of the zebrafish lens in the speckle reduction images. These observations indicate that our method effectively reduces speckle without degrading resolution.

4. Conclusion

We demonstrate a complex signal processing method to reduce speckle. The speckle reduction method effectively reduced speckle and revealed some microstructures which previously obscured by speckle.

References

[1] K. Tomita et al, Biomed. Opt. Express **14**(7), 3100–3124 (2023).

© 2025年 応用物理学会

Computational aberration correction and de-speckling for high-resolution, high-speed optical coherence tomography volumetric retinal imaging

COG, Univ. Tsukuba [1], ◦Shuichi Makita[1], Xibo Wang[1], Suzuyo Komeda[1], Yoshiaki Yasuno[1]

E-mail: shuichi.makita@cog-labs.org

1. Introduction

Vision is one of the most dominant senses in humans, and hence, its preservation is crucial for maintaining a high quality of life. The recent development of regenerative medicine opens up a door to regenerating the retina and restoring vision. Non-invasive assessment of the sensory retina is crucial for screening retinal diseases, monitoring treatments, and investigating the pathogenesis of retinal diseases and newly developed treatments.

Optical coherence tomography (OCT) is a widely used method for diagnosing retinal diseases. It's non-invasive, and high depth resolution enables the assessment of retinal layer thickness and morphological abnormalities. However, the lateral resolutions are limited by depth of focus and ocular aberrations. Furthermore, the coherent imaging nature of OCT exhibits speckle in its images. This deteriorates the practical spatial resolution. Thus, the cellular-level resolution of OCT requires an adaptive optics system to cancel wavefront errors and heavy averaging to suppress speckles.

In this study, we present computation-based aberration correction and de-speckling methods of OCT. Using the mathematical models of an aberrated OCT system and a speckled OCT image, we found a suitable computational method for aberration correction (CAC) and de-speckling (CDS). The numerical simulation of the models enables us to optimize these methods. We achieve high-quality 3D *in vivo* retinal OCT imaging with CAC and CDS with minimal hardware modifications and only a single acquisition.

2. Methods

The CDS algorithm is derived from the mathematical model of the OCT image with speckle using the dispersed scatter model [1] . The CAC method based on the bi-pupil OCT image formation theory [2] has been revised to adapt for CDS.

We used a prototype 1-µm swept-source OCT system for *in vivo* human retinal imaging. The A-line rate is 200 kHz. The beam diameter on the cornea is approximately 5 mm. A human eye has been scanned with a scanning range of approximately 0.3 × 0.3 mm in 0.5 seconds.

3. Results

The retinal images obtained by the system and processed with CAC and CDS are shown in Fig. 1. After applying CAC, blurred structures of nerve fiber bundle (blue), retinal capillaries (green), and cone photoreceptor tips (orange) have been sharpened up. Further application of CDS has revealed their fine structures.

4. Conclusion

The proposed computational method successfully reveals fine retinal structures without employing adaptive optics and heavy averaging.

References

[1] K. Tomita et al, Biomed. Opt. Express **14**(7), 3100–3124 (2023).
[2] S. Makita, et al, arXiv:2501.15011 (2025).

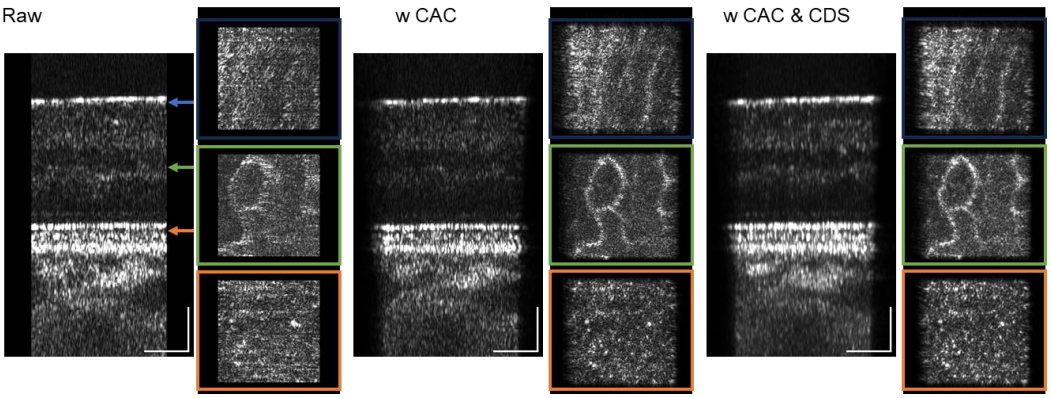


Fig. 1 OCT cross-section and *en-face* images of the retina with/without CAC and CDS. The scale bar represents 100 µm.

© 2025年 応用物理学会

波長 1.7um 帯擬似 SC 光源を用いたスペックル低減 OCM の開発

Speckle reduced OCM using 1.7um quasi-supercontinuum laser source

名大院工, ○(M1)柴山 凜太, 尾崎楓太, 北島将太郎, 西澤典彦

Nagoya Univ., ○Rinta Shibayama, Futa Osaki, Shotaro Kitajima, Norihiko Nishizawa

E-mail: shibayama.rinta.e4@s.mail.nagoya-u.ac.jp

１．研究背景・目的

光コヒーレンストモグラフィー(OCT)は、光の干渉を利用してサンプルを非破壊・非接触でイメージングすることができる技術である。OCT を発展させた技術として、光コヒーレンス顕微鏡(OCM)がある。OCM とは、OCT と共焦点顕微鏡を組み合わせることで構成されており、OCT よりも高分解能でのイメージングが可能である。スペックルノイズの低減は、OCT/OCM の課題の一つである。先に、本研究室では波長 1.7um 帯擬似 SC 光源を用いたスペックル低減 OCT の開発をした。[1] 本研究では、波長 1.7um 帯擬似 SC 光源を用いたスペックル低減 OCM の開発を行い、より高分解能なイメージングを行った。

２．実験方法

擬似 SC 光源の構成を Fig.1(a)に、擬似 SC によって得られたスペクトルを(b)に示した。擬似 SC によってスペクトルの異なる 7 つの波形を生成し、OCM に入力した。サンプルとして豚の甲状腺を用いて断面のイメージングを行い得られたイメージを平均化した。また、豚の甲状腺のイメージから強度分布をとり横分解能の評価をした。

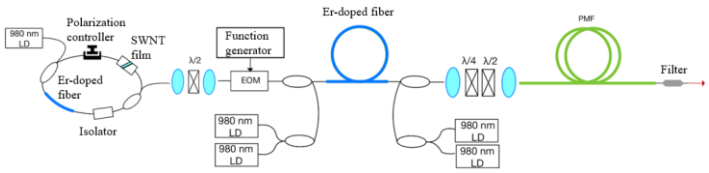
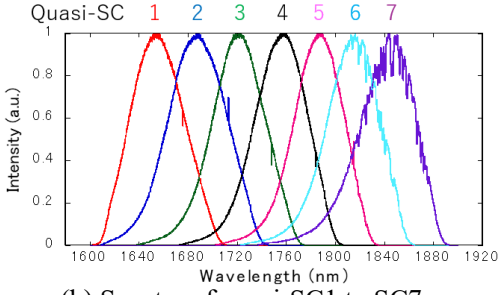


Fig.1(a) Experiment setup for quasi-SC fiber laser source



(b) Spectra of quasi-SC1 to SC7

３．結果

Figure 2(a)には、中心波長 1850nm の擬似 SC 光源を用いたイメージを、(b-d)には、それぞれ 2, 4, 7 種類のスペクトルによるイメージで、平均化を行った結果を示す。信号とノイズの比を表す Signal to Noise Ratio (SNR)は、平均化を行った結果 Fig.2(a)では 20.9、(b-d)ではそれぞれ 27.9, 38.4, 49.3 になり、スペックルノイズが低減されたイメージを得ることができた。

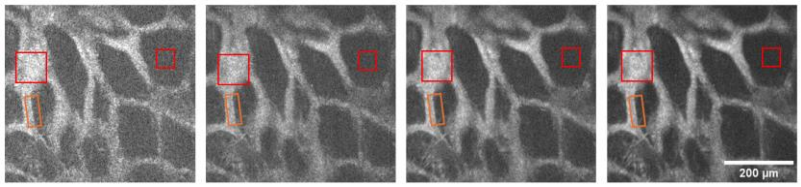


Fig.2(a) (b) (c) (d)

(a) OCM images of pig thyroid using quasi-SC5

(b-d) Compounded images averaging number n = 2, 4, 7

	Fig.2(a)	(b)	(c)	(d)
SNR= $\langle I_s \rangle / \sigma_b$	20.9	27.9	38.4	49.3
Lateral resolution (um)	2.20	2.61	2.59	2.61

[1] Ying Chen, Masahito Yamanaka, Norihiko Nishizawa, “Speckle-reduced optical coherence tomography using tunable quasi-supercontinuum source,” *Photonics* ***10****(12), 1338 (2023).*

© 2025年 応用物理学会

バイオスペックル光断層画像法(bOCT)を用いた金属酸化物ナノ粒子の植物成長に対する影響計測

Monitoring the effects of metal oxide nanoparticles on plant growth by using biospeckle Optical Coherence Tomography (bOCT)

埼玉大学，○(M2)矢吹 陸，門野 博史

Saitama Univ., ○Riku Yabuki, Hirofumi Kadono

E-mail: r.yabuki.351@ms.saitama-u.ac.jp

【はじめに】 ナノ材料は，農業，工業，医薬などの分野で普及し，その大きさ，形状，用量によって植物に異なる影響を与えるため，ナノ材料に対する植物の反応を計測する技術は重要である．我々が独自に開発した「バイオスペックル光断層画像法(bOCT)」は，生体に光が入射したときに細胞内の微小構造体などの変動・変位により散乱した光の干渉により生じる，ランダムで動的な斑点模様「バイオスペックル」を，試料の断層画像を得る光干渉法である OCT に応用した計測手法である．bOCT は生体試料の内部活性を，非接触，非破壊，かつリアルタイムに計測することができる [1, 2]．我々の先行研究では，重金属などによる環境ストレスが種子の発芽に与える影響を，bOCT および統計干渉法(SIT)による成長挙動計測をおこなってきた [1, 2, 3]．本研究では，重金属粒子の 1 つである酸化亜鉛(ZnO)が，植物の葉の成長に与える影響を計測することを目的として，異なる濃度(25ppm, 100ppm)の ZnO ナノ粒子(<50nm)およびミクロン粒子(<5μm)に暴露し，レンズ豆の葉の内部活性を bOCT により計測し，ZnO 粒子の与える影響のサイズおよび濃度依存性を調べた．

【実験】 Fig. 1 は，本実験で使用した bOCT の光学系である．光源には中心波長 1.3 μm，バンド幅 130 nm の波長掃引光源を用いており，光学系の深さ分解能は 6 μm である．OCT 断層画像は 12.5 fps で計 100 枚取得し，バイオスペックルにより生じる干渉信号の強度の時間的な変化を計測する．N個のスペックル画像および強度$I_{OCT}(x,y)$の干渉信号を得たとき，画像内の点(x,y)におけるバイオスペックルコントラスト$\gamma(x,y)$は次式で表される．

$$\gamma(x,y)=\frac{1}{\langle I_{OCT}(x,y)\rangle}\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left\{I_{OCT}(x,y;\,t_j)-\langle I_{OCT}(x,y)\rangle\right\}^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ただし，$\langle I_{OCT}(x,y)\rangle$は干渉強度の全観測時間に渡る時間平均であり，次式で表される．

$$\langle I_{OCT}(x,y)\rangle=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}I_{OCT}(x,y;\,t_j) \quad (2)$$

これまでに，バイオスペックルコントラストと内部活性に相関があることを実証している [1, 2]．内部活性を定量的に評価できる．サンプルには発芽後のレンズ豆の葉(発芽後 2-3 週齢) を用い，ZnO 粒子の暴露から 0, 6, 24 時間後にスペックルコントラストの計測をおこなった．

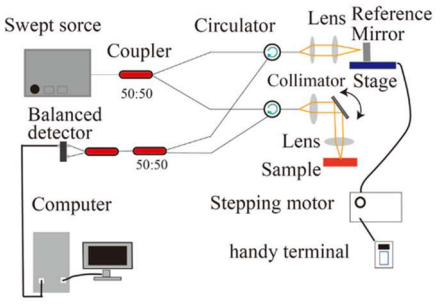


Fig. 1 Schematic of bOCT system

【結果と考察】 レンズ豆を，ZnO ナノ・ミクロン粒子にそれぞれ暴露した結果，どちらもスペックルコントラストが低下した(Fig. 2)．ナノ粒子の場合，Control と比較したときの 6 時間後のコントラストの平均は，低濃度(25ppm)の暴露では 4% (Fig. 3, ○)，高濃度(100ppm)では 3% (Fig. 3, ●)の減少だったが，24 時間後にはそれぞれ 14%, 13% 減少した．一方，ミクロン粒子の場合，6 時間後には 10% (Fig. 3, □)，16% (Fig. 3, ■)の減少，24 時間後には 21%, 26%の減少が観測された．これらの結果は，ZnO 粒子が葉の内部活性を抑制し，粒径の大きさによりその効果が増すことを示している．これは，ZnO 粒子が過剰な Zn として細胞内に取り込まれ，ストレス反応を誘発していることに加え，ミクロン粒子(<5μm)がレンズ豆の細孔(約 4~8μm)を透過しにくく，物理的な障害となっており，水分や養分の吸収を阻害している可能性がある．我々の統計干渉法(SIT)を用いた先行研究では，レンズ豆の葉の成長に対して，低濃度の ZnO ナノ・ミクロン粒子は悪影響を示したが，高濃度の ZnO ナノ粒子は好影響を示した [3]．本研究と比較すると，葉の微小な成長挙動と内部活性は必ずしも対応せず，異なる結果を示している．この違いは，植物の成長メカニズムと，ナノ粒子との相互作用の複雑さを表しており，現象の解明には更なる研究が必要である．

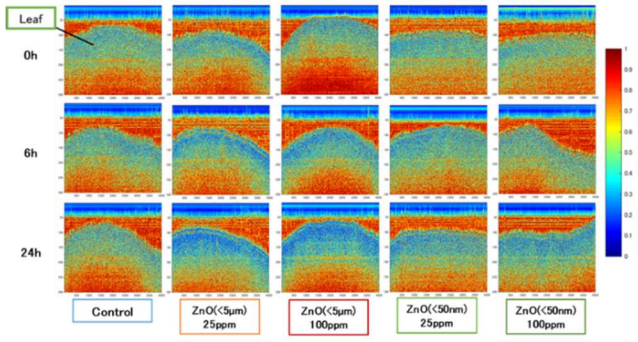


Fig. 2 bOCT image of lentil leaves under ZnO exposure

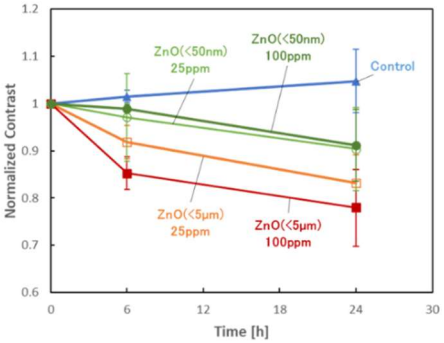


Fig. 3 Normalized contrast of bOCT image under ZnO exposure

[1] Li et al., Appl. Sci. (2022). [2] Lavista et al., SPIE Photonics Europe (2024). [3] 矢吹 他，第 72 回応物春, 15p-K306-2 (2025).

© 2025年 応用物理学会

Biospeckle optical coherence tomography (bOCT) visualizing the impact of silver nanoparticle size on internal activity of lentil seeds

Tyagi Lavista[1], H. Kadono [1*], R. Uma Maheswari [2]
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Japan[1]; Innovative Global Program, Shibaura Institute of Technology, Japan[2],
E-mail: kadono@mail.saitama-u.ac.jp

1. Introduction

The rapid integration of nanoparticles (NPs) into various sectors, including agriculture, healthcare, and manufacturing, has raised concerns about their interactions with living organisms, particularly plants. Silver (Ag) NPs, renowned for their antimicrobial properties and widespread use in industry and biomedicine, are of particular interest because they can penetrate seed coats and affect cellular mechanisms during germination, underscoring their size-related impacts. This study utilizes biospeckle optical coherence tomography (bOCT), a non-contact, non-destructive, in vivo technique that visualizes and quantifies changes in internal physiological activity, to monitor lentil (*Lens culinaris*) seeds exposed to Ag NPs of various sizes during germination. Our earlier study effectively confirmed its ability to assess the size-dependent effects of CuO and Cu metal NPs on lentil seeds, indicating a substantial negative impact of smaller CuO and Cu NPs (<50 nm, 25 nm) at 100 mg/L, while larger particles (10 µm, 10-25 µm) showed positive effects [1,2,3].

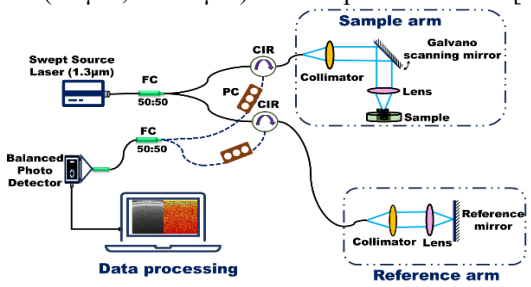


Fig.1. Schematic diagram of the OCT experimental system

2. Experiments and Discussion

Figure 1 shows the bOCT experimental system, which uses a swept source with a 1.3 µm central wavelength and a 130 nm bandwidth. The system provides an axial resolution of 6 µm and a lateral resolution of 39 µm. OCT images of the seeds were acquired at a rate of 12.5 frames per second, resulting in 100 cross-sectional images acquired within 8 seconds. While the conventional OCT delivers only an anatomical information, bOCT captures intensity fluctuations at each pixel along the temporal axis, which are associated with the cellular activity of tissue. The degree of fluctuation is quantified by the biospeckle contrast γ, defined as the ratio of the standard deviation of the intensity to its mean value at each pixel along the temporal axis over the total scan, and is calculated using the following equation,

$$\gamma(x,y) = \frac{1}{<I_{OCT}(x,y)>}\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\{I_{OCT}(x,y,t_j) - < I_{OCT}(x,y) >\}^2\right]^{\frac{1}{2}},$$

$$< I_{OCT}(x,y) >= \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} I_{OCT}(x,y,t_j),$$

where x and y are pixel coordinates, j is the scan index, and N is the total number of scans. Lentil seeds were exposed to Ag particles of three different sizes (100 nm, 2-3.5 µm, and 10 µm) at concentrations of 25 and 100 mg/L. bOCT measurements were performed at 0, 6, 24, and 48 hours. The average biospeckle contrast is calculated beneath the seed surface and normalized to the initial values to avoid variations between the samples (see Figs. 2a and b). At 25 mg/L (Fig. 2a), a significant decrease in biospeckle contrast was observed in seeds treated with smaller Ag particles (100 nm and 2-3.5 µm), with an early significant decay observed just after 6 hours of exposure for the 2-3.5 µm particles, indicating a rapid and pronounced inhibitory effect by smaller particles. In contrast, seeds exposed to 10 µm particles showed no significant changes compared to the control up to 24 hours, but exhibited a significant reduction in biospeckle contrast at 48 hours. At 100 mg/L (Fig. 2b), a similar trend was observed, with the smaller particles (100 nm and 2-3.5 µm) showing the most pronounced negative effects throughout the experiment. Meanwhile, larger particles (10 µm) again only led to significant reductions in biospeckle contrast at 48 hours.

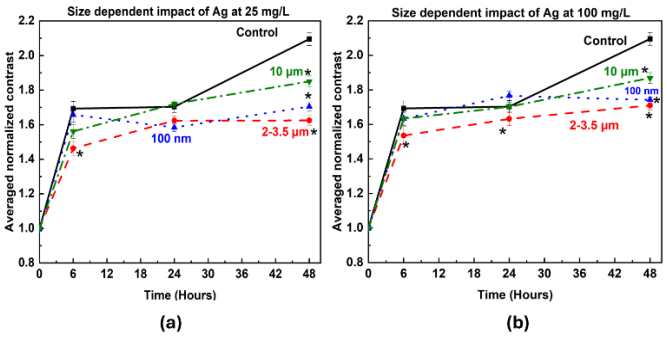


Fig. 2 Averaged normalized bOCT contrast in lentil seeds exposed to Ag NPs at (a) 25 mg/L, (b) 100 mg/L. *$p<0.05$ indicates statistical significance.

3. Conclusion

This study demonstrates the validity of bOCT for monitoring the effects of Ag NPs on the internal activity of lentil seeds. Ag particles of all tested sizes caused a substantial reduction in seed activity after 48 hours at both 25 and 100 mg/L. Interestingly, 2-3.5 µm particles induced significant changes as early as 6 hours, likely due to their ability to block seed pores (lentil ~4 µm) and limit internal processes. The 100 nm particles also had a marked effect, probably due to enhanced penetration and cellular interaction, while the 10 µm particles showed delayed toxicity, possibly due to aggregation, limited penetration, and slower Ag^+ ion release. In contrast, our previous study with Cu particles showed that larger sizes (10-25 µm) had a positive effect even at higher concentrations, whereas smaller Cu particles (25 nm) consistently had adverse effects at similar concentrations. Importantly, Ag is a toxic trace metal, whereas Cu is a vital plant micronutrient, likely to explain their contrasting effects. These findings highlight that NP's effects are highly dependent on both material and size. The bOCT method effectively revealed these size-dependent impacts within 48 hours of exposure.

References:

[1] L Tyagi, H Kadono, U M Rajagopalan, *AppliedPhys.* 2025; 1(1):1.
[2] L Tyagi, H Kadono, U M Rajagopalan, OIE'25 Proceedings, Finland.
[3] L Tyagi, H Kadono, U M Rajagopalan, JSAP 2025 Spring Meeting

© 2025年 応用物理学会

Cross-sectional study on development of *in vivo* zebrafish by optical coherence tomography

Computational Optics Group, Univ. of Tsukuba [1], Faculty of Science, Damietta Univ., Egypt[2], Institute of Medicine, Univ. of Tsukuba[3], ○Cunyou Bao[1], Aiyi Sui[3], Ibrahim Abd El-Sadek[1,2], Rion Morishita[1], Shuichi Makita[1], Makoto Kobayashi[3], Yoshiaki Yasuno[1]

E-mail: cunyou.bao@cog-labs.org

We demonstrate cross-sectional optical coherence tomography (OCT) imaging on investigating the developmental process in zebrafish. The study spans a two-week to five-week developmental period, with dynamic OCT, polarization sensitive contrast and conventional scattering OCT generated. This non-invasive approach enabled visualization of tissue development in zebrafish, particularly highlighting the pigmentation changes and spinal cord development.

1. Introduction

Zebrafish is an established vertebrate model in modern biological research with competitive advantages over mammalian models[1], such as its high reproductive capacity, rapid maturation time and high genetic similarity to humans. These advantages make zebrafish a powerful model for investigating the mechanics underlying tissue development and regeneration. Optical coherence tomography (OCT) and its contrast extension enabling non-invasive volumetric imaging of *in vivo* zebrafish. Polarization-sensitive OCT (PS-OCT) and OCT angiography (OCTA) have enabled the visualization and quantification of the spine and blood vessel networks in zebrafish, respectively [2] [3]. Additionally, the recently emerging dynamic OCT (DOCT) reveals the scatterers' motion and visualizes the intratissue activities. In this presentation, we develop an *in vivo* zebrafish measurement protocol and reconstruct images of DOCT, scattering OCT, PS-OCT and OCTA at different time points to investigate the development process of zebrafish development.

2. Method

A 1.3-μm Jones-matrix swept-source OCT with lateral and axial resolutions of 18.1 μm and 14 μm, respectively, was used to measure larva zebrafish at four time points in this study. The fish was partially soaked in a low-concentration anesthetic solution (0.016% tricaine) as it was scanned sequentially by two protocols. One protocol is a frame-repeat raster scan[4] for OCTA and PS-OCT that scans each location four times in 51.2 ms. And the other one is a volume-repeat raster scan specialized for DOCT [5], which scans each location 32 times in 6.55s. Along the surface, detected by a intensity-based threshold mask, we generated the *en face* slab projection images at skin and spinal regions to further investigate the developmental process on pigmentation and the spinal cord.

3. Results

Figure 1 summarizes the *en face* slab projection images at skin and spinal region spans two-week to five-week period. In the skin region, the scattering signal increases over time, while the stripe pattern appears at 3-week time point and becomes obviously in DOCT images (LIV and $OCDS_1$) [Fig.1 (a) (b) (c)]. And in degree of polarization uniformity (DOPU) images, the low signals consist of the same stripe pattern and its region increases over time [Fig. 1 (d)]. In the spinal region, the spinal cord and vessel structures appear at 3-week point and exhibit high scattering and DOCT signals [Fig. 1 (e) (f) (g)], and the spinal cord is growing along time while vessels become complex. And in OCTA images, the vessel structures are revealed by OCTA images and are becoming complex as observed in LIV images.

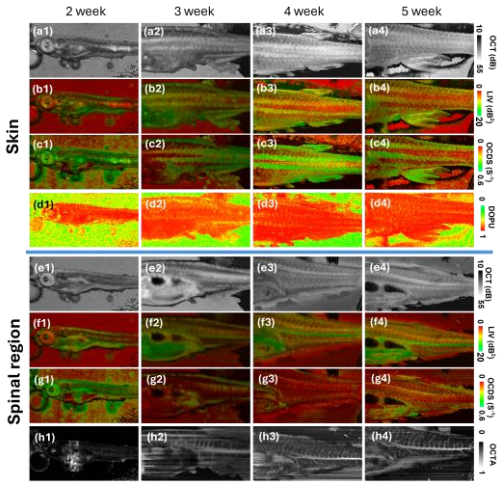


Figure 1: Slab projection images at skin and spinal region.

4. Conclusion

By applying DOCT and the other tissue-specific contrast, the depth-resolved tissue activities, especially the pigmentation and spinal cord growth process, in *in vivo* zebrafish have been observed at different developmental stages through a non-invasive method.

Reference

1) Lichtenegger, A., Baumann, Bioengineering 10(1), 5 (2022). 2) Yang, D., Biomedical Optics Express 11(10), 5618 (2020). 3) Kim, J., Bioengineering 10(5), 538 (2023). 4) Abd El-Sadek, I., Biomedical Optics Express 11(11), 6231 (2020). 5) Makita, S., Biomedical Optics Express 7(4), 1525 (2016).

© 2025年 応用物理学会

Comprehensive *in vivo* polarization-sensitive imaging of zebrafish for ultrastructural assessment

COG Univ. Tsukuba[1], Damietta Univ. [2], Univ. Tsukuba Med[3], Shadil Basheer[1] *, Yiheng Lim[1], Bao Cunyou[1], Ibrahim Abd El-Sadek[1,2], Makoto Kobayashi[3], Yoshiaki Yasuno[1]
E-mail: shadil.basheer@cog-labs.org

We present comprehensive *in vivo* polarization-sensitive imaging of zebrafish using Jones matrix optical coherence tomography (JM-OCT) for ultrastructural assessment. By utilizing contrasts such as birefringence, degree of polarization uniformity (DOPU), and optic axis orientation, the system reveals polarization-based information of zebrafish ultrastructure.

Introduction

Zebrafish are important models in biomedicine due to their genetic similarity to humans, cost-effectiveness, and high fertility [1]. Traditional imaging methods often cannot visualize internal structures [2]. OCT is a volumetric and non-invasive tool to image various animals including zebrafish. However, conventional intensity-based OCT cannot resolve the structures smaller than its resolution limit. JM-OCT overcomes these limitations by providing polarization contrasts such as birefringence, DOPU, and optic axis orientation [3,4]. These contrasts enable the visualization of ultrastructure beyond the resolution limit of OCT, which are important in zebrafish-based research.

Methods

A custom-built JM-OCT setup, with a central wavelength of 1310 nm, was utilized to investigate *in vivo* zebrafish. Details of a similar setup can be found in Li et al. [3]. The system has a scanning speed of 100,000 A lines/s. Imaging was conducted in the head, abdomen, and tail region of zebrafish. They were anesthetized using 0.016% Tricaine. The scanning protocol followed 512 A-lines per B-scan, 128 B-scans per volume, and four repeats of the frames at each B-scan. The field of view was set to 6 mm × 6 mm. OCT intensity, birefringence, DOPU, and optic axis orientation were computed and compared to histology.

Results

Figure 1 shows cross-sectional and *en* face images of the zebrafish head, abdomen, and tail, with the *en* face slice indicated by a yellow dotted line. In the OCT intensity image of the head (Fig. 1a), structures such as the iris (white arrow), cornea, lens, and retina (blue arrow) are clearly visible and align with histology (Fig. 1d) [4]. Birefringence (Fig. 1b) and DOPU (Fig. 1c) reveal polarization properties. The retina and gill region (yellow arrow, Fig. 1e) show low birefringence and high DOPU, while the iris exhibits low DOPU. Optic axis orientation (Fig. 1h) highlights homogenous fiber patterns in the head (white arrowheads). In the abdomen, the fin (blue arrow) and swim bladder (yellow arrow) are identified (Fig. 1i). En face intensity (Fig. 1m) shows vertebrae (green arrow) and muscle (white arrow), with high birefringence and low DOPU. Optic axis orientation (Fig. 1p) reveals distinct muscle fiber alignment. In the tail, histology [6] confirms muscle (blue arrow), skin (red arrow), and spine (yellow arrow), with corresponding high birefringence in muscle and spine and low DOPU in skin [5].

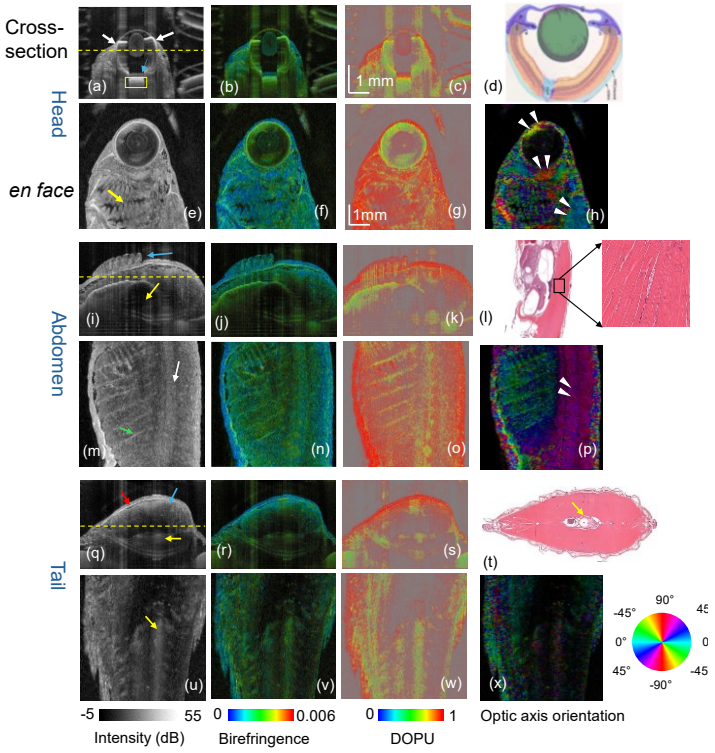


Figure 1: Comprehensive polarization-sensitive JM-OCT images of zebrafish head, abdomen and tail region.

Conclusion

This study highlights the use of birefringence, DOPU, and optic axis orientation in JM-OCT for detailed zebrafish imaging, which enables tissue-level ultra-structural assessment for *in vivo* zebrafish-based research.

References: **[1]** G. J. Lieschke and P. D. Currie, *Nat Rev Genet* **8**, 353–367 (2007), **[2]** A. Lichtenegger et al., *JBO* **27**, 016001 (2022), **[3]** E. Li et al., *Biomed. Opt. Express*, BOE **8**, 1290–1305 (2017), **[4]** Yiheng Lim et al., Proc SPIE Volume 13331; 133310E (2025), **[5]** T. S. Vihtelic et al., Mol. Vis. **11**, 1083–1100 (2005), **[6]** https://bio-atlas.psu.edu/zf/view.php?atlas=17&s=276, [7] https://bio-atlas.psu.edu/zf/view.php?atlas=18&s=231.

© 2025年 応用物理学会

生体組織からの円偏光散乱光の散乱体径依存性の実験的検証

Experimental investigations of dependence of the diameter of scatterers on circularly polarization of light scattered from biological tissues

北里大理[1]，自治医大[2]
○ﾏｽｷｰ ﾏｲｸ ﾗｼﾞｬ[1]，伊藤義将[1]，村田京介[1]，笠間航希[1]，江角朝登[1]，口丸高弘[2]，西沢 望[1]
Kitasato Univ.[1], Jichi Medical Univ.[2]
○ M. R. Maskey[1], Y. Ito[1], K. Murata[1], K. Kasama[1], A. Esumi[1], T. Kuchimaru[2], N. Nishizawa[1]
E-mail: masuki.maikuraja@st.kitasato-u.ac.jp

生体組織に円偏光を照射すると内部の散乱粒子によって散乱され偏光が徐々に解消される。この散乱光の偏光解消の度合いを調べることにより粒子の大きさ、密度、形状などを評価することができる[1]。生体内では赤色光から近赤外光の領域で散乱が優位になり、主な散乱体は細胞核とみなすことができる。これを利用し、組織のがん化を細胞核異型による散乱光の円偏光度（DOCP）の変化から検出できるとして、我々は円偏光散乱法（CiPLS 法）と呼び研究している。これまでCiPLS 法によるがん組織検出は実験と数値計算の比較によってその要因が細胞核径の変化であると推定してきた[2,3]。しかしながら、がん化により核形状や細胞内の微物の量、平均自由行程の長さなども変化し[4]、それらの要因の寄与が小さいとは言い切れない。本研究では、細胞核径変化の影響のみを考慮した部分的に散乱体径が異なる領域を有する生体模型を作製し、円偏光散乱光のDOCP変化を実験的に検証し、生体試料に対する結果と比較したので報告する。

生体試料にはヒトすい臓がん細胞 SUIT2 を異種移植したマウスから作成した肝転移検体を40 μmに薄片化した試料を用いた。一方、生体模型には平均粒径が5 μmおよび12 μmのポリスチレンマイクロビーズを一様に分散させた紫外線硬化樹脂を用い、同一模型内に異なる粒径のビーズが拡散した領域を設けた。このとき、それぞれの領域では散乱体の形状や微小粒子の存在、平均自由行程の長さなどの条件を揃えた。Fig. 1 に示す光学系を用いて撮像した結果を Fig. 2 に示す。生体試料の健常部とがん転移部、生体模型の平均散乱体径が5 μmと12 μmの領域のぞれぞれにおいて散乱光強度には差が見られなかったのに対し、円偏光度においては顕著な差が示された。これにより散乱体径の変化が検出光のDOCP値の変化の主因であることが実験的に示された。

[1] N. Nishizawa *et al*., J. Biomed. Opt. **29**, 075001 (2024).
[2] N. Nishizawa *et al*., J. Biophotonics **14**, 202000380 (2020).
[3] N. Nishizawa *et al*., JJAP. **59**, SEEG03 (2020).
[4] P. L. Pedersen, Prog. Exp. Tumor Res. **22**, 190 (1978).

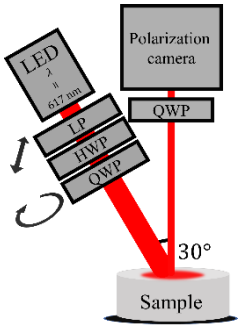


Fig. 1: The optical system.

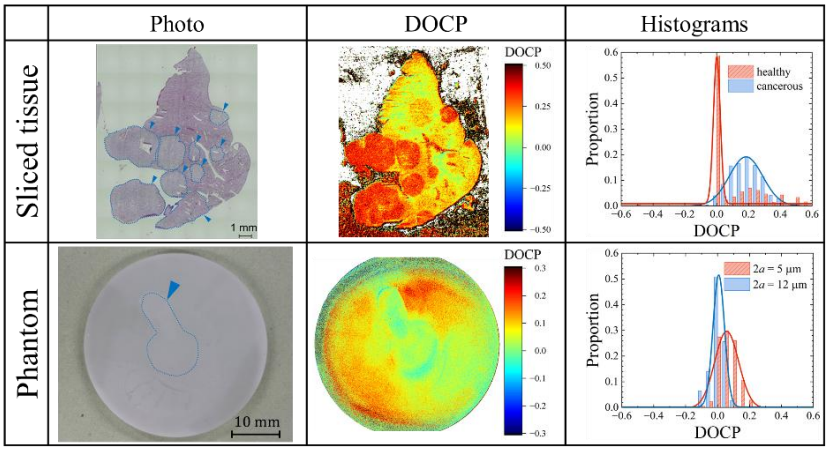


Fig. 2: Characteristics of the biological tissue sample (upper row) and the phantom (lower row); The left column shows the photos and corresponding maps. The parts surrounded by blue dotted line are cancerous (large scatterers) parts. The middle column represents the degree of circular polarization (DOCP) images taken by the polarization camera. The right column shows the distribution of the DOCP values in healthy (small scatterers) area (red) and cancerous (larger ones) area (blue).

© 2025年 応用物理学会

円偏光散乱法による扁平上皮がんの分布計測に対する検証

Distribution measurement of squamous cell carcinoma using circularly polarized light scattering method

北里大理 ○江角 朝登，ﾏｽｷｰ ﾏｲｸ ﾗｼﾞｬ，伊藤 義将，村田 京介，笠間 航希，西沢 望

Kitasato University ○Asato Esumi, M. R. Maskey, Y. Ito, K. Murata, K. Kasama, N. Nishizawa

E-mail: esumi.asato@st.kitasato-u.ac.jp

我々が開発に取り組んでいる円偏光散乱（Circularly Polarized Light Scattering; CiPLS）法では、生体組織中の細胞核の形状に関する情報を円偏光の散乱光の偏光解消として計測することができる[1]。悪性度が高い腫瘍では細胞核の肥大化などの異型性が強くなる[2]ため、非侵襲、無染色ながん評価が可能である。さらに、照射円偏光の散乱領域中の核異型の比率を評価できることから従来の光学的評価では困難であった核異型分布の計測、すなわち 3 次元的光学生検が可能であると考えられる。これまでのがん分布計測に対するモンテカルロシミュレーションによる検証[3]では健常細胞核およびがん細胞核それぞれの平均粒径を用いてきたが、本講演では粒径分布を導入したアルゴリズム[4]を用いて、反射型の光学系での扁平上皮がんの細胞核の粒径分布や屈折率比を考慮に入れたシミュレーションと生体模型を用いた実験を行い、核異型分布の評価に関する検討を行ったので報告する。

実際の扁平上皮がん検体から健常組織およびがん組織中の細胞核の粒径をそれぞれ$2a_{\mathrm{healthy}} = 6.03 \pm 0.50\ \mu\mathrm{m}$, $2a_{\mathrm{cancerous}} = 10.15 \pm 1.94\ \mu\mathrm{m}$、屈折率比を$n_{particle}/n_{medium} = 1.38/1.33$とし、それらを重ねたがん層／健常層の二層構造において散乱光の円偏光度（DOCP）のがん層厚および波長依存性を計算した。がん層厚を変化させた場合のDOCPの波長依存性を Fig. 1 に、完全な健常組織に対する結果との差分を Fig. 2 に示す。これらのグラフから、600 nmより短い波長ではがん層が厚くなるにしたがって散乱光のDOCPが大きくなる一方で、600 nmより長い波長ではこの傾向が逆転している。この結果より、600 nm前後の 2 波長でDOCPの差分を取ることで、より精度よくがん層厚の定量的計測が可能であると考えられる。当日は、深層から進行するがんに対しても粒径分布を導入した検討結果や、実験との比較についても示す予定である。

[1] N. Nishizawa, *et al*., J. Biomed. Opt. **29**, 075001 (2024). [2] Z. D. Goodman, Ann. Clin. Lab. Sci. **14**(3), 167-178 (1984). [3] N. Nishizawa *et al.*, J. Biophotonics **15**(10), 202200062 (2022). [4] A. Esumi, *et al*., 72th JSAP Spring Meeting, 16a-P03-4 (2025).]

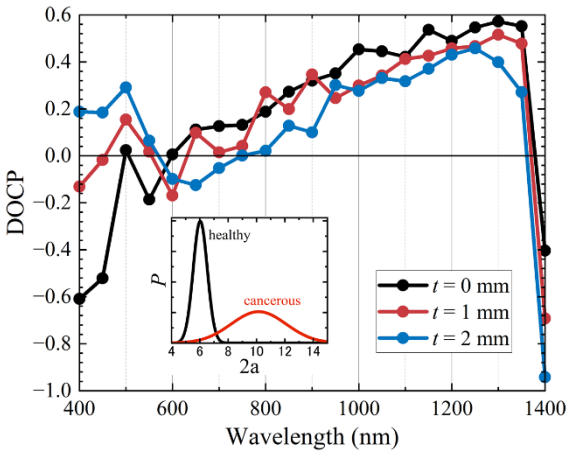


Fig. 1 : Wavelength dependences of the calculated DOCP values for several thicknesses of cancer ($t = 0, 1, 2$ mm). (Inset) Size distributions of cell nuclei in (black) healthy and (red) cancerous tissues.

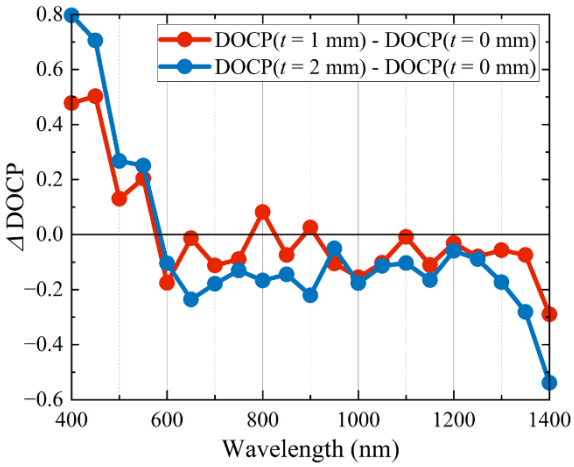


Fig. 2 : Wavelength dependences of the difference between DOCP values for $t = 1, 2$ mm and $t = 0$ mm of the pseudo-biological bilayer tissues, cancer/healthy tissues.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.3 Biomedical optics

[10p-N104-1~10] 3.3 Biomedical optics

[10p-N104-1]

[The 58th Young Scientist Presentation Award Speech] Advances and future directions in ultrafast fluorescence lifetime imaging microscopy

○Hiroshi Kanno[1,2], Fan Li[1], Kuniyasu Niizuma[2,3], Keisuke Goda[1,4,5,6] (1.Univ. of Tokyo, 2.Tohoku Univ. (Med.), 3.Tohoku Univ. (Biomed. Eng.), 4.Tohoku Univ. (SRIS), 5.UCLA, 6.Wuhan Univ.)

[10p-N104-2]

Development of an Experimental Platform Toward Realizing Mid-Infrared Photothermal Imaging Flow Cytometry

○(D)Yusei Sugawara[1], Keiichiro Toda[1], Masato Fukushima[1], Takuro Ideguchi[1] (1.Tokyo Univ.)

[10p-N104-3]

Evaluation of cellular structures in cells cultured and rapidly frozen on coverslips: Toward time-deterministic correlative light and electron microscopy

○Yuki Maeda[1], Kosuke Tsuji[1], Chieko Saito[2], Kaho Fujimori[2], Masahito Yamanaka[1], Masahide Kikkawa[2], Katsumasa Fujita[1,3] (1.UOsaka, 2.UTokyo, 3.UOsaka OTRI)

[10p-N104-4]

Design and Performance Evaluation of Extended Depth of Focus Intraocular Lenses

Yen-Ting Wu[1], ○(M1)XIANG-FAN LEE[1], Jia-Han Li[1] (1.Dept. of ESOE, Natl. Taiwan Univ.)

[10p-N104-5]

Bactericidal evaluation for Staphylococcus aureus in water.

○Tatsuro Kagawa[1], Daisuke Matsui[1], Hideharu Horikosi[2], Tomosumi Kamimura[3], Nobuhiro Umemura[1] (1.Chitose Inst., 2.TOSOH SGM Corp., 3.Osaka Inst. Tech.)

[10p-N104-6]

Rapid single-molecule digital SERS counting of disease biomarkers

○Jun Ando[1], Kazue Murai[1], Tomoe Michiyuki[1], Ikuko Takahashi[1], Tatsuya Iida[1], Yasushi Kogo[1], Masashi Toyoda[2], Yuko Saito[2], Shigeo Murayama[2], Masanori Kurihara[2], Rikiya Watanabe[1] (1.RIKEN, 2.Tokyo Metropolitan Institute for Geriatrics and Gerontology)

[10p-N104-7]

Sensitivity improvement of Raman flow cytometry using light-sheet illumination

○Taizo Koga[1], Toshiki Kubo[1,2], Katsumasa Fujita[1,3] (1.Dept. of Applied Physics, UOsaka, 2.Dept. of Dermatology, UOsaka, 3.OTRI, UOsaka)

[10p-N104-8]

Highly Sensitive Raman Detection of Exosomes Using Photo-induced Aggregation of Gold Nanorods

○Miho Sakao[1], Abhinav Sharma[1], Takuo Tanaka[1,2], Taka-aki Yano[1,2] (1.Tokushima Univ., 2.RIKEN)

[10p-N104-9]

Recovery of Raman signals under autofluorescence via extensive averaging and SERDS

○(M1C)Kota Hayashi[1], Takuya Koyama[2], Takashi Katagiri[2] (1.Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 2.Faculty of Engineering, University of Toyama)

[10p-N104-10]

Non-invasive real-time prediction of glioblastoma DNA methylation status – Blood lipid characteristics captured by infrared absorption spectra –

○Saiko Kino[1], Masayuki Kanamori[2], Yuji Matsuura[1] (1.Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku Univ., 2.Graduate School of Medicine, Tohoku Univ.)

超高速蛍光寿命顕微鏡技術の進展と将来展望

Advances and future directions in ultrafast fluorescence lifetime imaging microscopy

東大理[1]，東北大医[2]，東北大医工[3]，東北大 SRIS[4]，カリフォルニア大工[5]，武漢大工[6]

○菅野 寛志[1,2]，リ ボン[1]，新妻 邦泰[2,3]，合田 圭介[1,4,5,6]

Univ. of Tokyo[1], Tohoku Univ. (Med.)[2] (Biomed. Eng.)[3] (SRIS)[4], UCLA[5], Wuhan Univ.[6],

°Hiroshi Kanno[1,2], Fan Li[1], Kuniyasu Niizuma[2,3], Keisuke Goda[1,4,5,6]

E-mail: hiroshi.kanno.b2@tohoku.ac.jp

蛍光寿命は、蛍光分子が光励起された後に基底状態へ戻るまでの平均時間として定義され、励起光の強度変動や蛍光色素の局所的濃度に依存しない定量的なパラメータである。加えて、蛍光寿命は蛍光分子の置かれた周囲環境に応じて変化するため、細胞内の微小環境の変化を測定する手段として有用である[1]。このような特性から、蛍光寿命を計測する顕微鏡技術は、従来の蛍光強度ベースの顕微鏡法と比較して、より頑健で定量性に優れた測定技術として注目を集めている[2,3]。一方で、従来の蛍光寿命顕微鏡法では、撮像速度が最大でもビデオレート程度にとどまり、高速な細胞応答の計測や、大規模な細胞集団の解析には限界があった[4]。

本発表では、我々が昨年開発した、10,000 画像/秒以上の撮像速度を実現する超高速蛍光寿命顕微鏡システム[5]を中心に、近年進展の著しい蛍光寿命顕微鏡法の高速撮像技術とその生物医学応用について概説する。顕微鏡システムは一般に、照明方式の違いにより広視野型およびビームスポット走査型に大別されるが、蛍光寿命顕微鏡の高速化においては、前者では検出系、後者では照明系の技術革新が主に進展を支えている[4]。また、撮像速度が 100 画像/秒を超えることで、神経スパイクのような高速な細胞応答の観察や、腫瘍などにおける異種細胞集団の大規模解析が現実的となってきている[3,5]。こうした進展により、蛍光寿命顕微鏡法は細胞生物学、生物物理学、神経科学などの分野において、新たな研究展開を可能にする基盤技術として期待されている。

[1] M. Y. Berezin and S. Achilefu, *Chem. Rev.* **110**, 2641 (2010).
[2] B. Torrado et al., *Nat. Rev. Methods Primers* **4**, 80 (2024).
[3] A. J. Bowman et al., *Science* **380**, 1270 (2023).
[4] H. Kanno et al., *Biophoton. Discovery* **2**, 030901 (2025).
[5] H. Kanno et al., *Nature Communications* **15**, 7376 (2024).

© 2025年 応用物理学会

中赤外光熱イメージングフローサイトメトリーの実現に向けた実験プラットフォームの構築

Development of an Experimental Platform Toward Realizing Mid-Infrared Photothermal Imaging Flow Cytometry

東大理[1] ○(M2)菅原 優生[1], 戸田 圭一郎[1], 福島 誠人[1], 井手口 拓郎[1]

The Univ. of Tokyo (Science)[1], ○Yusei Sugawara[1], Keiichiro Toda[1], Masato Fukushima[1], Takuro Ideguchi[1]

E-mail: yusei637pepsi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

近年、高速に流路中を流れる細胞の画像を大量に取得するイメージングフローサイトメトリー（Imaging flow cytometry, IFC）が注目を集めている。しかし、従来の装置では蛍光標識が必要であり、細胞毒性やラベルによる生体機能への影響といった課題を抱えているため、非標識手法による IFC の実現が望まれている。実際、非標識分子振動顕微鏡を代表するコヒーレントラマン顕微鏡による IFC の報告もなされてきた[1, 2]。一方、新たな非標識手法として、ラマン散乱とは相補的な情報が取得可能な、中赤外吸収による光熱変換で生じる試料の屈折率変化を可視光顕微鏡で検出する中赤外光熱顕微鏡[3]の技術が近年急速に進展している。しかし、中赤外光熱顕微鏡では、中赤外光 ON 状態と OFF 状態のそれぞれの画像を差分処理する必要がある。従来手法ではこれらをイメージセンサの異なるフレーム(～ms 間隔)で取得していたため、フレーム間で測定対象が動くことでモーションアーティファクトが発生し、また高速流路中のサンプルでは ON/OFF 画像取得の間に視野外へ移動してしまうため、IFC への適用が困難であった（図 1b)。

そこで本研究では、周波数多重デジタルホログラフィ技術[4]を応用し、10 ns のパルス光を用いて、20 ns 間隔で中赤外光 ON/OFF 状態の画像をイメージセンサの 1 フレーム内に分離して埋め込む独自手法を IFC に適用する。この手法を用いると、対象の移動を無視できる時間間隔での差分処理が実現できる。実際に、水流速約 9 cm/s で直径 6 μm ポリスチレンビーズを流し、振動吸収ピークである 2925 cm^{-1}におけるモーションアーティファクトのない光熱信号の取得に成功した（図 1c)。本技術は環境中マイクロプラスチックの評価や、細胞内脂質分布の統計的解析などへの応用が期待される。

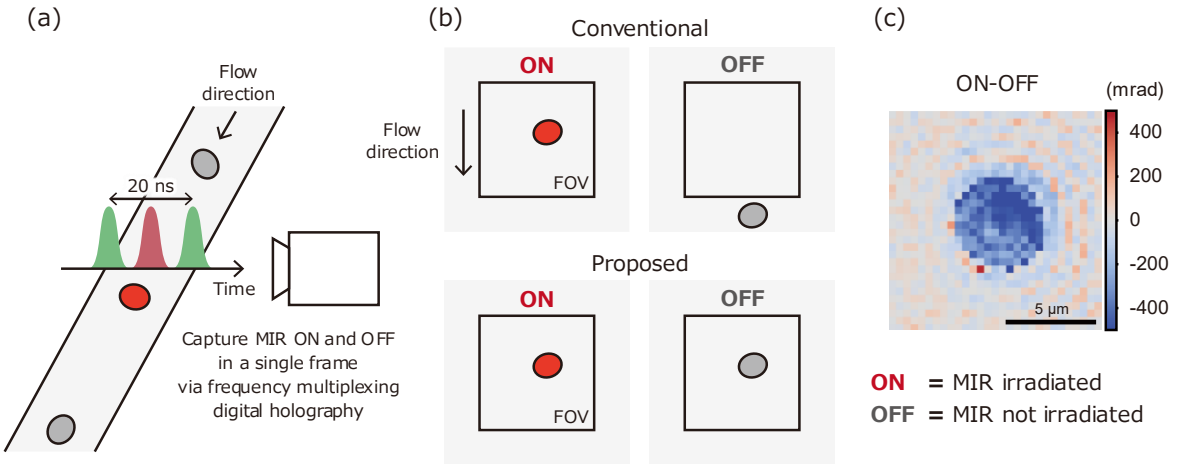


Fig. 1 Experimental platform toward realizing mid-infrared photothermal imaging flow cytometry. (a) Schematic of the experimental system. **(b)** Comparison of the conventional and proposed methods. **(c)** Photothermal images of a microbead flowing in capillary. MIR: Mid-infrared.

[1] Suzuki, Y. et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 116, 15842–15848 (2019). [2] Nitta, N. et al., Nat. Commun., 11, 3452 (2020). [3] Xia, Q. et al., J. Phys. Chem. B, 126, 8597–8613 (2022). [4] Shaked, N. T. et al., Adv. Opt. Photonics, 12, 556 (2020).

© 2025年 応用物理学会

カバーガラス上で急速凍結した細胞構造の評価：時間決定型光電子相関顕微法に向けて

Evaluation of cellular structures in cells cultured and rapidly frozen on coverslips: Toward time-deterministic correlative light and electron microscopy

阪大工[1]，東大医[2]，阪大 OTRI[3]，○前田侑希[1]，辻康介[1]，齊藤知恵子[2]，藤森香帆[2]，山中真仁[1]，吉川雅英[2]，藤田克昌[1,3]

UOsaka[1], UTokyo[2], UOsaka OTRI[3], ○Yuki Maeda[1], Kosuke Tsuji[1], Chieko Saito[2], Kaho Fujimori[2], Masahito Yamanaka[1], Masahide Kikkawa[2], Katsumasa Fujita[1,3]

E-mail: fujita@ap.eng.osaka-u.ac.jp

光学顕微鏡と電子顕微鏡を用いた光電子相関顕微鏡法は、光学観察で標的生体分子などの局在を観察、同定し、電子顕微鏡でその分子構造などの微細構造の観察を行う手法であり、細胞生物学などの分野の研究に幅広く利用されている。近年、我々は、光学顕微鏡観察下の細胞を、任意のタイミングでミリ秒の時間精度で凍結固定し、凍結環境下で細胞を高空間分解能かつ高い定量性で観察できる「時間決定型クライオ光学顕微鏡」を開発した［1]。本技術では、凍結直前まで細胞を光学顕微観察できるため、「どのような細胞内イベント中に」「いつ」「どのようなタイミング」で細胞が固定されたかという時空間情報を正確に把握したうえで、凍結された瞬間の細胞状態を詳細に観察できる。時間決定型クライオ光学顕微鏡で凍結固定された細胞を、電子顕微鏡で観察できれば、細胞内ダイナミクスの時空間情報を把握したうえでの光電子相関顕微鏡観察が可能になり、これまで実現できていなかった細胞内ダイナミクスの時空間情報と細胞の超微細構造を関連付けた解析が可能となる。

本研究では、時間決定型クライオ光学顕微鏡と同様の凍結手法を用い、カバーガラス上で培養した細胞を急速凍結固定した後、電子顕微鏡で細胞内微小構造を観察し、光電子相関顕微鏡観察に応用できるかを検証した。番地情報付きのカバーガラス上で細胞を培養した後にミトコンドリアを蛍光標識し、細胞分布を蛍光顕微鏡で確認したうえで、キムワイプを用いて細胞周囲の緩衝液を十分に減らし、その後、カバーガラス上から-190 ℃ のプロパン–イソペンタン混合寒剤を試料に滴下し、急速凍結した。急速凍結した試料を凍結置換、樹脂包埋、超薄切片にした後に、走査型電子顕微鏡で観察し、凍結前に同一の細胞で観察した蛍光像と重ね合わせた結果を図１に示す。本実験で得られた観察像では、ミトコンドリアなどの細胞内小器官の微細構造が観察できており、氷晶形成が原因と考えられる損傷や変形は見られなかった。この結果から、時間決定型クライオ光学顕微鏡で得られる細胞凍結試料は、電子顕微鏡による観察に十分に利用できるものであり、今後、光学顕微鏡上で急速凍結した細胞試料を、低温を維持した状態で凍結置換できる技術を実装できれば、時間決定型クライオ光学顕微鏡と電子顕微鏡による光電子相関顕微鏡観察が実現できることが確認できた。

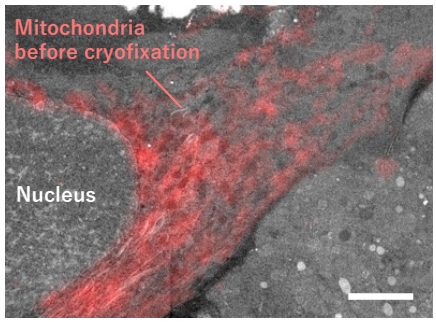


Figure 1. Marge of fluorescence (red) and SEM (gray) images of a HeLa cell cryofixed by pouring liquid cryogen from top of the sample coverslip. The cell was stained with PKmito RED (Ex : 549 nm, Em : 569 nm). Scale bar is 5 μm.

参考文献 [1] M. Yamanaka, K. Tsuji, et al., bioRxiv doi: 10.1101/2023.08.01.551103

© 2025年 応用物理学会

Design and Performance Evaluation of Extended Depth of Focus Intraocular Lenses

Yen-Ting Wu, Xang-Fan Lee , and Jia-Han Li*
Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, Taipei 106319, Taiwan
E-mail: r11525148@ntu.edu.tw, r13525097@ntu.edu.tw, * : jiahan@ntu.edu.tw

1. Introduction

Cataracts are the leading cause of vision impairment globally, affecting over 50 million people and responsible for one-third of global blindness cases [1]. Caused by age-related protein aggregation in the lens, cataracts lead to opacity, contrast loss, and eventual blindness [2]. Surgical implantation of intraocular lenses (IOLs) remains the only effective treatment.

Modern IOLs have evolved from rigid PMMA materials to foldable designs using hydrophobic acrylic, improving biocompatibility and enabling minimally invasive procedures [3]. Optical designs now include aspheric, multifocal, toric, and extended depth of focus (EDOF) lenses to meet varying visual needs [4].

EDOF IOLs aim to offer continuous vision across multiple distances while reducing halos and glare seen in multifocal designs. This study presents a hybrid EDOF IOL featuring a sinusoidal diffractive posterior surface and a freeform aspheric anterior surface. Using the Liou & Brennan eye model [5] and a custom hydrogel material, we evaluate the design through optical simulations and modulation transfer function (MTF) measurements to assess its imaging performance.

2. Methodology and results

To evaluate and optimize the optical performance of an EDOF IOL, we adopted the Liou & Brennan eye model optical simulations, incorporating accurate anatomical parameters and spectral dispersion across 380–750 nm. A hybrid optical design was developed featuring a sinusoidal diffractive posterior surface with adjustable phase parameters to tune energy distribution among diffraction orders. Among three design types, the Type I configuration—balancing far, intermediate, and near focus—was selected for its stable imaging performance. The anterior surface was optimized using a Binary 2 freeform equation, with curvature, conic, and higher-order coefficients adjusted through a merit function to improve modulation transfer function (MTF) and minimize aberrations. A hydrogel material (PH30S) was used for lens fabrication, with its refractive index (1.5277 at 550 nm) and Abbe number (39.1) measured and fitted using the Schott dispersion formula. The final design was validated through optical simulation and experimental testing using the TRIOPTICS OptiSpheric system. MTF measurements at 50 lp/mm in air yielded 0.427 (sagittal) and 0.269 (tangential), closely matching simulation results (~0.38). As shown in Figure 1, the EDOF lens consistently outperformed a commercial trifocal IOL across near (80 cm), intermediate (120 cm), and far (infinity) object distances, with the most significant improvement observed at intermediate range. These results validate the EDOF lens's ability to provide extended and continuous focus with improved contrast at all distances.

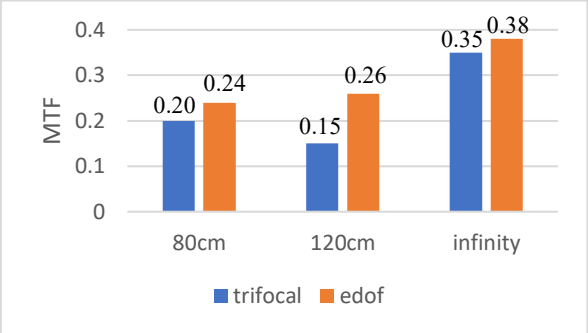


Fig.1 MTF Comparison Between EDOF and Trifocal IOL

3. Conclusions

In this study, we proposed and validated a hybrid EDOF IOL design that combines a sinusoidal diffractive posterior surface with an optimized freeform anterior surface. Using the Liou & Brennan eye model and a custom hydrogel material with experimentally measured optical properties, the design was evaluated through optical simulations and experimental MTF testing. Results demonstrated that the EDOF IOL achieved high image contrast across far, intermediate, and near distances, with superior performance at intermediate range compared to a commercial trifocal IOL. The design also showed effective control of spherical and chromatic aberrations, confirming its ability to provide continuous vision with reduced visual disturbances. These findings suggest strong clinical potential for the proposed EDOF IOL in improving postoperative visual outcomes and enhancing patient satisfaction.

Acknowledgements

We like to thank Professor Chi-An Dai at National Taiwan University for the hydrogel material preparation. This research was funded by National Science and Technology Council of Taiwan under grant number 112-2221-E-002-201-MY2. We are grateful to the National Center for High-Performance Computing, Taiwan, for providing us with the computation time and using its facilities.

References

[1] Flaxman SR, Bourne RRA, Resnikoff S, Ackland P, Braithwaite T, Cicinelli MV, et al. Global causes of blindness and distance vision impairment 1990–2020: a systematic review and meta-analysis. Lancet Glob Health. 2017;5(12):e1221–34.
[2] Michael R, Bron AJ. The ageing lens and cataract: a model of normal and pathological ageing. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2011;366(1568):1278–92.
[3] Zhao Y, Li X, Wang Y, Xu Y, He C. Development of intraocular lenses: from monofocal to accommodative. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. 2017;70(Pt 1):1019–29.
[4] Webb ST, Smart JD, Hutchings SD. Extended depth of focus intraocular lenses: design principles and clinical outcomes. Eye Vis (Lond). 2020;7:1.
[5]Hwey-Lan Liou and Noel A. Brennan, "Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling," J. Opt. Soc. Am. A 14, 1684-1695 (1997)

© 2025年 応用物理学会

黄色ブドウ球菌を対象とした水中での殺菌評価

Bactericidal evaluation for Staphylococcus aureus in water.

◦香川 達郎[1], 松井 大亮[1], 堀越 秀春[2], 神村 共住[3], 梅村 信弘[1]
Tatsurou Kagawa[1], Daisuke Matsui[1], Hideharu Horikoshi[2],
Tomosumi Kamimura[3] and Nobuhiro Umemura[1]
[1]Chitose Inst. Sci. & Tech., [2]TOSOH SGM Corp, [3]Osaka Inst. Tech.,
E-mail: umemura@photon.chitose.ac.jp

1. 背景

以前、我々は、発振波長が 1064 nm の Nd:YAG レーザーを用いて第 4 高調波及び第 5 高調波である 266 nm 及び 213 nm の深紫外線 (DUV) パルスレーザー光照射によるマンニット食塩寒天培地上での殺菌効果及び同じ菌種における水中殺菌の効果を報告した[1]。また、波長 213 nm 及び 266 nm の深紫外線パルスレーザー光の照射条件により大腸菌 NBRC 3301 の殺菌効果が異なることを報告した [2]。

本研究では、波長 266 nm 及び 213 nm 深紫外線パルスレーザー光を高強度、中強度、低強度の 3 つの照射条件にて水中の黄色ブドウ球菌 NBRC 13276 における殺菌効果の影響を調査した。加えて、黄色ブドウ球菌を寒天培地上で表面殺菌した結果との比較も行った。

2. 実験方法

波長 1064 nm の Nd:YAG レーザー (パルス幅 8 ns 、繰り返し周波数 10 Hz) 光を KTP ($KTiOPO_4$) 及び β-BBO (β-BaB_2O_4) などの非線形光学結晶に入射して波長変換を行い、DUV 光を出力した。266 nm の照射系の配置図を Fig. 1 に示す。発生させた波長 266 nm の光を照射後、プリズムで分光し凹レンズを通してビームを拡げた。シャーレ上のレーザーの照射エネルギー密度について高パルスエルギーでは、 1.2 μJ/cm^2 、中パルスエネルギーでは 0.6 μJ/cm^2、低パルスエネルギーでは 0.3 μJ/cm^2 となるように出力を調整するとともに、既定の総照射量に達するように照射時間を調整した。

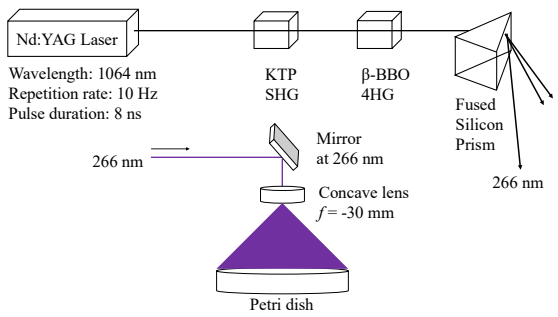


Fig. 1 Experimental Setup for DUV radiation at 266 nm

3. 実験結果

Fig. 2 は、波長 266 nm の DUV 光を高、中、低パルスエネルギーで液体中にある黄色ブドウ球菌に照射を行った結果を示したものである。グラフの縦軸は、紫外線照射を行い 24 時間培養した後の黄色ブドウ球菌 NBRC 13276 の生存率を示し、グラフの横軸は総照射量を示している。

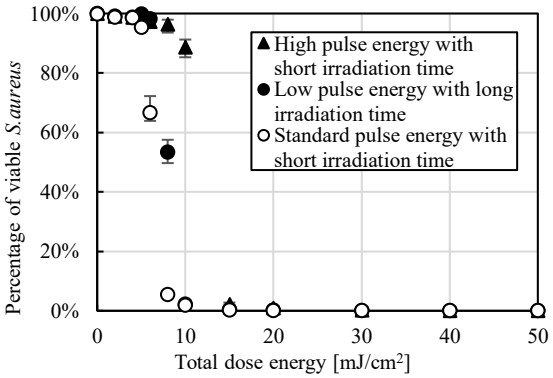


Fig. 2 Effects of DUV pulse radiation to *S.aureus*

Fig. 2 のグラフより、波長 266 nm での黄色ブドウ球菌の水中殺菌は総照射量が 8 mJ/cm^2 ~ 15 mJ/cm^2 の間で急激な生存率の低下を示している。高、中、低パルスエネルギーにおいて生存率の急落を示した総照射量は、それぞれ 15 mJ/cm^2、 8 mJ/cm^2、 10 mJ/cm^2 であった。波長 266 nm の深紫外線パルスレーザー光を使い黄色ブドウ球菌を寒天培地上で表面殺菌した際に生存率は、指数関数的な減少を示した。

当日は、水中での殺菌に照射強度と照射時間の相互作用による殺菌効果の検証や他の深紫外線パルスレーザー光である波長 213 nm の実験結果を表面殺菌にて行った結果 ouyoubuturigakkai

とともに報告する。

4. 参考文献

[1] K. Dainaka *et al*., *APLS* 2023, CW1-04(2023).
[2] T. Kagawa *et al.,* 応用物理学会春季学術講演会予稿集, 15a-K306-11 (2025)

© 2025年 応用物理学会

疾患バイオマーカーの迅速１分子デジタル SERS 計測

Rapid single-molecule digital SERS counting of disease biomarkers

理研[1], 東京都健康長寿医療センター[2], ○安藤 潤[1], 村井 和枝[1], 道幸 智恵[1], 高橋 育子[1], 飯田 龍也[1], 向後 泰司[1], 豊田 雅士[2], 齊藤 祐子[2], 村山 繁雄[2], 栗原 正典[2], 渡邊 力也[1]

RIKEN[1], Tokyo Metropolitan Institute for Geriatrics and Gerontology[2], ○Jun Ando[1], Kazue Murai[1], Tomoe Michiyuki[1], Ikuko Takahashi[1], Tatsuya Iida[1], Yasushi Kogo[1], Masashi Toyoda[2], Yuko Saito[2], Shigeo Murayama[2], Masanori Kurihara[2], Rikiya Watanabe[1]

E-mail: ando@riken.jp

酵素は、代謝や吸収、信号伝達などの生体機能を発現・調節している。血液や脳脊髄液などのヒト液性検体中にも多様な酵素が含まれ、臓器の炎症や機能不全、細胞の脱落など、疾患とこれに伴う諸症状を鋭敏に反映して検体液中の酵素活性(濃度)も増減する。検体液中で特定の疾患に応じて活性値が変化する酵素種は、疾患診断における指標、疾患バイオマーカーとして機能する。

酵素をバイオマーカーとした疾患診断法の拡充には、検体液中の微量な酵素を捉える計測感度の向上や、多様な混ざりの中から特定の酵素種の働きを見極める分子識別能の向上が重要になる。上記の状況を鑑み、我々はこれまでに、表面増強ラマン散乱(SERS)分光法と微細加工技術を融合した１分子デジタル SERS 計数法を開発してきた。酵素活性を１分子毎に捉える高い感度と狭線幅のスペクトルを活かした高い分子識別能を有し、精製酵素をモデルに用いた原理検証実験において、酵素濃度の計測感度を 100 倍向上させ、複数種の酵素の多色同時計測も実現した。

上記計測法の疾患バイオマーカー探索への展開を考える上では、計測時間が一番の障壁となる。1 分子デジタル SERS 計測では、金属ナノ構造を具備したマイクロチャンバーアレイに酵素を１個以下の濃度で封入し、生成物の SERS 光からチャンバー内の酵素の有無をデジタル判定する。デジタルカウントによる計測感度向上には、原理的に数万個以上のチャンバーを観察する必要があり、レーザー走査型のラマン顕微鏡では一度の計測に数時間以上を要していた。

本発表では、１分子デジタル SERS 計数法を迅速化する広視野型のラマン顕微鏡を開発し、ヒト液性検体中の酵素の高感度検出を試みた事例について報告する。狭線幅バンドパスフィルターを活用した広視野ラマン計測システムを構築することで、計測時間を従来装置と比べて 30 倍改善し、1 分子デジタル SERS 計測の 1 回の計測時間を 8.5 分まで短縮することができた。さらに、広視野システムでも従来装置と同等の酵素検出感度を維持でき、複数酵素の多色デジタル検出にも展開できることを実証した。計測時間を短縮した開発装置を用い、実際にヒト液性検体中の微量酵素の１分子デジタル SERS 計測に取り組んだ。認知症疾患に着目した検証を行い、特定の病型において有意に減少する酵素種を見出すことができた。本発表では、広視野ラマン顕微鏡の装置構成や撮像方式、検出感度等について報告するとともに、１分子デジタル SERS 計測によるヒト液性検体中の微量酵素検出と病型の判別能に関して議論する。

© 2025年 応用物理学会

ライトシート照明ラマンフローサイトメトリーにおける光検出感度の向上

Sensitivity improvement of Raman flow cytometry using light-sheet illumination

阪大院工[1]，阪大院医[2]，阪大 OTRI[3] ○(M2)古賀 大蔵[1]，久保 俊貴[1,2]，藤田 克昌[1,3]

Dept. of Applied Physics, UOsaka[1], Dept. of Dermatology, UOsaka[2], OTRI, UOsaka[3]

○Taizo Koga[1], Toshiki Kubo[1,2], Katsumasa Fujita[1,3]

E-mail: fujita@ap.eng.osaka-u.ac.jp

ラマンフローサイトメトリーは、細胞集団を無標識で迅速かつ単一細胞の精度で分析する手法として注目されている[1]。蛍光染色を用いないため、細胞への影響を最小限に抑えつつ、多様な生体分子の情報を同時に取得できるという利点がある。しかしながら、ラマン散乱は微弱であるため比較的長い露光時間が必要であり、結果としてラマンフローサイトメトリーのスループットが著しく制限される。この課題に対し我々は、マイクロキャピラリ内を流れる細胞をライトシートで側方照明し、TDI (time delay integration)技術を用いて CCD カメラの電荷移動と細胞の流速を同期させることで、移動中の細胞からのラマン信号を効率的に積算し、長い信号取得時間を維持しながらも、従来の共焦点光学系を用いた手法[2]に比べて高いスループットを実現する手法を開発した[3]。

本研究では、さらなるスループット向上のため、光学系の最適化を行うことで信号対雑音比（SNR）の改善および水由来の背景光を減少させることを目指した。具体的には、マイクロキャピラリ周辺を水で満たす構造を構築することで、検出光学系に水浸対物レンズの適用を可能とした。これにより、乾燥系対物レンズを使用していたことで発生していた球面収差を低減し、SNR の改善および水由来の背景光を抑制できる。さらに、照明光の開口数を高めて照明系の光軸方向の照明範囲を制限し、ガルバノミラーによってライトシートをその光軸に対し垂直な方向に走査することで、細胞全体を照明しつつ細胞外領域に存在する水への照明を抑制し、信号対背景光比の向上を図った。提案した光学系の有効性を評価するため、用いる光学素子やスリット幅、CCD カメラのピクセルサイズに基づいて、検出光学系の物体面における検出効率の空間分布を算出し、さらに、その空間分布と照明光の強度分布との積からラマン信号の実効的な検出効率の空間分布を導出した。信号対背景光比を計算した結果、提案手法は従来手法に比べて約 1.8 倍向上することを確認した。また、本手法と表面増強ラマン散乱を組み合わせることによって、信号強度を大幅に向上させつつ、高スループットな測定の実現にも成功した。

[1] J. Gala de Pablo *et al.*, *Acc. Chem. Res*. **54**, 2132-2143 (2021).

[2] X. Wang *et al.*, *Adv. Sci*. **10**, 2207497 (2023).

[3] M. Lindley *et al.*, *Optica* **12**, 479-489 (2025).

謝辞：本研究は、JST、COI-NEXT、JPMJPF2009 の支援を受けたものである。

© 2025年 応用物理学会

金ナノロッドの光凝集と光増幅効果を併用した エクソソームの高感度ラマン分光検出

Highly Sensitive Raman Detection of Exosomes Using Photo-induced Aggregation of Gold Nanorods

徳島大 pLED[1], 理研[2], 理研[3] ○(M1)酒尾 美星[1], Abhinav Sharma[1], 田中 拓男[1,2], 矢野 隆章[1,2]

Tokushima Univ.[1], RIKEN[2], ◦Miho Sakao[1], Abhinav Sharma[1], Takuo Tanaka[1,2], and Taka-aki Yano[1,2]

E-mail: yano.takaaki@tokushima-u.ac.jp

近年、多様な細胞種から放出される粒子であるエクソソームが、がんのバイオマーカーとして注目されている。エクソソームの物性や組成の違いを明らかにすることで、疾患の早期診断や新しい治療法の開発に貢献できる。従来のエクソソーム検出手法は、粒径や特定のタンパク質の有無に着目したものが主流であり、より高感度な組成分析手法の確立が求められている。

本研究では、金ナノロッドの光凝集効果と光増幅効果を併用し、高感度かつ高分析能なエクソソームのラマン分光分析を実現した。具体的には、静電的相互作用を利用して金ナノロッドをエクソソーム表面に吸着させ（Fig. 1a）、その後、表面プラズモン共鳴による放射圧を利用してエクソソームに吸着した金ナノロッドを基板上に凝集・堆積させた（Fig. 1b）。さらに、金ナノロッドの長軸方向のプラズモン増強場を活用し、エクソソーム表面の表面増強ラマン散乱（SERS）を高感度検出し、組成分析を可能にした。

本実験では、負に帯電したヒト結腸腺癌由来エクソソーム（直径 約 150 nm）と陽イオン性界面活性剤が表面修飾された金ナノロッド（プラズモン共鳴波長: 650 nm）を使用した。この混合液に、波長 671 nm のレーザー光を集光照射した。エクソソーム表面に吸着した金ナノロッド凝集体の大きさはレーザー光強度と照射時間に依存した。Fig. 1c は、光凝集されたエクソソームの SERS スペクトルである。948 cm^{-1}, 1251 cm^{-1}, 1330 cm^{-1}, 1342 cm^{-1}, 1365 cm^{-1}, 1580 cm^{-1} 付近にラマンバンドが支配的に観測された。これらはそれぞれ、多糖類に典型的な骨格モード、アミドⅢ、タンパク質含有量、DNA/RNA、必須アミノ酸の一種、DNA 塩基の振動モードに帰属された。これらのラマンバンドはエクソソームの凝集体によって個体差があることがわかり、エクソソーム表面組成の不均一性を反映していることが示唆された。

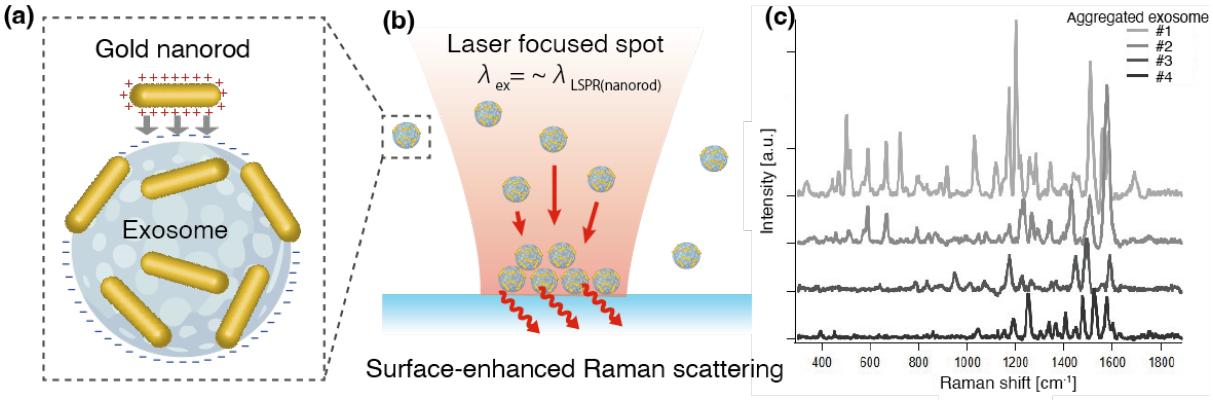


Fig. 1 (a)Electrostatic adsorption of gold nanorods on an exosome. (b) Schematic of plasmon-induced aggregation of gold nanorod adsorbed exosomes. (c) SERS spectra of four different aggregated exosomes.

© 2025年 応用物理学会

多数回平均化と SERDS による自家蛍光下でのラマン信号の回復

Recovery of Raman signals under autofluorescence via extensive averaging and SERDS

富山大理工[1]，富山大工[2]，○(M1C)林晃太[1]，小山卓耶[2]，片桐崇史[2]

Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama[1],
Faculty of Engineering, University of Toyama[2],
°Kota Hayashi[1], Takuya Koyama[2], Katagiri Takashi[2]
E-mail: katagiri@eng.u-toyama.ac.jp

1. はじめに

生体組織のラマンセンシングでは，強い自家蛍光の妨害が，病変部の分類や定量計測の精度を著しく低下させる問題がある．これまで，自家蛍光からラマン信号を分離する手法として，シフト励起ラマン差分分光法 (Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy : SERDS) が提案されている[1]．SERDS では，励起波長を僅かにシフトさせて取得した２つのスペクトルの差分をとることにより，蛍光成分のみを除去することが可能である．一方，従来の SERDS に関する研究は，自家蛍光が重畳したデータから高品質なラマンスペクトルを再構成するためのデータ処理法に関する検討に終始しており，ノイズ低減効果について詳細に調べた報告例はない．そこで，本研究では，多数回平均化によるノイズ低減に資する SERDS の効果を明らかにし，強い自家蛍光により測定が困難な試料からラマンスペクトルを抽出する手法の提案を目指す．

2. 多数回平均化における差分法の有効性

単一波長励起による従来のラマン分光計測システムを用いて，多数回平均化における差分法の有効性を評価した．実験系の概略を Fig. 1 に示す．波長 785 nm の励起光は 20 倍の対物レンズを介して，蛍光体粉末試料 ($(Ba,Su)_3SiO_5$: Eu, Yb) 表面に照射された．試料からの蛍光は，ロングパスフィルタとノッチフィルタにより励起光成分を除去した後に，分散型の分光器に取り付けた冷却 CCD により計測された．試料表面における励起光強度を 85 mW，励起光照射時間を 0.7 s とし，平均化回数を変化させたときのノイズを評価した．計測された蛍光スペクトルは，測定波長域においておおよそ 20000～60000 counts の強度を有する平坦な形状であり，ノイズは蛍光スペクトルからスペクトルの多項式近似を差し引いた後に全波長域の標準偏差を求めることにより算出した．

Fig. 2 に平均化回数とノイズの関係を示す．図より，生スペクトルには積算回数に依らず一定のノイズ成分が重畳していることが分かる．これは，測定系の光学特性や迷光に起因する系統ノイズが平均化処理により減少されないためである．一般に，スペクトルを白色光スペクトルで割ることで測定系の応答を補正する方法が知られているが，全ての系統ノイズを除去することは困難である．一方，差分法では，平均化回数が増えるほどノイズは減少する．ここで n 回積算におけるランダムノイズの理論値 $N(n)$は次式に従う．

$$N(n) = \frac{N(1)}{\sqrt{n}} \qquad (1)$$

本研究では，1000 回の平均化処理を経ても理論値に従いノイズが減少することを確認した．この結果は，多数回平均化と SERDS により強い自家蛍光下でのラマン信号の回復が可能であることを示唆している．

参考文献

[1] F. Korinth, et.al., Sci. Rep. **10**, 11215 (2020).

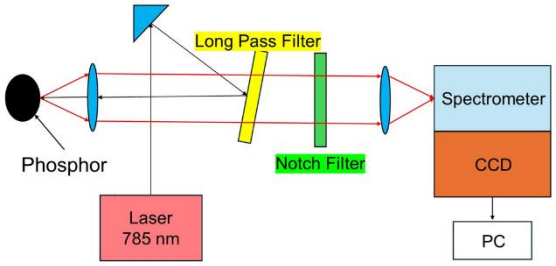


Fig. 1 Experimental setup.

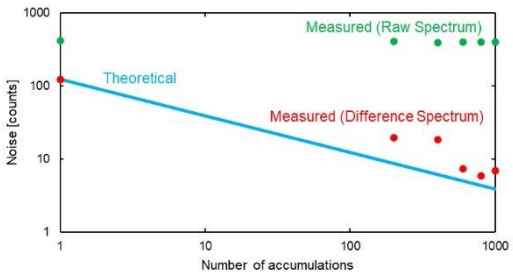


Fig. 2 Noise as a function of the number of accumulations.

© 2025年 応用物理学会

膠芽腫 DNA メチル化状態の低侵襲リアルタイム予測
ー　赤外吸収スペクトルが捉える血中脂質特性　ー

Non-invasive real-time prediction of glioblastoma DNA methylation status
– Blood lipid characteristics captured by infrared absorption spectra –

東北大院医工 [1]，東北大院医 [2]　○木野 彩子 [1]，金森 政之 [2]，松浦 祐司 [1]

Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku Univ. [1], Graduate School of Medicine, Tohoku Univ. [2]

○Saiko Kino[1], Masayuki Kanamori[2], Yuji Matsuura[1]

E-mail: saiko.kino.a3@tohoku.ac.jp

1. はじめに

O6-メチルグアニン-DNA メチルトランスフェラーゼ（MGMT）タンパクは，膠芽腫の標準治療における第一選択薬テモゾロミドに対する薬剤抵抗性を持つ．腫瘍 DNA における MGMT プロモーター領域のメチル化状態は MGMT 産生能を左右し，テモゾロミド感受性および予後予測の重要な因子となる．メチル化率の測定は現状で摘出後の膠芽腫組織生検より行われるが，メチル化状態は治療経過を通じて変化するため，リアルタイムかつ低侵襲の評価法の確立が求められている．この研究では、患者血漿の中赤外吸収スペクトル解析による DNA メチル化状態評価の可能性を探索する．

2. 血漿の赤外 ATR スペクトル測定および解析結果

膠芽腫患者 46 人の生検または切除術により得られた腫瘍組織について，MGMT プロモーターメチル化率を算出した．25%をカットオフ値として，15 人の患者がメチル化群，31 人が非メチル化群に分類された．同じ患者から術前に血漿サンプルを採取し，全反射減衰(ATR)法により赤外吸収スペクトルを得た．各血漿試料 20 µl を多重反射型台形プリズムの上底面に塗布し，20 分間の風乾後に測定を行った．得られたスペクトルの各波数における吸光度を説明変数とし，20%(9 例)をテストデータとする部分最小二乗(PLS)分析に基づくメチル化状態の判別，および連続値としてのメチル化率予測を行った．

メチル化状態の判別結果を図 1 に示す．判別得点の境界は 0 である．症例数の少ないメチル化群の感度がやや低いものの，非メチル化群の特異度は高く，全体の判別精度は 82.6%，受信者動作特性(ROC)の曲線下面積(AUC)は 0.886 であった．さらにメチル化率を連続値として回帰予測したところ，測定値との相関は 0.47 と，中程度の相関を示した(図 2)．MGMT プロモーター領域のメチル化状態による血漿スペクトルの差異は，おもに脂質由来の吸収帯で生じていた．図 3 にメチル化群および非メチル化群の二次微分 ATR スペクトルの群平均を示す．CH_2/CH_3 吸収強度比 $r_1 = I_{2923} / I_{2870}$ および $r_2 = I_{2853} / I_{2870}$ はそれぞれ脂質鎖の不飽和度および鎖長を示すが，いずれも非メチル群で高く，メチル化に伴う代謝脂質特性の変化を示唆している．

膠芽腫における MGMT プロモーター領域のメチル化状態評価のための，血漿 ATR-FTIR 分光法の可能性を示した．今後も引き続き，予測精度向上を模索していく．

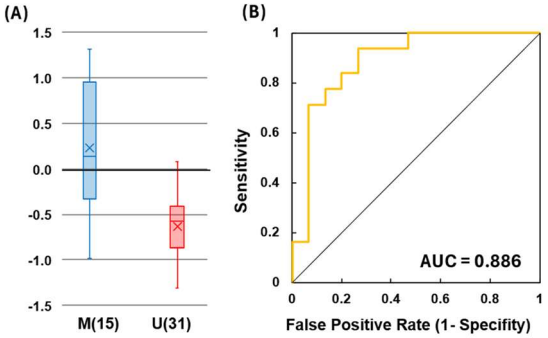


Fig.1 Methylation discrimination from plasma IR spectra. (A) Discriminant score (B) ROC Curve

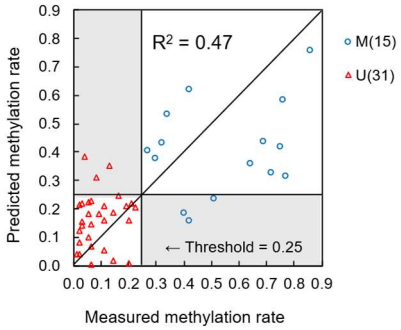


Fig.2 PLS prediction of methylation rate from plasma IR spectrum. Predicted value relative to measured value.

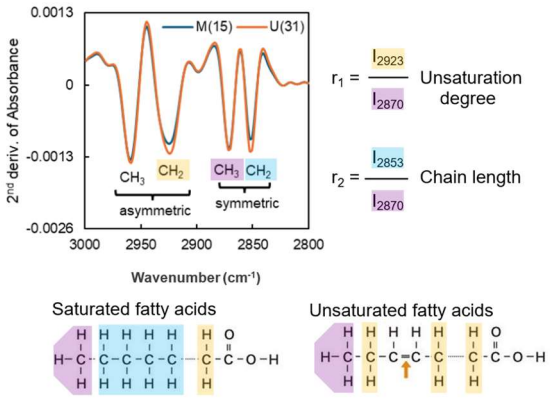


Fig.3 Second derivative group average spectra of methylated and non-methylated groups. “unsaturation degree” r_1 and “chain length” r_2

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation：3.4 Laser system and materials

[7p-P05-1~7] 3.4 Laser system and materials

[7p-P05-1]

Comparative Study of Laser Performance of Extracavity and Intracavity Resonant-Pumped Pulsed Ho:YLF Lasers

○Rukia Abe[1], Shoken Ishii[2], Atsushi Sato[1] (1.Tohoku Inst. Tech., 2.Tokyo Metro. Univ.)

[7p-P05-2]

Efficiency Enhancement of an Optical Parametric Amplifier for 193 nm Solid-State Laser

○Kimihiro Omata[1], Yasuaki Moriai[1,2], Hironori Igarashi[2], Atsushi Fuchimukai[2], Taisuke Miura[2], Takeshi Higashiguchi[1] (1.Utsunomiya Univ., 2.Gigaphoton Inc.)

[7p-P05-3]

Wavelength-tunable seed laser system for a GMNA Yb fiber Mamyshev oscillator

○(M1)Ryuta Suzuki[1], Atsutoshi Murata[1], Hiroyuki Toda[1], Masayuki Suzuki[1] (1.Doshisha Univ.)

[7p-P05-4]

Fabrication of PPLN waveguide device for mid-infrared generation

○Tadashi Kishimoto[1], Hiroyuki Takahashi[2], Tatsushi Hasegawa[2], Daisuke Shimura[2], Norihiko Sekine[1] (1.NICT, 2.OKI)

[7p-P05-5]

Laser oscillation characteristics of Yb:YAG thin disk bonded by thin-film double-sided tape

○Shuma Ako[1], Yasuaki Moriai[1,2], Atsushi Fuchimukai[2], Taisuke Miura[2], Takeshi Higashiguchi[1] (1.Utsunomiya Univ., 2.Gigaphoton Inc.)

[7p-P05-6]

High efficient Yb:YAG Thin-disk Laser via Full Power Zero-Phonon Line-Locked Diode Pump

Zhong-Rong Shi[1], ○Su ChengYu[1], Chun-Lung Wu[1], Chao-Kuei Lee[1], Yuan-Yao Lin[1], Li-Chang Tsou[2], Tzu-Neng Lin[2], Tai-Ming Chang[2] (1.National Sun Yat-sen Univ., 2.Turning Point Lasers Corp.)

[7p-P05-7]

Efficient cooling design for Er:YAP lasers via thermal modeling

○Jigme Zangpo[1], Hiyori Uehara[1,2], Ryo Yasuhara[1,2] (1.National Inst. for Fusion Science, 2.The Graduate Univ. for Adv. Studies(SOKENDAI))

外部共振器型及び内部共振器型共鳴励起 Ho:YLF レーザーのパルス発振特性の比較検討

Comparative Study of Laser Performance of Extracavity and Intracavity Resonant-Pumped Pulsed Ho:YLF Lasers

東北工大工[1]，都立大システムデザイン[2]　○(M1)阿部 琉輝亜[1]，石井 昌憲[2]，佐藤 篤[1]

Tohoku Inst. of Tech.[1], Tokyo Metro. Univ.[2], ○Rukia Abe[1], Shoken Ishii[2], Atsushi Sato[1]

E-mail: m252801@st.tohtech.ac.jp

1. はじめに

近年，防災減災対策や気象予報精度向上の観点から風の高度分解能の高精度化が必要になってきている．そこで，高い高度分解能の風観測が可能なセンサーとしてドップラー風ライダー(DWL)が注目されており，その光送信機となる Ho レーザーには高出力かつ高繰り返しのパルス動作が求められている．我々は，将来的な DWL の衛星搭載に向けた高効率化及び省電力化のための新しい発振技術として共振器内共鳴励起型 Ho レーザーの研究を行っている[1]．本研究では，室温動作の 100 mJ 級 Q スイッチ Ho:YLF レーザーの高効率化を目的とし，レート方程式モデルを用いた動作解析による外部共振器型及び内部共振器型共鳴励起 Ho:YLF レーザーのパルス発振特性の比較検討を行い，内部共振器型励起方式の有効性について検証した．

2. 動作解析結果

Fig.1 に Tm:YLF レーザーを励起光源とした外部共振器型及び内部共振器型共鳴励起 Ho:YLF レーザーの基本構成を示す．外部共振器型共鳴励起方式(Fig. 1(a))では，Ho 結晶長の違いにより Ho 結晶での Tm レーザー光の吸収率が変わるため，Ho レーザー出力が最大となるよう Ho 結晶長を最適化してから動作解析を行った．一方，内部共振器型共鳴励起方式(Fig. 1(b))では，マルチパス励起により Tm レーザー光は Ho 結晶長によらずすべて Ho 結晶に吸収されると仮定した．Fig. 2 にレート方程式モデル[2]を用いて計算した Q スイッチ発振時の入出力特性を示す．計算条件として Ho レーザーの出力鏡反射率を 85%，Ho:YLF 結晶のドープ率を 0.5 at.%，内部共振器型及び外部共振器型での Ho 結晶長をそれぞれ 5 mm 及び 25 mm とした．Tm レーザーの最大出力は 200 mJ とした．動作解析の結果，最大励起エネルギーにおける外部共振器型及び内部共振器型での出力パルスエネルギーはそれぞれ 78 mJ 及び 137 mJ であった．また，発振閾値はそれぞれ 28 mJ 及び 93 mJ であった．これらの結果は，内部共振器方式が高効率動作に適していることを示唆しているが，まだ動作解析モデルが厳密ではないため，今後さらに動作解析の高精度化を進める．加えて，実験結果との比較を実施する予定である．

参考文献 1) A. Sato, *Laser Congress 2024 (LS&C)*, LsW1C.3.
2) A. Sato *et al.*, Proc. SPIE **9262**, 926215 (2014).

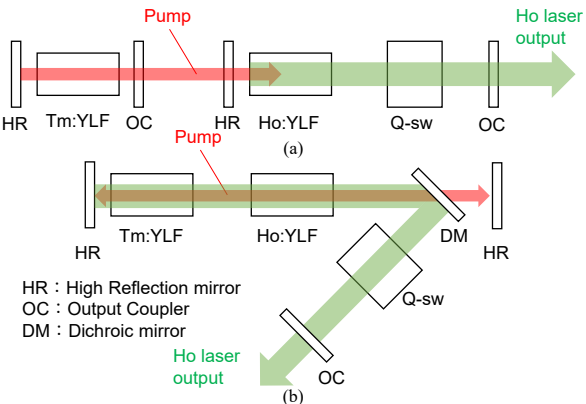


Fig. 1 Schematic diagram of a Q-switched Ho:YLF laser resonant-pumped by a Tm:YLF laser. (a) Extracavity pumping, (b) intracavity pumping.

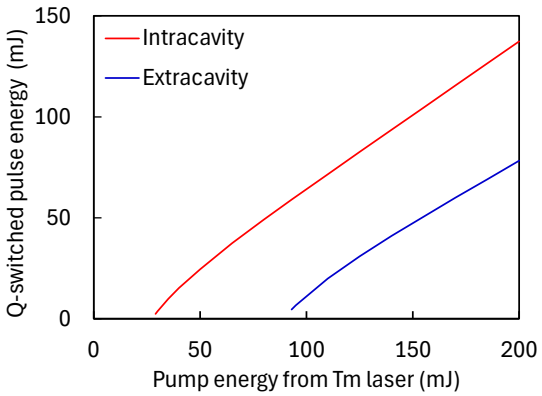


Fig. 2 Comparison of numerically calculated output energies of the Ho:YLF laser with two different pumping schemes.

© 2025年 応用物理学会

193 nm 固体レーザーに向けた光パラメトリック増幅器の高効率化

Efficiency Enhancement of an Optical Parametric Amplifier for 193 nm Solid-State Laser

宇都宮大学 [1]，ギガフォトン株式会社 [2]　○(M2) 小又 公拓 [1]，(D) 盛合 靖章 [1,2]，五十嵐 裕紀 [2]，淵向 篤 [2]，三浦 泰祐 [2]，東口 武史 [1]

Utsunomiya Univ. [1], Gigaphoton Inc. [2], ○(M2) Kimihiro Omata[2], (D) Yasuaki Moriai[1,2], Hironori Igarashi[2], Atsushi Fuchimukai[2], Taisuke Miura[2], and Takeshi Higashiguchi[1]

mc246883@s.utsunomiya-u.ac.jp

ハイブリッド ArF エキシマレーザーは、193 nm 固体レーザー（シード光）と ArF エキシマ増幅器を組み合わせたレーザーシステムであり、光子エネルギーとパルスエネルギーが高く、ビーム品質もよいため、微細加工や難加工材料の加工などの応用に適している [1]。

種光（シード光）の 193 nm 固体レーザーは、非線形光学結晶での多段の波長変換で近赤外レーザーから 193 nm 光に変換させるため、元となる近赤外レーザーの高出力化が必要である。そこで、波長が 1030 nm の近赤外レーザーを高効率化することにした。1030 nm の近赤外光は Yb 添加ファイバーレーザーでパルス生成した上で前段増幅し、Yb:YAG 細ロッドで主増幅した。これにより、繰り返し周波数 60 kHz、パルス幅 3 ns の 1030 nm 光パルスを発生させた。Yb:YAG 細ロッドを用いた 2 パスさせる主増幅による最大平均出力は 12 W であった（図 1）。これを励起光（ポンプ光）にした。次に、和周波発生 [SFG (Sum frequency generation)] のための 1553 nm 光の高効率化と高出力化を実現するため、光パラメトリック発生 [Optical parametric generation (OPG)] と光パラメトリック増幅 [Optical parametric amplification (OPA)] の最適増幅条件を調べた。図 2 は OPG と OPA の光学系である。種光は 1553 nm CW 光とし、結晶長が 50 mm の MgO:PPLN を非線形波長変換素子とした。λ/2 波長板と PBS を組み合わせることで OPG および OPA への励起光（ポンプ光）のパワーを調節し、1553 nm 光の高効率化と高出力化を図った。

発表では OPG および OPA の増幅条件や出力特性を報告する予定である。

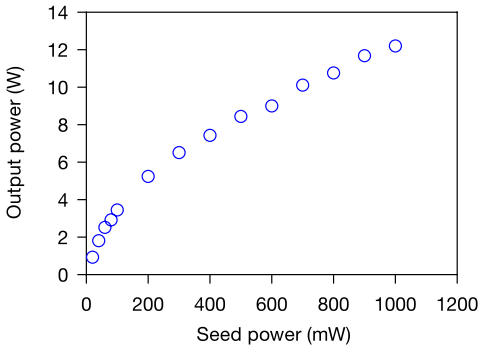


Fig. 1. Output power.

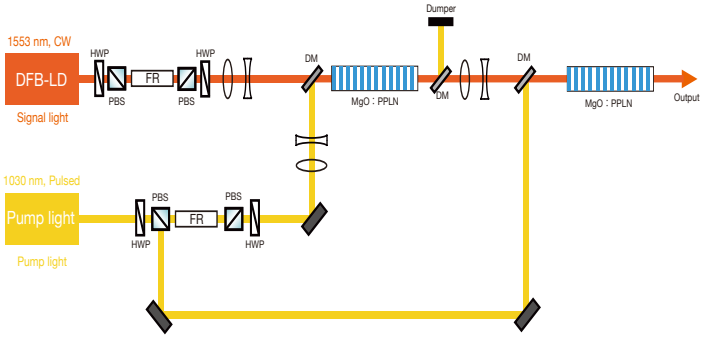


Fig. 2. Optical layout of two-stage OPA system.

参考文献

[1] M. Arakawa, Y. Tamaru, A. Fuchimukai, Y. Sasaki, T. Onose, M. Tamiya, T. Miura, T. Nakazato, S. Watanabe, and T. Matsunaga, “Amplification of DUV solid-state laser pulse using ArF laser,” CLEO Europe 2017, CA-1.6 SUN (2017).

© 2025年 応用物理学会

GMNA を利用した Yb ファイバ Mamyshev 発振器に向けた波長可変レーザーシステムの開発

Wavelength-tunable seed laser system for a GMNA Yb fiber Mamyshev oscillator

同志社大学（M1）鈴木　隆太，村田　昌聡，戸田　裕之，鈴木　将之

Doshisha Univ. Ryuta Suzuki, Atsutoshi Murata, Hiroyuki Toda Masayuki Suzuki

E-mail: ctwn0382@mail4.doshisha.ac.jp

高出力の超短パルスファイバレーザーはレーザー加工や非線形顕微鏡の光源に利用されており，特に近年，発振器から直接的に高出力かつ超短パルスの生成が可能な Mamyshev 発振器の開発が注目されている[1]．我々のグループでは，偏波保持シングルモード Yb 添加ファイバ(PM YDF)を用いた GMNA による広帯域 Mamyshev 発振器の開発を進めてきた．これまで GMNA Mamyshev 発振器に入力するシード光は主に波長 1030 nm であった．シード光の波長を変化させて得られるスペクトルの変化を確認するため，本発表では，GMNA Mamyshev 発振器に入射するシード光の波長を可変化して，GMNA Mamyshev 発振器の出力特性評価を行った．

開発した波長可変レーザーシステムの構成を Fig.1 に示す. 発振器と 1 段目増幅器で構築されたシステムから出力された光パルスは，回折格子により分散補償を行う．その後，2 段目増幅器(0.3 m 長 Yb SMF)内で引き起こされる自己位相変調(SPM)を利用して, スペクトルの広帯域化を行う．増幅された広帯域の光パルスに対して，狭帯域フィルタ(BPF0)を使用して，透過波長帯域を変化させたときのスペクトルを Fig. 2 に示す. Fig. 2 より, Mamyshev 発振器に波長 1010 nm 帯から 1040 nm までの光をシード光として Mamyshev 発振器に入射することが可能なシードレーザーシステムを構築することに成功した．

当日の発表では，開発したシステムおよび出力された波長可変光パルスを Mamyshev 発振器に入力したときの出力特性について報告を行う．

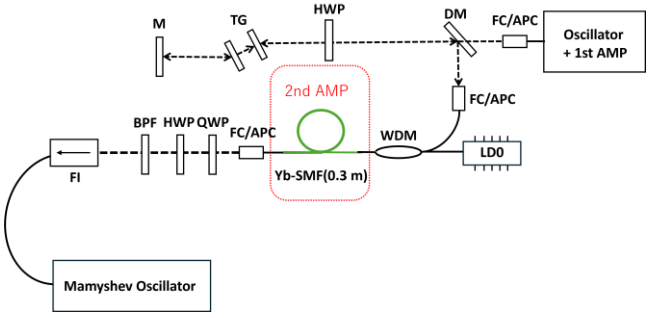


Fig. 1 Experiment diagram.

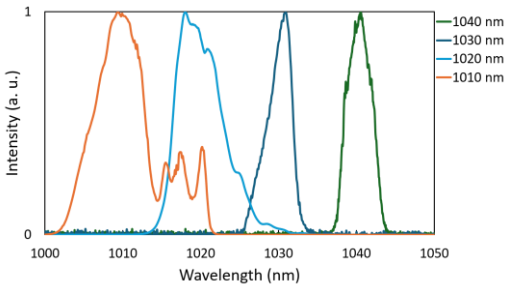


Fig. 2 Spectra at the different center wavelength BPF

参考文献

[1] Z. Liu et al., “Megawatt peak power from a Mamyshev oscillator.” Optica, 4, pp.640-654 (2017).

© 2025年 応用物理学会

中赤外光発生のための PPLN 導波路型波長変換デバイスの開発

Fabrication of PPLN waveguide device for mid-infrared generation

情通機構[1]，沖電気[2] ○岸本 直[1]，高橋 博之[2]，長谷川 達志[2]，志村 大輔[2]，関根 徳彦[1]

NICT[1], OKI[2], ◦T. Kishimoto[1], H. Takahashi[2], T. Hasegawa[2], D. Shimura[2], N. Sekine[1]

E-mail: tkishimoto@nict.go.jp

中赤外領域の波長帯には分子を特徴づける固有振動モードが存在するため、微量ガス分析やリモートセンシングなどへの中赤外光の応用が進んでいる。我々は、CO_2 などの温暖化ガスのリモートセンシングや工業プロセスでの物質濃度計測などのために中赤外光を利用した分光センシングシステムの開発を行っている。センシング対象の分子の吸収波長に対応した中赤外光源が必要なため、ここでは分極反転周期を設計することで疑似位相整合条件を満たす波長に変換できる周期分極反転 $LiNbO_3$（PPLN）波長変換デバイスに着目した。1 μm 帯と通信波長帯の光源を組み合わせることで差周波発生（DFG）による波長変換で 2~3 μm 帯の中赤外光を発生させることができる。中赤外光発生の変換効率向上のためにリッジ導波路型 PPLN デバイスを設計し、試作、評価した結果について報告する。

PPLN 導波路デバイスは、PPLN 基板を LN 基板に接着後、研磨加工で薄膜化してダイシングによりリッジを形成した構造である。図 1 に、PPLN コアサイズが 6x6 μm の場合に計算した等価屈折率を用いて求めた DFG 過程における疑似位相整合曲線を示す。周期が 22～23.5 μm の範囲では、励起波長 1.0~1.1 μm に対して 2.5~3.7 μm の中赤外光が生成されることが期待される。また、単一の周期構造の場合においても 0.6~0.8 μm 幅で波長可変な中赤外光を得ることが可能であることがわかる。試作した PPLN リッジ導波路の評価は、中心波長 1.064 μm、スペクトル幅 20 nm のパルス光源と通信波長帯の波長可変光源を用いて行った。両光源の励起光はダイクロイックミラーにより合波されて導波路へ入射し、生成した中赤外光については励起光を遮断する 3 枚のフィルタを透過させた上で測定した。図 2 に、周期 22.2 μm のデバイスを用いて通信波長帯励起光の波長を掃引したときの DFG スペクトルを示す。DFG による中赤外光の出力強度は 0.2 mW で、通信波長帯励起光に対する波長変換帯域は約 50 nm が得られた。これらの結果の詳細について報告する。

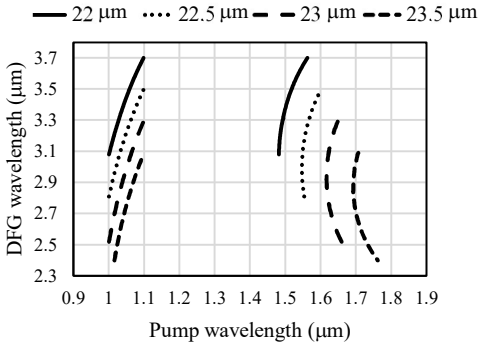


Fig. 1. Quasi-phase-matching conditions for DFG.

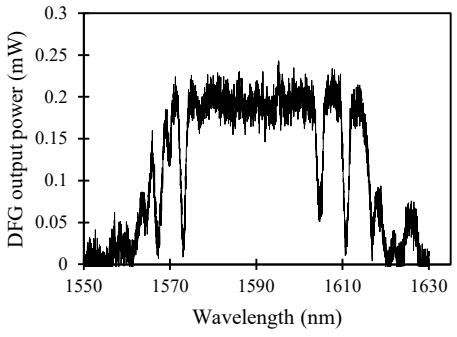


Fig. 2. DFG spectrum with PPLN ridge waveguide.

© 2025年 応用物理学会

薄膜両面テープ接合した Yb:YAG 薄ディスクのレーザー発振特性

Laser oscillation characteristics of Yb:YAG thin disk bonded by thin-film double-sided tape

宇都宮大学[1]，ギガフォトン株式会社[2]

○(M2) 阿光 秀馬[1]，(D) 盛合 靖章[1,2]，淵向 篤[2]，三浦 泰祐[2]，東口 武史[1]

Utsunomiya Univ.[1], Gigaphoton Inc.[2], ○(M2) Shuma Ako[1], (D) Yasuaki Moriai[1,2], Atsushi Fuchimukai[2], Taisuke Miura[2], and Takeshi Higashiguchi[1]

E-mail: mc246808@s.utsunomiya-u.ac.jp

薄ディスクレーザーは超短パルスレーザーの発生や難加工材料の微細加工，表面処理など，基礎研究から産業応用まで幅広く利用されている [1]. 薄ディスクレーザーで高いピーク出力を取り出すには，レーザー媒質に与えるパワー密度を大きくする．パワー密度を大きくするとレーザー媒質で熱が発生し，出力やビーム品質の低下，レーザー媒質の損傷につながる．除熱にはヒートシンクと接合して冷却する． 薄ディスクの接合には，はんだづけや UV 硬化法，原子拡散接合法 [2] が有効である．これらの接合法は高い熱伝導を達成する一方で，高コストな設備や複雑なプロセスを必要とする．そこで，安価かつ簡便なプロセスで済む極薄両面テープを用いて薄ディスクとヒートシンクを接合し，出力特性を明らかにした．

Yb:YAG コンポジット薄ディスクと銅製ヒートシンクを厚み 5 μm の極薄両面テープで接合した．図 1 に接合したディスクモジュールを用いて構築した W 型共振器を示す．波長 969 nm の LD を用いて最大出力 100 W でディスクを励起し，発振出力を測定した．ヒートシンクは 18°C で水冷し，サーモカメラでディスクの表面温度を観測した．

図 2 は CW 発振出力と光–光変換効率の励起出力依存性である．最大平均出力は 17 W，最大光変換効率は 30%であった．励起パワーが 100 W のとき，ディスクの最大表面温度は 50°C であった．本発表では，薄ディスクの接合方法や波面特性，種光パルスを再生増幅動作した特性を報告する．

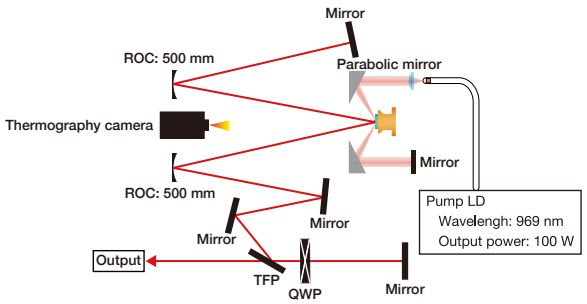


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

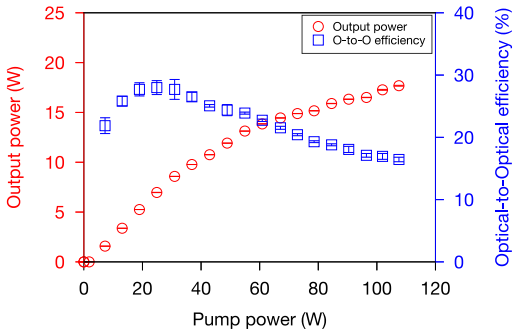


Fig. 2. Output power and O-to-O efficiency.

参考文献

[1] K. Sugioka, “Progress in ultrafast laser processing and future prospects,” Nanophoton. **6**, 393-413 (2017).
[2] S. S. Nagisetty *et al.*, “Lasing and thermal characteristics of Yb:YAG/YAG composite with atomic diffusion bonding,” Laser Phys. Lett. **14**, 015001 (2017).

© 2025年 応用物理学会

High efficient Yb:YAG Thin-disk Laser via Full Power Zero-Phonon Line-Locked Diode Pump

Department of Photonics, National Sun Yat-sen University[1]

Turning Point Lasers Corp. [2]

Zhong-Rong Shi[1], Su ChengYu[1], Chun-Lung Wu[1], Chao-Kuei Lee*[1],

Yuan-Yao Lin[1], Li-Chang Tsou[2], Tai-Ming Chang[2] and Tzu-Neng Lin[2]

E-mail: chuckcklee@yahoo.com

ABSTRACT

In this work, to reduce the thermal phonon generation, a full power 969 nm zero-phonon line (ZPL) locked diode module for pumping thin-dick laser was designed and fabricated. Comparing to this system with a 940 nm pumped laser, the optical-to-optical efficiency of the 969 nm pump 5 % doped Yb:YAG think disk CW laser exhibit the clear increase by 7.3%, demonstrating the advantages of zero-phonon line pumping in high-power operation. Additionally, by using a thermal effect testing system, the variation of the crystal's thermal lensing effect with pump power was investigated. Finally, we implement a thin-disk mode-locked laser system using a SESAM and successfully achieve a mode-locked output of approximately 1.34 W at a pump power of 14.71W.

© 2025年 応用物理学会

Efficient cooling design for Er:YAP lasers via thermal modeling

National Inst. for Fusion Science [1], The Graduate Univ. for Adv. Studies (SOKENDAI) [2], ◦Jigme Zangpo[1], Hiyori Uehara[1,2], Ryo Yasuhara[1,2]

E-mail: jigme.zangpo@nifs.ac.jp, yasuhara.ryo@nifs.ac.jp

A major challenge in high-power Er:YAP lasers is that up to ~40% of the pump power is converted into heat [1], inducing a significant temperature difference (ΔT) within the crystal. This leads to thermal lensing, mechanical stress, and degraded beam quality (elevated M^2), ultimately limiting pump power to avoid fracture risks. To address this, we conducted steady-state 3D thermal simulation of a cylindrical Er:YAP crystal embedded in a copper holder, quantify ΔT and evaluating thermal management schemes under various pump conditions.

The analytical maximum temperature difference, $\Delta T_{\max}$, is expressed as:

$$\Delta T_{\max} = \frac{\eta_{heat}\alpha P_{abs}}{4\pi k(1-e^{-\alpha l})}\left(1+2\ln\left(\frac{r_b}{\omega}\right)\right), \qquad (1)$$

where $\eta_{\mathrm{heat}}(0.7)$ is the heat generation parameter, $\alpha(115\mathrm{m}^{-1})$ is the absorption coefficient, P_{abs} is the absorbed power, k is the thermal conductivity of the crystal, $l(8\mathrm{mm})$ and $r_b(1\mathrm{mm})$ are the length and radius of the crystal, respectively, and ω is the pump power radius.

Crystal properties were adopted from [1]: anisotropic thermal conductivity k=11.6/9.9/12.3 W/m·K (∥a/b/c), density ρ= 5480 kg/m³ (5% Er-doped), and heat capacity C_{p}= 557 J/kg·K. The copper holder was modeled with k = 400 W/m·K, ρ = 8960 kg/m³, C_{p}= 385 J/kg·K. The volumetric heat source followed:

$$Q(r,z) = \eta_{heat}\frac{2P_{abs}\alpha}{\pi\omega_0^2(1-e^{-\alpha l})}e^{\frac{-2r^2}{\omega_0^2}}e^{-\alpha z}. \qquad (2)$$

Boundary conditions (BCs, Fig.1) included forced convection on the holder's side ($h_{fw} = 2e4$ W/m²·K, $T_{fw} = 15$℃) and free convection on the top/bottom faces ($h_{air} = 20$ W/ m² ·K, $T_{air} = 20$℃) [2].

At P_{abs}(25W) and ω(186μm), the simulated $\Delta T_{\max}$ reached 111.3°C, aligning closely with the analytical estimate of 100.1°C (~5% deviation). To optimize cooling, we varied ω(Fig.4). Increasing ω to 300 μm reduced $\Delta T_{\max}$ to 88.7 ℃ (~21% decrease), demonstrating effective thermal load mitigation. This permits a safe increase in P_{abs} to ~32.5W—surpassing the prior saturation limit of 25W [1]—before thermal lensing dominates, thereby enhancing laser output.

Reference

[1] Yao et al., Opt. Express, **28**(13), 19000–19007 (2020).

[2] Bergman & Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, 2017.

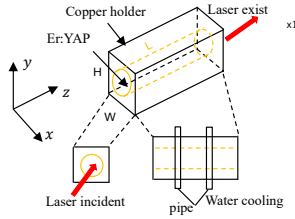


Fig.1:Geometry and BCs

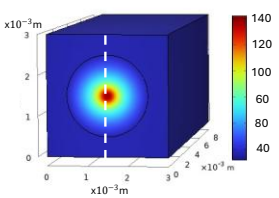


Fig.2:Simulated 3D temperature distribution.

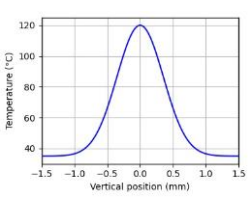


Fig.3:Cross-sectional plot via vertical position of Fig. 2.

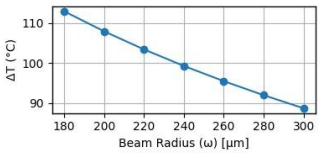


Fig.4: ΔT versus varying ω at P_{abs} : 25W.

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.4 Laser system and materials

[8a-N106-1~8] 3.4 Laser system and materials

[8a-N106-1]

Supercontinuum light generation using noise-like pulses as a light source

○(M1)Keita Koshimizu[1], Yoshiaki Takiguchi[1], Hiroyuki Toda[1], Masayuki Suzuki[1] (1.Doshisha Univ.)

[8a-N106-2]

Divided Pulse Amplification by Phase Detection using Second Harmonic Generation

○Oki Iguchi[1], Haruyuki Miyake[1], Akira Shirakawa[1], Henrik Tunnermann[2] (1.UEC, 2.DESY)

[8a-N106-3]

Spatial Mode Selection in a Multimode Fiber Laser Using Active Mode-Locking

○Yusuke Katsumata[1], Akira Shirakawa[1] (1.ILS, UEC)

[8a-N106-4]

Simulation development of stimulated Brillouin scattering and self-phase modulation in Yb-doped fiber amplifiers

○Yuya Imaeda[1,2], Tsubasa Endo[1], Yohei Kobayashi[1] (1.ISSP, Univ.Tokyo, 2.Hamamatsu Photonics K.K.)

[8a-N106-5]

High Repetition rate All-PM Figure-9 Fiber Laser with intracavity EOM

○Ryosuke Maki[1], Shotaro Kitajima[1], Norihiko Nishizawa[1] (1.Nagoya Univ.)

[8a-N106-6]

Development of an all-polarization-maintaining mode-locked Er-fiber laser with utilizing a 3×3 coupler

○(M2)Yoshiaki Takiguchi[1], Rion Kasatani[1], Hiroyuki Toda[1], Masayuki Suzuki[1] (1.Doshisha Univ.)

[8a-N106-7]

Development of all-polarization maintaining Yb fiber laser with narrow bandpass filter for high peak power

○(M2)Toshiki Tamura[1], Haruto Nishi[1], Hiroyuki Toda[1], Masayuki Suzuki[1] (1.Doshisha Univ.)

[8a-N106-8]

Temperature-compensated all-polarization-maintaining NPE mode-locked Yb fiber oscillator

○(M2C)Soshi Hiyane[1], Keiko Matumoto[1], Daiki Okazaki[1], Yuri Kirita[1], Seizi Shimizu[2], Shigeki Tokita[1] (1.Kyoto Univ., 2.Mishuboshi Inst.)

ノイズライクパルスを光源としたスーパーコンティニューム光生成

Supercontinuum light generation using noise-like pulses as a light source

同志社大学（M1）越水 啓太, 滝口 慶明, 戸田 裕之, 鈴木 将之

Doshisha Univ., Keita Koshimizu, Yoshiaki Takiguchi, Hiroyuki Toda, Masayuki Suzuki

E-mail: ctwn0343@mail4.doshisha.ac.jp

広帯域なパルス光源であるスーパーコンティニューム（Super Continuum：SC）光 [1] は光干渉断層計などへの応用が報告されている．本研究では，ノイズライクパルス（Noise-like Pulse：NLP）を励起源とした SC 光の生成に取り組んだ．NLP システムは，非線形増幅ループミラー（Nonlinear Amplifying Loop Mirror：NALM）をパルス生成機構に用いた全偏波保持 Er ファイバレーザー発振器とその光パルスを増幅する Er ファイバ増幅器で構築した．さらに，増幅した光パルスを高非線形ファイバ（Highly Nonlinear Fiber：HNLF）に入射することで SC 光の特性評価を行った．

はじめに，構築した NLP を光源とした SC 光発生系の構成を Fig. 1 に示す．NLP 発振器は，PM-WDM と PM-TC（70:30），PM-EDF，2×2 PMC(60:40) ，PM-FI，BPF（透過帯域幅 2 nm）で構成される．なお，発振器は 2 台の励起 LD の電流値を制御するだけで NLP を生成させることができる．正常分散偏波保持 Er ファイバ（PM-EDF）を増幅媒質とするファイバ増幅器を用いて，得られた NLP の出力増大を行った．

Fig. 2 に増幅器の励起 LD パワーが 670 mW のとき，増幅器の直後の出力をオートコリレーターにより測定した自己相関波形を示す．数ピコ秒のピーク成分と数 100 ピコ秒の時間幅を有する波束成分の二重構造からなる波形が得られ，この波形は NLP の典型的な特徴であることを示している [2] ．本構成に挿入した BPF の透過スペクトルは矩形波形状を示すことから，透過後のパルス波形は sinc 関数に対応しているため，主パルスの立ち上がりと立下りに多くのサイドローブが存在すると考えられる．このサイドローブを有するパルスが発振器を構成する長いファイバを伝搬することでパルス崩壊が起こり，結果として NLP が生成されたと考えられる [3] ．

モードフィールドアダプタを介して増幅した NLP を HNLF に入射し，スペクトルの広帯域化を行った．得られたスペクトルを Fig. 3 に示す．短波長側では波長 1200 nm 以下の領域までスペクトルが広帯域化することを確認できた．HNLF の高い非線形性により SPM が起こり，スペクトルが広がったと考えられる．

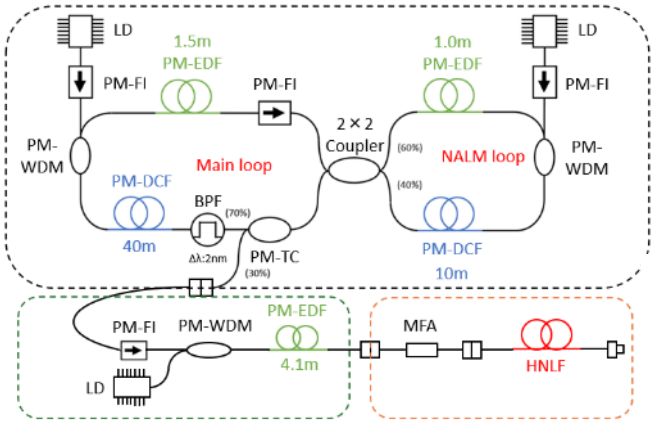


Fig.1. Experimental diagram.

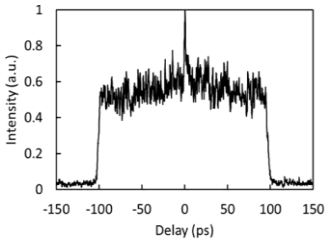


Fig.2. Autocorrelation trace.

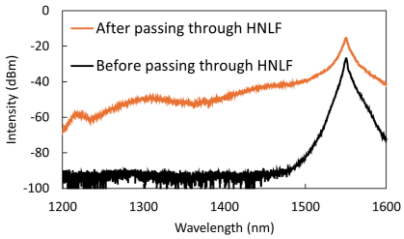


Fig.3. Output spectra before and after inputting HNLF.

参考文献

[1] J. M. Dudley, *et al.,* Rev. Mod. Phyys., 78, 1135 (2006).

[2] S. Kobtsev, *et al,* Opt. Express, 17, 20707 (2009).

[3] A. Turnali, *et al.,* Opt. Express, 30, 13977 (2022).

© 2025年 応用物理学会

分割パルス増幅の第二高調波を用いた位相差検出法によるパルス結合

Divided Pulse Amplification by Phase Detection using Second Harmonic Generation

○井口　央己，三宅 晴之，白川 晃，Henrik Tünnermann[1]

(電通大レーザー研，[1]Deutsches Elektronen-Synchrotron)

Ohki Iguchi, Haruyuki Miyake, Akira Shirakawa, Henrik Tünnermann[1]

(Institute for Laser Science, The University of Electro-Communications, [1]Deutsches Elektronen-Synchrotron)

1.　研究背景

分割パルス増幅（DPA）[1]は超短パルスファイバーレーザーの高ピークパワー化のための手法の１つとして研究されている．DPA では、自由空間で１つのパルスを複数のパルスに時間的に分割し，それぞれのパルスを利得媒質のピークパワー限界以下で増幅した後，再び自由空間に戻し再結合させることで高ピークパワーのパルスを得ることができる．結合の際にはパルス同士の位相を合わせる必要があり，位相は通常，LOCSET によって安定化する．しかしこのように変調を加えることは精密測定などへの応用には望ましくない．無変調の方法として HC（Hänsch-Couillaud）法があるが，これでは４分割以上での位相差検出が原理的に不可能となる[2]．本稿では，無変調の４分割 DPA での第二高調波発生（SHG）を用いた位相差検出法によるパルス結合を報告する。.

2.　実験方法と結果

図１に実験配置図を示す．

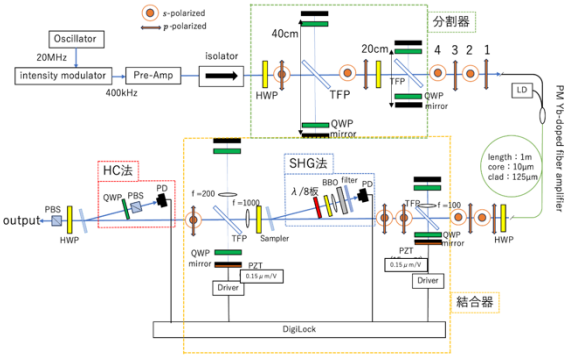


図１　SHG を用いた位相差検出法による４分割 DPA 実験配置図

発振器には全正常分散型モード同期 Yb ファイバーレーザーを使用し,出力パルスは平均出力 30mW, 繰り返し周波数 20 MHz, パルス幅 40ps であった. SHG の変換効率向上のため、繰り返し周波数を 400kHz に低下させ実験を行った．本実験の４分割 DPA では，パルス数 4→2 には SHG 法による位相差検出を行い, 2→1 には HC 法による位相差検出を行った．図２にパルス数 4→2 の場合の位相差信号を示す．結合器の遅延路を周期的に変位させ,時間的干渉縞とし観測している．パルス数 4→2 の干渉縞のビジビリティは理論値が 33%のところ，実測値は 26%となった．

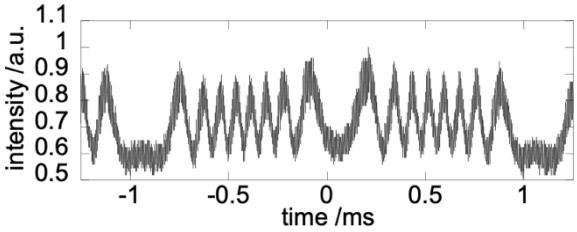


図 2. 位相差信号としての時間的干渉縞 (4→2)

結合パルスを位相差検出用のモニター光と出力光に分岐し，PID 制御で結合効率が最大化されるように遅延路をロックしパルスの結合を行った．図 3(a)には 4 分割されたパルス波形を，図 3(b)には 4→1 結合時のパルス波形を示す．この時, 4→1 パルス結合の結合効率は 61%であった.

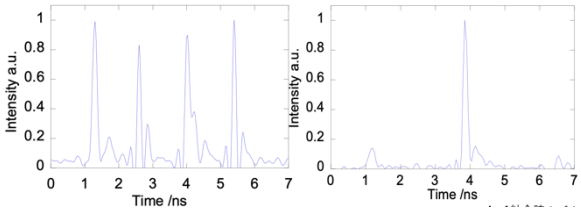


図 3(a) 4 分割パルス波形　(b) 4→1 結合時パルス波形

3.　. まとめと今後の展望

SHG を用いた 4 分割パルス間の位相差検出に成功した．また 4→1 への結合のロックを達成した．今後の課題は結合効率の向上である．また, 8 分割のパルス結合を目指して研究を行っていく．

4.　参考文献

[1] FS. Zhou, F. W. Wise, D. G. Ouzounov, "Divided-Pulse amplification of ultrashort pulses," Optics Letters, vol. 32, no. 7, pp. 871-873, 2007.

[2] 奥石（杉本）洸太，“分割パルスファイバー増幅およびチャープパルス増幅による高エネルギー超短パルス増幅特性，” 電気通信大学修士論文，2021

© 2025年 応用物理学会

能動モード同期によるマルチモードファイバーレーザーの空間モード選択の研究

Spatial Mode Selection in a Multimode Fiber Laser Using Active Mode-Locking

電通大レーザー研[1] ○勝又 悠介[1]，白川 晃[1]

ILS, UEC[1], ○Yusuke Katsumata[1], Akira Shirakawa[2]

E-mail: y_katsumata@ils.uec.ac.jp, akira@ils.uec.ac.jp

1. はじめに

マルチモードファイバーの空間モードはそれぞれ固有の実効屈折率および群速度を持っている．この特性を利用し，マルチモードファイバーレーザーにおける能動モード同期により，任意の空間モードを選択励振する方法を我々は考案し研究を行っている[1]．自在な空間モードの選択励振が実現できれば，超短パルスレーザーの高出力化やレーザー加工，空間多重化通信等への応用が期待される．

2. 実験及び結果

Fig.1 に実験配置図を示す．ファイバーは長さが 5.3 m で吸収係数 10 dB/m@976 nm の Yb 添加ダブルクラッド偏波保持マルチモードファイバーと 12.2 m のパッシブファイバーを融着して用い，端面は寄生発振を防ぐために角度をつけて研磨している．共振器内の PBS は，ファラデーローテーターと偏光子を組み合わせアイソレーターとして機能させるとともに，1/2 波長板 1 (HWP1) を操作することで出力結合率可変のアウトプットカップラーとしての役割も果たしている．また，反射率が一定なビームサンプラーによって常に共振器内のパワーを測定している．ファンクションジェネレータ (FG) で音響光学変調器 (AOM) に強度変調を与え能動モード同期をかけ、空間モード選択を試みている．

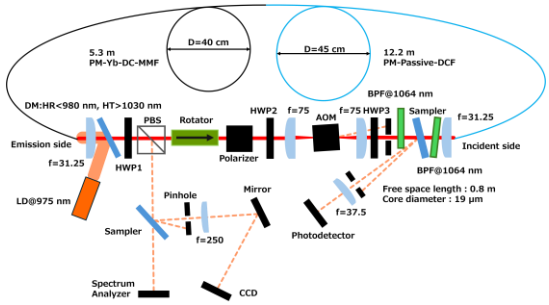


Fig.1. Experimental setup with 19 μm core fiber

使用しているファイバーには，存在する閉じ込めモードが LP_{01}，LP_{11}，LP_{21} の 3 種類存在することが計算によりわかっている．その実効屈折率をもとに共振器 1 周の繰り返し周波数の計算結果を Fig.2 に示した．Fig.2 から能動モード同期が約 11.4 MHz で起こるとわかる．ここで，LP_{02} は曲げ損失が大きいため励振しない．主に励振可能な LP_{01} と LP_{11} の繰り返し周波数の差から，約 2.5 kHz の範囲内に空間モードが単一励振可能な周波数が存在すると考えられる．

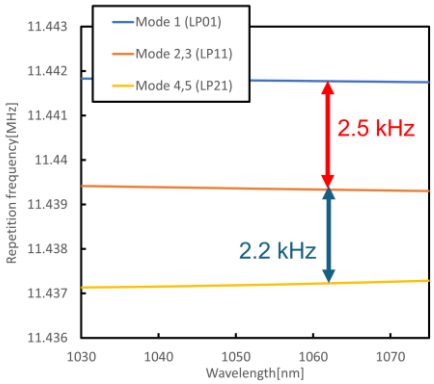


Fig.2. Calculated repetition frequencies of the spatial modes of the fiber

実際に，AOM のドライバーに矩形波電圧を FG によって印加し周期的な変調を加えると，ある周波数で Fig.3 のように Q スイッチ発振を観測した．Q スイッチ発振を起こす周波数は 2 か所確認でき，このとき選択できるモードと僅かなずれがある場合 Q スイッチ発振が起こると考えられる．しかし実験では明確なモード弁別を確認できていない．共振器の最適化と，変調周波数と繰り返し周波数差の許容幅（臨界周波数差）の検討が今後の課題である．

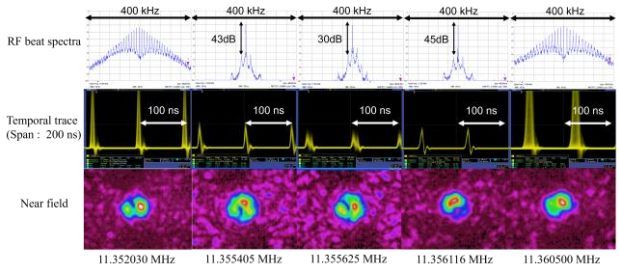


Fig.3. Active mode-locking and near field images with various modulation frequencies

参考文献

1) 大西志晶、白川晃：「マルチモードファイバーレーザーにおける能動モード同期による時間領域モード選択の研究」, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 11a-S202-5 (2021).

© 2025年 応用物理学会

Yb 添加ファイバー増幅器中の誘導ブリルアン散乱・自己位相変調シミュレーション開発

Simulation development of stimulated Brillouin scattering and self-phase modulation in Yb-doped fiber amplifiers

東大物性研[1]，浜松ホトニクス(株)[2] ○今枝 祐哉[1,2]，遠藤 翼[1]，小林 洋平[1]

ISSP, Univ. Tokyo[1], Hamamatsu Photonics K.K.[2], ○Yuya Imaeda[1,2], Tsubasa Endo[1], Yohei Kobayashi[1]

E-mail: imaedayuya@issp.u-tokyo.ac.jp

高出力ナノ秒パルスレーザーは、スペクトル純度と高エネルギー特性から、加工・LiDAR・波長変換用シード光などに広く用いられる。中でもファイバーレーザーは、放熱性と堅牢性に優れ、固体レーザーに比べ小型・高メンテナンス性を有する。しかし、ナノ秒パルスでの高強度化と狭線幅化は、主に 2 つの非線形効果によりトレードオフとなる。1 つ目は誘導ブリルアン散乱（SBS）で、線幅が狭いほどフォノン励起が強くなり、反射波による装置破壊を招く。2 つ目は自己位相変調（SPM）で、光強度の時間変化によりスペクトルが広がる。パッシブファイバー（コア径 10 µm、長さ 1 m）に線幅 100 GHz のガウシアンパルスを入射した場合、簡単な見積もり[1, 2]によりそれぞれのしきい値が Fig. 1 のように概算できる。しかし実用上重要なファイバー増幅器で 1-10 ns パルスを扱う場合は、利得飽和やフォノンダイナミクスを含めた動的解析が必要で、解析解のみでは最適化に限界がある。そこで我々は Yb 添加ファイバー増幅器中で、利得分布・SBS・SPM を同時に扱うフレームワークを構築し、任意波形レーザー実験系[3]との比較検証を進めている。

数値計算結果の一例を Fig. 2 に示す。ファイバーの利得分布によって波形歪みが生じ、SPM 由来のスペクトル広がりも生じている一方で、SBS による反射光とその増幅も確認できる。これら３つの効果のうち 2 つを扱った研究は多いが[1]、すべて同時に数値的に解いた報告は限られる[4]。実験検証を重ねることで、今後、パルスの任意時間波形生成により自由度の高い非線形効果の制御・抑制が期待できる。講演では、モデルの詳細や実験との比較検証について報告する。

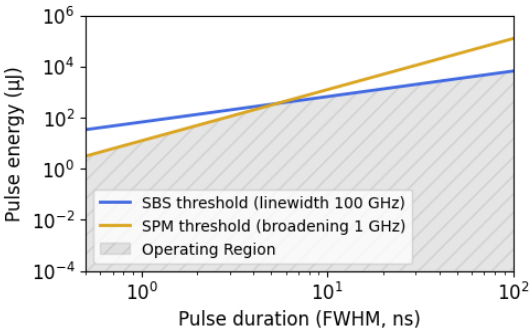


Fig. 1 Threshold of SBS and SPM

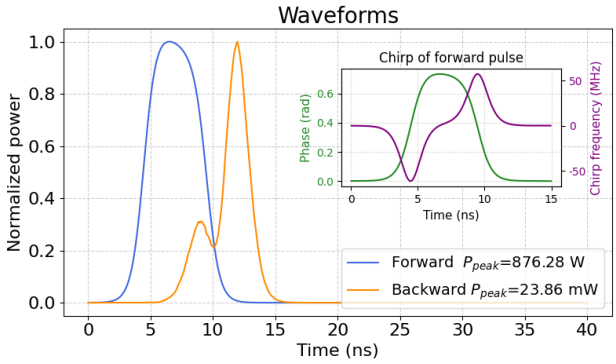


Fig. 2 Simulation of SBS and SPM in an amplifier

[1] Agrawal, G. P., *Nonlinear Fiber Optics, 6th ed.* (Elsevier/Academic Press, 2019)

[2] Fishman, Daniel A., and Jonathan A. Nagel. *Journal of Lightwave Technology* 11.11 (2002): 1721-1728.

[3] 遠藤翼，博士論文，東京大学 (2023)

[4] Ran, Yang, et al., *Optics Express* 23.20 (2015): 25896-25905.

© 2025年 応用物理学会

EOM 内包高繰り返し全偏波保持 Figure-9 ファイバーレーザー

High Repetition rate All-PM Figure-9 Fiber Laser with intracavity EOM

名大院工，◦(M1)牧 亮佑，北島 将太朗，西澤 典彦

Nagoya Univ. [1], ◦Ryosuke Maki, Shotaro Kitajima, Norihiko Nishizawa

E-mail: maki.ryosuke.a6@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1．研究背景・目的

光周波数コムとは、周波数軸上で縦モードが広く等間隔に並ぶ櫛状のスペクトルを持つレーザーのことであり、計測や分光の分野で広く用いられている。分光の分野においては、コムモード当たりのパワーが重要であるため、高い繰り返し周波数の光周波数コムが必要となる。本研究室ではこれまで 206 MHz の繰り返し周波数をもつ全偏波保持ファイバー構成 Figure-9 光周波数コムを開発してきた[1]。しかし、繰り返し周波数（f_{rep}）の安定化に用いるピエゾアクチュエータ（PZT）の制御帯域不足が原因で f_{rep} における高周波ノイズの残留が課題となっていた。そこで本研究では、200 MHz 程度の高い繰り返し周波数を保ちながら、広い制御帯域をもつ電気光学位相変調器（EOM）を内包した Figure-9 ファイバーレーザーを開発した。

2． 実験方法・結果

今回開発したのは、偏波保持 Er 添加ファイバ（PM-EDF）を利得媒質に用いた全偏波保持ファイバー構成の Figure-9 ファイバーレーザーである。全体の構成は先行研究[1]に近いが、PBS とエンドミラーの間に結晶長さ 50 mm の EOM が挿入されている。共振器はまずモード同期発振を得やすい構成にて構築し、その後各部のファイバーを短くする手法にて繰り返し周波数を高めていった。モード同期が得られた中で最も共振器長が短く、繰り返し周波数が高いときの RF スペクトルを Fig.1 に示す。f_{rep} は 198.1 MHz で、87 dB の信号対雑音比（SNR）を得ることができた。このときの光スペクトルを Fig. 2 に示す。スペクトル幅は 31.2 nm であり、ふちの切り立ったスペクトル形状より共振器内分散は正常分散であることが推測される。同様の共振器構成で EOM を挿入していないときのスペクトル幅は 52.6 nm であり、より単峰に近い形状であったことから、EOM 結晶の持つ強い正常分散が共振器全体の分散値に影響を及ぼしていることが分かった。Figure 3 は、EOM に周波数 2 MHz、電圧 80 V の変調信号を印加した時の、モード同期レーザーと狭線幅 CW レーザー（中心波長 1560 nm）とのビート信号（f_{beat}）である。位相変調によって 2 MHz の間隔で側帯波が立っていることが確認できた。これは EOM の変調帯域が 2 MHz 以上であることを示している。今後はキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} と f_{rep} の制御系を加え、光周波数コムシステムの構築を行う予定である。

本研究は JST CREST, JPMJCR2104 の助成を受けて行った。

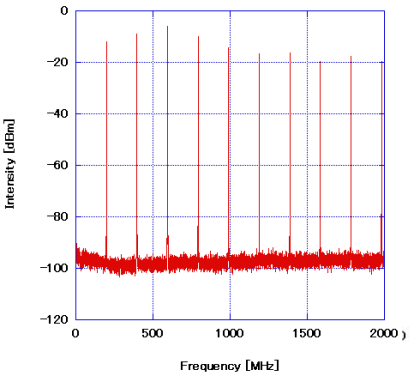


Fig. 1. RF spectrum

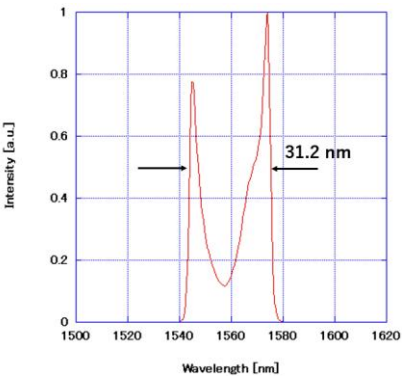


Fig. 2. Optical spectrum

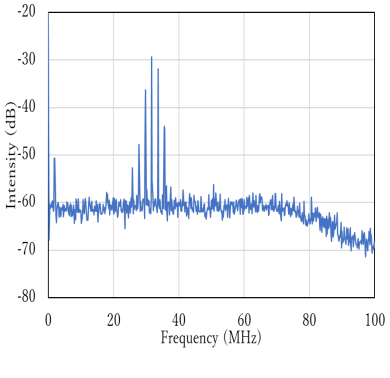


Fig.3. f_{beat} signal with modulation

参考文献

[1] S. Kitajima, K. Jung, and N. Nishizawa, “206 MHz fully stabilized all-PM dispersion-managed figure-9 fiber laser comb,” Sci. Rep. **14**(1), 7108 (2024).

© 2025年 応用物理学会

3×3 カプラを用いた全偏波保持 Er ファイバレーザーの開発

Development of an all-polarization-maintaining mode-locked Er-fiber laser with utilizing a 3×3 coupler

同志社大学　○（M2）滝口　慶明，笠谷　鈴音，戸田　裕之，鈴木　将之

Doshisha Univ. ○Yoshiaki Takiguchi, Rion Kasatani, Hiroyuki Toda, Masayuki Suzuki

E-mail: ctwk0343@mail4.doshisha.ac.jp

波長 1550 nm で発振するモード同期 Er ファイバレーザーは，多光子顕微鏡の光源や光コムによる測距技術など，様々な分野への応用を目指して研究されている．偏波保持ファイバで構築可能なモード同期ファイバレーザーを実現する方法のひとつとして，非線形増幅ループミラー(NALM)を用いる手法がある． これまで NALM を用いたモード同期ファイバレーザーには 2×2 カプラを使用する例が主であった．一方，3×3 カプラを用いる場合，モード同時実現に必要な位相シフト量が 2×2 カプラを用いる場合よりも小さいという特徴があり，近年，これを用いたモード同期ファイバレーザーに関する報告がある[1,2]．本講演では、3×3 カプラを用いた，セルフスタート可能な 8 の字型 Er ファイバレーザーシステムの出力特性について報告する．

Fig.1 に開発したレーザーの概略図を示す．レーザーは，3×3 カプラと偏波保持ファイバ，アイソレータ，WDM カプラ，中心波長が 1550 nm のバンドパスフィルタ，Er 添加光ファイバから構成されている．励起光源には波長 976 nm 帯の LD を使用した．

励起 LD の出力が 524 mW のときにモード同期動作が得られ，励起 LD の出力を徐々に下げていき，出力が 365 mW のときモード同期動作が安定し，ポート 2 から繰り返し周波数 22.3 MHz，平均出力 2.6 mW，スペクトル幅 1.2 nm，パルス幅 2.56 ps の出力が得られた．Fig.2 に出力光パルスのスペクトルを示す．当日は開発したファイバレーザーのより詳細な出力特性について述べる．

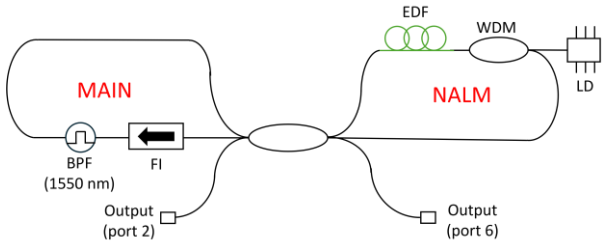


Fig.1. All-polarization-maintaining mode-locked Er-fiber utilizing a 3×3 coupler.

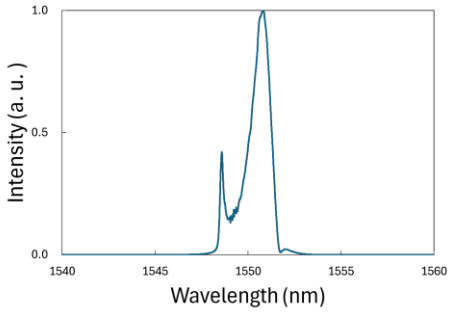


Fig.2. Output spectrum from the output 2.

参考文献

1. D. Kim, D. Kwon, B. Lee, and J. Kim, Opt. Lett. 44, 1068 (2019).
2. M. Nishiura, R. Kageyama, and T. Shioda, Opt. Lett 48, 4312 (2023).

© 2025年 応用物理学会

高ピークパワーを目指した帯域制限フィルタを用いた全偏波保持 Yb ファイバレーザーシステムの開発

Development of all-polarization maintaining Yb fiber laser with narrow bandpass filter for high peak power

同志社大学　°(M2)田村 俊貴，西 陽斗，戸田 裕之，鈴木 将之

Doshisha Univ.,　°Toshiki Tamura, Haruto Nishi, Hiroyuki Toda, Masayuki Suzuki

E-mail: ctwk0344@mail4.doshisha.ac.jp

平均出力が数ワット以上のコンパクトで堅牢なモード同期ファイバレーザーは，レーザー微細加工や高侵達で高解像度が実現できる非線形顕微鏡などの分野で広く使用されている．非線形増幅ループミラー(NALM)を用いた全偏波保持ファイバレーザーはモード同期の自己始動が可能であることから，波長やパルス幅の可変性など，その出力特性を向上させるための研究が精力的に行われている．

我々のグループでは，従来使用されている 2×2 カプラを用いた NALM より低い位相シフト量でセルフスタート可能な 3×3 カプラ[1]を用いた全偏波保持 Yb ファイバレーザー発振器の開発に成功している[2]．本発表では，3×3 カプラを用いた発振器から出力された光パルスに対して帯域制限フィルタ(BPF)を用いて光パルスを整形した後に偏波保持 Yb ダブルクラッドファイバを用いた増幅器にて増幅，そしてパルス圧縮した結果について報告を行う．

Fig.1 に開発した全偏波保持 Yb ファイバレーザーシステムの概略図を示す．発振器の励起光源には波長 976 nm 帯のレーザーダイオード（LD1）を使用した．また，発振器は 3×3 カプラと偏波保持光ファイバ，アイソレーター，波長分割多重カップラ，中心波長 1040 nm のバンドパスフィルタ，Yb ファイバから構成されている．発振器から出力された光パルスは長さ 0.7 m の高濃度偏波保持 Yb ファイバを用いた増幅器にて前段階増幅を行った．そして，中心波長 1064 nm，帯域幅 4 nm の BPF にてスペクトル形状を整形した後に，長さ 2.0 m，コア径 15 μm の偏波保持 Yb ダブルクラッドファイバ(Yb PM-DCF)を用いた非線形の主増幅器にて出力増大を行った．

オートコリレータを用いたパルス幅計測の結果を Fig.2 に示す．Yb PM-DCF で増幅した後に回折格子対で圧縮した後の光パルスの平均出力は 1.34 W，パルス幅は 126 fs であり，これらの値から算出されたピークパワーは 0.43 MW である．

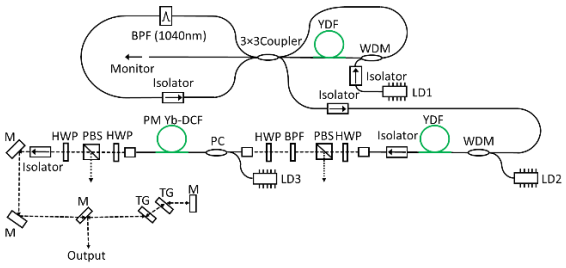


Fig.1. All-PM mode-locked Yb-fiber laser system.

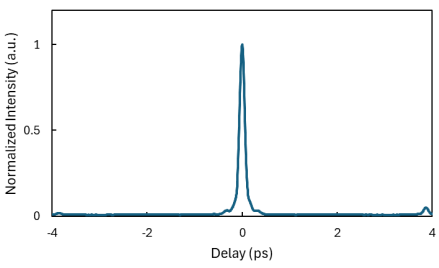


Fig.2. Autocorrelation trace.

参考文献

1. M. Nishiura, R. Kageyama, and T. Shioda. Opt. Lett 48 (16), pp. 4312-4315 (2023).
2. 田村，吉井，戸田，鈴木，第 85 回応用物理学会秋季学術講演会，20p-A37-10 (2024).

© 2025年 応用物理学会

温度補償された全偏波保持 NPE モード同期 Yb ファイバー発振器

Temperature-compensated all-polarization-maintaining NPE mode-locked Yb fiber oscillator

京大化研[1]，三星ダイヤモンド工業[1]，○(M2C)比屋根 総司[1]，松本 景子[1]，岡崎 大樹[1]，桐田 勇利[1]，清水 政二[2]，時田 茂樹[1]

Kyoto Univ.[1], Mitsuboshi Diamond Indus.[2], ○(M2C)Soshi Hiyane[1], Keiko Matsumoto[1], Daiki Okazaki[1], Yuri Kirita[1], Seiji Shimizu[2], Shigeki Tokita[1]

E-mail: hiyane.soushi.64j@st.kyoto-u.ac.jp

非線形偏波進展（NPE）を利用したモード同期発振器[1]は，半導体過飽和吸収体などを利用したものと比べ，高出力，短パルス，長寿命を実現しやすいという利点を有するが，偏波保持（PM）ファイバーの速軸と遅軸を利用したマッハツェンダ干渉計に基づくため，温度変化の影響を受けやすいという欠点をもつ．それを克服するために，ファラデー回転子（FR）を利用する提案がなされている[2]．本研究では，ファラデー回転子に基づく温度補償により，ロバスト性の向上を図った Yb ファイバーモード同期発振器について報告する．

実験装置の概略図を Fig.1 に示す．波長 976 nm の半導体レーザーで励起された Yb 添加ファイバーを増幅媒体として用い，定在波型の共振器を構成した．赤線は空間に取り出されたレーザー光を示している．左側にはファラデー回転子と λ/8 板 を配置し，右側には λ/2 板，偏光子（PBS），バンドパスファイルター（1064 nm，8 nm）を配置した．ファイバーを含めた共振器の光学長は約 9.3 m である．PBS で S 偏光成分を取り出し，2 枚の回折格子を用いてパルス圧縮した．室温において 30 時間以上の安定なモード同期発振を確認した．測定の際に励起パワーが過剰になるとマルチパルスによるスペクトルの干渉が見られるため，励起パワーをスペクトルの干渉が改善できるまで下げていった．その際のモード同期時の出力は 4.6 mW であった．Fig.2 は Fig.1 に示す赤枠で囲まれたファイバー部分を温度制御プレートに乗せ，温度を 90 秒で約 10 度上下させた際のモード同期時の出力変化を示している．温度を上下させた際にも大きな出力変化がなく，安定したモード同期を保っていたことから，ファラデー回転子による温度補償が行われていることが確認できた．

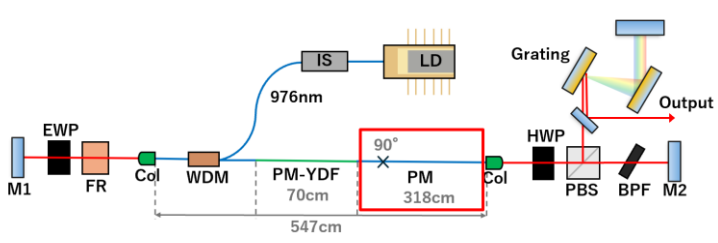


Fig. 1 Schematic of the mode-locked fiber laser.

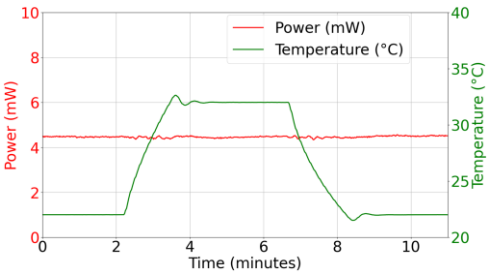


Fig. 2 Mode Locking power and temperature

参考文献

[1] J. Szczepanek, *et. al.*: Opt. Lett. **42** (2017) 575.
[2] X. Liu *et al.*: IEEE J. Lightwave Technol. **41** (2023) 5107.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.4 Laser system and materials

[8p-N106-1~11] 3.4 Laser system and materials

[8p-N106-1]

Detail model of gas optics for high power laser applications

○Hitoki Yoneda[1], Yurina Michine[1] (1.ILS, Univ. of Electro-Communications)

[8p-N106-2]

3cm^2 large diameter gas optics for 10kJ laser system

○Yurina Michine[1], Hitoki Yoneda[1] (1.ILS, UEC)

[8p-N106-3]

70-W Hybrid ArF Laser for Material Processing

○Rikuo Koike[1], Igarashi Hironori[1], Moriai Yasuaki[1], Kamba Yasuhiro[1], Fuchimukai Atsushi[1], Miura Taisuke[1] (1.Gigaphoton)

[8p-N106-4]

Development of compact Optical Parametric Amplifier for 193 nm solid-state laser

○Yasuaki Moriai[1,2], Kimihiro Omata[1], Hironori Igarashi[2], Atsushi Fuchimukai[2], Taisuke Miura[2], Takeshi Higashiguchi[1] (1.Utsunomiya Univ., 2.Gigaphoton Inc.)

[8p-N106-5]

High-energy operation of a blue-diode-pumped alexandrite laser

○Atsushi Sato[1], Yuma Takida[2], Hiroaki Minamide[2] (1.Tohoku Inst. Tech., 2.RIKEN)

[8p-N106-6]

Development of a Compact High Repetition Rate Cr:ZnS Mode Locked Laser

○(D)Ayu Konno[1], Masaki Tokurakawa[1,2] (1.ILS, UEC, 2.CNBE, UEC)

[8p-N106-7]

Implementing Deep Reinforcement Learning for autonomous laser cavity optimization

○Yuki Ikeya[1,2], Takashi Sekine[1], Endo Tsubasa[2], Toshio Otsu[2], Takaaki Morita[1], Yoshinori Tamaoki[1], Yoshinori Kato[1], Toshiyuki Kawashima[1], Yohei Kobayashi[1] (1.Hamamatsu Photonics K.K., 2.ISSP, Univ.Tokyo.)

[8p-N106-8]

Development of an EO Q-switched Er,Cr:YSGG Laser for Fe:ZnSe Amplification

○Yuri Kirita[1], Daiki Okazaki[1], Linpeng Yu[2], Ryo Yasuhara[2], Shigeki Tokita[1] (1.ICR, Kyoto Univ., 2.NIFS)

[8p-N106-9]

Femtosecond-Direct-Laser-Written Waveguides in Tm:YAG Ceramics

○Yukihiro Akiyama[1], Kotaro Nakagawa[1], Akihiro Tsunoda[2], Masato Nakazaki[2], Yohei Kobayashi[1] (1.ISSP. Univ. Tokyo, 2.JX Advanced Metals Co.)

[8p-N106-10]

Synthesis and Characterization of Transparent Nd-Doped Fluorapatite Laser Ceramics with Fine-Grained Microstructure and c-Axis Orientation

○(PC)Sanae Koizumi[1], Tohru S Suzuki[1], Hiroaki Furuse[1] (1.National Institute for Materials Science)

[8p-N106-11]

Characterization of Cr:LiSAF/Sapphire bonding interface and thermal properties

○(P)Florent Cassouret[1], Yoichi Sato[2,1], Takunori Taira[2,1] (1.Inst. for Molecular Science, 2.Riken Spring-8 Center)

ガスオプティックスの動作機構のモデリング

Detail model of gas optics for high power laser applications

電通大レーザー　°米田仁紀，道根百合奈

Institute for Laser Science, Univ. of Electro-Communications, °Hitoki Yoneda and Yurina Michine

E-mail: yoneda@ils.uec.ac.jp

気体を媒質としたガスオプティックスは、その高い光学損傷耐力（ナノ秒レーザーで 1.5 kJ/cm2）、超低挿入損失（<10ppm）、減反射コーティングが不要、ナノ秒のスイッチング動作、高い波面精度などを持ち、原理実証が行われた[1]後に実応用に向けて開発が進んでいる。このガスオプティックスの特徴は、0-1 に迫るような大振幅の密度波を気体中に生成できることである。[2]もとから気体の光学屈折率は 1 に近く、位相差をつけることを考えてもこの大振幅の密度波の生成は欠かせない要素となっている。しかし、詳細な動作機構を考えると、定性的な機構の説明がついているが定量評価はできていないものが多々ある状況にある。主なものは、(1)なぜ以下の Fig.1 のような密度分布の波になるか。(2)　多モードでの構造があるにもかかわらず、繰り返し同様の粗密波の形状が保たれるか。(3)位相光学素子では、高い回折効率を達成するには光学長差が正確に 0 とπの組み合わせになっていることが必要になるが、実際には Fig.2 のように回折効率が飽和するような特性をもつのはなぜか。(4)波面の選択性が高いのはなぜか。などである。

Fig.1

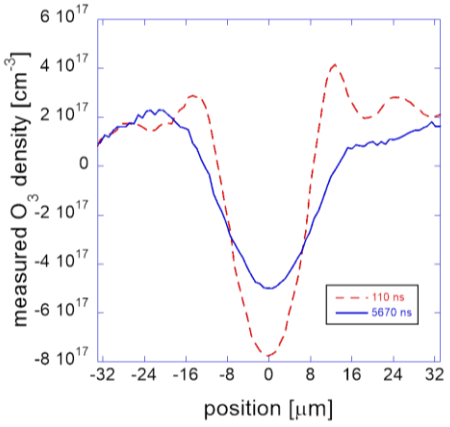


Fig.1

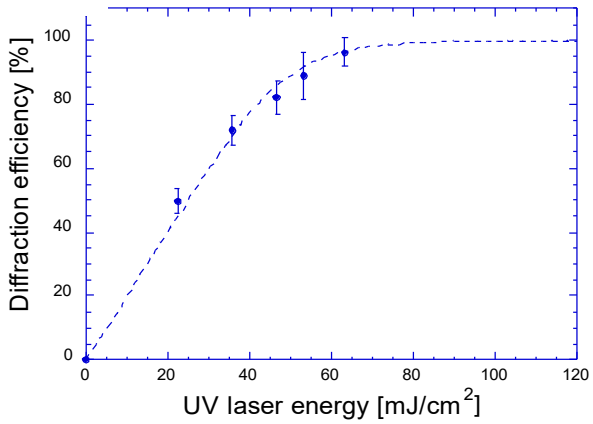


Fig.2

本研究では、この現状を打開するために、新たな詳細物理モデルを構築している。そのモデルをもとにガスオプティックスの特性を予測し、実験データと比較することを行っているが、これらの一致性を使ってこの開発したモデルの正当性の検証を行っていく。

[1] Y. Michine and H. Yoneda, COMMUNICATIONS PHYSICS, (2020) 3: 24

[2] Y. Michine, R. M. More, and H. Yoneda, Physics of Fluids 36, 041703 (2024)

© 2025年 応用物理学会

高エネルギーレーザー用大型ガスオプティックスの開発

3cm^2 large diameter gas optics for high energy laser system

電気通信大学レーザー新世代研究センター　○道根 百合奈，米田　仁紀
Institute for Laser Science, Univ. of Electro-Communications
E-mail: y_michine@ils.uec.ac.jp

米国国立点火施設（NIF）などで先導して進められているような大型の高エネルギーレーザーを利用したレーザー核融合研究では、ターゲットへの最終集光光学系の光学素子類の損傷が、さらなるレーザーシステムの高エネルギー化のための問題の一つとなっている。特に紫外光では光学材料のバンドギャップに近いことから赤外光よりも損傷しやすく、頻繁な交換が避けられない。産業でも高エネルギーレーザーによる加工研究開発が進んでおり、システムの小型化とメンテナンス性、耐力向上を狙った光学素子類品質改善のための開発が各光学素子メーカーでも進められている。

我々はその中で、原理的に固体材料より損傷閾値が高くできる中性気体を媒質とした光学素子開発を行ってきた。数 mm~1cm の厚みのオゾン混合ガスに対して、紫外パルスレーザー（266nm, 5ns pulse）を干渉照射し気体中に音波とエントロピー波から成る粗密波を励起させることで、気体中に大振幅の密度変調構造を生成させることができる。この密度変調のピーク時間は数 10ns 後にピークを迎えるので、ピーク時間に合わせて被制御レーザー光を入射させれば過渡的な透過型体積回折格子として機能させることができる。損傷閾値は典型的にはナノ秒レーザーに対して 1.6kJ/cm^2 であるので、10kJ レーザー制御を行うには、3cm 角のガスオプティックスを生成できれば良い。

ここでは、気体の流路を制御し 3cm 角の開口オゾン混合ガス流路の開発を行った。1cm 程度の開口であればガスの流入・流出速度を制御すればよいが、開口部が大きくなると乱流の影響が回避できなくなる。（図１）そこで、酸素・オゾン・酸素の３層の流路を作成し、それぞれの流入出速度を制御することで開口部での均一なガス厚み・ガス密度が確保できる条件の探索を行った。実際のガス密度計測結果等についても報告する。

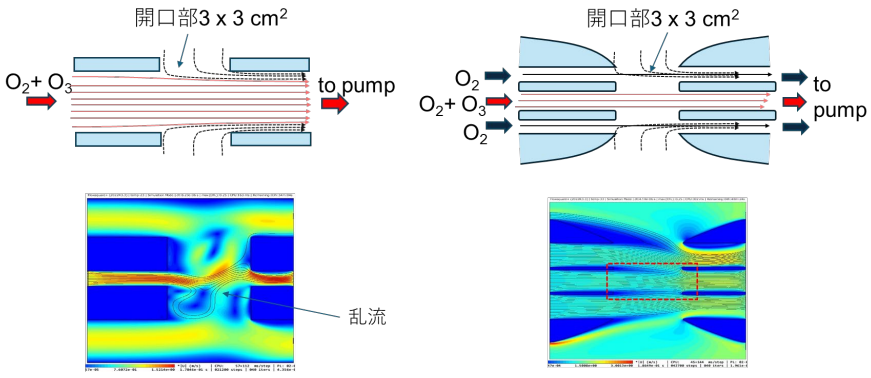


図１：（左）単層ガス流路　（右）３層ガス流路　の流体シミュレーション

© 2025年 応用物理学会

加工用 70 W ハイブリッド ArF レーザ

70-W Hybrid ArF Laser for Material Processing

ギガフォトン[1] ○小池 陸生[1], 五十嵐 裕紀[1], 盛合 靖章[1], 上場 康弘[1], 淵向 篤[1], 三浦 泰祐[1]

Gigaphoton Inc.[1] ○Rikuo Koike[1], Hironori Igarashi[1], Yasuaki Moriai[1],

Yasuhiro Kamba[1], Atsushi Fuchimukai[1], Taisuke Miura[1],

E-mail: rikuo_koike@gigaphoton.com

当社は半導体露光プロセス用のエキシマレーザの製造・販売を行っており、露光用 ArF レーザの最大出力は 90 W に達している。我々はこの高出力 ArF レーザを半導体露光以外の分野にも展開すべく、レーザ加工への応用を目指している。しかしながら、Fig.1.(a)に示すように、露光用 ArF レーザはビーム品質を示す M^2 値が 59 と大きく集光性に乏しいため、直接的な加工用途への展開は困難である。このため高ビーム品質を持つ DUV 固体レーザを種光とし、これを ArF レーザで増幅するハイブリッド ArF レーザの開発を進めている[1]。ハイブリッド ArF レーザは、固体レーザに由来する優れたビーム品質と、ArF レーザによる高利得増幅を両立することで集光性に優れた高出力な DUV 光源としての可能性を有している。我々はレーザ加工において重要なパラメータであるパルス形状に着目し、本発表では固体レーザ側でパルス形状の制御[2]を可能としたパルス形状可変ハイブリッド ArF レーザの増幅特性について報告する。

具体的には、Fig.1.(b)に示すようにパルス幅が長い単一パルス（パルス幅(FWHM)：10 ns、以下ロングパルス）や短いパルスを高繰り返しで発生させるバーストパルス（単一パルス幅：0.7 ns、サブパルス間隔：3 ns、サブパルス数：1~4）の発生を可能にした。Fig.1.(c)にロングパルスおよびバーストパルス動作時の出力特性を示す。ロングパルス動作では繰り返し周波数 6 kHz において 70 W 以上の出力を確認した。また高出力動作時のロングパルスの集光特性を Fig.1.(d)に示す。ここでは M^2 値が 7.1 と大きく改善されており、Fig.1.(a)に示す露光用 ArF レーザと比較して、集光性の大幅な向上が確認された。さらに、バーストパルス動作（Fig.1.(e)）においてもビーム品質を保持したまま安定した出力が得られており、加工用途への有効性が期待される。以上より、ハイブリッド ArF レーザは従来の ArF レーザでは困難であったビーム集光性及びパルス形状制御性を兼ね備えており、新たなレーザ加工プロセスの開拓や新産業分野への応用が期待される。

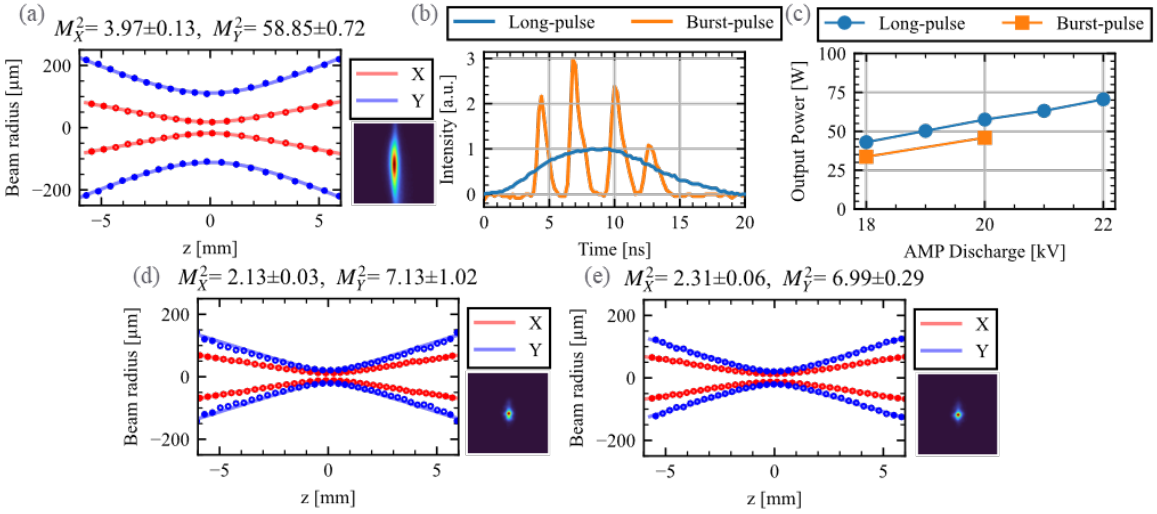


Fig.1.(a) Focusing property of the ArF laser for lithography (inset: beam waist profile); (b) Pulse shape of Hybrid ArF Laser. (c) Amplification characteristics of Hybrid ArF Laser; Focusing properties of (d) the long-pulse and (e) the burst-pulse in Hybrid ArF Laser (insets: beam waist profile)

[1] 五十嵐 裕紀, 上場 康弘, 小野瀬 貴士, 淵向 篤, 三浦 泰祐, “加工用短パルスハイブリッド ArF エキシマレーザーの開発”, レーザー研究 **52**, 1 (2024).

[2] Yasuaki Moriai, Yasuhiro Kamba, Hironori Igarashi, Atsushi Fuchimukai, and Taisuke Miura "Development of pulse shape controlled DUV solid-state light source for hybrid ArF laser", Proc. SPIE 13341 (2025).

© 2025年 応用物理学会

193 nm 固体レーザーのための小型光パラメトリック増幅器の開発

Development of compact Optical Parametric Amplifier for 193 nm solid-state laser

宇都宮大学 [1]，ギガフォトン株式会社 [2]　○(D) 盛合 靖章 [1,2]，(M2) 小又 公拓 [1]，五十嵐 裕紀 [2]，
淵向 篤 [2]，三浦 泰祐 [2]，東口 武史 [1]

Utsunomiya Univ. [1], Gigaphoton Inc. [2], ○(D) Yasuaki Moriai[1,2], (M2) Kimihiro Omata[2],
Hironori Igarashi[2], Atsushi Fuchimukai[2], Taisuke Miura[2], and Takeshi Higashiguchi[2]

E-mail: dc247214@s.utsunomiya-u.ac.jp

ハイブリッド ArF エキシマレーザーは、193 nm 固体レーザー（シード光）と ArF エキシマ増幅器を組み合わせることで、高フォトンエネルギー、高パルスエネルギー、高いビームクオリティといった特徴を持つ [1]。そのため、微細加工や難加工材料の加工への応用に有望な光源である。

波長が 193 nm の固体レーザーの構成を図 1 に示す [2]。基本波である 1030 nm 光パルスは Yb ドープファイバーレーザーで発生させ、Yb:YAG 固体増幅器で増幅される。波長を安定化しかつ 1030 nm 光パルスと同期させるため、もう一方の基本波である 1553 nm 光パルスは、DFB-LD からの 1553 nm CW 光を種光とし 1030 nm 光パルスをポンプ光として光パラメトリック発生（OPG）で発生させ、さらに光パラメトリック増幅（OPA）により 1553 nm シグナル光を増幅した。非線形光学結晶で 1030 nm 光の第 4 高調波を発生させ、1553 nm 光との和周波発生を二度行うことで 193 nm 光を発生させる。本研究では、この 1553 nm 光源の小型化と低コスト化のため、OPG と OPA を 1 つの結晶で行うダブルパス OPA 光源を構築した。

ダブルパス OPA の構成を図 2 に示す。種光は 1553 nm CW 光、ポンプ光は 1030 nm パルス光（繰返周波数 60 kHz、パルス幅 3 ns）、OPA 結晶は結晶長 50 mm の MgO:PPLN を用いた。ファラデーローテータとポラライザの組み合わせによりダブルパス後の光がポラライザから出力されるようにした。ポンプ光のピーク強度が 42.4 MW/cm^2 のときに出力 700 mW、パルス幅 3 ns のシグナル光が得られた。このときの増幅効率は 9.3 %であった。現在、ダブルパス OPA の増幅条件の最適化や出力特性を評価している。

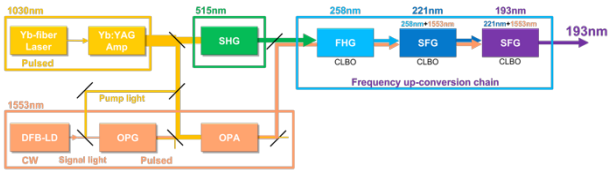


Fig. 1. Configuration of a 193 nm solid-state laser.

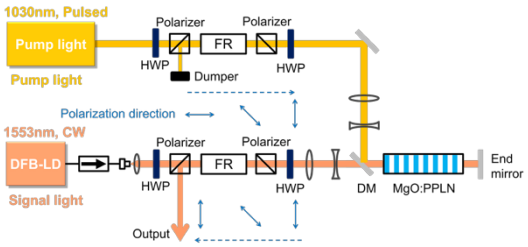


Fig. 2. Optical layout of a double-pass OPA.

参考文献

[1] M. Arakawa, Y. Tamaru, A. Fuchimukai, Y. Sasaki, T. Onose, M. Tamiya, T. Miura, T. Nakazato, S. Watanabe, and T. Matsunaga, “Amplification of DUV solid-state laser pulse using ArF laser,” CLEO Europe 2017, CA-1.6 SUN (2017).
[2] C. Qu, Y.Tanaka, H. Igarashi, Y.Tamaru, A. Fuchimukai, Y. Murakami, T.Miura, K. Kakizaki, “OPA Based Compact 193 nm Light Source for Hybrid ArF Laser,” ASSL 2020, JTh6A.2 (2020).

© 2025年 応用物理学会

青色 LD 励起アレキサンドライトレーザーの高出力化

High-Energy Operation of a Blue-Diode-Pumped Alexandrite Laser

東北工大工[1]，理研 RAP[2] ○佐藤 篤[1]，瀧田 佑馬[2]，南出 泰亜[2]

Tohoku Inst. of Tech.[1], RIKEN[2], ○Atsushi Sato[1], Yuma Takida[2], Hiroaki Minamide[2]

E-mail: atsushi@tohtech.ac.jp

1. はじめに

アレキサンドライトレーザーは、従来より医療・美容分野で広く使われているが、近年、加工用途でニーズが高い青色 LD の高出力化が進んでいることから、これを励起光源に用いた高出力アレキサンドライトレーザーの開発が可能になってきた [1)]。我々はこれまでシングルエミッター型の低出力青色 LD 励起により 1 W 以上の連続発振出力を達成している [2)]。本研究では、ファイバー結合型高出力青色 LD 励起によるアレキサンドライトレーザーの高出力化について実験的に検討したので報告する。

2. 実験結果

Fig. 1 に試作したアレキサンドライトレーザーの共振器構成を示す。励起光源は最大出力 200 W のファイバー結合型 LD であり、これを繰り返し周波数 50 Hz、パルス幅 400 μs で疑似連続発振(QCW)動作させた。レーザー結晶には、Cr ドープ率 0.2 at.%、長さ 1.9 mm のアレキサンドライトを使用した。結晶の励起側端面には、波長 700-820 nm に対する全反射(HR)コーティング及び波長 440-460 nm に対する高透過(T>97%)コーティング、出力側端面にはレーザー波長に対する無反射コーティングが施されている。共振器は、結晶の HR コーティング面と反射率 99%の出力鏡により構成した。Fig. 2 に結晶温度 20℃及び 50℃で測定した QCW 励起下での入出力特性を示す。結晶温度 50℃のとき、励起エネルギー43 mJ に対し、出力エネルギー3.9 mJ が得られた。この実験では、出力鏡反射率が 99%と高かったため、スロープ効率は 10%と低かった。発振しきい値が十分低く、さらに出力結合を大きく取れることがわかったため、今後、出力鏡反射率を最適化することにより出力向上を図る。フリーランニングでのレーザーパルス波形は、スパイク状パルスが続くバーストモード発振となっている。パルス発振モードについては、レーザーの最適化後、Q スイッチ発振に移行する予定である。

参考文献

1) H. Xiao *et al.*, Opt. Express **31**, 5832 (2023).
2) A. Sato, *CLEO-PR 2024*, P1_015.

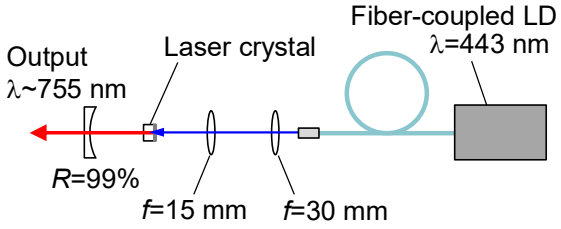


Fig. 1 Cavity configuration of the diode-pumped alexandrite laser.

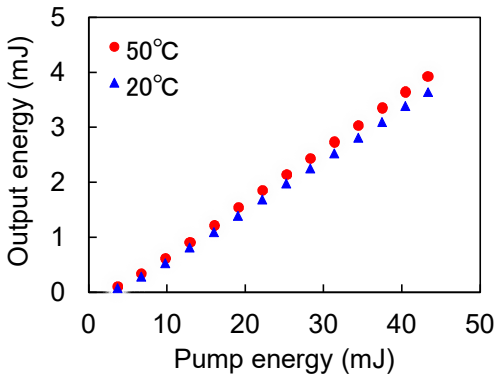


Fig. 2 Output energy as a function of pump energy.

© 2025年 応用物理学会

小型・高繰り返し Cr^{2+}:ZnS モード同期レーザーの開発

Development of a Compact High-Repetition-Rate Cr:ZnS Mode-Locked Laser

○(D1) 昆野 愛夕 [1]，戸倉川 正樹 [1, 2] (電通大レーザー研 [1]，電通大脳・医工研 [2])

○Ayu Konno[1], Masaki Tokurakawa[1, 2] (ILS UEC[1]，CNBE UEC[2])

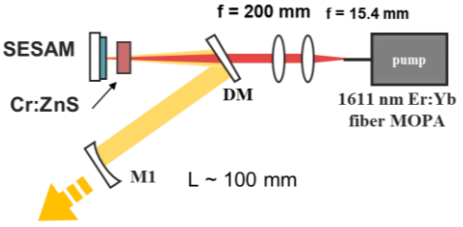
1. はじめに

中赤外の波長領域は分子の指紋領域とも呼ばれており, 多数の原子・分子の吸収線が存在する. そのため中赤外領域の超短パルスレーザー(光周波数コム)は，生体観測・環境計測などの応用から注目を集めている. この時共振器の小型化は可用性を向上のみならず，パルスの高繰り返し化，及び高平均出力化・縦モード輝度向上に寄与する.

本研究では，2~3 μm 帯に広帯域な利得を持つ Cr^{2+}: ZnS[1] を利得媒質とし，SESAM を用いた小型・堅牢で可用性のある高繰り返し中赤外超短パルス光源の開発を目指した.

2. 実験構成

図 1 に，短尺 Cr^{2+}:ZnS 共振器の構成を示す. 利得媒質には Cr^{2+}:ZnS (4 mm, 5.2 at.%) を用い，波長 1611 nm Er:Yb 共添加 fiber laser により励起している. 共振器は曲率 100 mm かつ透過率 3% の凹面鏡 M1, 及び SESAM から構成されている. 実験では，特性の異なる 2 種の SESAM を使用した. それぞれの諸特性は図 1 の表内に示す. 共振器長は 100 mm(1.5 GHz 相当)となっている.



	R_0 [%]	ΔR [%]	F_{sat}[μJ/cm²]
SAM A	98	0.9	95
SAM B	97	2.5	5

Fig. 1. Experimental Setup

3. 実験結果

図 1 の共振器において，励起パワー3.2 W 時に最大出力 0.7 W(SAM A), 0.8 W(SAM B)が確認された. スロープ効率は 26%, 34%となった. SAM A ではスペクトル構造の変化は確認されたが，パルシングの発生は認められなかった. 一方で，SAM B を使用した際に以下の図 2 に示すような，Q スイッチパルス(励起パワー0.5 W)及びスペクトル帯域の拡大が観測された.

しかし, 励起パワーを増加させてＱＭＬパラメータで定義される CWML の閾値[2]を超えた領域においても，発振スペクトルには依然として SESAM と結晶間隔に起因するエタロン効果によると考えられるスペクトル構造が残存しており, CWML に至っていない. そこで現在，このエタロンの抑制に向けた Brewster 研磨の Cr^{2+}:ZnS を用いたモード同期実験を進めており，当日はこの結果についても報告する.

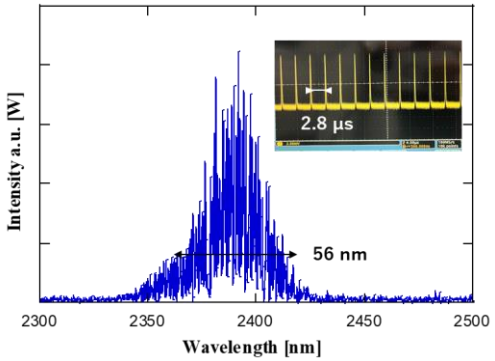


Fig. 2. Temporal and spectral characteristics of the Q-switched laser

参考文献

[1] C. Y. Cho, et al., Opt. Lett. 42, 5226-5229 (2017).

[2] C. Hönninger, et al., Opt. Soc. Am. B. 16,46-56 (1999).

© 2025年 応用物理学会

固体レーザー共振器の自律制御に向けた深層強化学習の導入

Implementing Deep Reinforcement Learning for autonomous laser cavity optimization

浜松ホトニクス(株)[1]，東大物性研[2]，○池谷 有貴[1,2]，関根 尊史[1]，乙津 聡夫[2]，
遠藤 翼[2]，森田 宇亮[1]，玉置 善紀[1]，加藤 義則[1]，川嶋 利幸[1]，小林 洋平[2]

Hamamatsu Photonics K.K.[1], ISSP, Univ.Tokyo[2], ◦Yuki Ikeya[1,2], Takashi Sekine[1], Toshio Otsu[2],
Tsubasa Endo[2], Takaaki Morita[1], Yoshinori Tamaoki[1], Yoshinori Kato[1],
Toshiyuki Kawashima[1], and Yohei Kobayashi[2], E-mail: yuki.ikeya@hpk.co.jp

レーザー発振器の開発において、目的に応じた理想的な出力光の波面や強度分布を得るには、共振器内の膨大なパラメータ探索と高度な空間モード制御技術が必要となる。強化学習（目的と状況に応じて最適な行動を選択する学習手法）の適用はレーザーの自律的な制御が期待できることから、課題解決の有効な手段と考えられる。しかし、実験系では大量のデータ取得に時間がかかることと、個々の実験系で実際に試してみないと有効性がわからないことから強化学習の適用は限られる。我々は、レーザー共振器内の空間モードを高精度に制御するための手段の一つとして、共振器ミラーの代わりに空間光位相変調器(LCOS-SLM)を用いることで、ミラーの角度やレンズの曲率などを動的かつ高速に制御することを可能にした。初期検証として深層強化学習の一つであるDQN(Deep Q Network)を用いた単一パラメータでの出力上昇試験に取り組んできた[1]。本講演では制御パラメータを3つに増やした条件における出力上昇試験の結果を報告する。

Fig.1 に実験系を示す。LCOS-SLM には焦点距離(f)と座標(x, y)で生成されるフレネルレンズの位相パターンを表示し、可変凹面ミラーとして用いた。凹面ミラーの上下（左右）方向の角度を振ることがフレネルレンズの y(x)座標を動かすことに相当する。焦点距離(f)と座標(x, y)の 3 パラメータに、発振画像から抽出した 2 つの値を加えた計 5 つの値で共振器の「状態」を表した。また f 値 ±12 mm、x(y)値 ±12 ピクセルの範囲（計 15,625 パターン）を探索範囲として「行動」に設定した。そして、出力が大きいほど高い「報酬」を与える学習を行った。Fig.2 に、学習回数に対し平均報酬（学習回数 100 回ごと）をプロットした結果を示す。出力値は報酬に対して別途測定した対応関係に基づき、参考として併記したものである。学習回数の増加に伴い報酬が大きくなり、出力が上昇することを確認した。レーザシステム自らが試行錯誤を行うことで学習が進んだこの結果から、より広範囲でのパラメータ探索の可能性が期待できる。

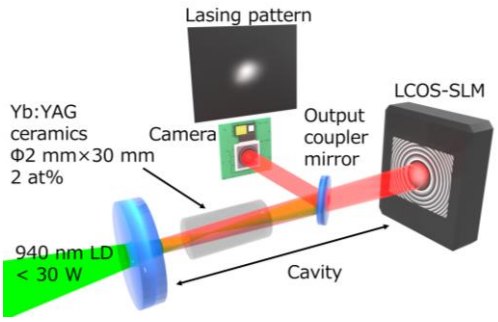


Fig.1 Experimental setup

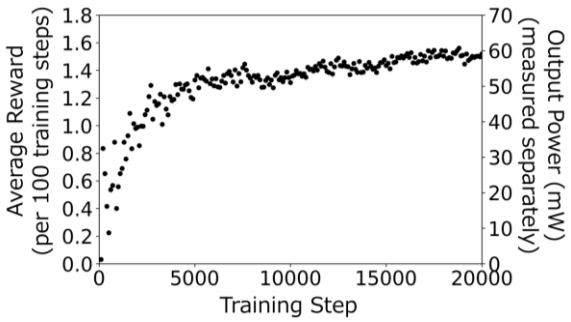


Fig.2 Learning Progress

[1] 池谷有貴 他 第72回応用物理学会春季学術講演会 14p-K309-3 (2025).

© 2025年 応用物理学会

Fe:ZnSe 増幅に用いる EO Q スイッチ Er,Cr:YSGG レーザーの開発

Development of an EO Q-switched Er,Cr:YSGG Laser for Fe:ZnSe Amplification

京大化研[1]，核融合研[2] ○桐田 勇利[1]，岡崎 大樹[1]，Yu Linpeng[2]，安原 亮[2]，時田 茂樹[1]

ICR, Kyoto Univ.[1], NIFS[2],

○Yuri Kirita[1], Daiki Okazaki[1], Linpeng Yu[2], Ryo Yasuhara[2], Shigeki Tokita[1]

E-mail: kirita@laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp

これまでの高次高調波発生に関する研究では近赤外帯の超短パルス光源を用いた前例が数多く存在するが、生体細胞が観察可能な水の窓領域やそれを超えるような波長帯では強度が不足しているのが現状である。より高次の高調波を効率よく生成するためにはより長波長な超短パルスを用いた方が効果的であることから[1]、中赤外高強度超短パルスレーザーの開発が急務となっている。Fe^{2+}イオンの放出スペクトルは波長 4 μm 帯に存在し、これをドープした ZnSe 結晶を用いた光増幅が可能である[2]。我々は Fe:ZnSe 結晶をレーザー利得媒質として 4 μm 帯フェムト秒パルスのチャープパルス増幅をおこなっている。

Fe^{2+}イオンは 3 μm 近傍に吸収スペクトルをもつため、先行研究[3]では励起源として 40 mJ/150 us の Er:YAG レーザーを用いていた。このレーザーはパルス幅が長いため、Fe:ZnSe 増幅に必要なパルスエネルギーの増加に加え、寄生発振により十分な反転分布を維持することが困難であった。そこで本研究では、EO 素子を用いた Q スイッチ Er,Cr:YSGG レーザーを開発した。図 1 は開発された Q スイッチ Er,Cr:YSGG レーザーの模式図(a)およびそのパルス時間波形(b)である。パルス時間幅(FWHM)は従来のフリーラン発振よりも 3 桁以上短い 61 ns を得ることが可能となった。さらに、フラッシュランプ励起エネルギーを変えた時のパルスエネルギーの変化を示したグラフが図 1 (c)である。これにより最大 11 mJ のパルスエネルギーで Fe:ZnSe 結晶の励起が可能となった。

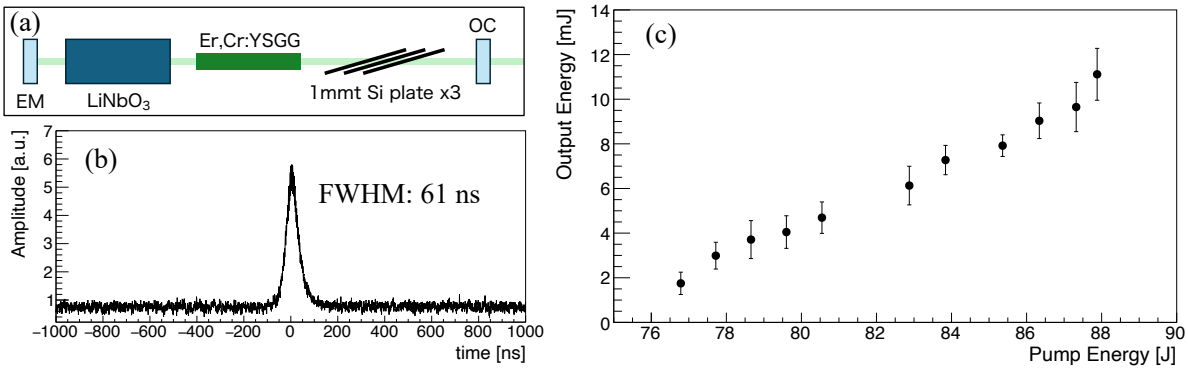


図 1 (a) Q-SW Er,Cr:YSGG レーザーの模式図および (b) パルス時間波形。(c) パルスエネルギーのフラッシュランプ励起エネルギー依存性。

[1] T. Popmintchev *et al*., *Science*, Vol 336, Issue 6086, pp. 1287-1291, 8 Jun 2012.
[2] A. Pushkin *et al*., *Photonics* **2023**, 10, 1375.
[3] Daiki Okazaki *et al*., EPJ Web of Conference, Vol 307, 04069 (2024).

© 2025年 応用物理学会

フェムト秒レーザー直描による Tm:YAG セラミックスへの導波路作製と評価

Femtosecond-Direct-Laser-Written Waveguides in Tm:YAG Ceramics

東大物性研 [1] JX 金属株式会社 [2] ○秋山 由洸 [1], 中川 耕太郎 [1], 角田 明博 [2], 中﨑 雅人 [2], 小林 洋平 [1]

ISSP, Univ. Tokyo[1], JX Advanced Metals Co.[2], ○Yukihiro Akiyama[1], Kotaro Nakagawa[1], Akihiro Tsunoda[2], Masato Nakazaki[2] and Yohei Kobayashi[1]

E-mail: akiyuki@issp.u-tokyo.ac.jp

波長 2 μm のレーザーはアイセーフかつポリマーの精密加工や半導体製造技術に使用可能な光源として応用が期待されており、特に高出力・高効率な光源の開発が求められている。この要求に対し、有望な利得媒質の一つが Tm イオン添加材料である。中でも Tm:YAG セラミックスは、高い熱伝導性、優れた機械的特性、そして量産性といった利点を有する。こういった利得媒質中にフェムト秒レーザー直描法を用いて直接導波路を形成する技術は、レーザー発振器や増幅器の高効率化・小型化を実現する強力な手法であり，Er:YAG などに適用されてきた[1]。Tm 添加媒質を用いた導波路レーザーは主にシングルモード光励起で研究されてきた[2, 3]。我々は、導波路レーザーによる高出力増幅の実現を目指している。そのために、母材として YAG セラミックスを用いることと、マルチモード LD を励起光として用いるシステムの実現を目標としている。

本研究では、高品位な Tm:YAG セラミックス（JX 金属株式会社製, 3.0 at.% Tm）に対し、繰り返し周波数 1 kHz の Ti:Sapphire フェムト秒レーザーを用いた直描により、クラッド型の直線導波路を作製した（Fig. 1）。加えて Tm 添加ファイバーレーザーを光源として用いて波長 2 μm 帯信号光の導波路伝搬実験を行った(Fig. 2)。

本講演では、この導波路の作製プロセスとその特性について述べる。

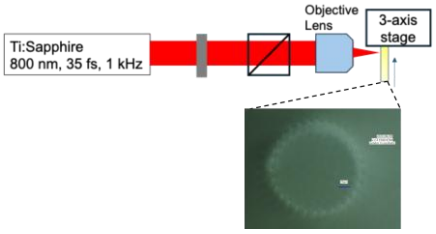


Fig. 1 The setup of fs-Direct Laser Writing and the created waveguide

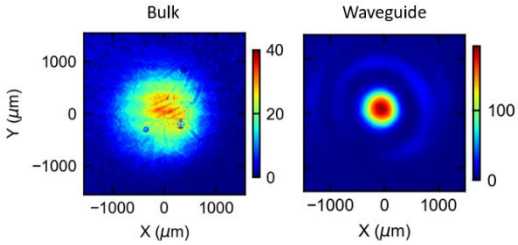


Fig. 2 The beam profile through the bulk or the waveguide

[1] T. Sumiya, *et al., Opt. Express,* **33**(5), 10047-10056 (2025).
[2] Llamas V, *et al., Opt Express.* **28**(3), 3528-3540 (2020).
[3] Esrom Kifle, *et al., Opt. Lett.* **42**, 1169-1172 (2017).

© 2025年 応用物理学会

微結晶粒組織から成る透光性 c 軸配向 Nd:FAP セラミックスの開発

Synthesis and Characterization of Transparent Nd-Doped Fluorapatite Laser Ceramics with Fine-Grained Microstructure and c-Axis Orientation

物質・材料研究機構　○(PC)小泉　早苗，鈴木 達，古瀬 裕章

National Institute for Materials Science, ○(PC)Sanae Koizumi, Tohru S Suzuki, Hiroaki Furuse

E-mail: KOIZUMI.Sanae@nims.go.jp

【緒言】新規光学材料創出において、非立方晶系の透明多結晶セラミックスが注目されている。非立方晶材では、多結晶体中の残留気孔や他相に加えて、結晶粒界の屈折率差による粒界散乱も透光性低下の主要因となる[1]。粒界散乱の大きさは、結晶粒のサイズや隣接結晶の屈折率差に比例するため、これまでに結晶粒の微細化や配向制御によって、その抑制が試みられてきた(e.g., [2-4])。

本研究では、非立方晶系レーザーセラミックスのさらなる高品位化を目指し、「微細結晶粒」と「配向性」を両立した試料の合成に取り組んだ。対象とした材料は、蛍光・レーザー・赤外応答・生体応用が可能な光機能性材料である六方晶系の Nd:$Ca_{10}(PO_4)_6F_2$（Nd:FAP）である。磁場配向制御による成形体作製過程において、Nd:FAP 微粒子の作製条件が配向度に及ぼす影響を検討した。

【実験】原料にH_3PO_4、$Ca(OH)_2$、$NdCl_3$を用い、液相法によりNd添加ハイドロキシアパタイト（Nd:HAP）前駆体粉末を合成した。得られた前駆体にフッ素化処理を施し、600～1400℃の範囲で仮焼して粒子径の異なるNd:FAP微粒子を作製した。得られた微粒子に分散処理を施し、最適な分散条件を検討した。分散後の粉末を12テスラの回転磁場中で鋳込み成形を行い、配向成型体を得た。試料は放電プラズマ焼結装置を用いて緻密化した。得られた試料に対して、粒度分布、結晶構造、微細組織、化学組成、透過率および蛍光特性の測定と評価を行った。

【結果および考察】XRD の結果から、合成した微粒子は単一相であることを確認した。SEM による一次粒子径評価の結果、仮焼き温度の変化により平均粒径が約 50 nm から 2.6 μm の範囲で変化した。配向成形体および焼結体の XRD 測定から、得られた試料は c 軸配向を示した（Fig. 1）。得られた透光性多結晶体の平均粒径は 300 nm 以下であった。講演では、Nd:FAP の配向度および光学特性評価の結果を報告する。また、焼結条件の最適化や、配向度向上に向けた粒成長挙動の検討結果についても議論する予定である。

参考文献：

[1] R. Apetz, et al., *J. Am. Ceram. Soc.* **86**, 480-486 (2003)
[2] J. Akiyama et al., Opt. Lett. **35**, 3598-3600 (2010).
[3] H. Furuse H. et al., *Sci Rep* **9**, 10300 (2019).
[4] X. Liu et al., *J. Eur. Ceram. Soc.* **42**, 6642-6653 (2022).

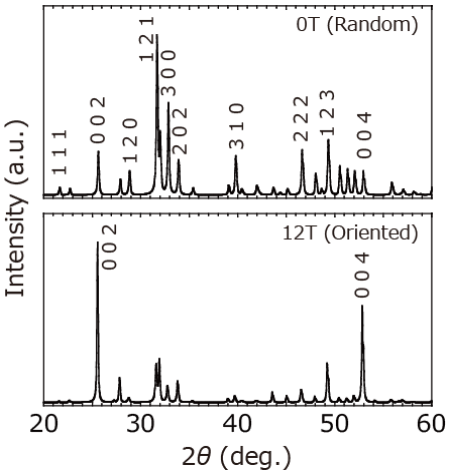


Fig. 1：Nd:FAP多結晶体のXRDパターン

Characterization of Cr:LiSAF/Sapphire bonding interface and thermal properties

Inst. for Molecular Science [1], Riken Spring-8 Center. [2], ◦Florent Cassouret[1], Yoichi Sato[2,1], Takunori Taira[2,1]

E-mail: florent-cassouret@ims.ac.jp

1. Introduction

Despite being a more efficient material for tunable CW lasers compared to Ti:sapphire, Cr:LiSAF-based lasers are not widely spread, mainly because their output power is limited by thermal problems due to low thermal conductivity of the gain medium. In order to improve the heat extraction inside Cr:LiSAF, aimed to use inter-layer surface activated bonding (il-SAB) technique which consist to bond the low thermal conductivity Cr:LiSAF (~2.5 W/mK) with high thermal conductivity transparent sapphire (~36 W/mK). In this work we present the analysis of bonding interface between Cr:LiSAF and sapphire as well as the thermal properties of such chip stacks.

2. Bonding and interface analysis

Successful bonding between uncoated 5 mm diameter and 1 mm thick c-cut Cr:LiSAF and same dimension sapphire crystal was realized after surface activation using ion beam under high vacuum conditions (10^{-5} Pa). After bonding, the interface was analyzed using TEM and EDX (Fig. 1.a). The results mainly show the diffusion of Oxygen and Fluoride through the bonding interface between Cr:LiSAF and sapphire. The thickness of the amorphous layer forming the bonding interface can be estimate at around 40 nm. Also, the bonding interface seems more extended on the Cr:LiSAF side indicating a longer diffusion depth of Oxygen in Cr:LiSAF (compared to Fluoride diffusion in sapphire) and a higher sensitivity of Cr:LiSAF to the ion beam performed for surface activation.

3. Thermal properties measurements

First, thermal diffusivity was measured by laser flash lamp method for the bulk c-cut Cr:LiSAF crystal and for the bonded samples in the 22 to 100ºC range (Figure 1-a). The results show that the bonded materials present a 2.5-3 times higher thermal diffusivity (2.693 mm^2/s) compared to the bulk crystal (0.961 mm^2/s). Also, the difference between measured and calculated thermal diffusivity of the bonded sample was estimated to be similar to the standard deviation of the measurement (~3%). In that case, the thermal resistance of the bonded layer can be neglected. In addition, Cr:LiSAF specific heat was also measured in the -20-200℃ to accurately calculate its thermal conductivity using the relation $\kappa(T) = D(T)*Cp(T)*\rho(T)$, with $\rho(T)$ the volume mass estimated using the thermal expansion coefficients of Cr:LiSAF. Finally, the effective thermal conductivity of the bonded material $\kappa_{eff.}$ was calculated to be around 6.6 W/mK, ~2.5 times the one of bulk Cr:LiSAF (2.5 W/mK) considering no thermal resistance of the bonding interface.

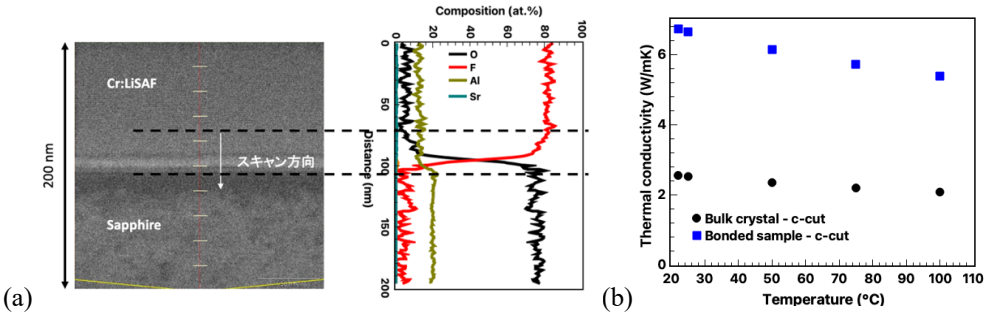


Fig. 1. Measured thermal diffusivity for bulk Cr:LiSAF and bonded samples (a) and calculated thermal conductivity of Cr:LiSAF bulk crystal and of bonded samples (b).

4. Summary

Successful bonding at room temperature between low thermal conductivity fluoride (Cr:LiSAF) and high thermal conductivity oxide (sapphire) crystals was demonstrated using il-SAB technique. Bonding analysis revealed that Cr:LiSAF is more sensitive to FAB compared to sapphire, resulting in a 40 nm thick amorphous layer, more extended on the Cr:LiSAF side. In addition, accurate measurements of thermal properties of bonded materials showed that the amorphous layer do not induce thermal resistance. As a results, >2.5 times higher effective thermal conductivity was demonstrated for the bonded sample. These results are promising for the power scaling of Cr:LiSAF and fluoride-based laser systems by using bonded chips as gain medium.

Acknowledgements:

This work was supported by the Moonshot project (JPMJMS2269), ARIM-NEXT project (JPMXP122MS1046) and the ATLA project (JPJ004506).

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.5 Ultrashort-pulse and high-intensity lasers

[8a-N405-1~11] 3.5 Ultrashort-pulse and high-intensity lasers

[8a-N405-1]

Development of a Soft-X-ray High-Harmonic Spectroscopy Apparatus and Its Application to Thin-Film Transmission Measurements

○Ryunosuke Takahashi[1], Soudai Sakoda[1], Kaede Yamada[1], Nobuhisa Ishii[2], Hiroki Wadati[1,3] (1.Univ. of Hyogo, 2.QST KPSI, 3.ILE, Osaka Univ)

[8a-N405-2]

Generation of 30 μJ, 20 fs Deep-Ultraviolet Pulses via Self-Phase Modulation in a Nonlinear Optical Crystal

○Shuzo Kakeya[1], Ryunosuke Hasegawa[1], Taro Sekikawa[1] (1.Hokkaido Univ.)

[8a-N405-3]

Development of a Ho:YAG Thin-Disk laser for a high-energy 2 μm laser system

○(P)Hiroki Kawase[1], Natsuki Kanda[1], Yasuo Nabekawa[1], Eiji Takahashi[1] (1.RAP, RIKEN)

[8a-N405-4]

100 W-level Pulsed Amplification in a Tm-doped Fiber Laser System

○(D)Donguhn Kang[1], Toshio Otsu[1], Kobayashi Yohei[1] (1.ISSP, Univ.Tokyo)

[8a-N405-5]

Stabilization of Sub-Cycle Mid-Infrared Pulse Generation via Filamentation Using a Static Electric Field

○Shuto Nakamura[1], Neil Irvin Cabello[1], Yue Zhao[2], Takao Fuji[1] (1.Toyota Tech Inst, 2.Muroran Inst. Tech)

[8a-N405-6]

Two-stage pulse compression using hollow-core fibers for intense and broadband multi-terahertz pulse generation

○(DC)Kotaro Ogawa[1], Natsuki Kanda[1,2], Yuta Murotani[1], Nobuhisa Ishii[3], Ryusuke Matsunaga[1] (1.Tokyo Univ., 2.RAP, RIKEN, 3.QST KPSI)

[8a-N405-7]

[The 58th Young Scientist Presentation Award Speech] Attosecond pulse generation using TW-class sub-cycle laser

○Kaito Nishimiya[1], Eiji Takahashi[1] (1.RIKEN RAP)

[8a-N405-8]

Enhanced second harmonic generation by using turbostratic stacking graphene

○(M2)Kazuma Mohara[1], Satoshi Kanda[1], Ryota Negishi[1], Hidetoshi Nakano[1] (1.Toyo Univ.)

[8a-N405-9]

Evanescent-field-induced harmonic generation in preionized liquids above the critical plasma density

○Tomoya Mizuno[1], Tianqi Yang[1], Takayuki Kurihara[1], Yimin Gu[1], Tomoyuki Shoji[1], Teruto Kanai[1], Jiro Itatani[1] (1.ISSP, Univ. of Tokyo)

[8a-N405-10]

Measurement of the time resolution on light-wave-driven scanning tunneling microscopy by autocorrelation method

○Sou Kayano[1], Yusuke Arashida[1], Hiroyuki Mogi[1], Shoji Yoshida[1], Osamu Takeuchi[1], Hidemi Shigekawa[1] (1.Univ. of Tsukuba)

[8a-N405-11]

Atomic-scale ultrafast dynamics of Mo_6Te_6 single nanowires

○Yusuke Arashida[1], Sou Kanano[1], Hiroyuki Mogi[1], Osamu Takeuchi[1], Shoji Yoshida[1], Hidemi Shigekawa[1] (1.Univ. of Tsukuba)

高次高調波軟 X 線分光装置の開発と薄膜透過率測定への応用

Development of a soft X-ray spectroscopic apparatus based on high-harmonic generation and its application to thin-film transmittance measurements

兵庫県大院理[1], 量研関西[2], 阪大レーザー研[3] ○高橋 龍之介[1]、迫田 壮大[1]、山田 楓[1]、石井 順久[2]、和達 大樹[1,3]

Univ. of Hyogo[1], QST KPSI[2], ILE, Osaka Univ[2] ○Ryunosuke Takahashi[1], Sakoda Soudai[1], Kaede Yamada[1], Nobuhisa Ishii[2], Hiroki Wadati[1,3]

E-mail: rtakahashi@sci.u-hyogo.ac.jp

高次高調波発生 (High-Harmonic Generation, HHG) は、強力なフェムト秒レーザパルスを希ガス原子に集光し、基本波の 3 倍・5 倍 … といった高調波（真空紫外〜軟 X 線）を直接生成する現象である。HHG を用いれば、軟 X 線フェムト秒パルスを実験室で生成できるため、遷移金属吸収端を用いた元素選択的な時間分解分光が可能となり、磁性体のスピン・電荷ダイナミクスや界面電子構造の初期過程を直接観測できることから、放射光 X 線と相補的な光源として注目されている[1]。本研究では超短パルスレーザーPHAROS (Yb: KGW)レーザー駆動の HHG 装置を構築し、実験室における軟X線透過分光による非破壊計測結果をおこなった。

波長 1030 nm・パルス幅 200 fs、繰り返し周波数 1 kHz、出力 1 W の PHAROS レーザーを f = 200 mm 平凸レンズで 0.01–0.05 MPa の圧力で噴射したアルゴンガスジェットに集光し、全長 4 m の光学系で 59 次 (~71 eV) までの HHG を観測することができた[図 1 (a)]。このエネルギーは Fe, Co, Ni といった遷移金属 M 吸収端をカバーしている。1 次光除去のために Al フィルターを使用しており、61 次光以降は Al $L_{2,3}$ 吸収端によってカットされた。生成光は 300 本 mm^{-1}回折格子により分光し、CCD カメラによって観測している。今回は、Si_3N_4および Cr, Mg(各 200 nm)薄膜の透過スペクトルを取得した。Si_3N_4薄膜においては、計算結果と重ね合わせた結果、図 1 (b)の結果が得られ、膜厚を~ 42 nm と見積もられた。講演では、HHG 装置の構成と薄膜透過率測定結果について詳しく議論する予定である。

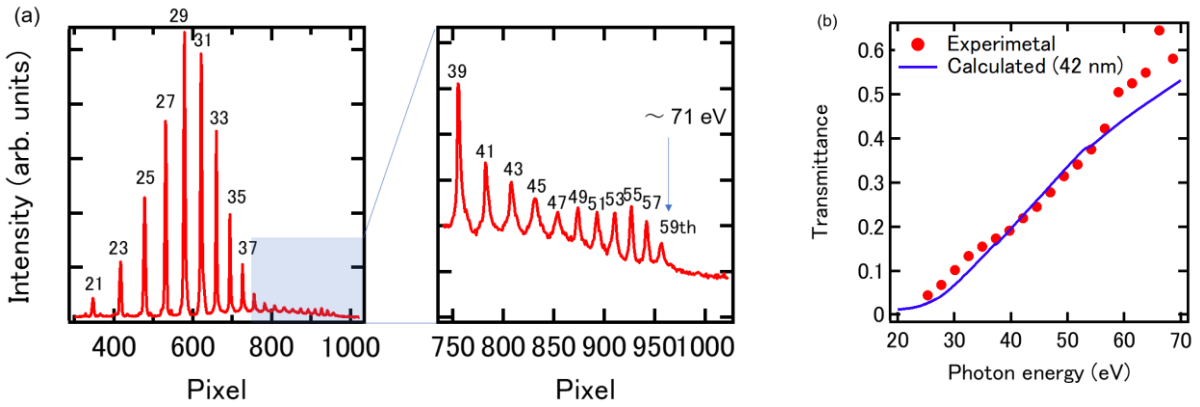


図 1. (a) Ar による HHG スペクトル。(b) Si_3N_4 薄膜の透過率測定結果。

[1] Clemens von Korff Schmising et al., Phys. Rev. Research **5**, 013147 (2023).

© 2025年 応用物理学会

非線形光学結晶中での自己位相変調を用いた 31μJ, 20fs 深紫外パルスの生成

Generation of 30 μJ, 20 fs Deep-Ultraviolet Pulses via Self-Phase Modulation in a Nonlinear Optical Crystal

北大工[1] ○掛谷 修造[1], 長谷川 龍之介[1], 関川 太郎[1]

Hokkaido Univ[1]. ○Shuzo Kakeya[1], Ryunosuke Hasegawa[1], Taro Sekikawa[1]

E-mail: kakeya.shuzo.x2@elms.hokudai.ac.jp

超高速の物理的、化学的な現象を観測するためには、試料に適した波長と、最小限の時間幅を持つ光源が必要となる。超短深紫外（DUV）パルスは、物理学、化学、生物学など多くの分野の時間領域における研究に極めて重要である。超短 DUV パルスの生成には、チタンサファイアレーザー（Ti:Sa）の第三次高調波発生(THG)[1]や、第二次高調波発生(SHG)による四光波混合[2]、波長可変光パラメトリック増幅器からの SHG[3]、DUV 超短パルスの SPM によるパルス圧縮[4]など様々なアプローチが用いられてきた。本研究では、これまでの方法と比較してコンパクトで高効率な方法として、非線形光学結晶中での自己位相変調(SPM)をともなった広帯域波長変換とパルス圧縮による DUV 超短パルス発生をおこなったので報告する。

DUV パルスの生成は Ti:Sa レーザーで中心波長 800nm、50fs のフーリエ限界パルスを光源として THG をおこなった。まず、300μm厚の BBO 結晶での SHG によって 400nm 光を発生し、2 枚目の 50μm厚 BBO 結晶での 800nm と 400nm の和周波発生によって、266nm 光を生成した。発生した 266 nm 光は石英のプリズム対によって圧縮され、自己回折時間分解光ゲート法（SD-FROG）により計測された。その結果、最短のパルス幅 20fs、パルスエネルギー31μJ のパルスが得られた。（図中 d 行）また、800 nm 光の強度を下げ、SHG 結晶の厚さを 200μm厚に変更することにより、266 nm 光のスペクトル幅が狭くなるとともにパルス幅も 25fs, 33fs, 39fs と伸びた。(図中 c, b, a 行) SHG 結晶中での SPM によってスペクトルが変化していると考えられる。

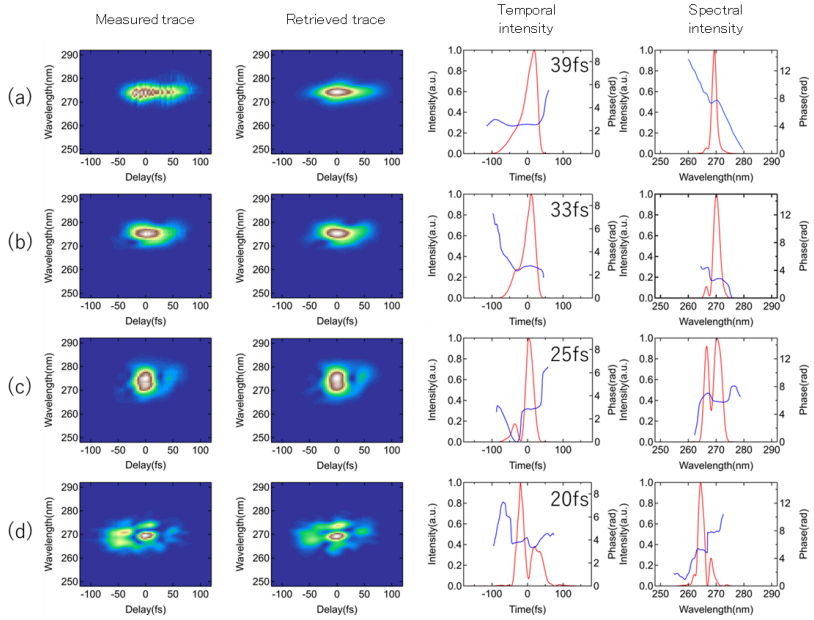


Figure 1: The top three rows show the results obtained using a 200 μm SHG crystal, with increasing input pulse energy from top to bottom. The bottom row shows the results using a 300 μm SHG crystal. The columns show the FROG traces, the retrieved traces, the temporal pulse intensities and phases, and the spectra with phases from left to right.

参考文献

[1] Mara Galli, Vincent Wanie, Diogo Pereira Lopes, et al., Opt. Lett. 44, 1308 (2019).

[2] Charles G. Durfee, Sterling Backus, Henry C. Kapteyn, and Margaret M. Murnane, Opt. Lett. 24, 697 (1999)

[3] Marcus Beutler, Masood Ghotbi, Frank Noack, Daniele Brida, Cristian Manzoni, and Giulio Cerullo, Opt. Lett. **34**, 710 (2009).

[4] N. Krebs, I. Pugliesi, and E. Riedle, Appl. Sci. **3**, 153 (2013).

© 2025年 応用物理学会

高強度 2 μm 帯レーザーシステムの実現に向けた Ho:YAG 薄ディスクレーザーの開発

Development of a Ho:YAG Thin-Disk laser for a high-energy 2 μm laser system

理研光量子セ　○(P)河瀬 広樹，神田 夏輝，鍋川 康夫，高橋 栄治

RAP, RIKEN, ○(P)Hiroki Kawase, Natsuki Kanda, Yasuo Nabekawa, Eiji J. Takahashi

E-mail: hiroki.kawase.vs@riken.jp

高次高調波によるアト秒パルス発生において、高光子エネルギー・短パルスを得るために光源の長波長化が進められてきた。光パラメトリック増幅を用いた波長変換で短波近赤外～中赤外光を得る方法が主流となっているが、高強度化や高繰り返し化において長波長領域の直接レーザー発振は重要な技術である。そこで我々は波長 2.1 μm で発振する Ho:YAG に注目し、薄ディスク(TD)レーザー技術による高強度超短パルスレーザー増幅システムを提案する。Ho:YAG は高い量子欠損効率を有し、TD 形状は高繰り返し・高出力動作時において媒質で問題となる熱的影響を抑制可能という特徴を持つ。また、2 μm 帯高強度パルスレーザーは CO_2 レーザーに代わる次世代の EUV 露光機用レーザードライバーとしても期待されており、社会的にも重要な課題となっている。

今回は Ho:YAG TD 再生増幅器(RGA)の初期実験として、利得媒質の特性を評価すべく連続波(CW)レーザー発振実験を行った。図 1(a)に共振器の図を示す。RGA 構築を見据えλ/4 波長板(QWP)と薄フィルムポラライザ(TFP)を含み、72 パスの励起チャンバー、TD 利得媒質、励起光源、曲率 1400 mm の凹面鏡で構成されている。TD は厚さ 200 μm の 3 at.% Ho:YAG で、波長 1.908 μm の CW Tm ファイバレーザーで励起した。QWP 角度により取り出し効率を最適化し、励起パワー7.96 W において出力 0.435 W が得られた。また、図 1(b)は、励起パワー5.76 W から 7.96 W までにおけるレーザー発振波長であり、いずれの励起パワーにおいても中心波長 2095 nm が観測された。本講演では、我々の Ho:YAG TD レーザーの開発状況と今後のレーザー開発について報告する。

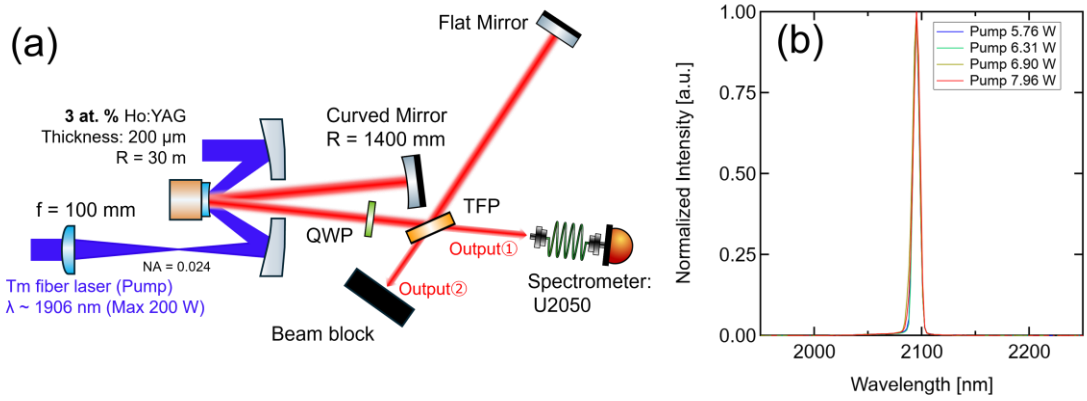


Fig. 1. (a) Ho:YAG Thin-Disk CW laser Cavity. (b) Output spectra of Ho:YAG TD laser under CW operation with various pump powers.

本研究は、JST【経済安全保障重要技術育成プログラム】【JPMJKP24M1】、JSPS 科研費 JP24K17625 の支援を受けたものです。

© 2025年 応用物理学会

平均出力 100 W 級 Tm 添加ファイバーレーザーのパルス増幅

100 W-level Pulsed Amplification in a Tm-doped Fiber Laser System

東大物性研 1、〇(D)姜 東彦 [1]、乙津 聡夫 [1]、小林 洋平 [1]

ISSP, Univ.Tokyo1, 〇Donguhn Kang[1], Toshio Otsu[1], Yohei Kobayashi[1]

E-mail: higasihiko@issp.u-tokyo.ac.jp

中赤外域の超短パルスレーザーは、分子分光や微細加工、医療応用など、多岐にわたる分野でその利用が期待されている。特に 2 μm 波長帯は、樹脂やシリコンなど材料の加工において新たな加工が注目されている。2 μm 波長帯で広い利得帯域を持つ Tm 添加ファイバー(TDF)は、高出力・超短パルスレーザーの光源に適している[1]。これまでに、我々は Tm 添加ファイバーを用いた発振器及び増幅器システムを構築し、平均出力 83 W を達成したことを報告した[2]。本研究では、第 2 プリアンプを追加し、シード光を増幅すると共に、メインアンプの高効率化を図ることで、増幅のスロープ効率を向上させるとともに、100 W を超えるパルス増幅の達成を目的とした。

実験系は、中心波長 1960 nm、繰り返し周波数 40 MHz のフェムト秒ファイバー発振器と、3 段の増幅器（プリアンプ 1、プリアンプ 2、メインアンプ）で構成される(図 1)。各増幅段では、Tm 添加ダブルクラッドファイバーを 793 nm のレーザーダイオード(LD)で励起した。プリアンプ 1 では回折格子対を用いてパルス幅を約 10 ps まで伸長し、非線形効果を抑制しつつ増幅を行った。メイン増幅器では、ゲインファイバー(長さ 2.7 m)とコンバイナーの融着条件を最適化し、融着を行った。そしてゲインファイバーを水槽に入れことで水冷を行った。また、ファイバー両端は端面反射による寄生発振を防ぐため、アングルクリーブした。

その結果、メイン増幅器において励起光出力 200 W に対し、平均出力 76 W、スロープ効率 44%が得られた(図 2)。その際の出力スペクトルを図 3 に示す。本講演では 100W を目指した増幅実験について述べる。

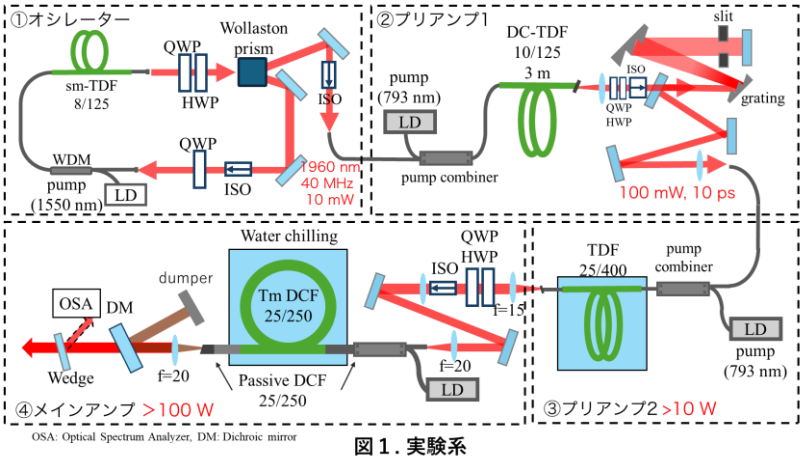


図 1 . 実験系

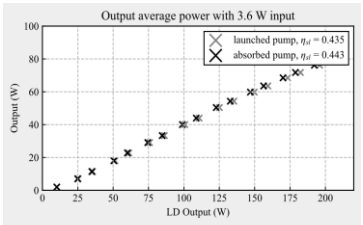


図 2 . 増幅出力特性

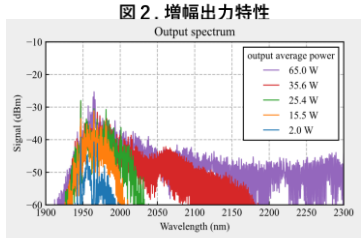


図 3 . 出力スペクトル

参考文献

[1] A. Sincore, J. D. Bradford, J. Cook, L. Shah and M. C. Richardson, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 24, 3,1-8 (2018)

[2] 姜 東彦、乙津 聡夫、谷 峻太郎、小林 洋平、"35 W 出力 Tm ファイバーレーザーシステム［JSAP2024A 20p-A37-8]"、第 85 回応用物理学会秋季、2024 年 9 月 20 日

【謝辞】本研究は、Q-LEAP 委託事業「光量子科学によるものづくり CPS 化拠点」により実施したものです。

© 2025年 応用物理学会

フィラメンテーション法による サブサイクル中赤外光パルス発生の直流電場による安定化

Stabilization of Sub-Cycle Mid-Infrared Pulse Generation via Filamentation Using a Static Electric Field

豊田工大[1]，室蘭工大[2] ○(M1) 中村 脩人[1]，Neil Irvin Cabello[1]，趙 越[2]，藤 貴夫[2]

Toyota Tech. Inst.[1], Muroran Inst. Tech.[2], ○Shuto Nakamura[1], Neil Irvin Cabello[1], Yue Zhao[2], Takao Fuji[1]

E-mail: sd25427@toyota-ti.ac.jp

イメージングシステムにおいて、光源の安定性は高品質な画像を得るための重要なパラメーターである。我々の先行研究[Nat. Commun. **14** 3929 (2023)]において、フィラメンテーションによって生成された中赤外(MIR)のサブサイクルパルスを、MIR ハイパースペクトルイメージングの光源として使用していた。フィラメンテーションにより生成される MIR 放射は広帯域かつ高強度であるが、kHz の繰り返し周波数で動作する際にフィラメント内のプラズマ再結合によって、ミリ秒スケールのジッターが発生することがある。これらのジッターは、得られるハイパースペクトル画像に現れ、高い精度が必要な場合、多くのデータの積算が必要となっていた。

最近の Liu らの研究[Light **13** 42 (2024)]では、フィラメントに強い電場を印加することで、プラズマの再結合を抑制し、フィラメンテーションで発生する広帯域光の発生の安定性を改善したことを確認した。本研究では同様に、**Fig 1** のようにフィラメントに強い電場を印加することで、生成される MIR サブサイクルパルスの安定化を試みた。MIR 生成の手法は以前の研究[Nat. Commun. **14** 3929 (2023)]と同様であるが、フィラメントの 5 mm 上方に電極を配置し、高電圧を加えることで電場を印加した。

まず、単一チャンネルの MCT 検出器によって MIR の強度の安定性を%stability として測定した。電圧を印加していないときは安定性が約 7%であったが、電圧を 5 kV 印加すると安定性は 2%まで改善された。同時にビームプロファイラーによってビームの指向性の安定性も測定を行った。結果として、ビームの指向性の安定性も向上したことが確認された。

次に、MIR パルスと光源の一部を CaF_2結晶中に集光して四光波差周波混合光（FWDFG）を発生させ、中赤外光のアップコンバージョン（$1/\lambda_{FWDFG} = 2/\lambda_{ref} - 1/\lambda_{MIR}$ ）を行い、可視領域に MIR パルスを波長変換した。可視光 (λ_{FWDFG}) を分光器で測定することで、MIR パルスの特性評価を実施した。**Fig 2** に示すように、電極に 5 kV を印加した際に上方変換されたスペクトルの強度が全体的に増加した。特定の波長では H_2O と CO_2 の吸収スペクトルが確認された。また、**Fig 3** に示すようにスペクトル全体にわたって強度の安定性が向上していた。一部の波長域では安定性が 5%を下回っており、フィラメントに電場を印加することで中赤外光パルス発生の安定化が達成できたと考えている。

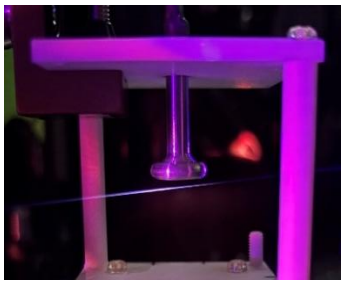


Fig 1

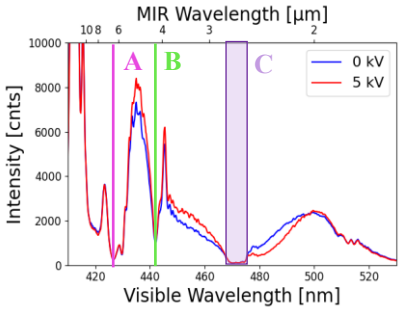


Fig 2

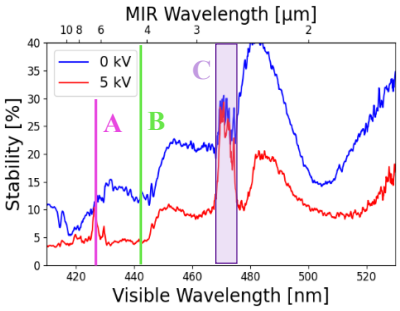


Fig 3

Fig 1: Experimental setup for applying static electric field to the filament during MIR pulse generation

Fig 2: The upconverted MIR spectra with no applied voltage (blue) and with 5 kV applied (red). Line A shows H_2O absorption due to H-O-H bending vibration, Line B shows CO_2 absorption due to C=O stretching vibration, Line C shows H_2O absorption due to O-H stretching vibration

Fig 3: The upconverted MIR spectral stability with no applied voltage (blue) and with 5 kV applied (red)

© 2025年 応用物理学会

中空ファイバーを用いた二段階パルス圧縮による高強度広帯域マルチテラヘルツ光の発生

Two-stage pulse compression using hollow-core fibers for intense and broadband multi-terahertz pulse generation

東大物性研 [1]，理研光量子セ [2]，量研関西 [3]
○(D) 小川宏太朗 [1]，神田夏輝 [1,2]，室谷悠太 [2]，石井順久 [3]，松永隆佑 [1]
ISSP The Univ. of Tokyo. [1], RAP, RIKEN [2], QST KPSI [3],
○Kotaro Ogawa[1], Natsuki Kanda[1,2], Yuta Murotani[1], Nobuhisa Ishii[3], Ryusuke Matsunaga[1]
E-mail: ogawa_k@issp.u-tokyo.ac.jp

マルチテラヘルツ領域(10–70 THz, 4–30 μm)は、典型的なテラヘルツ領域(~1 THz)と比べて強力なパルス電場の発生が可能であり、かつ可視光と比べて光子エネルギーが一桁程度小さいため、固体の損傷を避けながら光制御を行う上で非常に重要な周波数帯である。従来は比較的単色性が高い高強度マルチテラヘルツパルスが主に用いられてきたが[1]、我々は幅広い周波数のマルチテラヘルツ波を偏光まで含めて巧みに制御することで、n (>2)回回転対称な電場軌跡を描く二色逆回り円偏光パルスとして自在にデザインして発生させることに最近成功した[2]。このような特殊なパルスを高い強度で発生させることができれば、固体のトポロジー制御[3]など新たな光物性研究の開拓が期待できる。そのためには、近赤外領域において sub-10 fs 級で高強度かつ高安定な超短パルスを発生させてからマルチテラヘルツ帯へ波長変換することが重要である。

本研究では、これまでパルス圧縮に用いてきたマルチプレートブロードニング[4]より高いスループットが期待できる中空ファイバーを用いて、パルス圧縮と高強度マルチテラヘルツパルス発生を行った。図 1 に、2 段階パルス圧縮した近赤外超短パルスを周波数分解光ゲート法(FROG)により評価した強度スペクトルと時間波形を示す。パルスエネルギー0.7 mJ、パルス幅 7.1 fs、強度揺らぎ 0.2%の高強度かつ高安定な近赤外超短パルスの発生が確認できた。この光源を用いてマルチテラヘルツパルスの発生を行ったところ、10–70 THz に及ぶ広帯域な発生が見られ、ピークでの電場強度は1 MV/cm 程度であり、マルチプレート法より高強度かつ広帯域な発生が確認できた。

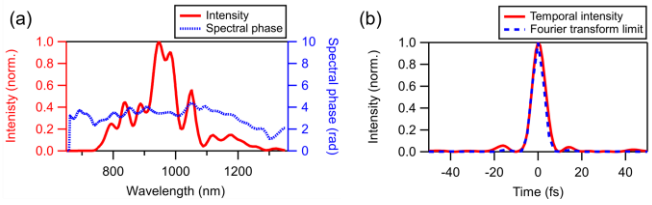


Fig. 1 (a) Intensity (red) and phase (blue) spectra evaluated by FROG measurement. (b) temporal intensity waveform (red) and its Fourier transform limited waveform (blue) by FROG measurement.

[1] A. Sell *et al.,* Opt. Lett. **33**, 2767 (2008). [2] K. Ogawa *et al*., Nat. Commun., **15**, 6310 (2024). [3] T. Trevisan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **128**, 066602 (2022). [4] N. Kanda *et al.*, Opt. Express **29**, 3479 (2021).

© 2025年 応用物理学会

10 TW 級サブサイクルレーザーによるアト秒パルス発生

Attosecond pulse generation using TW-class sub-cycle laser

理研光量子 ◦西宮 海人，高橋 栄治

RIKEN ◦Kaito Nishimiya and Eiji J Takahashi

E-mail: kaito.nishimiya@riken.jp ; ejtak@riken.jp

高次高調波変換による最短アト秒パルス幅は 43 as であり、更にアト秒のパルス幅を短くするためには基本波レーザー光源として波長が長く、サイクル数が少ない高強度レーザーが有利である。我々は独自のレーザー増幅技術である Advanced デュアルチャープパラメトリック増幅(DC-OPA)法を用いて、TW 級シングルサイクルレーザー開発とこの光源を用いた超広帯域高次高調波発生を行ってきた[1,2]。これらの研究成果から、基本波レーザーとしてサブサイクルレーザーを用いることで更に短いアト秒パルス生成が可能であることが見出された[3]。本発表では 10 TW 級サブサイクルレーザー開発と本光源を用いたアト秒パルス発生への応用についての報告を行う。

Ti:Sapphire レーザーシステムをフロントエンドのレーザーとして用い、自己位相変調と差周波発生を用いて 1.5 オクターブシード光を用意し、2 種類の AOPDF を用いて分散の調整をした。ポンプ光源として、パワーアンプにより 1 J まで増幅された光を用い、3 段の Advanced DC-OPA により増幅した。3 段増幅後のエネルギーは 50 mJ に達し、波長 2.26 μm、サイクル数 0.89 サイクル、7.5 TW のサブサイクルレーザー開発に成功した。本光源は気体高次高調波変換に利用され、より短いアト秒パルスの発生が期待される。

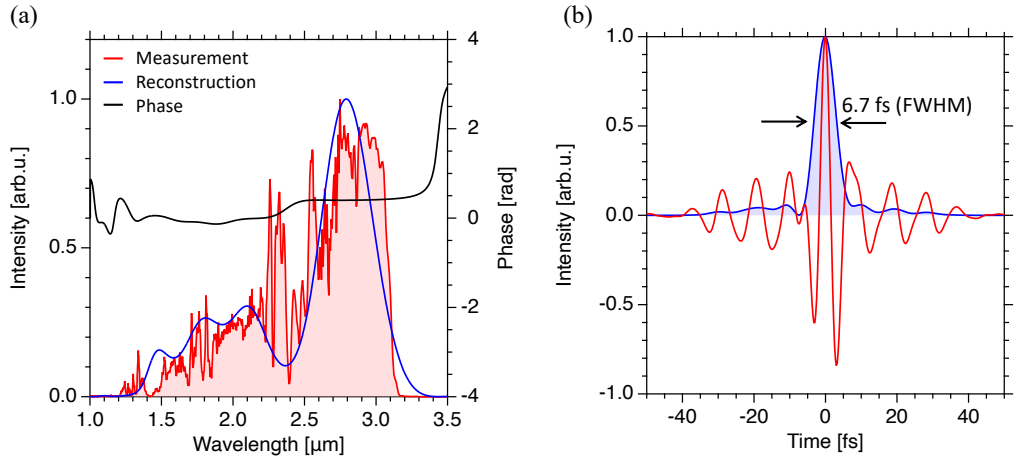


Fig. 1 (a) Measured spectrum after DC-OPA (red line), reconstructed spectrum by THG FROG (blue line), and reconstructed phase (black line). (b) Time waveform calculated from the spectral intensity and spectral phase in Fig.1 (a).

[1] L. Xu and E.J. Takahashi, *Nat. Photon.* **18**, 99–106 (2024).

[2] K. Nishimiya, et. al., *Opt. Lett.* **49**, 5779-5782 (2024)

[3] 西宮 海人 他 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 20a-C301-7 (2024).

© 2025年 応用物理学会

乱層積層グラフェンによるフェムト秒レーザー光の表面第二高調波発生増強

Enhanced second harmonic generation by using turbostratic stacking graphene

東洋大院理工　○茂原 和真，神田 哲志，根岸 良太，中野 秀俊

Toyo Univ., °Kazuma Mohara, Kanda Satoshi, Ryota Negishi, and Hidetoshi Nakano

E-mail: s36c02400172@toyo.jp

グラフェンは，炭素原子一個分の厚さの二次現材料であり，デバイスの小型化に適していることから，新規光学材料として期待されている。グラフェンが 2 層以上になると，その積層パターンがグラフェンの物性に影響を与えることがわかっており，先行研究では乱層積層グラフェンの層数が第二高調波発生に寄与し，22 層をピークとして信号を増強させることが示されている [1]。そこで本研究では，乱層積層した多層グラフェンにフェムト秒レーザーを照射し，試料表面で発生した第二高調波のグラフェン層数依存性を調査した。

本研究では，水晶基板上に塗布した酸化グラフェンをエタノール雰囲気により還元して作成される乱層積層グラフェンを使用した [2]。中心波長 780 nm，パルス幅 20 fs のチタンサファイアレーザー光を，試料に対して p 偏光，入射角 60° で照射した。試料からの反射光に含まれる第二高調波を測定するために，IR カットフィルタを用いて基本波を除去した。

集光強度 1.0×10^{10} W/cm^2 のときに試料で発生した第二高調波のスペクトルを Fig. 1 に示す。中心波長は 395 nm であり，入射光の波長の半分であることがわかる。Fig. 2 に示す信号発生量の入射光強度依存性の結果と合わせ，測定された光は第二高調波である。Fig. 1 は，水晶基板のみの場合と比べ，グラフェンを積層することにより第二高調波発生が増強されることを示している。また，測定されたスペクトルの周期構造は，水晶基板によるものである。

以上の結果から，水晶基板上に乱層積層グラフェンを積層することにより，第二高調波発生量が増強された。また，増強度はグラフェンの積層数に依存することが明らかになった。

[1] Y. Sugai, et al., 第 84 回応用物理学会春季学術講演会, 22p-B204-11, (2023).

[2] R. Negishi, et al., Sci. Rep. 6, 28936 (2016).

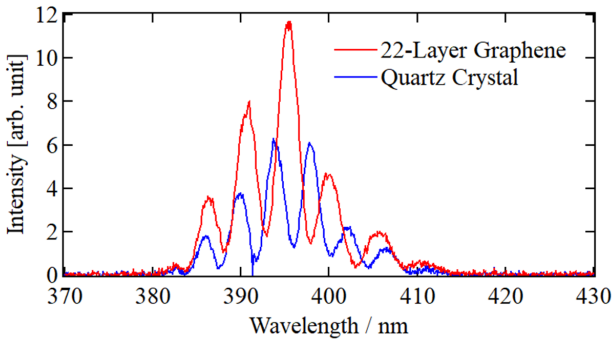


Fig. 1: Second harmonics from the surfaces of quartz and graphene.

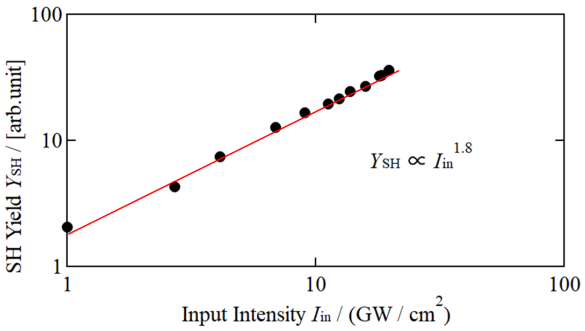


Fig. 2: Dependence of SH yield on incident laser intensity.

© 2025年 応用物理学会

臨界電子密度以上に電離した液体中におけるエバネッセント場による高調波発生

Evanescent-field-induced harmonic generation in preionized liquids above the critical plasma density

東大物性研[1] ○水野 智也[1]、楊 添淇[1]、栗原 貴之[1]、古 宜民[1]、庄司 知倖[1]、金井 輝人[1]、板谷 治郎[1]

ISSP, Univ. of Tokyo[1] ○T. Mizuno[1], T. Yang[1], T. Kurihara[1], Y. Gu[1], T. Shoji[1], T. Kanai[1] and J. Itatani[1]

E-mail: mizuno.tomoya@issp.u-tokyo.ac.jp

強レーザー場と物質との相互作用においては、高次高調波発生（HHG）をはじめとする多様な非線形現象が生じる。近年では、金属表面における光電界電子放出や、凝縮系からの高調波発生も報告されており、強レーザー場との相互作用の研究対象は気相にとどまらず、固体や液体などの凝縮系へと広がりを見せている。我々もこれまでに、中赤外光を用いた固体および液体からの高次高調波発生に関する研究を行ってきた [1-4]。

本研究では、高強度（$I \sim 10^{14}$ W/cm²）の近赤外光（波長 800 nm）により、液体ジェット (水もしくはエタノール) をあらかじめ電離させた上で、中赤外光（波長 3.1 μm、パルス幅約 160 fs）を照射し、高次高調波の発生を観測した。近赤外光と中赤外光との遅延時間を変化させながら、高調波スペクトルを時間分解計測した。

近赤外光による電離が行われていない場合には、中赤外光照射によって得られる高調波スペクトルに顕著なブロードニングが観測された。一方、強度の高い近赤外光で液体が電離された場合には、このブロードニングは消失し、高調波の収量も著しく抑制されることが確認された。この現象は、ポンプ光によって液体中の電子密度がプラズマ臨界電子密度を超えた結果、中赤外光が水中を伝搬できなくなり、界面近傍にエバネッセント場が形成されることによって説明できる。このとき、屈折率の実部はほぼゼロに保たれるため、中赤外光にスペクトル変調が生じず、結果としてブロードニングは抑制される。加えて、高調波の発生はエバネッセント場が存在する界面近傍に局在するため、その収量も大きく減少する。これらの振る舞いは、非線形伝搬方程式の数値解析によって定性的に再現され、実験で得られた高調波スペクトルの遅延時間依存性とも良く一致した。したがって、本研究で観測された高調波は、ポンプ光によって臨界電子密度以上に電離された液体中で形成されたエバネッセント場に起因すると考えられる。

本研究は、液体中の電子密度を制御することにより、強レーザー場下における新たな高調波発生機構――すなわち、エバネッセント場を介した界面局在的な非線形応答――を実証する成果である [4]。

参考文献

[1] K. Kaneshima *et al. Phys. Rev. Lett.* **120**, 243903 (2018)

[2] P. Xia *et al. Phys. Rev. B* **104**, L121202 (2021)

[3] T. Yang *et al. Appl. Phys. Express* **17**, 122006 (2024)

[4] T. Mizuno *et al.* Phys. Rev. A 投稿中

© 2025年 応用物理学会

自己相関法による光波駆動型走査トンネル顕微鏡法の時間分解能評価

筑波大数理　○(M2)茅野壮，嵐田雄介，茂木裕幸，武内修，吉田昭二，重川秀実

Measurement of the time resolution on light-wave-driven scanning tunneling microscopy by autocorrelation method

Univ. Tsukuba **S. ○Kayano, Y. Arashida, H. Mogi, O. Takeuchi, S. Yoshida, H. Shigekawa**

光の電場を走査トンネル顕微鏡(STM)に照射することで短い時間内にトンネル電流を流す方法を光波駆動 STM と呼び、原子スケールの超高速現象解明に期待がかかっている。この手法には正負の極性が非対称な広帯域光パルスを用いる必要があり、これまで THz 波を用いた多くの報告が行われてきた（THz-STM）。我々は中心周波数 30 THz 程度の中赤外パルス(MIR)を使った光駆動 STM（MIR-STM）に唯一成功しており、これまでに 29 fs の時間分解能を報告している[2]。しかしこの値は試料の応答から決定した値であったため、より正確な時間分解能の評価法が必要となっている。今回、自己相関法を用いることで MIR-STM の時間分解能を評価した。

光源には中心波長 800nm，パルス幅 8.2 fs，繰返し 4 MHz，パルスエネルギー1 μJ の光パルスを用い、GaSe 結晶による光整流効果によって広帯域 MIR パルスを発生させた。ピエゾ駆動の分割ミラーを MIR ビームを反射させることでダブルパルス化し、それらの間の遅延時間 τ_{MM} を変化させ、STM 探針先端に照射した。試料にはバルク 2H-$MoTe_2$（温度 77K）を用いた。Figure 1 自己相関トンネル電流波形を示す。およそ 8.4 fs (FWHM)の領域で大きな自己相関信号が観測された。これは他の光波駆動 STM より 1 桁以上良い時間性能であり[3]、今後の超高速表面科学の解明に期待がかかる。

[1] T. L. Cocker *et al.*, *Nat. Photon.* 7, 620 (2013). [2] Y. Arashida *et al.*, *ACS Photonics* 9, 3156 (2022). [3] T. L. Cocker et al., *Nature* 539, 263 (2016).

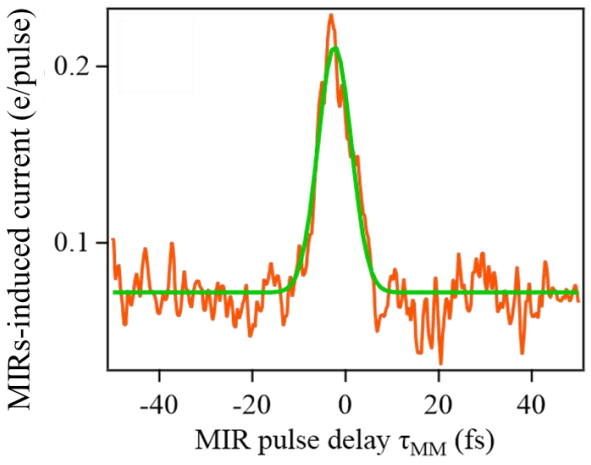


Fig. 1, autocorrelation current waveform of a MIR-STM

© 2025年 応用物理学会

Mo_6Te_6 単一量子細線における接合界面の光励起ダイナミクス

筑波大数理
○嵐田雄介，茅野壮，茂木裕幸，武内修，吉田昭二，重川秀実

Atomic-scale ultrafast dynamics of Mo_6Te_6 single nanowires

Univ. Tsukuba
°Y. Arashida, S. Kayano, H. Mogi, O. Takeuchi, S. Yoshida, H. Shigekawa

Mo_6Te_6 は化学的に安定な量子細線（NW）として知られた物質であり[1]、強い電子格子相互作用を呈する新しい 1 次元材料としてその電子物性解明が期待されている。Mo_6Te_6 は構造によって異なる電子状態を示し、単一 NW では狭ギャップ半導体、バンドル構造中では金属であることが知られている[2]。それらの界面などの局所電子状態にも興味が持たれている。本研究ではそのような単一 Mo_6Te_6 細線と Mo_6Te_6 束の界面において光励起後のダイナミクスを原子位置に区別して観察した。

実験には中心波長 800nm，パルス幅 8.2 fs、繰返し 4 MHz，パルスエネルギー1 μ J の光パルスを用い、これを GaSe 結晶による光整流効果により 1 サイクル以下の中赤外パルス（プローブ光）に変換したのちにレーザー基本波（ポンプ光）と同軸で超高真空下の走査トンネル顕微鏡 STM の探針先端に集光することにより光駆動 STM[3]を行なった。ポンプ光によって光キャリアを励起してから 120 fs 後のトンネル電流変化量のイメージング結果を Fig. 1 に示す。中赤外電場は負バイアス方向に印加した。画像の赤くなっている部分が光励起による変化量の大きな場所であり、バンドル構造上に比べ単一 NW 上で大きな変化が観察された。これは単一 NW の電子状態が半導体的でありキャリア寿命が長いことが原因だと考えられる。一方でバンドル構造は金属的であるため光励起キャリアの寿命が短い結果となった。これらの空間的・時間的な特性についての詳細を講演当日に議論する。

[1] H. Zhu *et al.*, *ACS Nano* 11, 11005 (2017). [2] H. Zhu *et al.*, Adv. *Mater.* 29, 1606264 (2017). [3] Y. Arashida *et al.*, *ACS Photonics* 9, 3156 (2022).

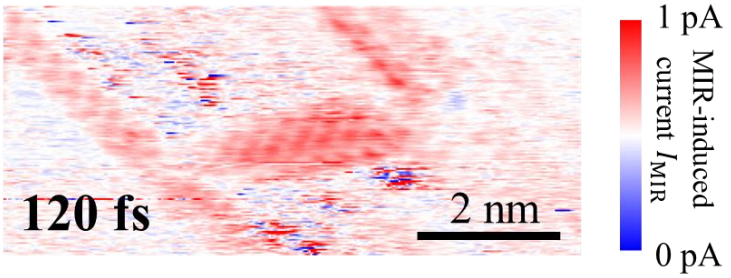


Fig. 1 tunneling current at 120 fs after photo-excitation on a Mo_6Te_6 nanowire

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.5 Ultrashort-pulse and high-intensity lasers

[8p-N405-1~18] 3.5 Ultrashort-pulse and high-intensity lasers

[8p-N405-1]

Ultrafast optical response of SnSe under intense photoexcitation

○Hiroshi Tanimura[1], Takao Homma[2], Norihiko Okamoto[2], Toshitaro Nose[3], Yuji Sutou[4,5], Tetsu Ichitsubo[2] (1.DENJIKEN, 2.Tohoku Univ. (IMR), 3.Kyoto Univ. (Eng.), 4.Tohoku Univ. (Eng.), 5.Tohoku Univ. (AIMR))

[8p-N405-2]

Ultrafast momentum dynamics of the transition from free carriers to excitons in a monolayer WSe_2

○Takumi Fukuda[1], Xing Zhu[1], Enrico Perfetto[2], Harley Suchiang[1], Joanna Nadolna[1,3], Nanami Tomoda[1], Suji Park[4], Hauk Jang[4], Kenji Watanabe[5], Takashi Taniguchi[5], Julien Madeo[1], Michael K. L. Man[1], Gianluca Stefanucci[2], Keshav M. Dani[1] (1.OIST, 2.Univ. Rome Tor Vegata, 3.Univ. Gdansk, 4.BNL, 5.NIMS)

[8p-N405-3]

Imaging of electronic structure in a two-dimensional magnetic insulator using TR-ARPES

○(D)Nanami Tomoda[1], Xing Zhu[1], Takumi Fukuda[1], Harley Suchiang[1], Michael Man[1], Julien Madeo[1], Keshav Dani[1] (1.OIST)

[8p-N405-4]

Ultrafast lattice dynamics in two-dimensional layered material $CeTe_3$

○(M1)Kentaro Yamauchi[1], Yu Mizukoshi[1], Mizuki Akei[1], Takumi Fukuda[2], Tomonori Nakamura[2], Yoshinori Okada[2], Muneaki Hase[1] (1.Univ. of Tsukuba, 2.OIST)

[8p-N405-5]

Monitoring the relaxation of hot carriers in a 2H-$MoTe_2$ thin film in saturable absorption conditions with ultrafast optical experiments

○Yui Iwasaki[1], Gael Privault[1], Takumi Fukuda[2], Muneaki Hase[1], Yusuke Arashida[1], Masaki Hada[1] (1.Univ. Tsukuba, 2.OIST)

[8p-N405-6]

Development of THz Systems for Characterization of Ultrashort Pulsed Electron

○(M1)Haruki Taira[1], Ryota Nishimori[1], Fuko Kato[1], Kaito En-ya[1], Godai Noyama[1], Gael Privault[1], Arnaud Arbouet[1,2], Shin-ya Koshihara[1], Yusuke Arashida[1], Masaki Hada[1] (1.Univ. Tsukuba, 2.CNRS IRL Dynacom)

[8p-N405-7]

Photoinduced structural dynamics of a $BaTiO_3$ thin crystal observed by ultrafast electron diffraction

○(B)Nagisa Yamamoto[1], Weikun Zhou[2], Gael Privault[1], Riyo Nagao[1], Arnaud Arbouet[1,3], Shin-ya Koshihara[1], Tsukasa Katayama[2], Masaki Hada[1] (1.Univ. Tsukuba, 2.Hokkaido Univ., 3.CNRS IRL Dynacom)

[8p-N405-8]

Ponderomotive Interaction of Ultrashort Pulsed Electrons

○(B)Fuko Kato[1], Haruki Taira[1], Gael Privault[1], Valentin Rollo[2,3], Shin-ya Koshihara[1], Masaki Hada[1], Arnaud Arbouet[1,4] (1.Univ. Tsukuba, 2.CEMES-CNRS, 3.Univ. Toulouse, 4.CNRS IRL Dynacom)

[8p-N405-9]

Control of Photoelectron-Ion Entanglement and Coherence by Rabi Oscillations: First-Principles Calculations

○Kenichi Ishikawa[1], Futa Yamakawa[1], Takeshi Sato[1], Bo-Ren Shen[2], Yi-Jia Mao[2], Zhao-Han Zhang[2], Yang Li[2], Feng He[2], Kevin C. Prince[3], Kiyoshi Ueda[4] (1.UTokyo, 2.SJTU, 3.Elettra, 4.Tohoku Univ.)

[8p-N405-10]

Quantum subspace methods for multielectron dynamics

○Takeshi Sato[1], Yukio Kawashima[2], Mario Motta[2], Haifeng Lang[1], Naoki Furukawa[1], Kenichi Ishikawa[1], Tanvi Gujarati[2], Antonio Mezzacapo[2] (1.UTokyo, 2.IBM Quantum)

[8p-N405-11]

First principles calculation of the 3D real-space current distribution in graphene driven by strong laser fields

○(D)SIYUAN LI[1], Mizuki Tani[2,1], Arqum Hashmi[1], Kenichi L. Ishikawa[1] (1.Univ. Tokyo, 2.QST)

[8p-N405-12]

Frist-Principles Simulation of High-Intensity Laser Reflection from TiO_2 Dielectic Thin Films

○(M1)Koya Shimaoka[1], Yusuke Kondo[2], Kazunori Shibata[3], Mitsuharu Uemoto[1] (1.Kobe Univ., 2.ORIST, 3.ILE)

[8p-N405-13]

Ab-initio calculations of high-harmonic generation in amorphous Si

○(D)Eiyu Gushiken[1], Tomohito Otobe[1,2], Hiroki Katow[1], Arqum Hashmi[1], Mizuki Tani[1,2], Shunsuke Yamada[2], Kenichi Ishikawa[1] (1.The Univ. of Tokyo, 2.KPSI)

[8p-N405-14]

Structural dynamics in a two-dimensional layered material WTe_2 by controlling coherent phonons using time-resolved second-harmonic generation

○(M2)Mizuki Akei[1], Takumi Fukuda[2], Yu Mizukoshi[1], Kazuhiro Kikuchi[1], Muneaki Hase[1] (1.Univ. of Tsukuba, 2.OIST)

[8p-N405-15]

Soft X-ray Reflectivity Studies Using a Laser-based High-Harmonic Light Source

○HungWei Sun[1], Ryunosuke Takahashi[2], Nobuhisa Ishii[1], Momoko Maruyama[1], Kohei Yoshimatsu[3], Hiroki Wadachi[2], Ryuji Itakura[1] (1.QST KPSI, 2.Univ. of Hyogo, 3.Science Tokyo)

[8p-N405-16]

Complex refraction spectroscopy with double attosecond pulses using a beam splitting mirror

○(D)Akihiro Oshima[1,2], Hiroki Mashiko[1], Ming-Chang Chen[3], Ikufumi Katayama[2], Jun Takeda[4], Katsuya Oguri[1] (1.NTT-BRL, 2.Yokohama National Univ., 3.National Tsing Hua Univ., 4.Shibaura Inst. of Technology)

[8p-N405-17]

Ultrafast pump–probe study of Bi-based cuprates with varying CuO_2 layers

○(M1)Taisei Shimizu[1], Shigeyuki Ishida[2], Hiroshi Eisaki[2], Tohru Kurosawa[1], Migaku Oda[3], Satoshi Tsuchiya[1], Yasunori Toda[1] (1.Dept. of Appl. Phys. Hokkaido Univ., 2.AIST, 3.Dept. of Phys. Hokkaido Univ.)

[8p-N405-18]

Spatial mapping of photoinduced QP dynamics in Bi2201 using time-resolved spectroscopy

Yukitsugu Fukasawa[1], Taisei Shimizu[1], Tohru Kurosawa[1], Migaku Oda[2], Satoshi Tsuchiya[1], Keisaku Yamane[1], Ryuji Morita[1], ○YASUNORI TODA[1] (1.Eng. Hokkaido Univ., 2.Sci. Hokkaido Univ.)

強光励起時の SnSe の超高速光応答

Ultrafast optical response of SnSe under intense photoexcitation

電磁研 [1], 東北大金研 [2], 京大工 [3], 東北大工 [4], 東北大 AIMR[5]

◦谷村 洋 [1], 本間 貴雄 [2], 岡本 範彦 [2], 野瀬 嘉太郎 [3], 須藤 祐司 [4,5], 市坪 哲 [2]

DENJIKEN[1], Tohoku Univ. (IMR)[2], Kyoto Univ. (Eng)[3], Tohoku Univ. (Eng)[4], Tohoku Univ. (AIMR)[5]

H. Tanimura[1], T. Homma[2], N. L. Okamoto[2], Y. Nose[3], Y. Sutou[4,5], T. Ichitsubo[2]

E-mail: tanimura@denjiken.ne.jp

結晶-アモルファス相変化を利用して情報を記録する従来の相変化材料と比較し，より高速かつ省エネルギーな情報記録を実現しうるとして，結晶-結晶相転移を利用した結晶性相変化材料の開発が注目されている．代表例の一つが MnTe であり，スパッタリング方で作製した薄膜試料に対しナノ秒レーザーの照射やパルス電圧を印加することにより，電気的・光学的に異なる物性を有する α 相と β'相の間で可逆的な相制御が報告されている[1]．その他に物性変化を伴う相転移をする物質の一つとして, IV-VI 族化合物である SnSe が挙げられる. SnSe はパイエルス転移により，α 相（$E_g \approx 0.83$ eV） から β 相($E_g \approx 0.46$ eV) の間で構造相転移を示す[2]．SnSe についてはフェムト秒レーザー照射による光応答の研究がなされており， Han らは，11 μJ cm^{-2} の弱励起で SnSe が高温相へ光誘起相転移すると主張している[3]．一方で Huang らは，Han らよりもはるかに強い 2.2 mJ cm^{-2} の励起で超高速 X 線回折を観測したが，高温相への相変化は確認されなかった[4]. そこで本研究では，SnSe の光誘起相転移の可能性を明確にするため，時間分解分光測定により強励起条件下における超高速光応答を測定した．

単結晶 SnSe 試料を作製し, 78 K から室温でフェムト秒レーザーを用いてポンププローブ分光法を行った．試料の光学特性を分光エリプソメーターで決定し，強励起条件を達成するために，先行研究で用いられている 800 nm の光よりも吸収係数が約 3 倍の 400 nm の光をポンプ光に用いた．プローブ光には可視光～近赤外線エネルギー領域の白色光を使用することで，広帯域観測を行った．励起強度 0.10 ~4.07 mJ cm^{-2}（ダメージしきい値まで）で光励起し，過渡的反射率変化を測定・解析した．光励起後の反射率に生じたコヒーレント振動を解析すると，振動は α 相に由来する 4 つの A_g 光学フォノンモードに由来することがわかった．一方で，これらの振動数は励起強度によって格子の softening に由来する周波数変化を示したものの，高温相への相変化を示すモードの変化は観測されなかった．講演では，SnSe の超高速光応答と相転移可能性について，より詳細な議論を行う．

[1] S. Mori, S. Hatayama, Y. Shuang, D. Ando, Y. Sutou, Nat. Commun., 11 (85) (2020).

[2] G. Shi, and E. Kioupakis., J. Appl. Phys. 117, 065103 (2015)

[3] Y. Han et al., J. Phys. Chem. Lett., 13, 2 (2022).

[4] Y. Huang et al., Physical Review X, 12, 011029 (2021).

© 2025年 応用物理学会

単層 WSe_2 における自由キャリアから励起子への遷移過程の運動量ダイナミクス

Ultrafast momentum dynamics of the transition from free carriers to excitons in a monolayer WSe_2

沖縄科技大[1], ローマ大[2], グダンスク大[3], ブルックヘブン国立研[4], 物質・材料研究機構[5],
○(P) 福田 拓未[1], Xing Zhu[1], Enrico Perfetto[2], Harley Suchiang[1], Joanna Nadolna[1,3],
友田 七海[1], Suji Park[4], Houk Jang[4], 渡邊 賢司[5], 谷口 尚[5], Julien Madeo[1],
Michael K. L. Man[1], Gianluca Stefanucci[2], Keshav M. Dani[1]
OIST[1], Univ. Rome Tor Vergata[2], Univ. Gdansk[3], BNL[4], NIMS[5],
°(P) T. Fukuda[1], X. Zhu[1], E. Perfetto[2], H. Suchiang[1], J. Nadolna[1,3], N. Tomoda[1], S. Park[4],
H. Jang[4], K. Watanabe[5], T. Taniguchi[5], J. Madeo[1], M. K. L. Man[1], G. Stefanucci[2], K. M. Dani[1]
E-mail: takumi.fukuda@oist.jp

光励起によって生じる半導体中の自由キャリアや励起子は，太陽電池や光センサーなどの光電子デバイスの性能に大きく関与するだけでなく，電子と正孔間のクーロン相互作用による量子多体効果の基礎を理解する上で重要な物理概念である。特に，二次元層状物質である遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)は，単層構造においてクーロン相互作用の遮蔽効果が弱く，大きな束縛エネルギー(数百 meV)と強い光吸収を伴う特徴的な励起子が生成される。近年では，時間分解角度分解光電子分光(TR-ARPES)によって励起子のエネルギーだけでなく運動量空間でのダイナミクスが追跡可能となった[1,2]。一方で，基礎・応用上重要な自由キャリアと励起子の共存や遷移過程に関する運動量ダイナミクスは，スピンやフォノンなど様々な内部自由度が関わると予想されるが，未だ十分に理解されていない。

本研究では，TMD の一種である単層 WSe_2 を対象とし，自由キャリアから励起子への遷移過程に関する運動量ダイナミクスの実験的観測とメカニズムの解明を目的とした。測定試料として，六方晶窒化ホウ素(hBN)上の単層 WSe_2 試料を物理的転写法によって作成し，飛行時間型光電子運動量顕微鏡の超高真空チャンバー内に配置した。そして，直接遷移ギャップより高い光エネルギーを有するポンプ光(3.1 eV)，極端紫外プローブ光(21.7 eV)を試料へと集光し，TR-ARPES 測定を行った。その結果，光励起直後(FIG.1(a))では，K 点と Q 点において価電子帯最高部から 2 eV 以上の領域に伝導帯(自由キャリア)，そして 1 ps までに(FIG.1(b))その多くが励起子(~ 1.8 eV)へと遷移する様子が観測された。本講演では，自由キャリアから励起子への散乱時間や，関連する物理過程についての考察を行う。

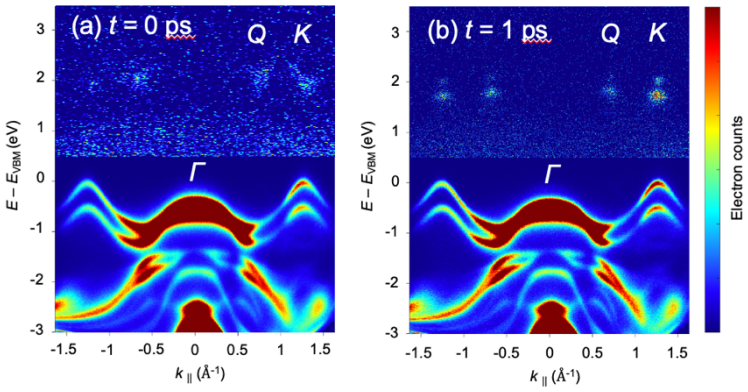


FIG.1 TR-ARPES spectra of the monolayer WSe_2 sample at the time delays *t*: (a) $t = 0$ ps, (b) $t = 1$ ps. Conduction bands (free carriers) at K and Q valleys show up upon photoexcitation at (a). At later time delay (b), the signal of both free carriers and excitons appear in the spectrum.

[1] *Science* **370**, 1199-1204 (2020). [2] *Sci. Adv.* **7**, eabg0192 (2021)

© 2025年 応用物理学会

時間分解 ARPES を用いた 2 次元反強磁性体の電子状態イメージング

Imaging of electronic structure in a two-dimensional magnetic insulator by TR-ARPES

沖縄科技大, ○(D)友田 七海, Xing Zhu, 福田 拓未, Harley Suchiang, Ka Lun Michael Man, Julien Madeo, Keshav M. Dani

OIST, ○N. Tomoda, X. Zhu, T. Fukuda, H. Suchiang, M. K. L. Man, J. Madeo, K. M. Dani

E-mail: nanami.tomoda@oist.jp

励起子は電子とホールが近接クーロン相互作用で結びついた準粒子であり、理論的概念が提唱されて以降、半導体物質を中心に盛んに研究が行われている。近年では、時間分解 ARPES (angle resolved photoemission spectroscopy) を用いて 2 次元半導体内の励起子の電子状態を直接観測可能となった[1]。近年、電子同士が強く相互作用する強相関性物質が励起子研究の舞台とし着目されている[2]。強相関物質で二次元性を持つ物質として MPS_3(M = Mn, Fe, Co, Ni)が挙げられる。これらの物質は電子の持つスピン間に超交換相互作用が働き、図 1(a)に示すように反強磁性構造をとる。このような、反強磁性構造を持つ強相関物質において、励起子と周囲のスピンとの間に、従来の半導体励起子の 10 倍の交換相互作用が生じることが理論研究で明らかになった[3]。しかし、実験では、励起子の数百 fs という短い寿命をカバーする時間分解能、数十 meV という小さなエネルギー分解能を兼ね備えた観測技術における課題から、強相関性物質における励起研究の成果は未だ十分ではない。

そこで本研究では、時間分解 ARPES を用い、2 次元反強磁性物質 $MnPS_3$ における、平衡状態・非平衡状態の電子状態を観測することで、強相関物質での励起子の解明を行う。実験には、励起子観測に十分な時間分解能 170 fs かつエネルギー分解能 60 meV の時間分解 ARPES を用いた[1]。図 1(b)にバルクの $MnPS_3$ を磁気転移温度(T_N = 78 K)以下の 10K で測定した際の光電子スペクトルを示す。研究室の装置を用い取得した実験結果は、先行研究の結果[4]とよく一致した。本講演では、$MnPS_3$ における磁気転移温度以上・以下での光電子スペクトルの変化の詳細や、非平衡状態の観測結果についての考察を行う。

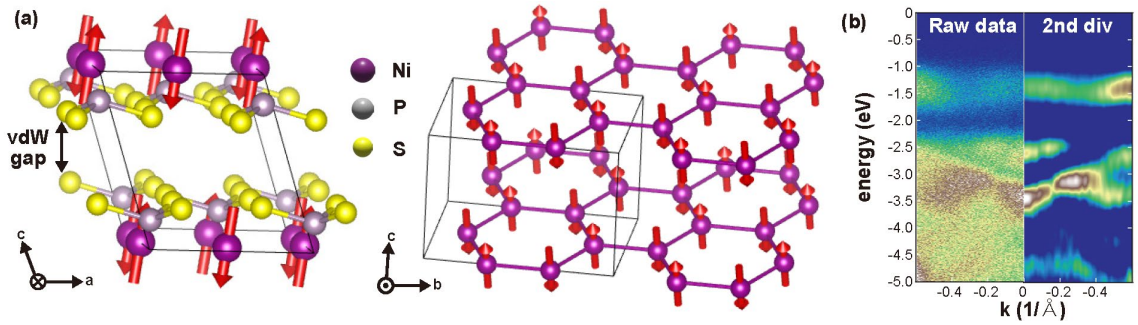


図 1. (a) $MnPS_3$ の結晶構造 左図：すべての原子、右図：磁性を持つ原子のみ。 (b) バルク $MnPS_3$ における ARPES 測定結果（10 K, $h\nu$ = 22 eV）左図：生の ARPES データ、右図：二回微分を行ったデータ。

[1] J. Madéo *et al*, Science, **370**, 1199–1204 (2020). [2] S. Kang et al, Nature, **583**, 785–789 (2020). [3] T. Kaneko, *et.al*, *Phys. Rev. B* Condens. Matter **108**, 205121 (2023). [4] J. Strasdas *et.al*, Nano Lett., doi: 10.1021/acs.nanolett.3c02906 (2023).

© 2025年 応用物理学会

二次元層状物質 $CeTe_3$ の超高速格子ダイナミクス

Ultrafast lattice dynamics in two-dimensional layered material $CeTe_3$

筑波大院数理[1]，沖縄科技大[2] ○(M1)山内 健太朗[1]，(D)水越 優[1]，(M2)明井 水希[1]，
福田 拓未[2]，中村 友謙[2]，岡田 佳憲[2]，長谷 宗明[1]

Univ. of Tsukuba[1], OIST[2], ○(M1) Kentaro Yamauchi[1], (D) Yu Mizukoshi[1], (M2) Mizuki Akei[1],
Takumi Fukuda[2], Tomonori Nakamura[2], Yoshinori Okada[2], Muneaki Hase[1]

E-mail: s2520335@u.tsukuba.ac.jp

光照射によって巨視的な構造変化や電子状態の変化が生じる、光誘起相転移(PIPT: Photoinduced Phase Transition)は、超高速光スイッチングなどの次世代デバイスへの応用が期待され、盛んに研究されている。特に、電荷密度波(CDW: Charge-Density Wave)系では、光によって CDW 秩序の制御が可能であるという特徴を持つことから、注目を集めている[1]。CDW 系の多くは低温下でのみ CDW 秩序を持つ一方で、$CeTe_3$ は常温常圧下であっても CDW 秩序を持つ。しかし、光励起下における $CeTe_3$ の研究はほとんど報告されていない。そこで本研究は、超高速時間領域でのコヒーレントフォノンのダイナミクスから CDW 秩序に関する PIPT の知見を深めることを目的とする。

本実験では、室温環境下 $CeTe_3$ バルク単結晶に対し、フェムト秒パルスレーザー(中心波長 800 nm、パルス幅 40 fs、繰り返し周波数 100kHz) を用い、ポンプ・プローブ分光測定を行った。励起光密度を 1.2 mJ/cm^2 から 4.8 mJ/cm^2 の範囲で変化させ、得られた反射率変化信号に含まれるコヒーレントフォノンの振幅の励起光密度依存性を評価した。その結果、励起光密度の増加に伴い、3 つのフォノンモードの振幅は単調増加した一方で、4 つのフォノンの振幅は 3.6 mJ/cm^2 を境に減少に転じる振る舞いを示した。後者のフォノンモードは振幅モードを含む CDW 由来のフォノンモードである[2]。この結果は、CDW 秩序の消失を示唆している。

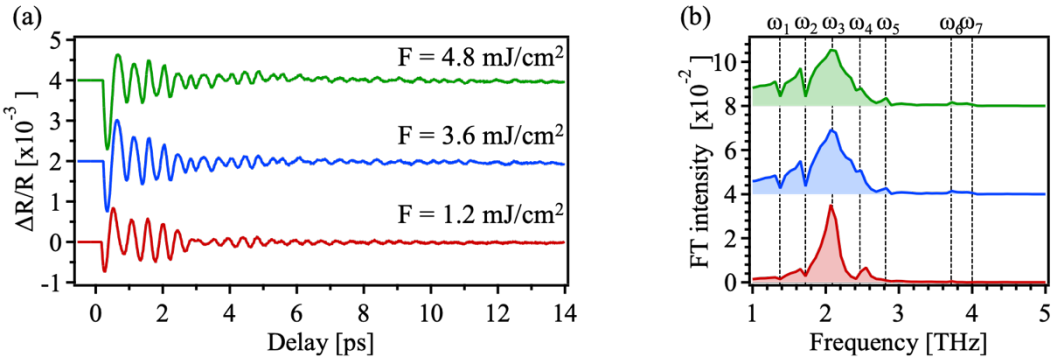


Fig.1(a) Time-domain coherent phonon signals at each pump fluence.
(b) FT spectra of the signals in (a). Seven phonon modes (ω_1~ω_7) were observed.

【参考文献】

[1] A. Kogar, *et al.*, *Nat. Phys.* **16.2**, 159-163 (2020).

[2] K. Yumigeta, *et al.*, *APL Mater.* **10**, 111112 (2022).

© 2025年 応用物理学会

過渡透過率計測による 2H-$MoTe_2$ 薄膜における熱電子緩和の観測

Monitoring the relaxation of hot carriers in a 2H-$MoTe_2$ thin film in saturable absorption conditions with ultrafast optical experiments

筑波大数理[1]，沖縄科学技術大[2]　○(M2)岩崎 ゆい[1]，Gaël Privault[1]，福田 拓未[2]，長谷 宗明[1]，嵐田 雄介[1]，羽田 真毅[1]

Univ. Tsukuba[1], OIST[2], ○Yui Iwasaki[1], Gaël Privault[1], Takumi Fukuda[2], Muneaki Hase[1], Yusuke Arashida[1], Masaki Hada[1]

E-mail: s2420398@u.tsukuba.ac.jp

遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDs）は 2 次元層状物質であり、その中で $MoTe_2$ は半導体、半金属、ワイル半金属などの相を持つ[1, 2]。半導体物質において、キャリアの振る舞いは性能に影響するため、光励起直後の伝導帯における電子緩和のダイナミクスを理解することは重要である。我々は、TMDs の 1 つである 2H-$MoTe_2$ の可飽和吸収特性[3]を用いて、伝導帯における電子のダイナミクスをダブルパルス超高速時間分解電子線回折法により観測した[4]。超高速時間分解電子線回折法とは、プローブのパルス電子線を用いて、物質にポンプ光を照射することによって生じる物質の構造ダイナミクスを直接的に観測できる手法である。この手法にダブル光パルス励起を用いることにより、2H-$MoTe_2$ の伝導帯における電子の運動量緩和の時定数は 100 fs 以下であることを明らかにした。この系の時間分解能は 2 つのポンプ光のパルス幅に依存しており、用いたポンプ光のパルス幅は約 100 fs であったため、運動量緩和を詳細に理解するにはより短いポンプ光のパルス幅が必要となる。また、我々は電子線回折法にダブル光パルス励起を組み合わせることで 2H-$MoTe_2$ の光吸収を観測したが、これは、1 つ目の光パルスで 2H-$MoTe_2$ に可飽和吸収を生じさせた後の、試料の 2 つ目の光パルスの吸収の有無を調べている。よって原理的には、光励起された電子の初期緩和過程を過渡透過率計測により明らかにすることは可能であると考えられる。本研究では、ポンプ光（波長 400 nm）を 2H-$MoTe_2$ 薄膜に照射して可飽和吸収を生じさせ、プローブ光（波長 400 nm）の過渡透過率変化を観測することで、電子の運動量緩和を詳細に理解する。波長 400 nm のパルス幅は 76 ± 1 fs (FWHM)であり、デコンボリューションにより 30 fs 程度の現象を観測可能であると分かった。我々は、本手法により、可飽和吸収領域における 2H-$MoTe_2$ 薄膜のプローブ光の時間的な透過率変化を観測する。

[1] D. H. Keum, et al., *Nature Physics* **11**, 482-486 (2015).

[2] K. Deng, et al., *Nature Physics* **12**, 1105-1110 (2016).

[3] T. Fukuda, et al., *Journal of Physical Chemistry C* **127**, 13149-13156 (2023).

[4] Y. Iwasaki, et al., *Applied Physics Letters* **123**, 181901 (2023).

© 2025年 応用物理学会

極短パルス電子線の特性評価のための THz 波光学系の開発

Development of THz Systems for Characterization of Ultrashort Pulsed Electron

筑波大数理[1]，筑波大応理[2]，CNRS IRL Dynacom[3]，○(M1)平 晴希[1]，西森 亮太[1]，加藤 芙宇子[2]，塩谷 海斗[1]，野山 豪大[1]，Gael Privault[1]，Arnaud Arbouet[1,3]，腰原 伸也[1]，嵐田 雄介[1]，羽田 真毅[1]

Univ. Tsukuba[1], CNRS IRL Dynacom[2], ○Haruki Taira[1], Ryota Nishimori[1], Fuko Kato[1], Kaito En-ya[1], Godai Noyama[1], Gael Privault[1], Arnaud Arbouet[1,2], Shin-ya Koshihara[1], Yusuke Arashida[1], and Masaki Hada[1]

E-mail: s2520307@u.tsukuba.ac.jp

物質への光照射等によって生ずる、フェムト秒からピコ秒時間域における過渡的な構造変化を理解することは、新しい光電機能を持つ材料開発のための一つの重要課題である。電子線パルスをプローブとして用いる超高速時間分解電子線回折法は、物質の過渡的な構造変化を直接的に観測することができる計測手法である[1]。この手法の時間分解能は電子線のパルス幅に依存する。我々は、高周波キャビティによる電子線圧縮システムにより、約 75 fs という極めて短いパルス幅を実現している[2]。しかし、この値はシリコン膜の光応答からパルス幅を推定したもので、より直接的な計測が必要である。そこで本研究では、テラヘルツ（THz）ストリーキング法を用いて、この極めて短い電子線パルス幅の直接的な計測を行った。この手法は、THz パルスを金属共振器に集光することにより、瞬間的な電場を発生させる。発生した電場は、金属共振器を通過する電子線パルスを偏向する。偏向量の時間変化から、電子線パルス幅を計測することができる[3]。

有機 BNA（N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline）結晶を用いて発生させた THz パルスを、焦点距離 30 mm のレンズで集光し、バタフライ型の金属共振器に対して斜め方向から入射した。この実験系を用い、THz ストリーキング実験を行った。その結果、高周波キャビティによる圧縮を行わない場合、電子線のパルス幅は 9.8 ps であることが確認された。一方、圧縮後の電子線パルス幅は 5.7 ps 以下であるという結果になり、金属共振器に対して THz 波を斜めに入射するような光学系では発生する電場分布が非対称となり、正確な計測はできないということが分かった。そこで、THz 波に対して共振器を垂直にし、電子線に対して共振器を斜めに設置するという光学系の改善を行った。その結果、圧縮後のパルス幅は 2.3 ps 以下まで圧縮されているということが分かり、測定の時間分解能が向上した。この結果から、THz パルスを共振器に対して垂直に設置することが重要であるとわかった。現在、より高精度に電子線のパルス幅を計測するために、軸外し放物面鏡を用いて、THz パルスを共振器に対して垂直かつ電子線と同軸に入射・集光することが可能な光学系を開発している。

[1] R. J. D. Miller, *Science* **343**, 1108-1116 (2014)

[2] K. Takubo et al., *Rev. Sci. Instrum.* **93**, 053005 (2022)

[3] C. Kealhofer et al. *Science* **352**, 429-433 (2016)

© 2025年 応用物理学会

超高速時間分解電子線回折法を用いた 紫外光励起による $BaTiO_3$ 薄膜単結晶の構造変化の観測

Photoinduced structural dynamics of a $BaTiO_3$ thin crystal observed by ultrafast electron diffraction

筑波大応理[1], 北大電子研[2], 筑波大数理[3], CNRS IRL Dynacom[4], ○(B)山本 渚[1], Zhou Weikun[2], Privault Gaël[3], 長尾 梨代[3], Arbouet Arnaud[3,4], 腰原 伸也[3], 片山 司[2], 羽田 真毅[3]

Univ. Tsukuba[1], Hokkaido Univ.[2], CNRS IRL Dynacom[3], ◦(B)Nagisa Yamamoto[1], Weikun Zhou[2], Gaël Privault[1], Riyo Nagao[1], Arnaud Arbouet[1,3], Shin-ya Koshihara[1], Tsukasa Katayama[2], Masaki Hada[1]

E-mail: s2210763@u.tsukuba.ac.jp

ペロブスカイト酸化物の 1 つであるチタン酸バリウム($BaTiO_3$)は室温で強誘電特性を持ち、積層コンデンサー、メモリ、センサーなどの電子機器や素子の材料として広く用いられている[1]。最近、$BaTiO_3$ 薄膜に光照射することによって巨大な膜変形が生じることが確認されており、ロバストな光駆動アクチュエータとしての応用が期待されている[2]。この光照射による $BaTiO_3$ 薄膜の巨大な膜変形の初期過程あるいはその起源をより詳細に解明するために、我々は超高速時間分解電子線回折法を用いて、光誘起による室温下での $BaTiO_3$ 超薄膜（90 nm）のピコ秒で生じる原子構造の変化を観察した。超高速時間分解電子線回折法とは、ポンプ・プローブ法の一種であり、光照射によって非常に短い時間で変化する物質の回折像を取得する方法である。ポンプに 266 nm の光パルスを用い、プローブに 75 keV で加速した電子線パルスを用いた。本実験で用いた装置の時間分解能は約 1 ps である。$BaTiO_3$ 超薄膜からは、明瞭な複数の回折点が得られた。特に、(220)面からの回折点が強く出ており、紫外光照射下（フルーエンス：0.5 mJ/cm^2）におけるこの回折点の強度変化を解析した。220 回折点の強度は、時定数 90 ps で 6-8%減少しており、サンプルの励起後少なくとも 600 ps まで変化が続いている。フルーエンス 0.5 mJ/cm^2 のポンプ光によって生じるサンプルの温度上昇はサンプルが均一に光励起がなされたと仮定した場合、15 K よりも小さいと考えられる。これは、390K 付近で生じる正方晶から立方晶の構造相転移と考えるには十分な温度上昇ではなく、デバイワーラー因子による回折点の減少と考えることも困難である。光照射下における $BaTiO_3$ 超薄膜は、きわめて特異な状態となっていると考えられる。観測された、高速かつ大きな強度変化の原因を誘電分極、構造変化、局所的な温度変化、相転移あるいは他の光と物質との相互作用など、様々な可能性を考慮しながら検討し、発現メカニズムの解明を目指す。

[1] G.C. Manika, *et al., Molecules* **25**, 2686 (2020).

[2] L. Gong, *et al., ACS Appl. Mater. Interfaces* **16**, 54146–54153 (2024).

© 2025年 応用物理学会

高速電子線のポンデロモーティブ相互作用

Ponderomotive Interaction of Ultrashort Pulsed Electrons

筑波大応理[1], 筑波大数理[2], CEMES-CNRS[3], Univ. Toulouse[4], CNRS IRL Dynacom[5],
○(B)加藤 芙宇子[1], 平 晴希[2], Gaël Privault[2], Valentin Rollo[3,4], 腰原 伸也[2], 羽田 真毅[2],
Arnaud Arbouet[2,5]

Univ. Tsukuba[1], CEMES-CNRS[2], Univ. Toulouse[3], CNRS IRL Dynacom[4], ◦Fuko Kato[1],
Haruki Taira[1], Gaël Privault[1], Valentin Rollo[2,3], Shin-ya Koshihara[1], Masaki Hada[1],
and Arnaud Arbouet[1,4]

E-mail: s2211347@u.tsukuba.ac.jp

近年、超高速時間分解電子線回折法や超高速電子顕微鏡などのパルス電子線を用いた物質の過渡構造解析が盛んに行われるようになってきた。通常、電子顕微鏡では、電子線を電磁石レンズにより集束と発散を行いながら絞りで成型することで、平行な電子ビームを試料に入射する。しかし、パルス電子線を集束する場合、空間電荷効果により電子線がランダム方向に飛散するため、1 パルス、1 μm^2 当たりの電子数を 1 つ以下にする必要があった。したがって複数の電子が入った高輝度な極短パルス電子線を発散するためには、凹レンズが必要である。しかし、電子線の電磁石レンズは凸レンズとしてしか働かない。そこで、我々は電子線の凹レンズとして、レーザー電場と電子線との相互作用、すなわちポンデロモーティブ相互作用に着目した。ポンデロモーティブ力とは、振動する電場の下で電子が受ける力であり、この力を利用することで、パルス電子線の凹レンズとして作用させることができるのではないかと考えた。この手法は、レーザーを強集光することで電子線を直接的かつ高速に広げることが可能である。また、レーザーの形状を工夫することで電子線の収束と広がりを自由自在に操ることも可能になると期待される。

我々はパルス圧縮空洞で電子線をパルス圧縮することが可能な超高速時間分解電子線回折システムを用いた。電子線が通過する軸上に焦点距離 25.4 mm の穴あきの軸外し放物面鏡を導入し、振動電場としてビーム径を 14 μm（レイリー長 : ~200 μm）に集光したパルス幅 40 fs、波長 800 nm のパルス光をパルス電子線に対して逆平行（オフセット角：7.5°）に導入した。このとき、入射光のパワーは、パルス当たり 540 μJ であり、約 350 J/cm^2（8.8 × 10^{15} W/cm^2）の入射フルーエンスであった。パルス電子線は、パルス光が通過するタイミングでわずかに広がっていることが分かった。これは数値シミュレーションとも一致している。

© 2025年 応用物理学会

ラビ振動による光電子・イオンエンタングルメントとコヒーレンスの制御の第一原理計算

Control of Photoelectron-Ion Entanglement and Coherence by Rabi Oscillations: First-Principles Calculations

東大院工[1]，上海交通大[2]，Elettra[3]，東北大[4]　○石川 顕一[1]、山川楓太[1]、佐藤健[1]、B.-R. Shen[2]、Y.-J. Mao[2]、Z.-H. Zhang[2]、Y. Li[2]、F. He[2]、K. C. Prince[3]、上田 潔[4]

UTokyo[1], SJTU[2], Elettra[3], Tohoku Univ.[4], ○K. L. Ishikawa[1], F. Yamakawa, T. Sato, B.-R. Shen[2], Y.-J. Mao[2], Z.-H. Zhang[2], Y. Li[2], F. He[2], K. C. Prince[3], K. Ueda[4]

E-mail: ishiken@n.t.u-tokyo.ac.jp

例えばFERMI自由電子レーザー [1, 2] から得られるようなz方向に直線偏光したフェムト秒2波長極端紫外光パルス（$\hbar\omega$ と $2\hbar\omega$）の下でのNe原子の振る舞いを考える。Ne $2p$ および $2s$ のイオン化閾値はそれぞれ21.56 eV, 48.47 eVなので、$\hbar\omega$ がその差（26.91 eV）に一致する場合、2ω パルスは $2s$ 電子を、ω パルスは $2p$ 電子をイオン化し、同じ5.35 eVのエネルギーで反対のパリティを持つ光電子が放出される。それぞれの光電子状態を $|\alpha\rangle$（p 波）、$|\beta\rangle$（s, d 波）と表すと、光電子波束 $|\alpha\rangle$ と $|\beta\rangle$ は異なるイオン状態（$2s^{-1}$ と $2p^{-1}$、それぞれ $|2\rangle$ と $|1\rangle$ と表す）と結びついているため干渉しない。ところが、$\hbar\omega$ が $2s^{-1}$ と $2p^{-1}$ のエネルギー差に等しいためラビ振動が起きる。$2p^{-1}$（$|1\rangle$）が $2s^{-1}$（$|2\rangle$）へ遷移する場合（逆も同様）、$|\alpha\rangle$ と $|\beta\rangle$ の光電子状態は干渉可能になる。我々はこれまでに essential-states アプローチを用いて、実際にラビ結合がもともとは干渉しない光電子波束間にコヒーレンスを生み出すことを示してきた [3, 4]。本研究では、この結果を、実時間第一原理計算によって検証する [5]。

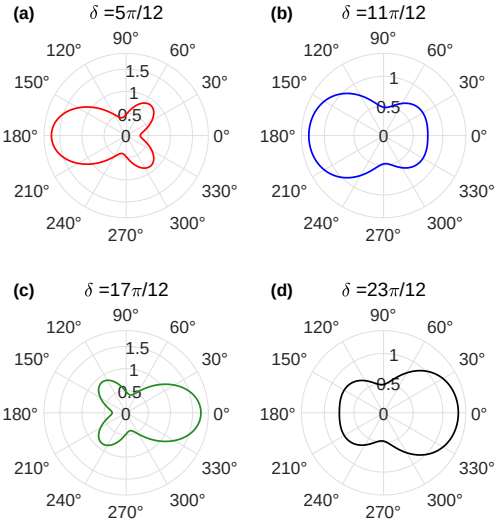


図 1: Photoelectron angular distribution at the spectral center vs. the ω-2ω relative phase δ.

基本波と倍波がそれぞれパルス幅30 fsと45 fs、ピーク強度 8.9×10^{11} W/cm^2 と 2.0×10^{13} W/cm^2 の $\sin^2$ パルスであるとする。多配置時間依存ハートリーフォック法による計算で求めた光電子角度分布が相対位相 δ によってどのように変化するかを Fig. 1 に示す。この図から分かるように、ラビ振動によって $|\alpha\rangle$ と $|\beta\rangle$ 光電子間にコヒーレンスが生まれ、ω パルスと 2ω パルスの相対位相 ϕ を通した PAD のコヒーレント制御が可能になる [5]。

参考文献

[1] E. Allaria, R. Appio, L. Badano, W.A. Barletta, *et al.*, Nat. Photonics **6**, 699 (2012)
[2] C. Callegari, A.N. Grum-Grzhimailo, K.L. Ishikawa, K.C. Prince, G. Sansone, and K. Ueda, Phys. Rep. **904**, 1 (2021)
[3] K.L. Ishikawa, K.C. Prince, and K. Ueda, J. Phys. Chem. A **127**, 10638 (2023)
[4] 石川顕一, K.C. Prince, 上田潔, 2024 年応用物理学会春季学術講演会
[5] B.-R. Shen, *et al.*, Phys. Rev. A, in press

© 2025年 応用物理学会

多電子ダイナミクスのための量子部分空間法の開発

Quantum subspace methods for multielectron dynamics

東大院工 [1], IBM Quantum[2] ○佐藤 健 [1], 川島雪生 [2], Mario Motta[2], Haifeng Lang[1], 古川 直樹 [1], 石川顕一 [1], Tanvi Gujarati[2], Antonio Mezzacapo[2]

UTokyo[1], IBM Quantum [2], ○Takeshi Sato[1], Yukio Kawashima[2], Mario Motta[2], Haifeng Lang[1], Naoki Furukawa[1], Kenichi L. Ishikawa[1], Tanvi Gujarati[2], Antonio Mezzacapo[2]

E-mail: sato@atto.t.u-tokyo.ac.jp

私達は高強度レーザー場中の多電子ダイナミクスを記述するため、時間依存自己無撞着場法や時間依存結合クラスター法に基づく計算手法を開発してきた [1]。これらの手法は高強度レーザー場中の原子・分子の複雑な励起・イオン化過程を記述できる強力な計算手法だが、これまでの古典コンピュータ上の実装では、計算コストが粒子数に対して指数関数的に増大するという組合せ爆発の問題から完全には免れられない。そこで私達は、量子多体問題を原理的には多項式計算コストで解くことができる、量子コンピュータを用いた多電子ダイナミクスの第一原理シミュレーションにも取り組んできた。特に、変分量子回路に埋め込まれたパラメータを時間発展させる Variational Quantum Solver (VQS)[2]を拡張し、多体波動関数を展開するための一電子軌道関数と量子回路パラメータを同時に時間発展させる最適化 VQS（OVQS）を開発してきた[3−5]。OVQS は時間に依存する軌道関数を用いるため高励起やイオイ化も記述でき、時間依存変分原理に基づくためゲージ普遍性やエーレンフェストの定理を満たす。波動関数の情報を（古典コンピュータ上に）保存でき、比較的浅い量子回路で定式化できるため NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum) デバイスでも動作するという特長がある。しかし、統計精度の確保に必要な期待値サンプリングに高いコストを要し、量子ビット数の増大に伴う勾配消失問題が深刻視されている。本研究では、勾配消失問題を回避できるため近年注目されている、量子部分空間法[6]を応用した多電子ダイナミクスシミュレーション手法の開発について報告する。

[1]. T. Sato, et al., Can. J. Chem., **101**, 698 (2023).

[2]. X. Yuan et al, Quantum **3**, 192 (2019).

[3] 魏博紀 他, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 23p-C206-3 (2022).

[4] 魏博紀 他, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 23a-B204-3 (2023).

[5] 佐藤健, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-A25-6 (2024).

[6] M. Motta et al., Electron. Struct. 6, 013001 (2024).

© 2025年 応用物理学会

First principles calculation of the 3D real-space current distribution in graphene driven by strong laser fields

Univ. Tokyo[1], QST[2], ◦Siyuan Li[1], Mizuki Tani[1,2], Arqum Hashmi[1], Kenichi L. Ishikawa[1]

E-mail: li-siyuan@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Complex dynamics of graphene electrons under strong laser fields have been explained by the unique Dirac cone structure in reciprocal space. However, the interpretation in real space still requires further in-depth investigation. In this research, by using time-dependent density functional theory with SALMON package [1], we reproduce the experimental modulation and reversal of the residual current reported previously [2][3], support the prediction by Morimoto *et al.* [4] and further show its 3D distribution. In Fig. 1, we show the current distribution under the peak field amplitude of 3.5 V/nm where the total current is almost reversed. From the in-plane perspective, our results are consistent with the two-dimensional model, in which oppositely atomic currents emerge and cancel each other at carbon nuclei. As for the out-of-plane distribution, weak positive net current is observed slightly above and below the graphene basal (XY) plane rather than within it. This work underscores the significance of three-dimensional real-space current distribution in understanding the complex nonlinear dynamics of graphene under strong laser fields.

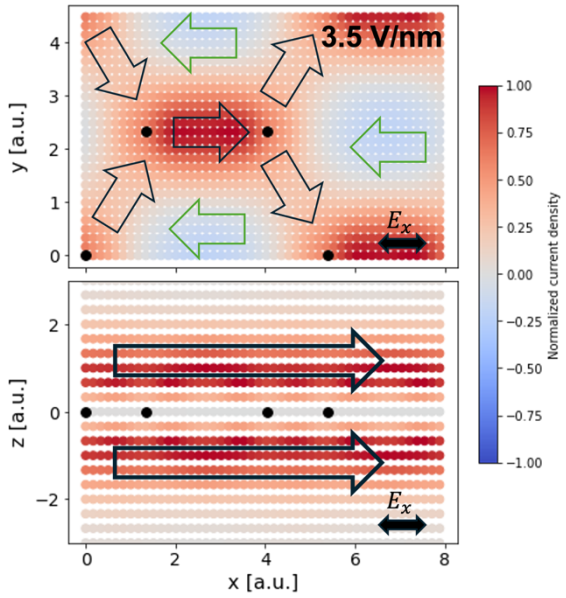


Figure 1 Residual current density distribution projected on X-Y plane (upper) and X-Z plane (lower). Arrows represent the current direction. Black circles show the position of carbon nuclei. Values are normalized.

[1] Noda M *et al.* 2019 *Comput. Phys. Commun.* **235** 356

[2] Higuchi T *et al.* 2017 *Nature* **550** 224

[3] Weitz T *et al.* 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 206901

[4] Morimoto Y *et al.* 2022 *New J. Phys.* **24** 033051

© 2025年 応用物理学会

第一原理計算による TiO_2 誘電体薄膜ミラーの高強度レーザー反射シミュレーション

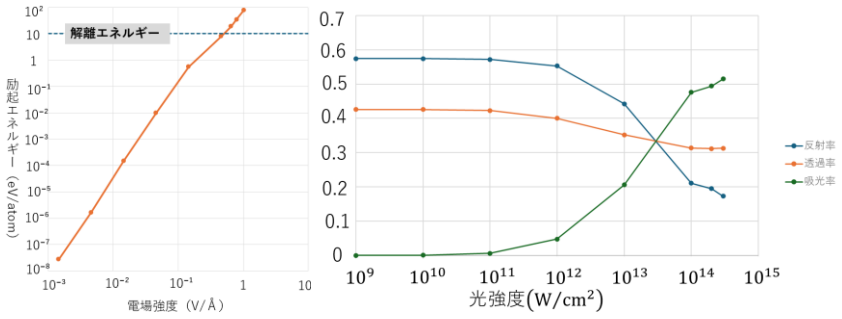
Frist-Principles Simulation of High-Intensity Laser Reflection from TiO_2 Dielectic Thin Films

神戸大工[1]、大阪産業技術研[2]、大阪大レーザー研[3]
島岡　幸生[1]、近藤　裕佑[2]　柴田　一範[3]　植本　光治[1]
Kobe Univ.[1], ORIST[2], ILE, Osaka Univ.[3]
Koya Shimaoka[1], Yusuke Kondo[2], Kazunori Shibata[3], Mitsuharu Uemoto[1]
E-mail: 259t227t@stu.kobe-u.ac.jp

高強度レーザーは医療、材料加工、核融合研究など多岐にわたる分野で活用される。過去20年間の技術革新により利用可能なレーザーの最大強度は急速な成長を果たしている。高強度レーザー実験施設では強い衝撃に耐えうる光学部品の要求が高まっており、高強度の光に耐えうる多層膜ミラーを設計・実現することは重要課題となっている[1]。

そこで、本研究では、第一原理の時間依存密度汎関数理論(TDDFT) による電子ダイナミクス計算[2]を用いて、誘電体材料の励起エネルギーがレーザーの強度にどのように依存するかを解析した。多層膜ミラーの高屈折率材料に用いられることが多い二酸化チタン(TiO_2) の結晶を計算対象とし、1.0×10^{9} (W/cm^2)から 3.0×10^{14}(W/cm^2)の 12(fs) のパルスによる励起を行ったところ、1.0×10^{13}(W/cm^2) 程度で物質系の励起エネルギーが解離エネルギー(9.03 (eV/atom)) に達し(図(a))、この領域で破壊的な損傷が生じることを予測した。

(a)　　(b)



図：(a) 励起エネルギーの電場強度依存性
(b) 反射率・透過率・吸光率の強度依存性

さらに、マルチスケール Maxwell-TDDFT 法により光伝搬シミュレーションを行い、薄膜による反射率・透過率を計算したところ、光反射率が 1.0×10^{14}(W/cm^2) 程度で急速に減少すると同時に、多光子過程により吸収率が大幅に増大する様子(図(b))が確認された。本講演では、偏光方向や結晶多型による応答特性についても報告する予定である。今回の試みは第一原理計算を用いた多層膜ミラー設計手法の確立に向けた第一歩となると期待される。

[1] T. A. Laurence, D. A. Alessi *et al.* J. Appl. Phys, 128, 071101 (2020)
[2] A. Yamada, K. Yabana, Phys. Rev.B. 109, 245130 (2024)

© 2025年 応用物理学会

アモルファス Si における高次高調波発生の第一原理計算

Ab-initio calculations of high-harmonic generation in amorphous Si

東大院工 [1], QST 関西研 [2] ○(D1) 具志堅英雄 [1], 乙部智仁 [1,2], 加藤洋生 [1], Arqum Hashmi[1], 谷水城 [1,2], 山田俊介 [2], 石川顕一 [1]
The Univ. of Tokyo[1], KPSI[2] ○Eiyu Gushiken[1], Tomohito Otobe[1,2], Hiroki Katow[1], Arqum Hashmi[1], Mizuki Tani[1,2], Shunsuke Yamada[2],Kenishi L. Ishikawa[1]
E-mail: gushiken-eiyu20003@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

高次高調波発生 (HHG) は、気相から結晶固体 [1] へと研究対象が広がり、近年では液相 [2] やアモルファス [3] といった、より複雑な凝集系における非線形・超高速現象の解明手段として注目を集めている。我々はこれまで、c-Si 中の点欠陥が HHG 特性に与える影響を報告してきた [4]。本研究ではより強い構造乱れを持つアモルファス Si(a-Si) を対象とし、構造の非周期性が HHG の基本過程である電子ダイナミクスに与える影響を、第一原理計算に基づき解明することを目的とする。

オープンソース計算プログラム SALMON [5] を用い、時間依存密度汎関数理論 (TDDFT) に基づきスーパーコンピュータ「富岳」上で計算を行った。a-Si の構造は、機械学習原子間ポテンシャルによる分子動力学法で再現された原子配置 [6] を元に、512 原子を含むスーパーセルを構築した。パルス幅 14.4 fs、波長 3000 nm、ピーク強度 10^{12} W/cm^2 のパルスを c-Si および a-Si に照射した際の HHG スペクトルを図 1に示す。a-Si の HHG 強度は c-Si と比較して数桁低く、これはアモルファス化による構造乱れ (周期ポテンシャルの乱れ) が電子のコヒーレンス時間を短縮するからと考えられる。また、c-Si のバンドギャップ E_g から第一カットオフエネルギー $\Delta\varepsilon(A_{peak})$ までの領域で、両者のスペクトルは比較的類似した傾向を示す。これはこの領域の HHG が局所的な Si-Si 結合の非線形分極に強く依存しており、a-Si の短距離秩序が c-Si と類似していることを示唆している。一方で、c-Si では $\Delta\varepsilon(A_{peak})$ 付近に明瞭な強度の落ち込みがあるのに対し、a-Si ではなだらかに減衰する。これらの傾向は、HHG スペクトルの形状が構造的無秩序の程度に依存することを示唆した以前のモデリング研究 [7] と一致しており、HHG がアモルファス物質の超高速電子ダイナミクスや局在状態を解明する新たな分光プローブとなる可能性を示している。

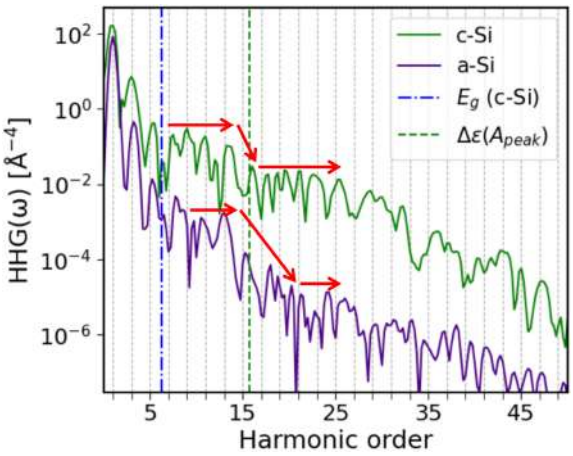


図 1: c-Si と a-Si の HHG スペクトル

参考文献

[1] S Ghimire *et al.*, Nature Physics **7**, 138 (2011).
[2] A Mondal *et al.*, Optics Express **31**, 34348 (2023).
[3] Y You *et al.*, Nature Communications **8**, 724 (2017).
[4] T Otobe and E Gushiken, Physical Review Applied **22**, 064096 (2024).
[5] M Noda *et al.*, Computer Physics Communications **235**, 356 (2019).
[6] Volker L. Deringer *et al.*, The Journal of Physical Chemistry Letters **9**, 2879 (2018).
[7] K Chinzei and T N. Ikeda, Physical Review Research **2**, 013033 (2020).

© 2025年 応用物理学会

時間分解第二高調波発生を用いたコヒーレントフォノン制御下における二次元層状物質 WTe_2 の構造ダイナミクス

Structural dynamics in a two-dimensional layered material WTe_2 by controlling coherent phonons using time-resolved second-harmonic generation

筑波大院数理[1]，沖縄科技大[2]，○(M2)明井 水希[1]，福田 拓未[2]，
(D)水越 優[1]，菊池 和弘[1]，長谷 宗明[1]
Univ. of Tsukuba[1], OIST[2], ○(M2) Mizuki Akei[1], Takumi Fukuda[2],
(D) Yu Mizukoshi[1], Kazuhiro Kikuchi[1], Muneaki Hase[1]
E-mail: s2420263@u.tsukuba.ac.jp

光を照射することにより、結晶構造などの物質のマクロな性質が変化する現象は光誘起相転移と呼ばれ、フェムト秒領域で駆動する光デバイスへの応用や物性制御の観点から近年盛んに研究が行われている[1]。特に二次元層状物質である WTe_2 は、結晶構造の空間反転対称性の無いワイル半金属 T_d 相から空間反転対称性の有る半金属 1T'相へ、層間の剪断変位を伴う構造相転移を示すことから、光励起下における構造ダイナミクスの研究が注目されている。これまでの研究から、原子層を剪断する方向にコヒーレントに駆動するシアーフォノンが、T_d-1T'相間の相転移に関与している可能性が示唆されている[2-4]。しかしながら、高密度電子励起条件下(>1 mJ/cm^2)において光誘起構造相転移の駆動原理は十分に理解されていない。そこで本研究は、高密度な電子励起条件下において、電子励起やシアーフォノンが WTe_2 の光誘起構造相転移に果たす役割を明らかにすることを目的に実験を行った。

本実験では、室温環境下の T_d-WTe_2 バルク単結晶に対し、ダブルパルス励起と時間分解第二高調波発生(TR-SHG)を組み合わせた測定を行った。この手法は、ダブルパルス励起によってシアーフォノン振幅の増強・消去を行い、TR-SHG によって結晶構造の空間反転対称性の有無をプローブする。シアーフォノン振幅の増強・消去の場合を比較することで、光誘起構造相転移における電子励起とシアーフォノンの寄与を分けて評価した。光源として再生増幅器(中心波長 800 nm、パルス幅~40 fs、繰り返し周波数 100 kHz)を用い、光パラメトリック増幅器によってプローブ光の波長を 1230 nm に変換し、発生した波長 615 nm の SHG を時間分解計測した。波長 800 nm のポンプ光は、マイケルソン干渉系によってダブルパルスの時間間隔 Δt をシアーフォノン周期 T の整数倍または半整数倍にした。Fig. 1 に示すように、シアーフォノンの有無によらず、SHG 強度が減少し、光励起によって結晶構造の空間反転対称性が変化していることが明らかになった。この結果は、光誘起構造相転移の駆動力がシアーフォノンではなく、電子励起であることを示唆している。

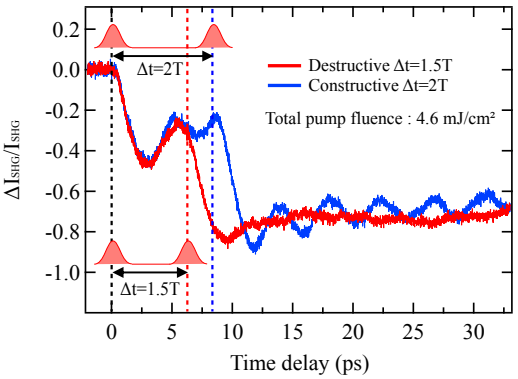


Fig. 1 Time-domain SHG signals of T_d-WTe_2 obtained for the double-pulse excitation at a total fluence of 4.6 mJ/cm^2. The blue and red lines show the constructive (Δt=2T) and destructive (Δt=1.5T) excitation of shear phonon by the double-pulse, respectively.

[1] S. Koshihara, *et al*., *Phys. Rep*. **942**, 1-61 (2022).
[2] E. J. Sie, *et al*., *Nature* **565**, 61-66 (2019).
[3] P. Hein, *et al*., *Nat. Commun.* **11**, 2613 (2020).
[4] M. X. Guan, *et al*., *Nat. Commun.* **12**, 1885 (2021).

© 2025年 応用物理学会

Soft X-ray Reflectivity Studies Using a Laser-based High-Harmonic Light Source

QST KPSI [1], Univ. of Hyogo [2], Science Tokyo [3], ◦Hung-Wei Sun[1], Ryunosuke Takahashi[2], Nobuhisa Ishii[1], Momoko Maruyama[1], Kohei Yoshimatsu[3], Hiroki Wadachi[2], Ryuji Itakura[1]

E-mail: sun.hungwei@qst.go.jp

X-ray spectroscopies that involve core-level electron excitation have emerged as powerful techniques for probing electronic and lattice structures. Unlike most soft X-ray transmission measurements, which require ultrathin samples with thicknesses typically below a few hundred nanometers to allow sufficient photon transmission to the detector, soft X-ray reflectometry can be applied to single crystals, polycrystalline specimens, and amorphous materials. This approach enables detailed analysis of near-surface structures and interfacial phenomena without direct contact or damage to the sample.

We present reflection measurements performed with a compact soft X-ray light source based on high-order harmonic generation, driven by an intense optical parametric chirped pulse amplifier operating at a central wavelength of 2000 nm and a repetition rate of 5 kHz. The generated broadband coherent spectrum, extending beyond the L-edge of chromium at 575 eV, allows for simultaneous observation of multiple spectral features in the soft X-ray region. Figure 1 shows the soft X-ray reflection spectra for λ-Ti_3O_5 [1], $SrTiO_3$, and copper, recorded at a glancing incidence angle of 2 degrees. Using the copper spectrum as a reference, distinct features associated with the titanium L-edge are observed in both λ-Ti_3O_5 and $SrTiO_3$. In contrast, features associated with the oxygen K-edge are unclear in these static measurements, as most oxygen atoms contribute primarily to the valence band. However, time-resolved measurements are expected to reveal changes at both the titanium L-edge and oxygen K-edge.

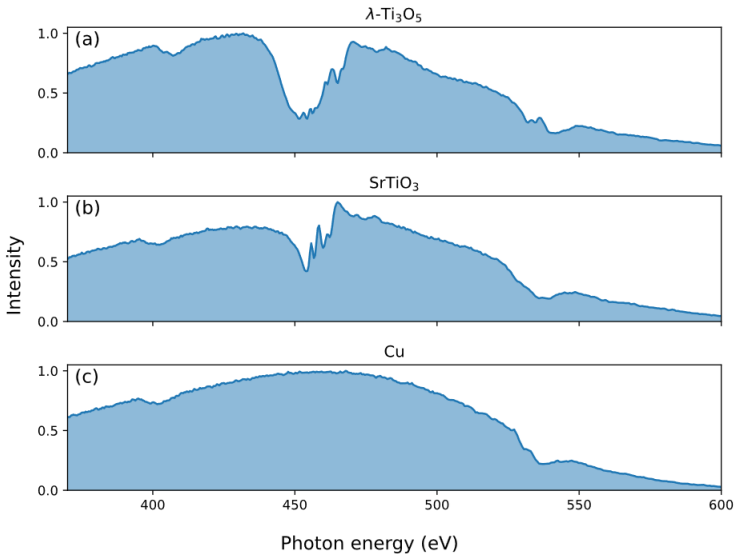


Figure 1. The soft X-ray spectrum obtained in a reflection geometry with (a) λ-Ti_3O_5, (b) $SrTiO_3$, and (c) copper, respectively, at a glancing angle of 2 degrees

Reference: [1] K. Yoshimatsu, et al. Phys. Rev. Materials **8**, 035002 (2024)

© 2025年 応用物理学会

空間分割ミラーによるダブルアト秒パルス発生を用いた過渡複素屈折分光

Complex refraction spectroscopy with double attosecond pulses using a beam splitting mirror

NTT 物性基礎研 [1],横浜国立大学 [2], 国立清華大学 [3], 芝浦工業大学 [4], ○大島彬広 [1,2], 増子拓紀 [1], Ming-Chang Chen [3], 片山郁文 [2], 武田淳 [4], 小栗克弥 [1]

NTT Basic Research Labs. [1], Yokohama National Univ. [2], National Tsing Hua Univ. [3], Shibaura Inst. of Technology[4]

○Akihiro Oshima[1,2], Hiroki Mashiko[1], Ming-Chang Chen[3],

Ikufumi Katayama[2], Jun Takeda[2], and Katsuya Oguri[1]

E-mail: katsuya.oguri@ntt.com

近年、高い時間分解能を持つ単一アト秒パルス(IAP）と近赤外光（NIR)による励起を組み合わせた時間分解 XUV 分光法によって、原子・分子・固体における電子運動のダイナミクスが明らかにされてきた [1,2]。一方で、電子励起に伴う強度変化に加えて、誘起分極の位相を計測することは、XUV 領域の複素屈折率のダイナミクスを明らかにするうえで重要な知見となるが、これまでの報告は少ない。そこで本研究では、ダブルアト秒パルス(DAPs)におけるスペクトル干渉を利用した過渡複素屈折分光系を構築し、アルゴンの自動電離過程における過渡複素応答を計測した。

実験では二重光学ゲート法を用いて IAP を発生させ、ピエゾ電気変換器を備えた反射ビームスプリッターミラー（BSM）を用いて時間遅延をつけた DAPs に分割した。NIR のパルスは DAPs と同軸にターゲットのアルゴンガスに集光した。透過した DAPs は、Mo/Si 多層膜球面ミラーにより拡大投影され、極端紫外分光器によりスペクトル分解することで図 1.(a)に示すような干渉波形を得た。この干渉波形をフーリエ変換し、干渉に起因する周期のみを取り出した上で、逆フーリエ変換することで、NIR 光照射の有無による干渉パターンの変化を抽出できる。図 1.(b)はスペクトル干渉波形から得られた相対強度の過渡変化を示し、図 1.(c)は相対位相の過渡変化を示している。これらの過渡応答波形を解析することにより、DAPs と NIR によって励起されたアルゴン原子における複素屈折率の時間変化を得ることができる。本手法は、XUV 励起に伴う複素屈折率の過渡変化計測の新しい分光手法として、光と物質の相互作用の研究に活用することができる。

本研究は、科研費 19H02637、20H02703、20H05670 の助成を受けて行われた。

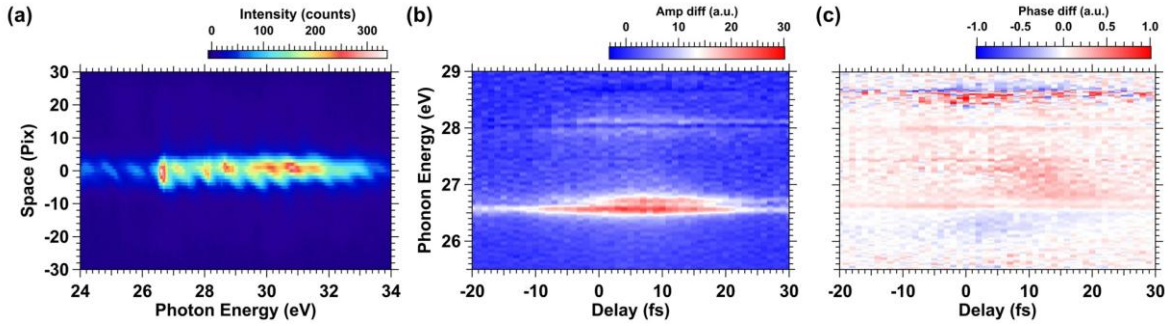


Fig.1 Measurement results of transient complex refraction spectroscopy using DAPs. (a)Spectral interference waveforms obtained by DAPs (b)Transient relative intensity changes in the autoionization of Argon (c) Transient relative phase changes.

[1] R. Borrego-Varillas et al., *Rep. Prog. Phys.* **85**, 066401 (2022).

[2] H. Mashiko et al., Nat. Phys. **12**, 741 (2016).

© 2025年 応用物理学会

時間分解ポンププローブ分光による Bi 系銅酸化物の層数依存準粒子ダイナミクス

Ultrafast pump–probe study of Bi-based cuprates with varying CuO_2 layers

北大工 [1]，産総研 [2],北大理 [3]

○清水 大成 [1]，石田 茂之 [2]，永崎 洋 [2]，黒澤 徹 [1]，小田 研 [3]，土屋 聡 [1]，戸田 泰則 [1]

Dept. of Appl. Phys. Hokkaido Univ.[1], AIST[2], Dept. of Phys. Hokkaido Univ.[3]

○T. Shimizu[1], S. Ishida[2], H. Eisaki[2], T. Kurosawa[1], M. Oda[3], S. Tsuchiya[1], Y. Toda[1]

E-mail: shimizu.taisei.v0@elms.hokudai.ac.jp

銅酸化物超伝導体は現在発見されている超伝導体の中では常圧で最も高い転移温度(T_c)をもち、その高い T_c の発現メカニズムは多角的に研究されている。可視域の超短パルス光を使った非熱的準粒子励起では超伝導及び擬ギャップに起因する準粒子応答が観測され、時間領域の物性探索手法として利用されてきた。本研究では超伝導層 CuO_2 の層数 n が異なる 3 種類の最適ドープ Bi 系銅酸化物超伝導体 Bi2201(n=1, T_c=34 K), Bi2212(n=2, T_c=92 K), Bi2223(n=3,T_c=110 K)について光誘起準粒子応答を測定し、その特徴を明らかにする。特に T_c 付近に現れる、Bi2223 の特異な準粒子応答について報告する。

時間分解ポンププローブ分光(パルス幅 ~120 fs、繰り返し周波数 270 kHz)ではポンプパルス(3.1 eV)により準粒子を励起し、その電子状態変化をプローブパルス(1.55 eV)の過渡反射率変化 $\Delta R/R$ として観測する。Fig.1 の内挿図に T = 20 K(< T_c)で観測された Bi2223 試料の過渡応答を代表例として示した。ポンプフルーエンスは 3.4μJ/cm^2 に設定され、この励起条件は超伝導ギャップを構成する一部のクーパー対を励起させる弱励起に相当し、$\Delta R/R$ にはギャップ間緩和が反映される。3 種類の Bi 系銅酸化物超伝導体に観られる過渡反射率応答振幅 A_{SC} の温度依存性を Fig.1 に示す。比較のため、縦軸は最低温度での A_{SC} の値で、横軸は磁化率測定から得られた T_c の値でそれぞれ規格化した。層数 n による過渡応答の違いは T_c 近傍に現れており、n=3 の Bi2223 試料でのみ顕著なピーク構造が現れる。また Bi2201 および Bi2212 試料では BCS 的な超伝導ギャップの温度依存性を仮定した解析モデルにより実験結果がよく再現されるのに対し、Bi2223 試料では明らかに異なる振る舞いを示す。さらに、ポンプフルーエンス依存性の測定により、このピーク構造が弱励起条件下でのみ支配的であることが確認された。また 3 パルス型ポンププローブ分光実験では、この成分が超伝導応答とは独立に現れる回復過程として観測される。以上の結果から、Bi2223 における特異な準粒子応答は超伝導とは異なる電子相関あるいは多層構造特有のダイナミクスに起因する可能性が示唆される。

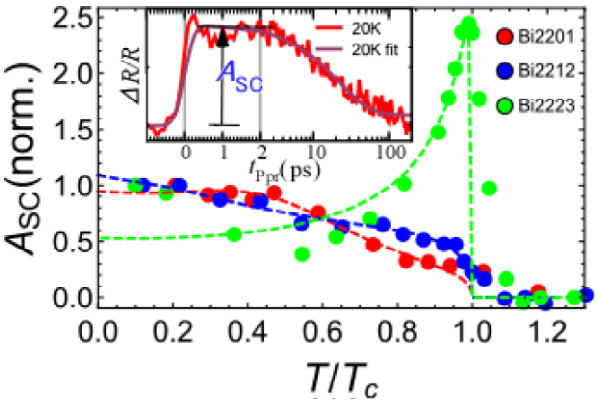


Fig.1 : Temperature dependence of the SC amplitudes A_{SC}. The inset shows $\Delta R/R$ at 20K as a function of delay time t_{Ppr}.

時間分解分光による高温超伝導体準粒子応答の空間マッピング

Spatial mapping of photoinduced QP dynamics in Bi2201 using time-resolved spectroscopy

北大工[1]，北大理[2]

深澤 幸紹[1]，清水 大成[1]，黒澤 徹[1]，小田 研[2]，土屋 聡[1]，山根 啓作[1]，森田 隆二[1]，○戸田 泰則[1]

Dept. of Appl. Phys. Hokkaido Univ.[1], Dept. of Phys. Hokkaido Univ.[2]

Y. Fukasawa, T. Shimizu[1], T. Kurosawa[1], M. Oda[2], S. Tsuchiya[1], K. Yamane[1], R. Morita[1], ○Y. Toda[1]

E-mail: toda@eng.hokudai.ac.jp

超伝導相転移温度（T_c）を超えて存在する擬ギャップは銅酸化物高温超伝導体の特徴的な電子状態であり、超伝導との関係解明は超伝導相転移機構の理解及び T_c のさらなる向上に直結する重要な課題である。本研究では、可視光領域の超短パルスを用いたポンププローブ時間分解分光法により、代表的な銅酸化物高温超伝導体である最適ドープ $Bi_2Sr_{1.7}La_{0.3}CuO_{6+\delta}$ (Bi2201, T_c~34 K)における光誘起準粒子応答の空間分布を調査した。ミクロンオーダーの空間スケールで観測される応答変化から、超伝導および擬ギャップ状態の光誘起相破壊（飽和）しきい値の相関関係を明らかにした。

測定には $Ti:Al_2O_3$ レーザーを光源とするプローブパルス(パルス幅 120fs、繰り返し周波数 270kHz、λ_{pr}=800 nm)と、その第二高調波(λ_P=400 nm)をポンプパルスとするポンププローブ分光を用いた。単結晶試料は He フロークライオスタット中に設置され、モーター駆動ステージにより位置制御される。同軸に重ね合わされたポンプとプローブパルス光を対物レンズで集光し、試料に照射する（図 a)。準粒子応答は過渡反射率変化$\Delta R/R$ として検出され、空間分解能約 5μm の測定を実現している。

超伝導物質で観測されるΔR は、通常、光誘起準粒子密度と線形関係にある弱励起条件と、超伝導相や擬ギャップ相の光誘起相破壊により飽和応答が現れる強励起条件で特徴づけられる（図 b)。内挿図に各条件で観測された超伝導準粒子応答の空間分布（50×50 μm^2）を示す。弱励起条件下の場所依存性は小さいが、強励起条件下の超伝導応答には飽和を反映した特徴的な空間分布が現れる。飽和応答は光の浸透深さを考慮したモデルにより相破壊しきい値として定量化され、この値は T_c および擬ギャップエネルギー（Δ_{PG}）を反映する。この関係性をもとに、強励起条件下のΔR の空間分布が相破壊しきい値の場所依存性に起因することを明らかにする。さらに超伝導応答の相破壊しきい値の空間分布は擬ギャップ応答のしきい値分布と相関し、両者に協調的な関係が存在することを示す。

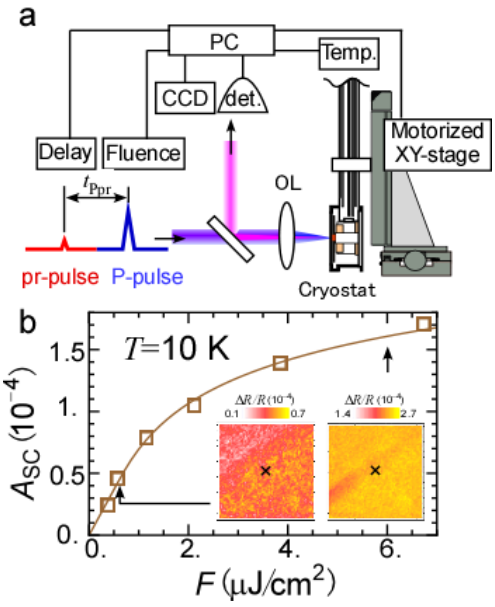


Fig1. a: Experimental setup. b: Fluence dependence of $\Delta R/R$ amplitudes (A_{SC}) on a typical position (x) at T=10 K. Insets show 2D imaging of $\Delta R/R$ at T=10 K and t_{Ppr}=3.0 ps, with pump fluences of (left) F=0.6 μJ and (right) 6.0 μJ.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation：3.5 Ultrashort-pulse and high-intensity lasers

[9p-P02-1~5] 3.5 Ultrashort-pulse and high-intensity lasers

[9p-P02-1]

A Transient Absorption Method for Observing Long-Lived Photoexcited States

○(M2)Mitsuki Yuge[1], Kazuhiro Ema[1], Hideyuki Kunugita[1] (1.Sophia Univ.)

[9p-P02-2]

Extraction of narrowband spectra buried in a broadband noise with a phase shifter.

○Yoshimi Kimura[1], Takayuki Suzuki[1], Haruka Tanji[2] (1.Meiji Univ., 2.ILS at Univ. of Electro-Comms.)

[9p-P02-3]

Cumulative effect on extreme ultraviolet high harmonics generated by high repetition rate Yb-based amplifier

○(M1)Hotaka Yamada[1,2], Kohei Nagai[2], Takuya Okamoto[2], Yasushi Shinohara[2], Haruki Sanada[2], Ikufumi Katayama[1], Jun Takeda[3], Katsuya Oguri[2] (1.Yokohama Natl. Univ., 2.NTT-BRL, 3.Shibaura Inst. of Tech.)

[9p-P02-4]

Sensitivity improvement of dual-comb spectroscopy using spectral peaking (II).

○KYOSUKE KATO[1], SYOTARO KITAJIMA[1], RYOHEI TERABAYASHI[1], HIDEO TOMITA[1], HISASHI ABE[2], NORIHIKO NISHIZAWA[1] (1.Nagoya Univ., 2.Sanso Inst.)

[9p-P02-5]

Ganeration of Raman Soliton Frequency Combs for Methane Spectroscopy

○Taichi Tanaka[1], Naoki Takeshi[1], Takumi Takahoshi[1], Hisanari Takahashi[2], Toshiyuki Kawashima[2], Yoshiaki Nakajima[1] (1.Toho Univ., 2.Hamamatsu Photonics K.K.)

長寿命光励起状態観測のための過渡吸収測定法の開発

A Transient Absorption Method for Observing Long-Lived Photoexcited States

上智大理工[1]　,○(M2)弓削　光伎[1]，江馬　一弘[1]，欅田　英之[1]

Sophia Univ.[1],　°Mitsuki Yuge[1], Kazuhiro Ema[1] , Hideyuki kunugita[1]

E-mail: m-yuge-2c6@sophia.ac.jp

1.はじめに

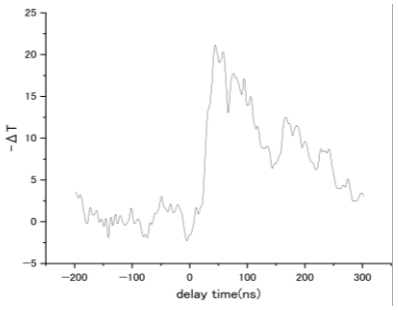
当研究室では過去に、フェムト秒パルスレーザーを光源とし、様々な物質で、ピコ秒からナノ秒の時間領域における光励起状態の観測を行ってきた。この方法では、単一のパルスを二つに分け、ポンプパルス、プローブパルスとして両者に光路差を変化させることで遅延時間をつけている。一方、光励起後ナノ秒以上の長時間の動的挙動はこのような光路差による遅延時間の制御では、観測が困難である。そこで本研究では、ポンプ光とプローブ光をそれぞれ独立した光源から発生させ、電気的なタイミング制御によって遅延時間を制御する新たな測定手法の構築を目指した。

2.実験方法

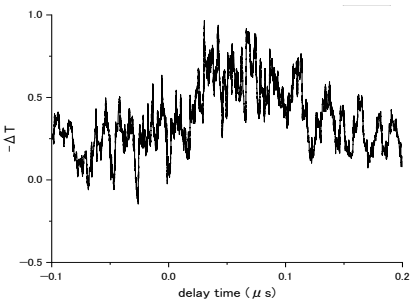
本研究では、フェムト秒チタンサファイア再生増幅器の第三次高調波(266nm)をポンプパルスとして使用した。一方、プローブ光源にはスーパーコンティニューム光源を用いた。さらに比較のために、CW 半導体レーザーをプローブ光源として用いた、レーザーフラッシュフォトリシス測定を行った。試料としてはフェロシアン化カリウム（$K_4[Fe(CN)_6]・3H_2O$）水溶液を用いた。
プローブ光源が受動 Q スイッチを用いているため、パルスの出射タイミングに揺らぎが生じ、厳密な時間制御は困難であった。そこで、本研究では、各パルスごとに信号波形を記録し、各パルスにおける実際の遅延時間および対応するプローブ信号強度を抽出する手法を採用した。この記録を積算・整理することで、減衰プロファイルを得た。

3.実験結果

下図に示すように、レーザーフラッシュフォトリシス測定（左）と、今回開発した手法（右）で同様の減衰時間をもつ過渡吸収が得られた。このことから本手法が長寿命キャリアの観測であると考えられる。詳しい考察については当日発表する。



Transient Absorption Decay by Laser Flash Photolysis



Transient Absorption Measured by the Method Developed in This Study

[1] 土田直樹　他　第８４回応用物理学会秋季学術講演会

© 2025年 応用物理学会

広帯域位相シフタを用いたノイズに埋もれた狭帯域スペクトルの抽出

Extraction of narrowband spectra buried in a broadband noise with a phase shifter.

明大理工 [1]，電通大レーザー研 [2] ○(M1)木村 嘉 [1]，丹治 はるか [2]，鈴木 隆行 [1]

Meiji Univ. [1], ILS at Univ. of Electro-Comms. [2], ○Yoshimi Kimura[1], Haruka Tanji-Suzuki[2], Takayuki Suzuki[1]

E-mail: suzuki@meiji.ac.jp

1. 目的

コヒーレントアンチストークスラマン散乱(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering; CARS) 分光法は分子由来の振動モードを高感度に観測できる手法である。コヒーレントな広帯域光である超短パルスレーザー光を活用することによる、広いスペクトル領域を一括観測する Multiplex-CARS 分光法もその有用性が広く注目されている。しかし超短パルスレーザー光では、その尖頭出力の高さゆえに望まない非共鳴な非線形光学過程、いわゆる非共鳴背景光(Non-Resonant Background; NRB) も同時に生成されてしまう。このため、目的の狭帯域の振動スペクトルは、広帯域な NRB スペクトルに埋没してしまい、明瞭な観測が阻害されてしまう。我々はこれまでに入射する広帯域なレーザー光の周波数成分の一部を位相変調し、NRB と狭帯域スペクトル間の干渉スペクトルの変動成分を抽出することにより、広帯域の振動スペクトルを一括測定する手法を開拓してきた。これまで、狭帯域成分の位相変調には、光路長を微小変化させることにより行ってきた。しかしこの方法は 1 次分散の変調であり、広帯域なスペクトル成分すべてに対して適する均一な位相変調を与えておらず、信号検出強度が周波数ごとに異なってしまう。また、変調に用いるピエゾ素子のヒシテリシスの影響を高速に補正することや長時間稼働による変調量の較正なども容易ではなく、1 次分散ですらも理想的に与えることは難しい。そこで本研究では、波長板を用いた位相シフタに注目し、その有用性を数値計算から検証するとともに、疑似的に生成した広帯域光と狭帯域光に対して、波長板位相シフタを用いたスペクトル抽出機構を開発し実演することを目的とする。

2. 方法

ピエゾ素子を使用した遅延による位相変調では、空間距離を操作するので波長成分によって位相の変調量に差ができてしまう。一方、異なる材質を張り合わせて作られるアクロマティック波長板を用いれば、波長成分にとらわれず位相に遅延をかけられる。この点で波長板を使うことにメリットがある。まずは数値計算で 2 つのスペクトルの干渉をシミュレートすると Fig. 1 のようになった。Fig. 1(a)は干渉の元となる 2 つの波、(b)はピエゾ素子を仮定して、遅延時間を 0.3 ps ± 1.25 fs で変調し、異なる変調位相で 100 回測定した結果を用いて元の波を合成したグラフである。これに対し(c)は波長板を用いて、波長によらず 0～4π の位相を任意に与えて同様に 100 回測定した結果から、元の波形を合成したグラフである。

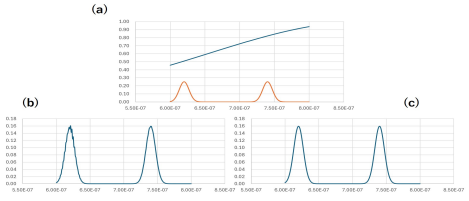


Fig. 1. Phase-modulated spectra in numerical simulations.

Fig. 1 に示すように、遅延由来の位相変調では、遅延に基づく干渉フリンジが消し切れていない一方、波長板を用いた場合には元のスペクトルをほぼ完全に再現できている。

計算結果を踏まえ、実際に波長板を用いた位相シフタを導入したデモ光学系を Fig,2 のように構成した。中心波長 805 nm、100 fs のパルスレーザーを光源として、その出力をハーフミラーで 2 つに分割する。片方はそのまま広帯域光とし、もう一方に 808 nm のショートパスフィルター(SPF)を用い狭帯域光とする。SPF を角度をつけて配置することによって 803 nm 辺りにピークをシフトさせる。この操作によって疑似的に異なる 2 つの波の重ね合わせを再現した。λ/4 板 2 枚とλ/2 板 1 枚で構築した幾何学的位相シフタを挿入する。これはλ/2 板を角度θ回転させることで 4θ位相に遅延をかけることができる。2 つの光が合流したところのスペクトル干渉を観測することで、幾何学的位相シフタの有効性が証明できる。

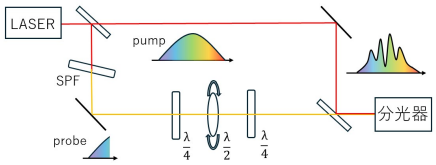


Fig. 2 Schematics of experimental setup.

3. 結果

現在得られているスペクトル波形を Fig. 3 に示す。光源及び広帯域光のスペクトルが(a)である。808 nm の SPF を用いて分割したスペクトルが(b)である。スペクトル中心は 804 nm 付近であり、広帯域光の中心からやや短波長よりである。(c)は 2 つのスペクトルの干渉波形の一例である。スペクトル干渉がしっかりと観測できており、光学系の 2 つの光路差が非常に小さいことが確認できる。また幾何学的位相シフタを使用することで干渉スペクトルが連動して変化することも確認済みである。連続回転マウントにλ/2 波長板をマウントして駆動すると、連続的かつなめらかに干渉スペクトルが変化する様子が確認できた。これを用いたスペクトル抽出の結果については講演にて紹介する。

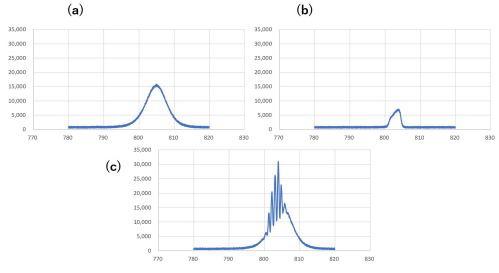


Fig. 3. Spectra with a waveplates phase shifter

© 2025年 応用物理学会

高出力 Yb レーザー励起高次高調波の高繰り返し発生における累積効果

Cumulative effect on extreme ultraviolet high harmonics generated by high repetition rate Yb-based amplifier

(M1)山田穂高[1,2]、永井恒平[2]、岡本拓也[2]、篠原康[2]、眞田治樹[2]、片山郁文[1]、武田淳[3]、小栗克弥[2]
(（1)横浜国立大学、(2)NTT 物性科学基礎研究所、(3)芝浦工業大学 SIT 総研)
Yokohama Natl. Univ.[1], NTT Basic Research Lab.[2], Shibaura Inst. of Tech.[3]
Hotaka Yamada[1,2], Kohei Nagai[2], Takuya Okamoto[2], Yasushi Shinohara[2]
Haruki Sanada[2], Ikufumi Katayama, Jun Takeda and Katsuya Oguri
E-mail: yamada-hotaka-td@ynu.jp

極端紫外線領域の光を発生することのできる高次高調波光源は、光電子分光、コヒーレント回折イメージングなどの用途において高い需要がある。近年の Yb 系結晶を用いたレーザー増幅器技術や光パラメトリックチャープパルス増幅器（OPCPA）技術の発達により、数百 kHz から MHz 級の繰り返し周波数を持つ高平均出力の高次高調波発生（HHG）が実現可能となってきた[1]。MHz 級での繰り返し周波数の増加に伴い HHG 効率が低下する累積効果はこれまで報告されてきたが [2]、それが HHG に与える直接的な影響について定量的に調べた研究はほとんど行われておらず、その起源については明らかになっていなかった。

本研究では、0.1 kHz から 100 kHz までに繰り返し周波数が可変な Yb 再生増幅レーザー器を用いて、HHG の繰り返し周波数依存性を調べた。500 μJ、パルス幅 500 fs の出力をマルチパスセルで 50 fs にまで圧縮し、真空チャンバー内の Ar ガスセルに集光した。集光には焦点距離が 175 mm のレンズを使用し、そのときの集光強度は 1.35×10^{14} W/cm^{2}と見積もられた。生成された高次高調波は、回折格子で波長分解し、マイクロチャンネルプレート（MCP）と蛍光板を用いて観測した。

図 1(a)は、33 次高調波の 1 パルスあたりの高調波強度を 0.1~100 kHz の範囲でプロットしたものである。1kHz 以上のとき、高調波強度が単調に減少している。特に 100 kHz では、40 kHz に比べて強度が約 0.57 倍にまで低下しており、この周波数領域で累積効果が顕著になることがわかる。累積効果に関して、高繰り返しのレーザー照射によって焦点領域でのガスが加熱され、局所的にガス密度が低下する現象が報告されている[3]。ガス密度の低下を計測した先行研究 [4] の結果を高調波強度の Ar ガス背圧依存性の結果(図 1 (b)）に照らし合わせると、強度の低下が繰り返し周波数の増加に伴うものとよく一致した。これらの知見は、今後高輝度な HHG 光源の実現に向けて重要な指針となる。

本研究の一部は、JSPS 科研費 20H05670 の助成を受けて行われたものである。

[1] T Witting et al., Optica **9**, 145 (2022); J Rothhardt *et al*., Opt. Express **24**, 18133 (2016)
[2] T Saule *et al*., APL Photonics **3**, 101301 (2018)
[3] Tie-Jun Wang et al., Adv. Photonics Res., **4**:2200338 (2023)
[4] R Löscher *et al*., *APL Photonics* **8**, 111303 (2023)

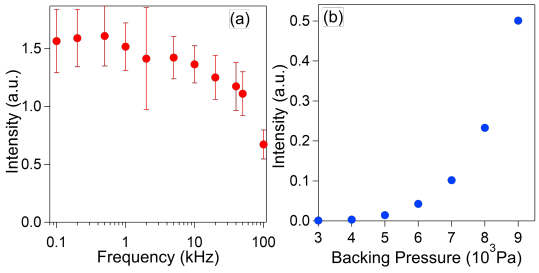


Fig. 1. Dependence of the 33rd harmonic intensity on repetition rate at backing pressure of 9×10^3 Pa (a) and on backing pressure at repetition rate of 40 kHz (b).

© 2025年 応用物理学会

スペクトルピーキングを用いたデュアルコム分光の高感度化（Ⅱ）

Sensitivity improvement of dual-comb spectroscopy using spectral peaking (Ⅱ).

名大院工[1], 産総研[2] ○加藤 杏祐[1], 北島 将太朗[1], 寺林 稜平[1], 富田 英生[1], 阿部 恒[2], 西澤 典彦[1]

Nagoya Univ.[1], AIST[2], ○K. Kato[1], S. Kitajima[1], R. Terabayashi[1], H. Tomita[1], H. Abe[2], and N. Nishizawa[1]

E-mail: kato.kyosuke.u8@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

デュアルコム分光とは、繰り返し周波数がわずかに異なる２つの光周波数コムを用いて、スペクトルを RF 領域でリアルタイムに観測することのできる分光法であり、高速・高分解能な高機能分光法として注目を集めている. しかし、微量物質の計測等においては更なる分光の高感度化が課題となっている. 分子ガスなどの狭帯域な吸収を受けた光パルスを光ファイバに導波させると，周期的に狭帯域なスペクトルのピークが生成されるスペクトルピーキング現象が現れる[1]. この現象を用いることでデュアルコム分光の高感度化が期待される. 本研究では、これまでに開発してきたデュアルコム分光システムを用いてスペクトルピークの観測と分光応用を試みた.

2. 実験・結果

今回の実験系を Fig. 1 に示す. 二台の光周波数コムは Figure-９型のファイバーレーザーをベースとして用いており、繰り返し周波数f_{rep}はそれぞれ約 50MHz、その差Δf_{rep}は 200Hz である. コム出力を 10m の PMF を通す ことで、1650nm 帯にソリトンパルスを 生成した. それぞれのコム出力は CH_4 ガスセルを備えた非線形ファイバループミラー(NOLM)に入射し, 対向伝搬する２つのパルスの干渉によって, 台座成分を抑圧したピーク成分のみを抽出した[2]. この二台のコムによるピーク同士を干渉させ、得られるインターフェログラムを高速フーリエ変換処理することで、RF 領域でスペクトルを観測した. RF 領域で観測されたスペクトルピークを Fig. 2(a)赤線に示す. デュアルコム分光によって、台座成分を抑圧したピークのみを高分解能且つ高 SBR で観測することができた. 青線では CH_4 の吸収によってピークの大部分が吸収されたスペクトルを観測した. Fig. 2(b)にはスペクトルピークを用いたコムモード分解スペクトルを示す。コムモードは 38dB と高い SNR を示し、高い安定性を示した. また CH_4 サンプルを通した場合のコムモードとの比較により 50dB 以上の高いダイナミックレンジを持つことを確認した.

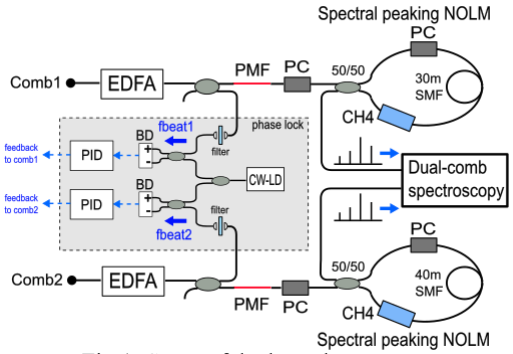


Fig.1: Setup of dual-comb spectroscopy using spectral peaking

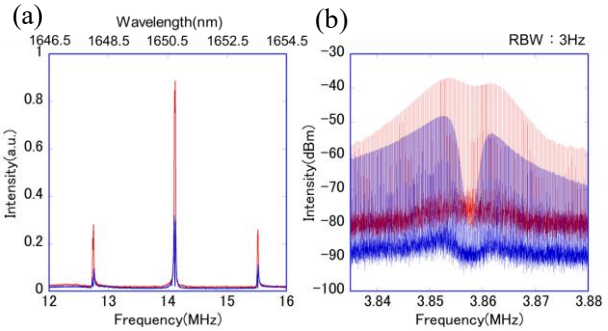


Fig.2: (a)Observed spectral peak w/o (red) and w/ CH_4 sample(blue), (b)Comb-mode resolved spectrum w/o (red) and w/CH_4 sample (blue)

本研究は，科研費基盤(A)および JST CREST(JPMJCR2104)の助成を受けて実施した.

[参考文献] 1) N. Nishizawa and M. Yamanaka, Optica **7**, 1089 (2020).
2) N. Nishizawa, J. Jung, and S. Kitajima, Opt.Lett. **48**, 4869 (2023).

© 2025年 応用物理学会

メタン分光のためのラマンソリトン光コムの発生

Generation of Raman Soliton Frequency Combs for Methane Spectroscopy

東邦大[1]，浜松ホトニクス株式会社[2]

○田中泰地[1]，武子尚生[1]，髙星拓海[1]，高橋 永斉[2]，川嶋 利幸[2]，中嶋善晶[1]

Toho Univ.[1], Hamamatsu Photonics K.K.[2]

○Taichi Tanaka[1], Naoki Takeshi[1], Takumi Takahoshi[1], Hisanari Takahashi[2], Toshiyuki Kawashima[2], Yoshiaki Nakajima[1]

E-mail: yoshiaki.nakajima@sci.toho-u.ac.jp

近年、ガス分子の高速・高分解能分光を可能とする光コム技術が注目を集めている。中でも、繰り返し周波数がわずかに異なる 2 つの光コムを用いるデュアルコム分光は、広帯域・高速・高分解能なスペクトル取得を可能とする手法として注目されている[1]。しかし、利得媒質の制限により、波長 1.65 μm 帯におけるメタン（CH_4）の $2\nu_3$ 振動モードの分光には、既存の近赤外光コムをそのまま利用することが難しいという課題がある。

本研究では、この課題を解決する手法として、ラマンソリトンの自己周波数シフト[2]に着目した。具体的には、東邦大学にて開発したデュアルコム分光システム[3]におけるレーザー出力を、Er 添加光ファイバ増幅器（EDFA）によって増幅した後、ラマンファイバに導入することでラマンソリトンを生成し、その波長を自己周波数シフトによりメタン吸収帯へと変換した。実験の結果、Fig. 1 に示すように、EDFA の出力を増加させることにより、ラマンソリトンが長波長側へと連続的にシフトし、最大で 1.7 μm 以上の波長まで到達することが確認された。本研究は NEDO の研究助成を受けた。

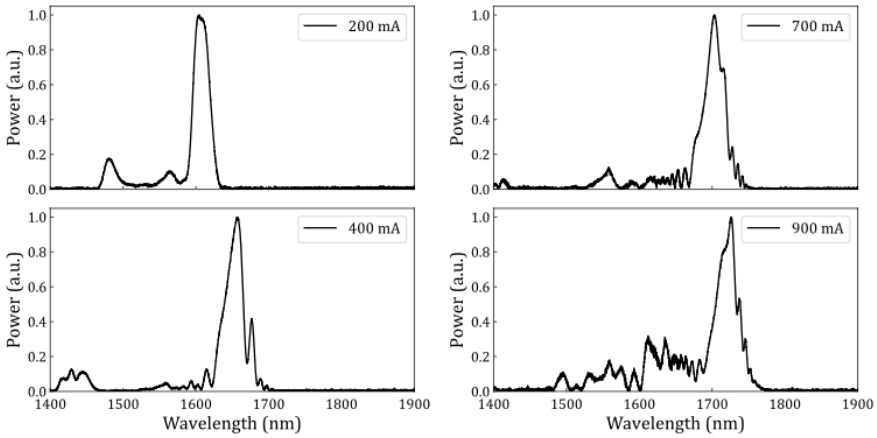


Fig.1　Spectral shift of Raman solitons as a function of EDFA driving current

[1]　I. Coddington, et al., Optica **3**, 414-426 (2016).

[2]　N. Nishizawa, et al., IEEE Photon. Technol. Lett. **11**, 325-327 (1999)

[3]　武子 尚生, 他, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-K304-2 (2025)

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.6 Laser processing

[7a-N221-1~10] 3.6 Laser processing

[7a-N221-1]

Impact of molecular structure on the fragmentation behavior of organic crystals

○Kota Abe[1], Tomosumi Kamimura[1,2], Teruki Sugiyama[3], Ryohei Yasukuni[1] (1.OIT., 2.ILE, Osaka Univ., 3.National Yang Ming Chiao Tung Univ.)

[7a-N221-2]

Pipe diameter dependence of Si spherical nanoparticles deposited by pulsed laser ablation method with pipe and gas flow

○Yutsuki Hanada[1], Tamao Aoki[1], Ikurou Umezu[1] (1.Konan Univ.)

[7a-N221-3]

Dependence of Graphite Synthesis by Local Laser-Heating on Alcohol Solvent Species

○Hideki Fujiwara[1], Masaya Kamo[1], Mizuki Matsuzaka[2], Kotaro Kashima[2], Hideo Kaiju[2,3], Kenji Hirai[4], Hiroshi Ujii[4] (1.Hokkai-Gakuen Univ., 2.Keio Univ., 3.CSRN Keio Univ., 4.RIES Hokkaido Univ.)

[7a-N221-4]

Impact of the adsorbed molecules on the optical properties of organic nanocrystals

○(M2)Naoto Masuda[1], Tomosumi Kamimura[1,2], Ryohei Yasukuni[1] (1.OIT, 2.ILE, Osaka Univ.)

[7a-N221-5]

Optical Properties and Thin Film Processing of Manganese Phthalocyanine Nanoparticles Prepared by Laser Ablation in Liquid

○Yuchun Wang[1], Hiroyuki Wada[1] (1.Science Tokyo)

[7a-N221-6]

Investigation of mechanism of gelation induced by laser ablation of CaO colloids in alcohol

○(M1C)Koki Fujita[1], Haruki Takamori[1], Eriko Onishi[1], Takeshi Tsuji[1], Daiki Atarashi[1], Hiroki Iida[1], Hideo Shiratori[1], Yasushi Okumura[2], Hirotugu Kikuchi[2] (1.Shimane Univ., 2.Kyusyu Univ.)

[7a-N221-7]

Study on Laser Ablation Threshold of Silicon Wafers Using All-Solid-State 193nm Light Source

○KOJI TAMATE[1], Rikuo Koike[1], Hiroaki Motosugi[1], Osamu Konda[1], Taisuke Miura[1] (1.Gigaphoton Inc.)

[7a-N221-8]

Optimization of laser parameters in ns pulsed laser decontamination and evaluation of dust particle size

○(M2)Keisuke Yamamoto[1], Kosuge Atsushi[2], Takashi Nakajima[1] (1.Kyoto Univ., 2.JAEA)

[7a-N221-9]

Dependence on Laser Wavelength for Trust Force Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastic by Laser-Induced Ablation

○Tatsuya Shinozaki[1], Hiroshi Kasuga[1], Tomohiro Tsukihana[1], Hideaki Yamane[1], Katsuhiko Tsuno[1], Yutaka Nagata[1], Noriko Kurose[1], Saito Norihito[1], Takayo Ogawa[1], Satoshi Wada[1] (1.RIKEN)

[7a-N221-10]

Development of tungsten/copper bonding technique via laser surface modification for fusion plasma facing devices

○(PC)Hiyori Uehara[1,2], Haotian Yang[2], Keita Suzuki[3], Tomoki Tanaka[4], Takahiro Fujita[4], Ryo Yasuhara[1,2], Takashi Endo[3], Haruki Kawaguchi[1,2], Suzuki Chihiro[1,2], Miyagawa Reina[1,5], Hiroyuki Noto[1,2] (1.NIFS, 2.SOKENDAI, 3.Hokkaido Univ., 4.Nippon Tungsten Co.,Ltd., 5.NITech)

有機結晶の液中レーザー粉砕過程における分子構造の影響

Impact of molecular structure on the fragmentation behavior of organic crystals

大阪工大[1]，阪大レーザー研[2]，國立陽明交通大[3]

○(M2)阿部 晃汰[1]，神村 共住[1,2]，杉山 輝樹[3]，安國 良平[1]

OIT.[1], ILE, Osaka Univ.[2], National Yang Ming Chiao Tung Univ.[3]

○Kota Abe[1], Tomosumi Kamimura[1,2], Teruki Sugiyama[3], Ryohei Yasukuni[1]

E-mail: ryohei.yasukuni@oit.ac.jp

【背景】

有機物のナノ粒子は孤立分子ともバルクとも異なる物理化学特性を示すことから、有機デバイスや医療分野などへの応用が期待される。液中レーザー粉砕法は、水（貧溶媒）に懸濁した有機物の微結晶粉末を攪拌しながらレーザーパルスを照射する方法で、比較的容易に且つ様々な種類の化合物でナノ粒子の作製例があることから、その汎用化が期待される。一方で、化合物の種類によってナノ粒子化の効率が大きく異なり、ナノ粒子化が困難な化合物も存在する。本研究では側鎖の構造がわずかに異なる化合物を用い、液中レーザー粉砕法において分子構造の差異がナノ粒子化効率に及ぼす影響を明らかすることを目的とした。

【実験】

試料としてキナクリドン(QA)、ジメチルキナクリドン(DMQA)、ジブチルキナクリドン(DBQA)の 0.1 mM 水懸濁液を調整した。光学セルに 2 mL の試料を入れ、撹拌しながら Nd:YAG レーザーからのレーザーパルス（波長 532 nm，パルス幅 6-8 ns, 10 Hz, 50 mJ/cm^2）を 10 分間照射した。レーザー照射前後で吸収スペクトル測定を行い、吸光度の増加率からナノ粒子の生成効率を評価した。

【結果および考察】

QA、DMQA、DBQA の水懸濁液にレーザーを照射し、ナノ粒子の生成効率を比較すると、QA で 175 %、DMQA で 125 %、DBQA で 51 %と側鎖炭素数の増加に伴い生成効率が約 3.4 倍低下した(Fig.1)。これらの試料は照射したレーザー波長である 532 nm での吸収特性が類似しており、結晶表面の上昇温度は 1.6 倍程度の差しかないことが推定された。また結晶構造の比較より、水素結合により分子間力が強く硬い QA のほうが、分子間力が弱く柔らかい DBQA よりもナノ粒子の生成効率が高いことが示された。これらの結果から、硬い結晶の場合には温度上昇に伴う熱応力によって脆性的な破壊が生じやすいと考えられる。また発表ではナノ粒子化の閾値やサイズも含めたナノ粒子化の効率を議論する。

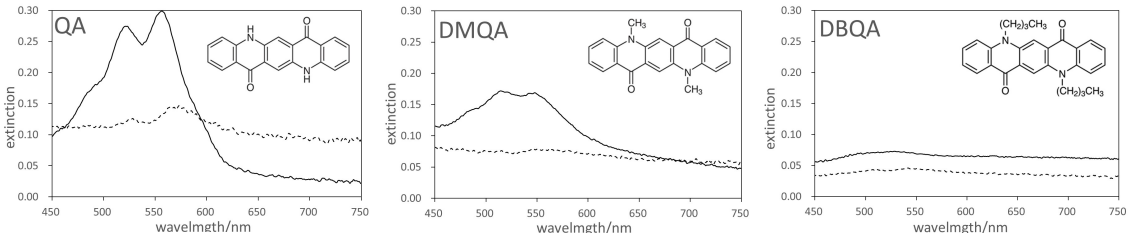


Fig. 1 Molecular structures of QA, DMQA and DBQA, and their extinction spectral changes. Before (Dashed line) and after (solid line) the laser irradiation.

© 2025年 応用物理学会

パルスレーザーアブレーション法でパイプとガスの流れを用いて堆積させた Si 球状ナノ粒子のパイプ径依存性

Pipe diameter dependence of Si spherical nanoparticles deposited by pulsed laser ablation method with pipe and gas flow

甲南大　○(M1)花田 裕月，青木 珠緒，梅津 郁朗

Konan Univ.,　○(M1)Yutsuki Hanada, Tamao Aoki, Ikurou Umezu

E-mail : m2521006@s.konan-u.ac.jp

我々は、ガス中のパルスレーザーアブレーション法において、パイプとガスの流れを利用すると、粒径が数十～数百nmの球状ナノ粒子をガスの流速で制御性よく堆積でき、粒径はストークス数 Stk=1 を満たす粒径であることを報告してきた。この方法は制御性の良いドライプロセスであるが、パイプを用いるため基板上に堆積する面積は限られている。

そこで本研究では、基板上の堆積面積を変化させるためにパイプ径を変化させて堆積を行った。ターゲットには Si を用い、パイプと基板の距離 L を 4.5mm、流速を 26m/s とし、パイプ径を ϕ2.3mm から ϕ5.0mm まで変化させた。基板上での堆積面積は光学顕微鏡で観察した。パイプの断面積と堆積面積の関係を Fig.1 に示す。予想通りパイプ径を大きくすると堆積する面積が広がることが確認できた。次に SEM を用いて観察した堆積中心での平均粒径とパイプ径の関係を Fig.2 の(●)に示す。このようにパイプ径を太くするにつれて平均粒径も増大している。ストークス数は、$Stk = \frac{\rho_p C_C d_p^2 u_p}{9\mu W}$とあらわせる。ここで$\rho_p$は粒子の質量密度、$C_c$は補正項、$d_p$は粒径、$u_p$はガスの流速、$\mu$は雰囲気ガスの粘度、$D$はガスの基板直前での曲率半径である。$D$は通常パイプ半径 W を用いるため、パイプ径が増大すると Stk=1 を満たす粒径は大きくなることが予想され、Fig.2 の傾向を説明できる。D=W として Stk=1 を満たす粒径を計算した結果を Fig.2 に(●)で示す。ϕ2.3 と ϕ3.5 では実験値は計算値とよく合うが、ϕ5.0 では実験値は計算値よりもかなり小さい。これは基板前面でのガスの流れの曲率半径がパイプ半径 D よりも小さいことを示す。ϕ2.3 と ϕ3.5 では実験結果から求めた曲率半径 D とパイプ半径 W の違いはほぼ一致するのに対して、ϕ5.0 において実験結果からガスの流れの曲率半径 D を求めると 1.7mm となり、パイプ半径 2.5mm よりも 3 割程度小さくなっていると考えられる。これはパイプ径が大きくなると、パイプ径 2W に対してパイプと基板の距離 L の距離が、相対的に小さくなるためであると考えられる。発表ではミー散乱光の色から判断した基板上での広範囲な粒径分布のパイプ径依存性について議論する。

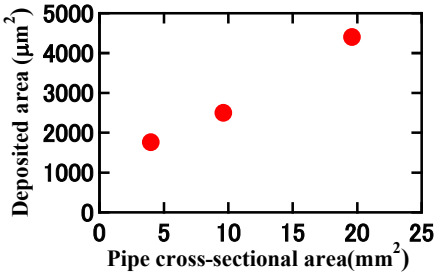


Fig.1 Relationship between pipe cross-sectional area and deposited area on the substrate.

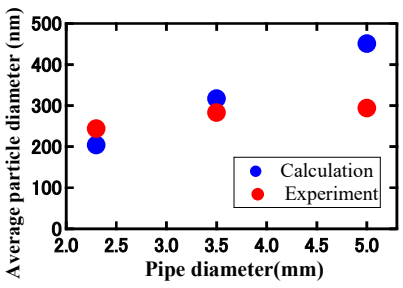


Fig.2　Relation between experimental values for different pipe diameters and particle size satisfying Stk=1.

© 2025年 応用物理学会

レーザー加熱グラファイト合成のアルコール溶媒種依存性

Dependence of Graphite Synthesis by Local Laser-Heating on Alcohol Solvent Species

北海学園大工[1]，慶大理工[2]，慶大スピンセンター[3]，北大電子研[4] ○藤原 英樹[1]、
加茂 雅也[1]、松坂 美月[2]、鹿嶋 倖太郎[2]、海住 英生[2,3]、平井 健二[4]、雲林院 宏[4]

Hokkai-Gakuen Univ.[1], Keio Univ.[2], CSRN Keio Univ.[3], RIES Hokkaido Univ.[4]

○Hideki Fujiwara[1], Masaya Kamo[1], Mizuki Matsuzaka[2], Kotaro Kashima[2], Hideo Kaiju[2,3],
Kenji Hirai[4], Hiroshi Uji-i[4]

E-mail: h-fujiwara@hgu.jp

グラファイトは多くの注目すべき特性を持ち、エネルギー貯蔵や電子回路など多岐にわたる応用が期待されているが、化学気相合成法などの既存の合成法では高い処理温度と長い処理時間、高価な装置を必要とするため、結晶性や特性を制御したグラフェン材料を自在に作製・描画できる簡便で安価な合成技術が求められている。これに対し我々は、エタノール中の NiFe 基板を集光レーザーで局所加熱する新しいグラファイト作製法を提案し、レーザ照射条件を最適化することで良好なラマン特性を示すだけでなく、高い導電性を示すグラファイトを合成することに成功した[1)]。今回の発表では、この方法の更なる改善のため、これまで注目していたレーザー照射条件ではなく、溶媒の種類に注目し、グラファイト合成条件の改善を試みた。

実験では、NiFe 薄膜（厚み~120 nm）コートガラス基板を異なるアルコール中に浸漬し、ガラス基板側から波長 405 nm のレーザー光を集光照射（これまでの結果を基にレーザーパワー180 mW、照射時間 0.1 s×100 回とした）。基板を洗浄・乾燥した後、ラマン分光装置により炭素材料に特有の G, D, 2D ピークの確認およびラマン信号強度分布の測定を行った。図 1 は、各溶媒でレーザー加熱を行った際の D/G 比分布（20 μm 四方）である。炭素数が少ないアルコールの場合、中心付近において低い D/G 比（＜0.2）の領域が存在するが、炭素数が多い場合、信号強度は高くなるものの、低い D/G 比の領域が消失することが確認できた。Shibuta らの理論研究では[2)]、熱分解によって発生した OH ラジカルが炭素と反応して CO として離脱することで、炭素の成長速度が抑制されると報告している。このため、炭素数に対する OH 基の割合が大きいアルコールにおいて徐々にグラファイトが成長し、高品質なグラファイトが形成されるものと考えられる。

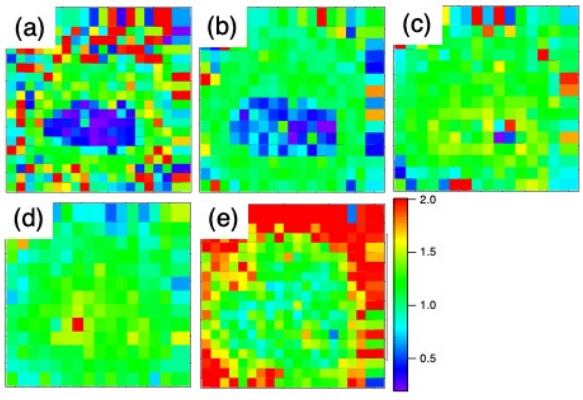


図 1　D/G 比分布．(a)メタノール、(b)エタノール、(c)プロパノール、(d)ブタノール、(e)オクタノール．照射レーザーパワー : 180 mW、照射時間 : 0.1 s × 100 回.

1)　H. Fujiwara *et al.*, ACS Appl. Nano Mater. **6**, 13885 (2023).

2)　Y. Shibuta *et al.*, Chem. Phys. Lett. **382**, 381 (2003).

© 2025年 応用物理学会

有機ナノ結晶の光学特性における表面吸着分子の影響

Impact of the adsorbed molecules on the optical properties of organic nanocrystals

大阪工大[1]，阪大レーザー研[2]
○(M2)増田直人[1]，神村共住[1,2]，安國良平[1]
OIT[1], ILE, Osaka Univ.[2]
○Naoto Masuda[1], Tomosumi Kamimura[1,2], Ryohei Yasukuni[1]
E-mail: ryohei.yasukuni@oit.ac.jp

背景

有機物のナノ結晶はバルク結晶や孤立分子とは異なる特有の発光特性を示すことが知られており、また無機発光ナノ材料と比較して毒性が低く、環境負荷が小さいことから光デバイスへの応用が期待される。しかしながら、有機ナノ結晶を合成する際に使用される界面活性剤が有機ナノ結晶の光学特性に与える影響の詳細については未解明な点が多い。液中レーザー粉砕法は純水中に分散させたバルク結晶にパルスレーザーを照射してナノ結晶を作製することが可能である。本研究では、本手法を用いて作製した純水中の有機ナノ結晶に界面活性剤を添加して蛍光スペクトルの変化を測定することで、表面に吸着した分子が有機ナノ結晶の光学特性に与える影響について検討した。

実験

化合物としてビス(3,5-ジメチルフェニル)-3,4,9,10-ペリレンテトラカルボン酸ジイミド(PR149)を使用し、0.006 mg/mL の濃度で純水中および界面活性剤水溶液に分散させた。界面活性剤溶液にはドデシル硫酸ナトリウム(SDS)を最終濃度 16 mM で調整した。試料 2 mL を光路長 1 cm の光学セルに入れ、マグネティックスターラーで撹拌しながら Nd:YAG レーザーからのレーザーパルス（波長 532 nm，パルス幅 6-8 ns, 10 Hz, 20 mJ/cm2）を照射し、その前後で吸収・蛍光スペクトルを測定した。

結果と考察

PR149 を水および SDS 溶液に懸濁しレーザーを照射したところ、どちらもナノ粒子生成に伴う吸光度の増加が観測され、また水中と SDS 溶液中で吸収スペクトルの形状に大きな差異は見られなかった。次にそれらの蛍光スペクトルを測定したところ、水中では結晶に由来するエキシマー発光が支配的であるのに対して、界面活性剤溶液中では短波長側に単分子様の蛍光ピークが観測された(図 1)。この結果は，ナノ粒子の表面に界面活性剤が吸着したことで結晶表面の分子配列が乱れ、単分子からの蛍光スペクトルが現れたことを示唆している。発表ではさらに界面活性剤の種類を変えた時に、表面への吸着が蛍光スペクトルに与える影響についても紹介する。

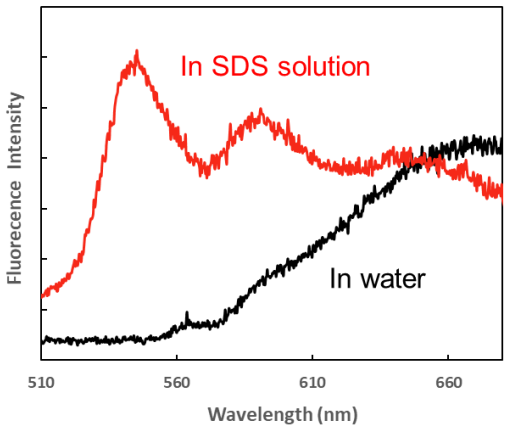


図 1　液中レーザー粉砕法により作製した PR149 ナノ結晶の蛍光スペクトル.

© 2025年 応用物理学会

Optical Properties and Thin Film Processing of Manganese Phthalocyanine Nanoparticles Prepared by Laser Ablation in Liquid

Science Tokyo, °(D)Yuchun Wang, Hiroyuki Wada

E-mail: wang.y.bx@m.titech.ac.jp

Manganese phthalocyanine (MnPc) offers favorable optoelectronic properties and structural flexibility for applications in sensing, catalysis, imaging, and optoelectronic devices. [1] However, the practical use of Pcs in solution-processed devices is limited by their low solubility and strong aggregation in conventional solvents. In this study, MnPc nanoparticles were prepared using laser ablation in liquid to enhance colloidal stability and help in the development of uniform films. [2] Laser ablation in liquid (LAL) provides a high-quality, top-down, and surfactant-free approach for the synthesis of nanoparticles, enabling control over particle morphology and optical properties through laser parameters. [3] The nanoparticles were then deposited into thin films by the spin-coating method, to achieve optimal morphology for improved optical and electronic properties.

MnPc powder was dispersed in deionized water and irradiated by a nanosecond-pulsed Nd:YAG laser (532 nm wavelength, 5-7 ns pulse duration, 10 Hz repetition rate) to prepare the nanoparticle dispersion. Then nanoparticles were extracted into chloroform to improve compatibility with the spin-coating process. The nanoparticles were characterized by Scanning Electron Microscope (SEM), Dynamic Light Scattering (DLS), and UV-Vis spectroscopy. The thin film was prepared by spin coating techniques, and analyzed by Atomic Force Microscopy (AFM), Dektak profilometer and UV-Vis spectroscopy to determine their surface morphology and optical properties.

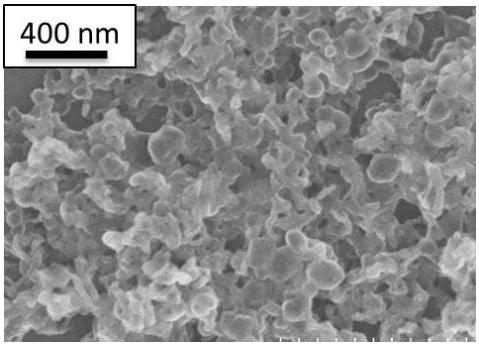


Figure 1. SEM image of MnPc nanoparticles

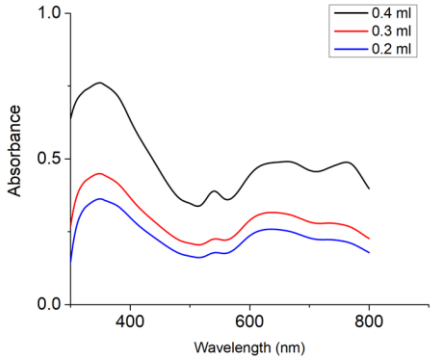


Figure 2. UV-Vis spectrum of thin films

Thin films were successfully prepared by spin coating techniques. Figure 1 shows the nanoparticle morphology observed with Scanning Electron Microscopy (SEM), the particles size was about 100 - 200 nm. Figure 2 shows the UV-Vis spectrum of the thin film, which was used to analyze the optical properties.

Reference:

[1] H. Sirringhaus, Adv. Mater., 26, (2014), 1319.

[2] N. Karl, Synth. Met., 133–134, (2003), 649.

[3] D. Zhang, Z. Li, and K. Sugioka, *J. Phys. Photonics*, **3**, (2021), 042002.

© 2025年 応用物理学会

アルコール中の CaO コロイドへのレーザー照射による ゲル生成メカニズムの解析

Investigation of mechanism of gelation induced by laser ablation of CaO colloids in alcohol

島根大院自然科学[1]，九大先導研[2] ○(M1C)藤田 航輝[1]，高盛 陽生[1]，大石 恵理子[1]，辻 剛志[1]，新 大軌[1]，飯田 拡基[1]，白鳥 英雄[1]，奥村 泰志[2]，菊池 裕嗣[2]

Shimane Univ.[1], Kyusyu Univ.[2], ○(M1C) Koki Fujita[1], Haruki Takamori[1], Oishi Eriko[1], Takeshi Tsuji[1], Daiki Atarashi[1], Hiroki Iida[1], Hideo Shiratori[1], Yasushi Okumura[2], Hirotsugu Kikuchi[2]

E-mail: n25m620@matsu.shimane-u.ac.jp

【緒言】 以前の研究で我々は、エタノール中に分散させた酸化カルシウムに対して波長 266 nm のレーザー光を照射するとゲルが生成することを見いだした [1]。また、最近の研究により、ゲル生成はエタノールの光酸化によって生成する酢酸が引き起こしていることを明らかにした [2]。今回、2-プロパノール(IPA)中の CaO に対してアブレーションを行った結果、ゲル生成のメカニズムについて新たな知見が得られたので報告する。

【実験方法】IPA 中の CaO コロイドに対して 266 nm の Nd:YAG レーザーを照射した。また、IPA にレーザーを照射して生成した成分をガスクロマトグラフィーで分析した。また、IPA 中の CaO コロイドに 0.02 M の酢酸を添加した場合のゲル生成の観察および XRD による成分分析を行った。

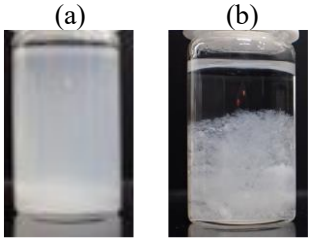


Fig.1: CaO colloids in (a) neat IPA and (b) IPA containing 2 % H_2O after laser irradiation.

【結果】IPA 中の CaO コロイドにレーザー照射を行ったところ、ゲルは生成しなかった(Fig.1a)。一方、少量の水を添加した IPA 中ではゲルが生成した(Fig.1b)。そこで、IPA および水を添加した IPA に対してレーザー照射を行い、成分の分析を行ったところ、それぞれ 0.004、0.002 M の酢酸が生成していた。さらに、IPA 中に分散させた CaO コロイドに 0.02 M の酢酸を添加した場合でも、水を添加した場合のみゲルが生成した。これらの試料を XRD で分析したところ、水を添加した場合のみ酢酸カルシウムが生成していた。これらのことは、ゲル生成には酢酸以外の因子が関わっていることを示している。

そこで、他のアルコール中におけるゲル生成について解析したところ、酢酸カルシウムの生成反応にはアルコールの級数が関与していることが明らかになった。また、水の影響についても同じメカニズムで説明できることが明らかになった。

【参考文献】

[1] T. Tsuji, et al., J. Laser Micro/Nano Eng., 14 (2019) 147.

[2] T. Tsuji, et al. Colloids and Surfaces A 703 (2024) 135361.

© 2025年 応用物理学会

全固体 193nm 光源を用いたシリコンウェハのアブレーション閾値評価

Study on Laser Ablation Threshold of Silicon Wafers Using All-Solid-State 193nm Light Source

ギガフォトン株式会社，○玉手 光次，小池 陸生，本杉 宇晃，近田 修，三浦 泰祐

Gigaphoton Inc., ○Koji Tamate, Rikuo Koike, Hiroaki Motosugi, Osamu Konda, and Taisuke Miura

E-mail: koji_tamate@gigaphoton.com

我々は半導体露光用 ArF レーザの応用先として材料加工の研究開発を進めている。レーザ加工においては、まず使用する光源の波長やパルス幅における加工対象のアブレーション閾値を知ることが重要である。一方波長 193nm におけるアブレーション閾値のデータは少ないため、我々は他の波長の光源との比較のためにまず Si（100）ウェハのアブレーション閾値を評価している。

ガウス型の強度分布を持つレーザ光の場合には Liu's method を用いて加工クレータ径からアブレーション閾値を求めることが可能であり、波長 266nm、パルス幅 15ps のレーザによる Si(100)の閾値は 0.55J/cm^2 と報告されている[1]。これまで我々はパルス幅 15ns の ArF エキシマレーザのビーム強度分布を、ランダム位相板を用いて Sinc 関数形状に成形し、Liu's method により Si(100)に関して閾値 0.52J/cm^2（決定係数 R^2=0.96）という結果を得ている[2]。今回は全固体 193nm レーザ光源を使用し、ガウス型ビームを用いたアブレーション閾値の評価を行ったので報告する。

全固体 193nm レーザ光源を用いた加工システムは、Fig. 1(a)に示すように波長 1030nm と波長 1553nm のファイバーレーザの光を LBO および CLBO 結晶を用いた波長変換により、パルス幅 0.5ns の 193nm 光を発生させ[3]、焦点距離 28.8mm の平凸レンズで Si ウェハ上に集光される。Si ウェハを載せた x 軸ステージを 10mm/sec で走査しながらパルス繰返し 1kHz で照射することにより、単一パルスによる加工クレータを連続的に作成する事ができる。加工クレータをレーザ顕微鏡で観察すると、ガウス型ビームによる加工であるため Fig. 1(a)に示すように均一なすり鉢状のクレータが形成されていることが分かる。加工点における最大パルスエネルギーは 12μJ であるが、加工直前に出力をパワーメータで計測し平均パルスエネルギーを調節しながら加工を行った。

Fig. 1(b)は平均照射パルスエネルギーとクレータ径の変化を示す片対数グラフである．平均照射エネルギーを減少させるに伴って，クレータ径が小さくなることが確認できた。各照射エネルギーにおいて、6 個のクレータ径の平均値を求めている。このグラフより、アブレーション閾値を算出したところ、0.43J/cm^2（決定係数 R^2=0.98）となった。上記 ArF エキシマレーザによる閾値よりも低い値となったのは、パルス幅 15ns と 0.5ns の違いが一因であると考えられる。

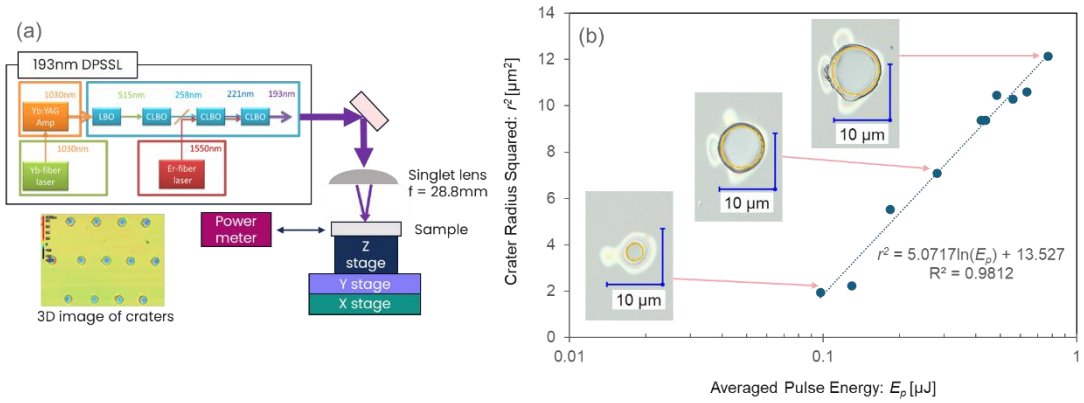


Fig. 1 (a) Laser machining system using the all-solid-state 193nm light source; (b) Semilog plot of the energy dependence of the crater radius (inset: micrographs of craters)

【参考文献】

[1] J.M. Liu ”Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes,” *Opt. Lett.*, **7** (5), pp. 196-198 (1982).

[2] O. Konda, H. Motosugi, and T. Miura "Measurement of the excimer-laser ablation threshold using the random phase plate," in CLEO-PR 2024, paper P1_111.

[3] 五十嵐 裕紀，上場 康弘，小野瀬 貴士，淵向 篤，三浦 泰祐，加工用短パルスハイブリッド ArF エキシマレーザーの開発．レーザー研究, **52**(1), pp.17-21 (2024).

© 2025年 応用物理学会

ナノ秒パルスレーザー除染におけるレーザーパラメータの最適化と飛散粉塵粒径評価の試み

Optimization of laser parameters in ns pulsed laser decontamination and evaluation of dust particle size

[1]京大エネ研，[2]JAEA(敦賀) ○山本恵輔[1]，小菅淳[2]，中嶋隆[1]

[1]Kyoto U. , [2]JAEA Keisuke Yamamoto[1], Atsushi Kosuge[2], Takashi Nakajima[1]

E-mail: nakajima@iae.kyoto-u.ac.jp

レーザー除染とは，表面汚染された原子力構造材にレーザーを照射し，アブレーションによって汚染物質を除去する方法であり，東京電力は福島第一原発の処理水施設において，2019 年に CW レーザー除染を実施した．このことからもわかるように，国内においてはなぜか，CW レーザーの方がパルスレーザーよりも除染に適している，と考えられている．我々は，ナノ秒パルスレーザーの方が CW レーザーよりも除染に適していると考え，それを実証するための研究を進めている．CW レーザーとパルスレーザーに共通するレーザーパラメータとしては、出力，スキャン速度，スポット径があるが，パルスレーザーの場合にはこれ以外に，パルス時間幅やパルス繰り返し数がレーザーパラメータとして存在するので，レーザーパラメータを系統的に探索し，最適化することが重要である．

今回は、100 W のファイバーレーザーを用いて単位面積当たりの投入レーザーエネルギーが一定，すなわち，レーザー出力とスキャン速度が一定の条件下でパルス時間幅とパルス繰り返し数を変化させ，ターゲット(SUS304 材) 除去量を比較した．レーザー出力 100 W，スキャン速度 2000 mm/s の場合の結果を Fig. 1 に示す．同一の条件で CW レーザーを用いた場合には，除去量はわずか 7 mg であり，ナノ秒パルスレーザーを用いた方がはるかに除去効率が良いことを確認できた．

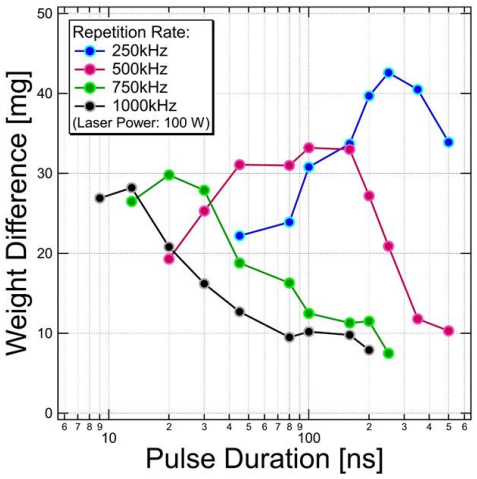


Fig. 1. Removal rate of SUS target as a function of pulse duration. The laser power is 100 W and scan speed is 2000 mm/s for all cases.

また、レーザー除染によって発生する粉塵は，サンドブラスト除染などに比べて発生量は桁違いに少量ではあるものの汚染されているため，粉塵の速度と粒径を正しく評価することが重要である．春の講演ではレーザー散乱を応用した粉塵の速度評価について報告したが，今回は粉塵粒径の評価を試みたので，途中経過を報告する．空気中を飛散/浮遊する粒径不明の粉塵粒径を計測するのは困難なので，まずテスト粒子として，純水中に径が 370 nm のポリスチレン(PS)粒子を分散させ，レーザー散乱信号が 7 cm 離れた位置からどれくらいの輝度で観測できるかを確認した(Fig. 2)．画面では見づらいが，370 nm の PS 粒子が検出できている．粒子の動きが遅い水中ならば，さらに小さな 190 nm の粒子までは検出できることが確認できた．本講演では，この後の進捗について報告する．

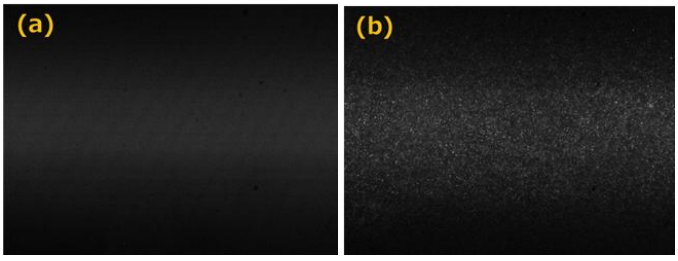


Fig. 2. Laser scattering images of pure water (a) without and (b) with polystyrene beads with a diameter of 370 nm.

© 2025年 応用物理学会

炭素繊維強化プラスチックに対するレーザーアブレーションによるレーザー推力の波長依存特性

Dependence on Laser Wavelength for Thrust Force Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastic by Laser-Induced Ablation

理研[1]　○篠崎 琢也，春日 博[1]，月花 智博[1]，山根 秀公[1]，
津野 克彦[1]，永田 豊[1]，黒瀬 範子[1]，斎藤 徳人[1]，小川 貴代[1]，和田 智之[1]
RIKEN.[1], ○Tatsuya Shinozaki[1], Hiroshi Kasuga[1], Tomohiro Tsukihana[1], Hideaki Yamane[1],
Katsuhiko Tsuno[1], Yutaka Nagata[1], Noriko Kurose[1], Norihito Saito[1], Takayo Ogawa[1], Satoshi Wada[1]
E-mail: tatsuya.shinozaki@riken.jp

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP）は軽量であるが、十分な強度を持っていることから人工衛星や航空機などの構造材として使用されている。しかしながら、そのために宇宙空間にスペースデブリとして大量に存在しており、その対策が急務となっている。

我々は、これまで炭素繊維強化プラスチックに対して、より効果的にレーザーにより除去させるための研究を進めている。これまで様々な波長で実験を行ってきたが、今回は波長が 1.57 ミクロンのレーザーを用いて、CFRP に対して測定を行った。

計測には減衰機能を有する小型の釣り鐘式振り子を用い，真空環境下においてナノ秒のレーザーアブレーション実験を行った。時間と変位データから振り子の初速度を算出し，初速度と振り子＋試料の質量から力積 I を求めた。得られた力積の効率を示す指標には，単位エネルギー当たりの力積である推力結合係数（Momentum coupling factor: Cm）を用いた。照射エネルギーを変化させ，照射位置を変更したときのフルエンスと様々な波長を用いた推力結合係数の関係を図 1 に示す。照射は同じポイントに複数回行い、照射 1 回目と 2 回目以降とは異なる挙動が見られたが、2 回目以降においては 1.57 ミクロンのレーザーは他の波長のレーザーよりも低い推力結合係数となった。

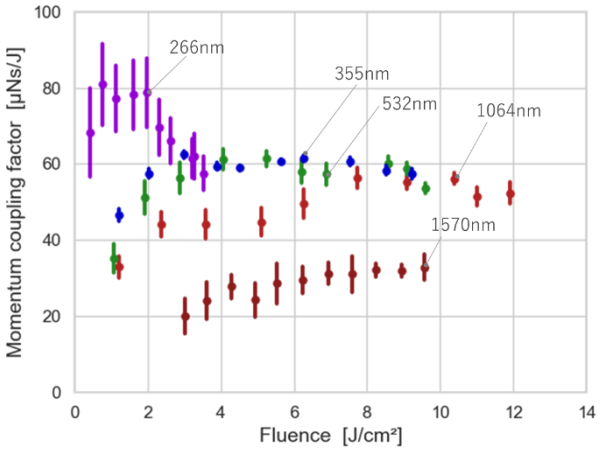


図 1　様々なレーザーにおけるフルエンスと推力結合係数の関係

謝辞：本研究は防衛装備庁が実施する安全保障研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

© 2025年 応用物理学会

核融合応用のためのレーザー表面改質タングステンと銅の無欠陥接合

Development of tungsten/copper bonding technique via laser surface modification for fusion plasma facing devices

核融合研[1]，総研大[2]，北大[3]，日本タングステン㈱[4]，名工大[5]
○上原日和[1,2]，楊浩天[2]，鈴木啓太[3]，田中智基[4]，藤田貴弘[4]，安原亮[1,2]，遠堂敬史[3]，川口 晴生[1,2]，鈴木千尋[1,2]，宮川 鈴衣奈[5,1]，能登 裕之[1,2]
NIFS[1], SOKENDAI[2], Hokkaido Univ.[3], Nippon Tungsten Co.,Ltd.[4], NITech[5]
○Hiyori Uehara[1,2], Haotian Yang[2], Keita Suzuki[3], Tomoki Tanaka[4], Takahiro Fujita[4], Ryo Yasuhara[1,2], Takashi Endo[3], Haruki Kawaguuchi[1,2], Chihiro Suzuki[1,2], Reina Miyagawa[5,1], Hiroyuki Noto[1,2]
E-mail: uehara.hiyori@nifs.ac.jp

磁場閉じ込め方式の核融合炉において、ダイバータとよばれるプラズマ対向機器が重要な役割を果たすが、その開発のために、耐熱材料であるタングステンと徐熱性に優れた銅合金を高品位に接合する技術が必要不可欠である。そこで著者らは、レーザー照射でタングステン表面にマイクロメートルの凹凸構造を形成したのちに銅と接合する手法を提案し、アンカー効果や接触面積の増大による接合性能・徐熱性能向上を目指している。

これまでの著者の研究では、核融合グレードの純タングステンおよびタングステン合金に対してナノ秒 Nd:YAG レーザーを照射し、アブレーション特性を詳細に評価した[1]。さらに著者らは、レーザー照射によるタングステン結晶構造の変化を詳細に追跡することで、レーザー照射による微視的・巨視的な硬度低下が極めて小さいことを明らかにした[2,3]。本研究では、ナノ秒レーザーで表面改質したタングステンと銅の接合を試みたため、その結果について報告する。

今回は、日本タングステン株式会社と共同で、接合材を使用せず、タングステンと銅を直接接合する NDB（無欠陥接合）法を試みた。接合試料に対してレーザー加工痕を横切るように切断したのち、断面をクロスセクションポリッシャで研磨し、接合界面近傍を走査電子顕微鏡やオージェ電子分光（AES）装置、電子線後方散乱回折（EBSD）法で観察・分析した。図 1 は、得られた SEM 像と AES に基づいたタングステン／銅の元素マップである。レーザー照射でタングステンに生じたサブ μm 幅の亀裂に銅が欠陥なく侵入し、強固に接合している様子が明瞭な像として取得された。このような接合界面の複雑な形状によって、アンカー効果が高まるほか、熱抵抗・電気抵抗を抑制する効果も期待できる。NDB 法と並行して、熱間静水圧加圧（HIP）処理による接合も試みたため、報告予定である。

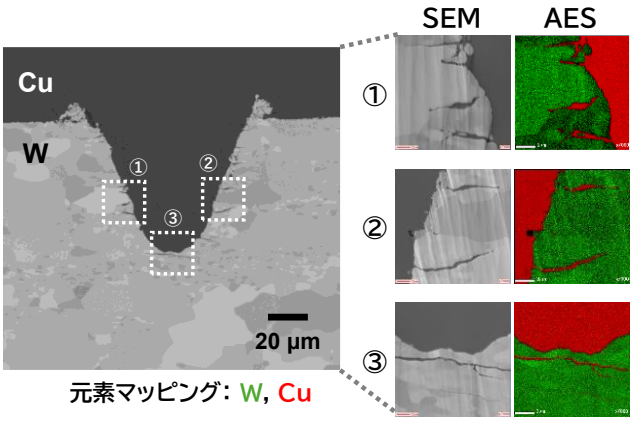


図 1 レーザー表面改質タングステン／銅接合体の断面 SEM 像と AES で取得した元素マップ

参考文献

[1] Uehara et al., J. Laser Micro/Nanoeng. 17, 162 (2022).
[2] Uehara et al., Plasma Fusion Res. 18, 1205017 (2023).
[3] Uehara et al., Nucl. Mater. Energy 40, 101688 (2024).

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation : 3.6 Laser processing

[7p-P06-1~12] 3.6 Laser processing

[7p-P06-1]
Crystal Polymorphic Transition Induced by Beam-Shaped Laser Pulses

○(M1)Kanon Taniguchi[1], Norifumi Fujii[1], Hozumi Takahashi[1], Hiroshi Yoshikawa[1] (1.Grad. Sch. Eng., Univ. Osaka)

[7p-P06-2]
Photochemical Transparency of Amorphous Carbon Thin Films Using F_2 Laser (2)

○DO VAN LE[1], Masayuki Okoshi[1] (1.NDA)

[7p-P06-3]
Fabrication of Gold Nanoparticle-Decorated Graphitic Carbon Electrodes on Hydrogels

○Kosuke Fujiwara[1], Mitsuhiro Terakawa[1,2] (1.Grad. Sch. Keio Univ., 2.Keio Univ.)

[7p-P06-4]
Electrostatic force pull-up growth of melted Titanium formed by laser irradiation.

○(B)Nobu Matsumoto[1], Takashi Nishimura[1] (1.Suzuka KOSEN)

[7p-P06-5]
Hole drilling characteristics of various polymer films using a short pulse CO2 laser with a novel water assistance

○Katsunori Negishi[1], Kazuyuki Uno[1] (1.Univ. of Yamanashi)

[7p-P06-6]
Formation of Hydrophobic Silicone Nanofilms Using ArF Excimer Laser

○(D)Yoshimi Shibuta[1], Masayuki Okoshi[1] (1.NDA)

[7p-P06-7]
Deposition of platinum co-catalyst on Au/TiO_2 substrates using laser ablation in liquid and evaluation of their hydrogen evolution performance

○(M1)Koudai Totuka[1], Keiki Ito[1], Akihiro Furube[2], Tetsuro Katayama[2], Pankaj Koinkar[2], Yasutaka Matuo[3] (1.Tokushima Univ., 2.Tokushima pLED, 3.Hokkaidou Univ.)

[7p-P06-8]
Efficient Generation of an Annular-Shaped Radially Polarized Beam for Laser Nano Processing of a Dielectric Surface

○(M1)Wenqi Wang[1,2], Yuuki Uesugi[1], Yuichi Kozawa[1] (1.IMRAM, Tohoku Univ., 2.Grad. Sch. of Eng., Tohoku Univ.)

[7p-P06-9]
Surface carbonization of metal by ultrashort pulse laser irradiation in hexane

○Shuya Matsushita[1] (1.Nagoya Inst)

[7p-P06-10]
Bubble jet ejection in two-photon bubble printing

○Sawa Suzuki[1], Masaharu Aoyama[1], Hiroaki Nishiyama[1] (1.Grad. Yamagata Univ.)

[7p-P06-11]

Rheological influence of donor materials on laser-induced forward transfer process

○(M1)Shoei Koide[1], Ryota Tamemoto[1], Keisaku Yamane[1], Hiroshi Orihara[2], Yasunori Toda[1], Ryuji Morita[1] (1.Hokkaido Univ., 2.RIES-Hokkaido Univ.)

[7p-P06-12]

Effect of plasmonic electric field enhancement in optical vortex laser ablation in liquid

○Haruki Kawaguchi[1,2], Ryo Yasuhara[1,2], Reina Miyagawa[3], Koji Sugioka[4], Yoshiaki Nishijima[5], Masato Ota[1,2], Hiyori Uehara[1,2] (1.NIFS, 2.SOKENDAI, 3.Nagoya Inst. of Tech., 4.RIKEN RAP, 5.YNC)

ビーム成形したパルスレーザーによる結晶多形相転移現象の計測

Crystal Polymorphic Transition Induced by Beam-Shaped Laser Pulses

阪大院工，○(M1)谷口 華音，(M2)藤井 紀文，高橋 秀実，吉川 洋史

Grad. Sch. Eng., Univ. Osaka ○Kanon Taniguchi, Norifumi Fujii, Hozumi Takahashi, Hiroshi Y. Yoshikawa

E-mail: taniguchi.k@mp.ap.eng.osaka-u.ac.jp

【序論】所望の構造や形状を有する結晶を作製することは、電気光学デバイスや医薬品など様々な分野において必要不可欠である。そのアプローチの一つとして、近年我々は、超短パルスレーザーアブレーションを外部刺激とした結晶核発生、結晶成長、多形相転移の時空間制御手法を開発してきた[1,2 等]。一方、これまで我々は、空間的に等方的なガウシアンビームを主に用いてきたが、結晶は分子が秩序的に配向した固体であるため、結晶化挙動がレーザー強度の空間分布の影響を受ける可能性がある。 そこで本研究では、ビーム成形したパルスレーザーが結晶多形相転移現象に与える影響を調査した。

【実験】試料として、メタノールをグリシン水溶液中に拡散させることで作製した準安定多形のβ形グリシン結晶を使用した。光源としては、再生増幅 Ti:Sapphire レーザー(中心波長 800 nm, パルス時間幅 100 fs)を用いた。レーザーは空間光位相変調器(SLM)によりビーム成形した後、大気中のβ形グリシン結晶表面に対し、対物レンズ(10×, NA: 0.40)を用いて集光照射した。結晶多形相転移の様子は、光学顕微鏡を用いてクロスニコル条件下で観察した。

【結果】本要旨では、ガウシアンビームとベッセルビームを比較した結果について示す。生成したビームの強度分布をビームプロファイラで測定したところ、ベッセルビームに特有な同心円状の空間分布が得られていることがわかった(Fig. 1a)。それぞれのビームをアブレーションしきい値以上のエネルギー(130 μJ/pulse)で結晶表面に照射したところ、どちらの場合も集光領域から多形相転移が広がっていく様子が観察された(Fig. 1b)。次にレーザー照射によって多形相転移が誘起される確率を調べたところ、ガウシアンビームの方がベッセルビームよりも確率が高くなった。以上の結果から、ビーム形状が多形相転移の挙動に影響を及ぼす要因となる可能性が示唆された。

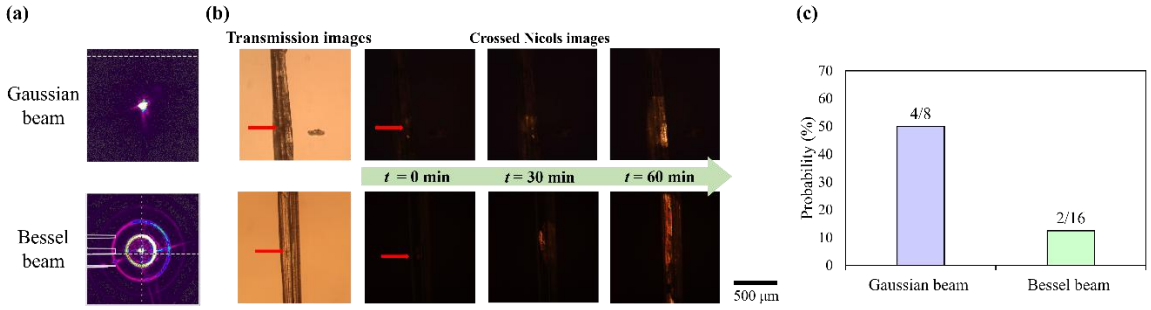


Fig.1 (a) Beam intensity profiles at a laser focus. (b) Progression of the polymorphic phase transition indued by laser ablation. (c) Probability of laser-induced polymorphic phase transitions within 1 hour.

[1]H. Y. Yoshikawa et al., ***Chem Soc Rev***, 43, 2147 (2014). [2]H. Takahashi et al., ***J Phys Chem Lett***, 15, 180 (2024).

© 2025年 応用物理学会

F_2 レーザーによるアモルファス炭素薄膜の光化学的透明化(2)

Photochemical Transparency of Amorphous Carbon Thin Films Using F_2 Laser (2)

防衛大 電気電子，○レ・バン・ドー，大越 昌幸

National Defense Academy, ○Le Van Do, Masayuki Okoshi

E-mail: levando35p@gmail.com

1. 序論 これまでわれわれは、アモルファス炭素（a-C）薄膜中の sp^3 炭素と sp^2 炭素の比を、薄膜形成後の表面に大気中でレーザー照射することで変化させることができる、新たな光化学表面改質法を見出してきた[1]。これは、波長 157 nm の F_2 レーザーを用い、a-C 薄膜表面を光励起するとともに、その光路中の O_2 分子を次のように光分解する:

$$O_2 + h\nu\ (157\ \mathrm{nm}) \rightarrow O(^1D) + O(^3P)$$

F_2 レーザーの光分解により生成された励起一重項酸素原子 $O(^1D)$が、薄膜中の sp^2 炭素を優先的に引き抜くことで、a-C 薄膜表面の光化学的透明化が起こると考えられる。しかしこれまでは、a-C 薄膜の膜厚を 30 nm よりも薄くすると、レーザー照射領域の薄膜が除去されてしまい、a-C 薄膜の厚さ方向全体を透明化するには至らなかった。そこで本報告では、単一パルスのフルエンスをより低く設定することで、a-C 薄膜の膜厚を薄くでき、かつ深さ方向全体を透明化できることを示す。また、X 線光電子分光（XPS）分析により、薄膜中の sp^3 炭素と sp^2 炭素の比率を調べ、F_2 レーザーによる sp^2 炭素の引き抜き反応を明らかにする。

2. 実験方法 基板として合成石英ガラス（厚さ 525 μm、大きさ 15×15 mm^2）を用いた。合成石英ガラス基板上に、真空中でのグラファイト棒のアーク放電により、a-C 薄膜を室温で形成した。そのときの膜厚は 9〜21 nm とした。レーザー未照射部と照射部の境界を明瞭にするため、試料表面には予め開口 8×8 mm^2 の金属製マスクを密着させ F_2 レーザーを照射した。そのときの照射条件は、単一パルスのフルエンス 8 mJ/cm^2、パルス繰り返し周波数 10 Hz、照射時間 30~90 min とした。またその際、空気中の O_2 分子の強い光吸収を避けるため、レーザー光路中を N_2 ガスでパージした。レーザー照射は室温で行った。

3. 結果 a-C 薄膜の膜厚を 9 nm としたとき、F_2 レーザー照射領域の深さ方向全体が透明化された。Fig.1 は、XPS 分析における C 1s スペクトルを示している。未照射の a-C 薄膜では 284.5 eV に強いピークが見られた。一方 F_2 レーザー照射後、C 1s のピーク強度が減少し、かつ高エネルギー側への化学シフトが認められた。C 1s スペクトルの波形分離を行った結果、sp^3 炭素/sp^2 炭素の比率が未照射領域では 0.48 に対して、照射後 1.41 になった。したがって、F_2 レーザー照射により sp^2 炭素が顕著に減少することが明らかとなった。

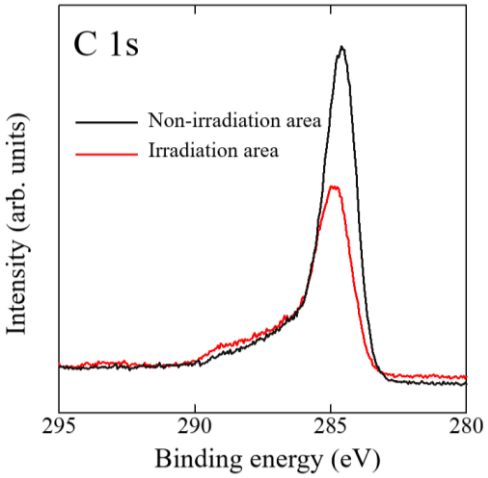


Fig.1 An investigation into the C1s core level using X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) for both F_2 laser-irradiated and nonirradiated areas of 9 nm a-C thin films.

参考文献

[1] S. Okuzono, M. Okoshi: Carbon 227 (2024) 119234.

© 2025年 応用物理学会

ハイドロゲル表面への金ナノ粒子担持黒鉛質炭素電極の作製

Fabrication of Gold Nanoparticle-Decorated Graphitic Carbon Electrodes on Hydrogels

慶大院理工[1]，慶大理工[2] ○(M2)藤原 巧将[1]，寺川 光洋[1,2]

Grad. Sch. Keio Univ.[1], Keio Univ.[2], ○Kosuke Fujiwara[1], Mitsuhiro Terakawa[1,2]

E-mail: terakawa@elec.keio.ac.jp

炭素材料は導電性および化学的安定性に優れ、電極材料として広く研究されている。中でも、金属ナノ粒子を担持した炭素電極は高い触媒活性を示し、大きな比表面積を有することから、電気化学センサおよび燃料電池への応用が進められている。我々はこれまでに、ハイドロゲル表面にレーザ光を照射することで導電性を示す炭素構造を作製可能であることを示した [1]。本研究では、電気化学デバイスの電極への応用を目的としてハイドロゲル表面に金ナノ粒子を担持した炭素電極の作製を行った。

リグニンを含侵させたアガロースハイドロゲルの表面へフェムト秒レーザーパルス (波長 522 nm、パルス幅 192 fs、繰り返し周波数 63 MHz) を集光照射することで炭素構造を作製した。その後、同構造に塩化金溶液を滴下して 5 分間静置し、純水中で 5 時間静置することで未反応の塩化金を除去した。Fig. 1(a) に蛍光 X 線分析により取得した作製構造中の金の含有量を示す。炭素構造への塩化金溶液の滴下によって金が析出し、塩化金溶液の濃度の増大に伴って金の析出量が増大した。また、二端子法による抵抗値測定の結果、金が析出した構造の抵抗値は、塩化金溶液の濃度が 20 mg/ml の条件において極小値を示した (Fig. 1(b))。走査電子顕微鏡画像から、析出した金はナノ粒子として炭素構造表面に付着していることが確認された (Fig. 1(c))。炭素構造表面に存在する金ナノ粒子は、電極電子移動反応を促進する電極触媒として機能することが知られている。本研究でハイドロゲル表面に作製した電極は、電気化学デバイスにおける電極電流密度の増加に寄与すると考えられる。

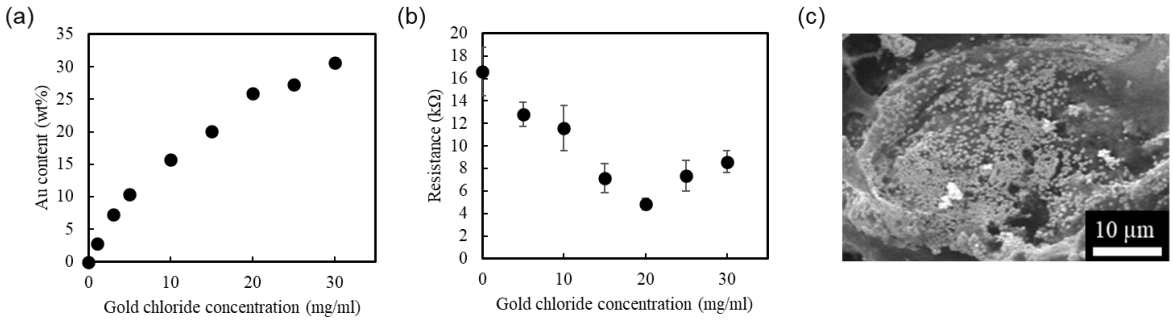


Fig.1 (a) Relationship between the concentration of dropwise-added gold chloride solution and the Au content in the fabricated electrodes. (b) Resistance of the graphitic carbon structures with gold chloride added dropwise. (c) SEM image of the surface structure of the fabricated electrodes with 20 mg/ml gold chloride added dropwise.

[1] R. Miyakoshi, et. al., Adv. Elec. Mater. 9, 2201277(2023).

© 2025年 応用物理学会

レーザ局所加熱により形成したチタン凸融液の静電引上成長

Electrostatic force pull-up growth of melted Titanium formed by laser irradiation.

鈴鹿高専[1] ○(B4)松本乃武[1], 西村 高志[1]

Suzuka college[1], ○Matsumoto Nobu[1], Takashi Nishimura[1].

E-mail: takashi@elec.suzuka-ct.ac.jp

1. はじめに

材料電磁プロセッシングは融液成長を主に磁場で制御し電磁鋳造などへ応用されているが，静電場により融液成長を制御する手法の報告例は少ない．その理由は，静電エネルギ（$E \cdot D/2 = 4.4$ J/m^3 ($E = 1$ kV/mm)）は磁気エネルギ（$H \cdot B/2 = 4\times10^5$ J/m^3 (B=1 T)）に対して 5 桁程度小さいためである．我々はこれまで，レーザ局所加熱により形成したシリコン（Si）凸融液へ高電圧を印加することで強い電界を融液へ集中させ引き上げ成長させることで先端部がファセットで囲まれた鋭いニードル結晶の創製に成功し，静電応力の融液結晶成長への応用の可能性を示した[1)]． Si は凝固すると体積が膨張する特異な性質（正の膨張率）を持つため容易に融液を凸形状にできるが，多くの金属では負の膨張率のため凝固過程で凸融液の形成が難しく電界を集中させることは困難である．そこで本研究では，負の膨張率の金属（チタン（Ti)）の線材先端部をレーザ局所加熱することで凸融液を形成し電界を集中させ静電引上成長が可能か検討したので報告する．

2. 実験方法

Ti 線（φ0.05 mm, 長さ 5 mm）の先端部から 2.5mm 上方の位置に高電圧電極を配置し，0 kV，-8 kV，-15 kV の電圧を印加した．その後，レーザ（φ1.6 mm, 21 W）を Ti 線先端部へ照射し Ti 凸融液を形成した直後，レーザ出力を 0 W へ下げた．このとき Ti 凸融液は強い静電場の影響を受けながら結晶成長する．Ti 凸融液の結晶成長は長焦点顕微鏡によりその場観察し，成長後の Ti 結晶の表面観察は電子顕微鏡（SEM-EDS）で行った．

3. 結果と考察

印加電圧が 0 kV の場合，Ti 線先端部は表面が薄く溶融し，さらに先端部付近の一部分で線材が曲がったが先端部の形状に大きな変化はなかった．印加電圧 -8 kV の場合，レーザで溶融した Ti 線表面の融液が先端部へ集まり，曲率半径 25 μm 程度の融液が形成した．この Ti 融液が凝固した後の結晶構造も曲率半径 25 μm 程度であった．印加電圧 -15 kV の場合，レーザで溶融した Ti 線表面の融液は先端部へ集まり強く引き上げられ，融液先端の角度が 98.6° となった．この角度は Taylor cone として知られており Ti 融液が静電応力で引き上げられていることを示す. 成長後の Ti 線先端部はファセット面で囲まれており先端曲率半径は 300 nm 程度であった（Fig. 1）．Ti 融液には静電応力と表面張力が作用するが，-15 kV 印加では表面張力より静電応力が強くなり鋭い Ti ニードル結晶が形成できた．

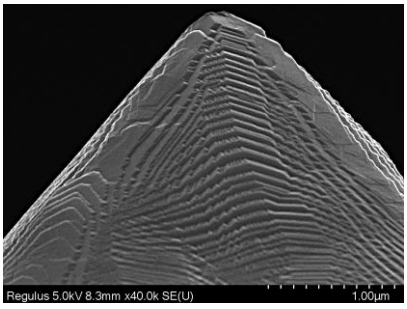


Fig. 1. SEM image of the tip of Ti wire heated at −15 kV.

4. 参考文献

1) T. Nishimura, Jpn. J. Appl. Phys. **64,** 035502 (2025).

謝辞 本研究は立松財団研究助成，フジクラ財団，科研費基盤 C (25K08497）より助成を受けて実施した．

© 2025年 応用物理学会

短パルス CO_2 レーザーと新規ウォーターアシストによる様々な樹脂フィルムの穴あけ加工

Hole drilling characteristics of various polymer films using short-pulse CO_2 laser with novel water assistance

山梨大[1]，○(M2)根岸 克典[1]，宇野 和行[1]

University of Yamanashi[1]

E-mail: g24te016@yamanashi.ac.jp

1. 研究背景

CO_2 レーザーは発振波長域が 9.11 μm - 11.1 μm（主な発振波長 : 9.6 μm, 10.6 μm）であり，樹脂やガラス，水分を多く含む生体分子に吸収されやすいため産業や医療を活用されている．一般的な CO_2 レーザーの最小パルス幅は約 10 ns であるため，熱加工が生じる．熱加工では，照射対象の熱特性とレーザーの照射条件によって炭化や溶融，変色といった熱影響領域（HAZ : Heat Affected Zone）が形成される可能性がある。加工品質の改善が重要である．

レーザー加工における HAZ の低減には，ウォーターアシストによるサンプルの冷却が効果的である．しかし，CO_2 レーザー光は水に吸収されるため従来のウォーターアシストは適切ではない．そこで CO_2 レーザーに適応可能な新しいウォーターアシストが先行研究にて提案された[1]．提案方法では，サンプルを水面上に設置することで，貫通穴形成後に水面に照射されたレーザーパルスによって生じる水蒸気により後続のレーザーパルスが吸収され，HAZ の拡大の低減が期待できる．ポリイミド（PI）フィルムを用いた CO_2 レーザーによる穴あけ加工において，HAZ の大幅な拡大の低減が報告された．

本研究では，CO_2 レーザー加工における新規ウォーターアシストのさらなる効果検証を目的として，フッ素樹脂（PTFE）フィルムとポリカーボネート（PC）フィルムの穴あけ加工の調査を実施した．

2. 実験装置

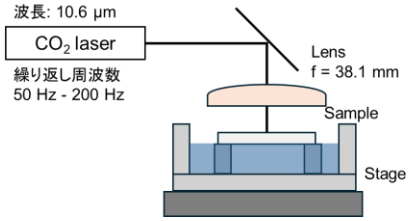


図 1. 実験装置

本研究では，波長 10.6 μm の短パルス CO_2 レーザーにより，厚さ 50 μm - 300 μm の PTFE フィルムと厚さ 100 μm - 300 μm の PC フィルムの穴あけ加工が調査された．図 1 は実験装置を示す．集光レンズは焦点距離 38.1 mm であり，レンズの焦点位置はサンプル表面に固定された．サンプルは水上に設置された．照射径は 525 μm であり，1 パルス当たりのフルエンスは 17.5 J/cm^2 であった．図 2 はレーザーパルス形状を示す.パルス形状は尖頭パルス幅 152 ns，パルステール長 69.9 μs，尖頭パルスとパルステールのエネルギー比 1:47.9 のテール付き短パルスであった．

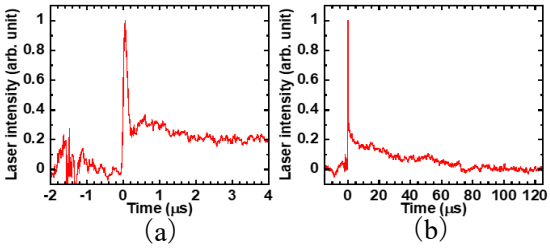


図 2. レーザーパルス形状．（a）尖頭パルスの拡大図，（b）全体図

3. 実験結果

図 3 は厚さ 100 μm の PTFE フィルムにおける加工写真と加工特性を示す．新規ウォーターアシスト加工法により HAZ は低減された．総照射フルエンス約 3500 J/cm^2 における照射径に対する HAZ 径の比は，アシスト無しでは 230%であり，アシスト有りでは 153%であった．

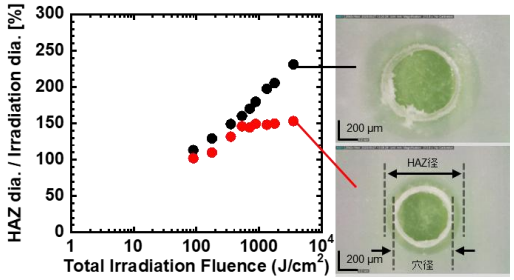


図 3. 厚さ 100 μm の PTFE における加工写真と加工特性．黒丸がアシスト無，赤丸がアシスト有の効果をそれぞれ示す．

4. 参考文献

[1] 大川亮，宇野和行，一般社団法人レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会，P01-22p-P-21, 2024 年 1 月．

© 2025年 応用物理学会

ArF エキシマレーザーを用いた撥水性を有するシリコーンナノ膜の形成

Formation of Hydrophobic Silicone Nanofilms Using ArF Excimer Laser

防衛大 電気電子 ○渋田　好美，大越 昌幸

National Defense Academy, ○Yoshimi Shibuta, Masayuki Okoshi

E-mail: ed25002@nda.ac.jp

1. 序論　シロキサン結合を主鎖とする高分子化合物であるシリコーンは、耐熱性、耐寒性、耐薬品性、電気絶縁性、光学的透明性、ガス透過性など種々の優れた特性を示す。そのため、シリコーンの用途は多岐にわたる。これまでわれわれは、波長 193 nm の ArF エキシマレーザーを用い、シリコーンゴムの主鎖構造（Si-O-Si 結合）を光開裂し、低分子量化による体積膨張により、ミクロンサイズの周期的な微細隆起構造を光化学的に形成できることを示してきた[1]。今回は、前記手法を基に、シリコーンゴムの光開裂により生成する低分子量シリコーンを大気中で光脱離させ、対向基板上にナノ膜として形成する新たな光化学的プロセスを実証するに至ったので報告する。

2. 実験方法　厚さ 525 μm、大きさ約 12×15 mm^2 の合成石英ガラス基板を、厚さ 1 mm のスライドガラスで作製したスペーサを介して、厚さ 2 mm で基板と同サイズのシリコーンゴムターゲットと対向させた。その後 ArF エキシマレーザーを、レンズを介してゆるやかに集光し合成石英ガラス基板側からシリコーンゴムターゲットに照射した。そのときのパルスエネルギーは 25 mJ、パルス繰り返し周波数は 1 Hz、照射時間 30 min（照射パルス数 1800）とした。レーザー照射後、合成石英ガラス基板は、光学顕微鏡および原子間力顕微鏡により観察した。また、基板上の形成膜の化学結合状態を調べるために、赤外分光分析および X 線光電子分光分析を行った。さらに、形成膜の撥水性を水との接触角測定から調べた。

3. 結果　ArF エキシマレーザー照射後の合成石英ガラス基板表面の写真と、光学顕微鏡写真を Fig. 1 に示す。目視において白色の堆積物が確認された（Fig. 1(a)）。また光学顕微鏡観察から、粗さを有する膜形成が認められた（Fig. 1(b)）。形成膜の水との接触角を測定したところ、Fig. 2 に示すように 90° となり、撥水性の発現が認められた。

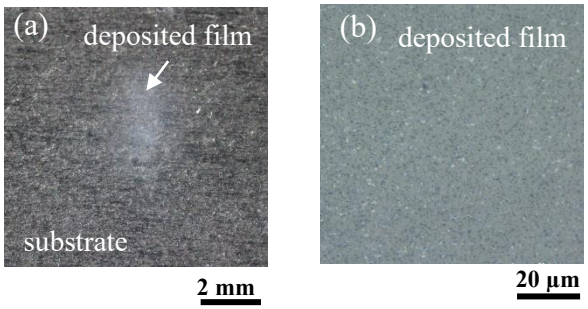


Fig.1 Photograph (a) and optical micrograph (b) of the deposited film on synthetic fused silica glass.

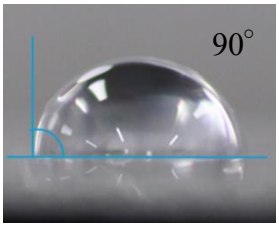


Fig.2 Measurement of contact angle of water on the deposited film on synthetic fused silica glass.

参考文献

[1] K. Iwasaki, M. Okoshi: Mater. Chem. Phys. 318 (2024) 129321.

© 2025年 応用物理学会

液中レーザーアブレーション法による Au/TiO_2 基板への白金助触媒の担持と水素生成特性の評価

Deposition of platinum co-catalyst on Au/TiO_2 substrates using laser ablation in liquid and evaluation of their hydrogen evolution performance

徳島大 pLED[1]，北大電子研[2] ○(M1)戸塚 航大[1]，伊藤 圭希[1]，片山 哲郎[1]，
コインカー パンカジ[1]，古部 昭広[1]，松尾 保孝[2]
Tokushima Univ.[1], Hokkaido Univ.[2], ○Koudai Totsuka[1] , Keiki Ito[1], Tetsuro Katayama[1],
Pankaj Koinkar[1], Akihiro Furube[1], Yasutaka Matsuo[2]
E-mail: c612536016@tokushima-u.ac.jp

近年、地球温暖化への対抗策としてソーラー水素技術が注目されており、その鍵となるのは光触媒である。しかし問題点として可視･近赤外光の活用が難しく、その解決策として金属ナノ粒子のプラズモン共鳴吸収を利用したプラズモン増感反応が注目されている。本研究では、金ナノ粒子のプラズモン増感反応により酸化チタン(TiO_2)内に生成された伝導電子を、液中レーザーアブレーション法によって作製した白金(Pt) 助触媒によって水分解反応に導き、水素を生成する Au/TiO_2/Pt 基板の作製と評価を行った。

塩化金酸の還元法により金コロイド溶液を調製し、ガラス基板に金ナノ粒子を担持し、その上に酸化チタンを原子体積法により製膜した。その基板表面に液中レーザーアブレーションによって白金粒子を堆積させ、Au/TiO_2/Pt 基板を作製した。動的光散乱法、走査電子顕微鏡(SEM)、エネルギー分散型 X 線分光法(EDS)、紫外･可視吸収分光法で試料の構造、組成、光学特性に関する解析を行った。さらにガスクロマトグラフィで可視光照射下での水素生成量評価を行った。

Fig. 1 は白金を水中でレーザーアブレーションし、得られる白金粒子の粒径サイズの分布を DLS で測定したデータであり、最小粒径は約 10 nm であり、また約 100 nm 以下の白金粒子が全体の半分を占めることが分かる。Fig. 2 は SEM-EDS 解析を行い、白金粒子が基板表面にどれだけ存在するかを示している。PtLl 線と PtLa 線が検出され少量ではあるが白金の付着を確認できた。水素生成量評価では 1 時間の可視光照射で約 539 ppb の水素濃度増加が確認できた。

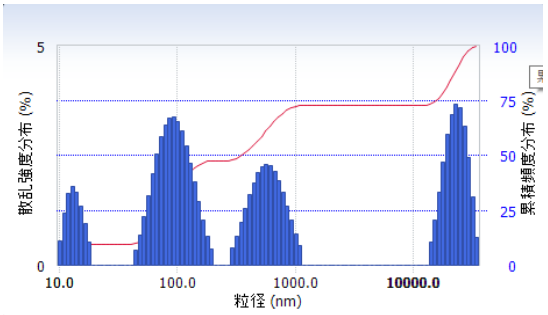


Fig. 1 Platinum particle size distribution

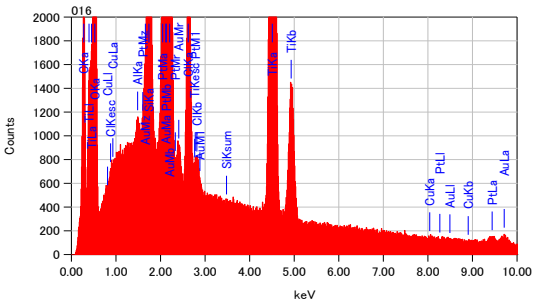


Fig. 2 Elemental analysis of substrate surface

© 2025年 応用物理学会

Efficient Generation of an Annular-Shaped Radially Polarized Beam for Laser Nano Processing of a Dielectric Surface

IMRAM, Tohoku Univ.[1], Grad. Sch. of Eng., Tohoku Univ.[2] °Wenqi Wang[1,2], Yuuki Uesugi[1], and Yuichi Kozawa[1]

E-mail: wang.wenqi.q7@dc.tohoku.ac.jp

A radially polarized beam has a superior ability to produce a small focal spot compared to conventional, linearly or circularly polarized beams, which has the potential to improve the spatial resolution in ultrafast laser processing. This property stems from the generation of the longitudinal electric field under high numerical aperture (NA) conditions [1]. However, the presence of material interfaces generally diminishes the longitudinal field because of the boundary condition [2]. The introduction of an annular amplitude mask for a radially polarized beam, which masks the low NA components, is a common approach to enhance the longitudinal electric field at the focus [3]. However, the thinner annular width suffers from a significant reduction in light use efficiency of the mask, limiting the usability of the annular mask in laser processing. Here, we propose a novel beam shaping technique that can efficiently generate a thin annular-shaped radially polarized beam, suitable for laser nano-processing.

A thin annular-shaped beam with a wavelength of 1040 nm and a pulse width of ~300 fs was generated using a spatial light modulator (SLM). We employed a double-path scheme for the SLM, where the phase pattern displayed on the SLM was divided into two regions acting as an annular beam shaper (first region) and an additional annular amplitude mask (second region), respectively. The first region converts an incident Gaussian beam into an annular-shaped beam by displaying a phase pattern corresponding to an Axicon with a Fresnel lens. By adding an annular mask, the second region refines the numerical aperture range to achieve a cleaner and more well-defined annular beam. Subsequently, a radially polarized beam was produced by passing the linearly polarized beam through a 12-segmented half-waveplate. A single pulse of the converted beam was focused on a quartz surface to examine the capability of laser ablation by an objective lens with NA = 0.95.

By observing the generated ablation craters by scanning electron microscope analysis, an ablation crater with a size of about 100 nm was demonstrated by employing the annular-shaped radially polarized beam (Fig. 1). We confirmed that the efficiency of generating an annular-shaped beam was improved by a factor of 4-5 times using the proposed beam-shaping technique.

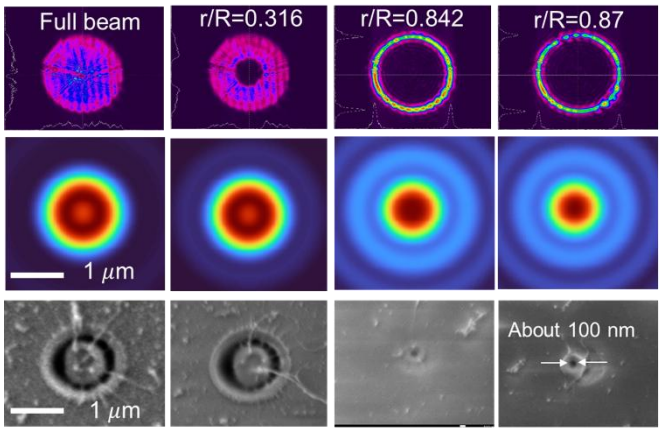


Fig. 1. The top images show the intensity distribution of the incident annular-shaped beams with different annular mask ratios; the middle shows the calculated focal spot pattern at the focus; and the bottom shows the SEM images of the ablated craters fabricated on a quartz surface.

References

[1] K. S. Youngworth and T. G. Brown, Opt. Express, **7**, 77 (2000).
[2] Y. Tsuru *et al*., Opt. Lett., **49**, 1405 (2024).
[3] S. Quabis *et al*., Opt. Commun., **179**, 1 (2000).

© 2025年 応用物理学会

ヘキサン中での超短パルスレーザー照射による金属表面炭化

Surface carbonization of metal by ultrashort pulse laser irradiation in hexane

名古屋工業大学,

○(M1)松下 修弥, 吉永 孟史, 浅香 透, 劉 暁旭, 前川 覚, 樋口 和夫,

糸魚川 文広, 小野 晋吾

Nagoya Institute of Technology, ○Shuya Matsushita, Takeshi Yoshinaga, Toru Asaka, Xiaou Liu,

Satoru Maegawa, Kazuo Higuchi, Fumihiro Itoigawa, Shingo Ono

E-mail: s.mathushita.019@stn.nitech.ac.jp

1. はじめに

炭化物は高強度，耐熱性・耐摩耗性に優れていることから構造材料として高温環境下での応用がされている。また，MoC のような遷移金属の炭化物は高い触媒能力を示すことから貴金属触媒の代替材料として期待されている。既存の炭化物の合成手法としては CVD 法や熱炭素還元法が一般的である。しかしこれらの手法では装置が複雑であることや工程が長くなる問題があり，より単純な作製手法が必要とされている。そこで本研究では、ヘキサン中での金属基板表面への超短パルスレーザー照射による、より単純な炭化物合成手法の開発のため、照射後の金属基板表面について各種評価を行った結果について報告する。

2. 実験方法

ヘキサンで満たされたシャーレに Mo 板を浸し，そこへフェムト秒レーザーパルス(波長:1030 nm，パルス幅:700 fs，繰り返し周波数:100 kHz)をパルスエネルギー2.5, 5, 10, 30μJ で集光照射し、ガルバノミラーを用いレーザーを走査することで 2mm 角の範囲に照射を行った。酸化物の生成を抑制するために液相には酸素の含まれていないヘキサンを用いている。

3. 実験結果及び考察

まずレーザー照射領域を SEM によって観察した。加工閾値を超えたパワーでは照射部にナノ周期構造の形成が確認された。次にパルスエネルギー30μJ において、レーザー照射後の試料断面を撮影した像を Fig. 1 に示す。試料表面に厚さ約 300～500nm 程度の改質層の形成が確認された。TEM 像の改質層(1)では MoC，改質層(2)では Mo_2C に該当する回折パターンが確認された。試料内部にいくにつれて炭素割合が減少し、組成が異なる炭化物が形成されたと考えられる。

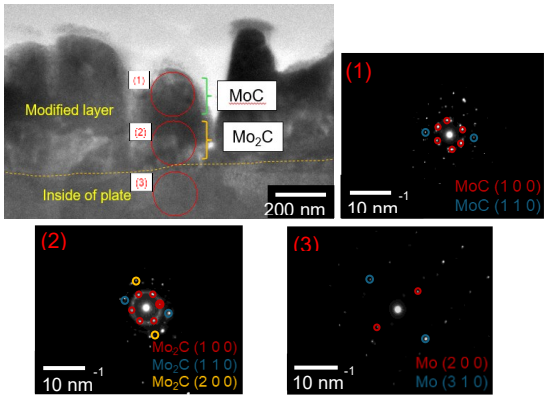


Fig. 1 TEM image of an irradiated Mo plate and electron diffraction image

さらに、レーザー照射面の化学結合状態を分析するために、XPS によって測定した結果を Fig. 2(a)に示す。C 1s スペクトルから、C-Mo 結合由来のピークを確認することができた。また、C1s 軌道の各結合状態の存在比率及びその合計の割合を Fig. 2(b)に示す。照射面のレーザーによるプラズマ発生により、表面の炭素割合が顕著に増加したことが確認できる。また、パワー増加に伴い C-C 結合割合が増加する一方 C-Mo 結合割合は 10μJ まで増加し 30μJ では減少した。これは表面の Mo に対しての炭素供給量が多くなったためと考えられる。

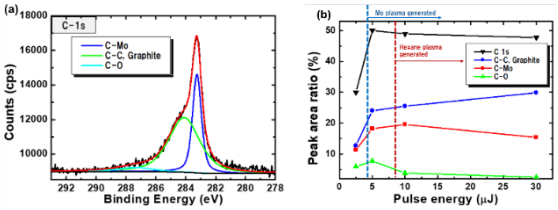


Fig. 2 (a) XPS spectra of the laser-irradiated area (pulse energy 30μJ)
(b) Existence ratio of each bonded state of C1s orbitals for each irradiation pulse energy

© 2025年 応用物理学会

フェムト秒レーザー二光子バブルプリントにおけるガスジェット放出

Bubble jet ejection in two-photon bubble printing

山形大院理工 [1] ○鈴木 紗和 [1]，青山 昌央 [1]，西山 宏昭 [1]

Yamagata Univ. [1], ○Sawa Suzuki [1], Masaharu Aoyama [1], Hiroaki Nishiyama [1]

E-mail: nishiyama@yz.yamagata-u.ac.jp

レーザー直接描画プロセスは，シンプルかつフレキシブルなマイクロ造形手法であり，集光部で生じる光重合や溶融，焼結などを経てマイクロパターンが形成される．有用な手法ではあるが光加工であるため，その適用は適切な光吸収と反応経路を有する感光性材料に限定されてきた．一方，我々は，これまでに集光部での二光子還元反応を起点としたバブル生成とそのナノ粒子の集積固化プロセスである二光子バブルプリントへの応用に取り組んできた[1-3]．同プロセスは感光性に関わらず，高透過性や導電性材料，半導体，生体親和性材料，量子ドットなど多様な機能性材料群での連続的なマイクロパターン描画が可能である．

本研究では，レーザー集光部で生じるマイクロバブルから放出される微小なガスバブルの特性とそのレーザー描画に与える影響について報告する．

光源として，中心波長 780 nm，パルス幅 130 fs のフェムト秒レーザーパルスを対物レンズで集光走査した．図 1 は，レーザー集光部近傍の溶液を側方から観察した像である．ガラス基板が画面上部にあり基板の下側は溶液と接している．レーザー光はガラス基板越しに上方から集光され，集光部は画面の左から右へと走査されている．集光部にはレーザー照射で蒸気バブルが生じているが，それに加えて微小バブルがジェット状に噴出されていた．この現象はレーザー走査速度に連動していた．このバブルジェットの発生機構と粒子集積固化に与える影響の詳細について報告する．

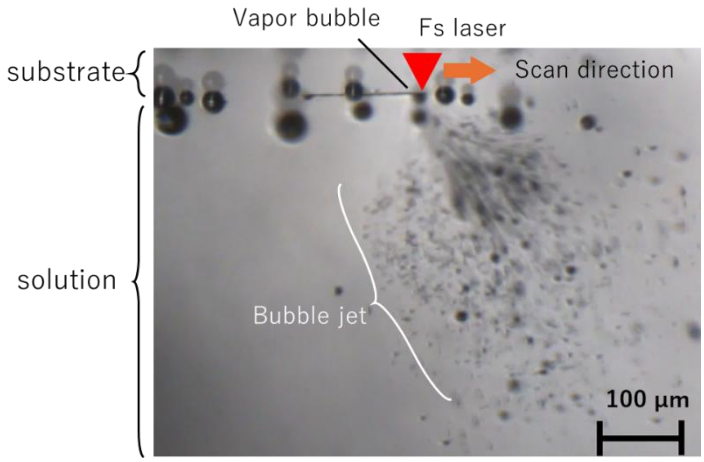


Fig.1 Frontal view around the laser focus in two-photon bubble printing.

[1] H. Nishiyama, et al., Scientific Reports, 9 (2019) 14310.

[2] H. Nishiyama, et al., Optical Materials Express, 14 (2024) 216.

[3] ChemRxiv 10.26434/chemrxiv-2025-34kg0

© 2025年 応用物理学会

レーザー誘起前方転写におけるレオロジー特性の効果

Rheological influence of donor materials on laser-induced forward transfer process

北大院工[1]，北大電子研[2]

○(M1) 小出 照瑛[1]，(D) 爲本 龍汰[1]，山根 啓作[1]，折原 宏[2]，戸田 泰則[1]，森田 隆二[1]

Hokkaido Univ.[1] RIES-Hokkaido Univ.[2] ,

○S.Koide[1], R.Tamemoto[1], K.Yamane[1], H.Orihara[2], Y.Toda[1], R.Morita[1]

E-mail: koide.shiyouei.x2@elms.hokudai.ac.jp

レーザー誘起前方転写法（Laser-Induced Forward Transfer, LIFT）は、高粘性物質のみならず固体材料など幅広い物質のパターニングが可能な技術として注目されている[1]。LIFT ではナノ秒～マイクロ秒域でキャビテーションバブルが生じ、そのバブルの時間発展に伴う圧力変化等によってジェットが形成されることで、ドナー物質が吐出され、レシーバー基板への転写が行われる。LIFT によるパターニングはバブルの時間発展に伴う流体力学的過程に依存するため、ドナー物質のレオロジー特性の影響を強く受けることが報告されている[2]。しかしながら、レオロジー特性が LIFT に及ぼす影響についての系統的な調査は未だ十分になされていないのが現状である。

そこで我々は、レオロジー特性の中でもニュートン流体/非ニュートン流体・粘度・粘弾性の 3 点に注目し、それらがジェット及びバブルの時間発展に与える影響について比較検証を行った。現象の観測には、バブルとジェットをマルチフレームで同時観測できる装置[3]を使用し、LIFT 光として光渦パルス(パルス幅: 130 ps, 中心波長: 800 nm, トポロジカルチャージ: ℓ= 2)を照射した(Fig.1_A)。本研究では、水で 80%に希釈したグリセリン溶液を基準として、増粘剤を添加することで、ドナー材料のレオロジー特性を調整した。これらに吸収体として黒ナノインクを 30 倍希釈で加え、スライドガラス上に薄膜化(厚み約 40 μm)したものをドナーとして使用した。これらレオロジー特性の異なるドナー薄膜に対して LIFT 光を照射し、発生したバブル直径の時間発展を観測した結果を Fig.1(B),(C)に示す。その結果、非ニュートン流体(Fig.1_C)ではニュートン流体(Fig.1_B)に比べ、バブルの成長の早期飽和とより短いジェットの飛翔が確認された。また、これらの特徴は非線形粘性挙動を増大させるほど顕著になることを確認した。現在は、これらレオロジー特性が LIFT に与える影響について更に詳細な調査を進めるとともに、吸収体の違いがバブル及びジェットに与える影響についても検証を進めている。詳細は講演で報告する。

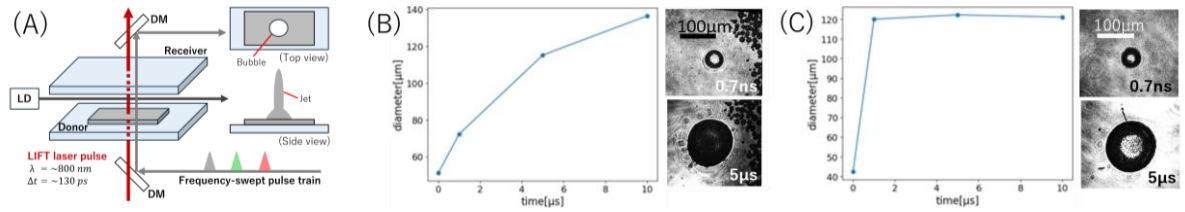


Fig.1: (A) Diagram of a multi-frame high-speed imaging system using frequency-swept pulse train. Time dependences of measured diameters of cavitation bubbles generated in donor films (B) without viscosity increaser and (C) with 0.821 % xanthan gum. Insets show the corresponding snapshot images.

References:
1) P. Serra and A. Piqué, Adv. Mater. Technol. 4, 1800099 (2019).
2) J.J. Moreno-Labella et al., Materials 14, 5567 (2021).
3) 爲本他,第 70 回春季学術講演会講演予稿集 17p-A501-2(2023).

© 2025年 応用物理学会

マルチパルス液相光渦加工におけるプラズモニック電場増強の効果

Effect of plasmonic electric field enhancement in optical vortex laser ablation in liquid

核融合研[1]，総研大[2]，名工大[3]，理研 光量子[4]，横浜国立大[5]，◦川口 晴生[1,2]，安原 亮[1,2]，
宮川 鈴衣奈[1,3]，杉岡 幸次[4]，西島 喜明[5]，太田 雅人[1,2]，上原 日和[1,2]

NIFS[1], SOKENDAI[2], Nagoya Institute of Technology[3], RIKEN RAP[4], ◦Haruki Kawaguchi[1,2],
Ryo Yasuhara[1,2], Reina Miyagawa[3], Koji Sugioka[4], Yoshiaki Nishijima[5], Masato Ota[1,2],
and Hiyori Uehara[1,2]

E-mail: kawaguchi.haruki@nifs.ac.jp

液相レーザーアブレーションによる表面微細加工では、レーザー照射時に発生する流体運動がレーザー加工現象と相互作用することで、従来の常識を打ち破る複雑な構造形成が可能となる[1]。我々は螺旋状の波面を持つ光渦[2]による液相レーザーアブレーション加工を提案し、偏光方向依存性を持つ非対称マイクロボウタイ構造の作成に成功した。この非対称構造化現象は光の空間構造に立脚した新しい物理現象であると同時に、構造制御を確立できれば、レーザー表面微細加工の新たな自由度として材料の表面特性制御の高度化が期待できる。

本研究では液相マルチパルスフェムト秒光渦レーザー加工によるマイクロボウタイ構造形成の原理解明のため、加工初期過程の調査を行った。フェムト秒レーザーシステム(λ:520 nm、τ:420 fs)を螺旋位相板により直線偏光 1 次光渦に変換し、対物レンズ(NA 0.6)の集光点で水中の純タングステン基板表面の定点加工を行ったところ、照射パルス数 N=1000 で図(a)のようなマイクロボウタイ構造が形成された。このとき低照射パルス数 N=100 による初期構造は、図(b)に示すように対称な円錐構造であった。つまり、マイクロ構造の非対称性はパルス照射の重畳によって徐々に成長することを見出した。ここで、x-偏光平面波を入射した際の初期構造近傍における$|E|^2$分布を計算したところ、x 方向でのみマイクロ構造表面に局在電場が観測された。このマイクロ構造表面の非対称な電場増強が、偏光方向に加熱、及び蒸気バブル発生を偏析させることで、照射光は偏光方向でのみバブルによる阻害を受けて加工速度に非対称性が発生したと考えられる。詳細は当日報告するが、これらの結果は、液相光渦加工ではプラズモニックな電場局在効果がレーザー微細加工における構造制御に活用できる可能性を示している。

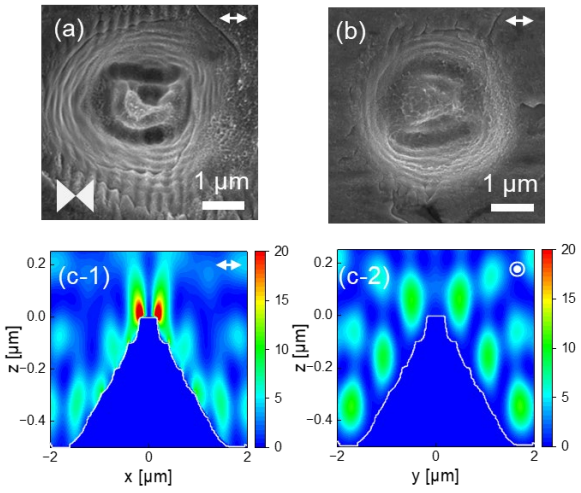


図 (a)液相光渦アブレーション加工によるマイクロボウタイ構造(N=1000)、(b)初期構造(N=100)、(c)初期構造近傍における (c-1)x-z 断面、(c-2)y-z 断面での$|E|^2$分布(a.u.)

[1] D. Zhang, et. al., Opto-Electronic Adv. 5(2), (2022).
[2] L. Allen, et. al., Phys. Rev. A 45(11), 8185–8189 (1992).

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.6 Laser processing

[8a-N221-1~12] 3.6 Laser processing

[8a-N221-1]

Construction of an Optical System and Reflectance Rate Imaging Diagnostics for Elucidating the Femtosecond Laser Ablation Process on borosilicate glass

○Hiroki Nakako[1], Takuro Tomita[1] (1.Tokushima Univ.)

[8a-N221-2]

Single-shot measurement of electron temperature during femtosecond laser irradiation

○Tomohiro Fukui[1], Qinru Zheng[1], Seitaro Kumo[1], Nobuhiro Kaku[1], Yuta Teshima[1], Junya Hattori[1], Yanming Zhang[1], Yusuke Ito[1] (1.Univ. Tokyo)

[8a-N221-3]

Interferometric observation of femtosecond laser-induced secondary nucleation of urea crystal

○Yuka Tsuri[1,2], Mihoko Maruyama[3], Katsuo Tsukamoto[4], Hiroshi Yoshikawa[3], Yoichiroh Hosokawa[1,2] (1.Div. Mat. Sci., NAIST, 2.MLC, NAIST, 3.Grad. Sch. Eng., Osaka Univ., 4.Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.)

[8a-N221-4]

Influence of optical absorption patterns in Laser-Induced Forward Transfer

○Ryota Tamemoto[1], Shoei Koide[1], Keisaku Yamane[1], Yasunori Toda[1], Ryuji Morita[1] (1.HokkaidoUniv.)

[8a-N221-5]

Ultra-high aspect ratio direct hole drilling of glass substrates by a single-shot GHz burst mode ultrafast laser Bessel pulses

○Yuhei Miyahara[1,2], Genichi Kimiduka[1,2], Motoki Tanaka[1], Ryosuke Yaginuma[1,2], Shota Kawabata[2,3], Kotaro Obata[2], Toshinori Okada[1], Koji Sugioka[2] (1.Enplas Laboratories, 2.RIKEN Center for Advanced Photonics, 3.Tokyo Univ. of Agri. and Tech.)

[8a-N221-6]

Enhancement of Piezoelectric Properties by Laser Microfabrication

○Hiumi Terashima[1], Jundong Song[2,3], Naoki Shibao[2], Shingo Ono[1], Takashi Harumoto[3], Ji Shi[3], Takashi Nakajima[2], Soichiro Okamura[2] (1.Nagoya Tech, 2.Tokyo Univ. of Sci., 3.Science Tokyo)

[8a-N221-7]

Fabrication and characterization of onion-like carbon-encapsulated SiC nanoparticles by laser ablation

○Aoi Yokota[1], Kensuke Miyajima[1] (1.Tokyo Univ. of Sci.)

[8a-N221-8]

Preparation of Eu doped Strontium Aluminate Green Phosphor Microparticles by Laser Ablation in Liquid

○Yuto Takashima[1], Toshihiro Nakamura[1] (1.Hosei Univ.)

[8a-N221-9]

Effects of Photothermal Materials for Laser-induced Graphene Formation on Polyimide

○Masaki Teramoto[1], Do Hoon Lee[1], Kuniharu Takei[1] (1.Hokkaido Univ.)

[8a-N221-10]

Continuous laser writing of Au nanorod/SiO_2 aggregates by laser-excited microbubble

○Yuta Nakagawa[1], Yuki Sarai[1], Hiroaki Nishiyama[1] (1.Grad. Yamagata Univ.)

[8a-N221-11]

Stability of femtosecond laser two-photon excited microbubble

○Haruto Kumagai[1], Masaharu Aoyama[1], Sawa Suzuki[1], Kai Suzuki[2], Hiroaki Nishiyama[1] (1.Grad. Yamagata Univ., 2.Yamagata Univ.)

[8a-N221-12]

Change in crystallinity of PEEK Induced by Sub-Threshold Ultrashort Pulse Laser Irradiation

○Miyu Takahashi[1], Keisuke Takabayashi[2], Tsubasa Endo[2], Yohei Kobayashi[2], Takuro Tomita[3], Makoto Yamaguchi[1] (1.Akita Univ., 2.ISSP, Univ. Tokyo, 3.Tokushima Univ.)

ホウケイ酸ガラスにおけるフェムト秒レーザーアブレーション過程の解明に向けた光学系の構築と反射率イメージング計測

Construction of an Optical System and Reflectance Imaging for Elucidating the Femtosecond Laser Ablation Process on Borosilicate Glass

徳島大院　○仲子 宙輝，富田 卓朗

Tokushima Univ. ○Hiroki Nakako, Takuro Tomita

Email : nakako@ee.tokushima-u.ac.jp

フェムト秒レーザーアブレーションによる材料表面加工は材料に対して熱的影響を与えずに加工することができ、微細加工技術として様々な分野において注目されている。一方で、ホウケイ酸ガラスは高い化学的安定性や優れた耐熱性、光学特性により幅広い製品に利用されているが、微細加工が難しいという課題もある。現在は、フェムト秒レーザー加工などによるホウケイ酸ガラスの高精度加工技術の実用化・高度化が期待されている。しかしながら、フェムト秒レーザーアブレーションは微細かつ高速で不可逆な現象であるため、観測は非常に困難である。そのためフェムト秒レーザーアブレーションの科学的メカニズムは十分に解明されているとは言えず、詳細な制御を行うことができないというのが現状である。金属におけるアブレーション時の加工形状が入射ビームの強度プロファイルに依存することが報告されているが[1]、透明材料における表面形状の遷移過程は明らかになっていない。ホウケイ酸ガラス微細加工の高度化を目指すためにも、アブレーションの時間分解実験を行い現象に関する知見を得ることは重要である。

本研究では、ホウケイ酸ガラスに対してパルス幅 130 fs, 波長 800 nm の十分に集光したフェムト秒レーザーを照射し、材料表面の時間変化を観測した。観測光には非線形光学結晶によって発生させた波長 400 nm の第 2 高調波を使用することで、十分な時間分解能で観測することに成功した。実験によって材料表面におけるアブレーション時の反射率の変化を確認できた。講演では表面形状の遷移過程について議論する。

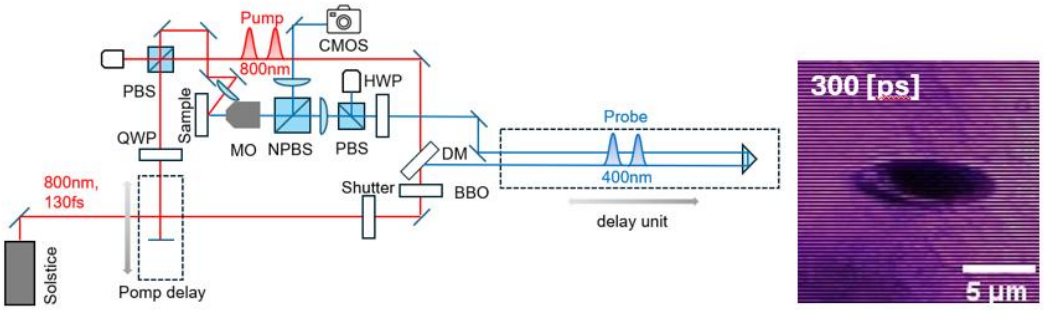


Fig1. Constructed experimental Pump-Probe Set up (Left),

Results of reflectance measurements on borosilicate glass; after 300 ps (Right)

参考文献

[1] N. Kakimoto et.al, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, Vol.11, No.1, 91-94, 2016

© 2025年 応用物理学会

フェムト秒レーザ照射時の電子温度のシングルショット計測

Single-shot measurement of electron temperature during femtosecond laser irradiation

東大院工 [1] ○福井 智大 [1]，鄭 勤如 [1]，雲 誠太朗 [1]，郭 展熙 [1]，手嶋 勇太 [1]，
服部 隼也 [1]，張 艷明 [1]，伊藤 佑介 [1]

Univ. Tokyo [1], ○Tomohiro Fukui[1], Qinru Zheng[1], Seitaro Kumo[1], Nobuhiro Kaku[1], Yuta Teshima[1],
Junya Hattori[1], Yanming Zhang[1], Yusuke Ito[1],
E-mail: fukutom-ut397@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

ガラス，ダイヤモンド，サファイアなどの透明硬脆材料は，その優れた物理的特性により様々な応用先が存在する．特にマイクロ流路や光導波路などでは微細かつ精密な加工が要求される．フェムト秒レーザは焦点付近を局所的に加工できることから微細加工ツールとして注目されており，様々な加工方法が開発されている[1, 2]． フェムト秒レーザを用いた技術の開発を推し進めるには，レーザと最初に相互作用する電子の超高速過渡現象を捉えることが重要である．しかし，ノイズや散乱の影響により電子の挙動を正確に予測・計測することは困難である．

本研究では，透明材料にフェムト秒レーザを照射したときの電子励起と温度変化を高精度に測定する手法を提案・開発し，電子温度の時間変化を高時間分解能で追跡した．設計・実装した光学系を Fig. 1(a)に示す．第二高調波発生と回折光学素子（DOE）による像の複製を利用し，透過型ポンププローブ法（PP）とマッハ・ツェンダー干渉計（MZ）による 2 波長での測定をシングルショットで行う．この光学系を用いて撮影した，ポンプ光照射後 1 ps のフィラメント状の電子励起の画像を Fig. 1(b)に示す．これら 3 種類のデータから材料の吸収係数と屈折率を抽出し，ドルーデ・ローレンツモデル，フェルミ・ディラック分布関数および状態密度関数によって求めた電子温度分布を Fig. 1(c)に示す．また，ポンプ光とプローブ光の遅延時間を変えて追跡したフィラメント近傍の電子温度の時間変化を Fig. 1(d)に示す. 電子温度は数 ps で 18,000 K のピークに達し、10 ps 後には 10,000 K まで緩和した．以上により，ノイズと散乱の影響を低減した電子温度計測を実現した．

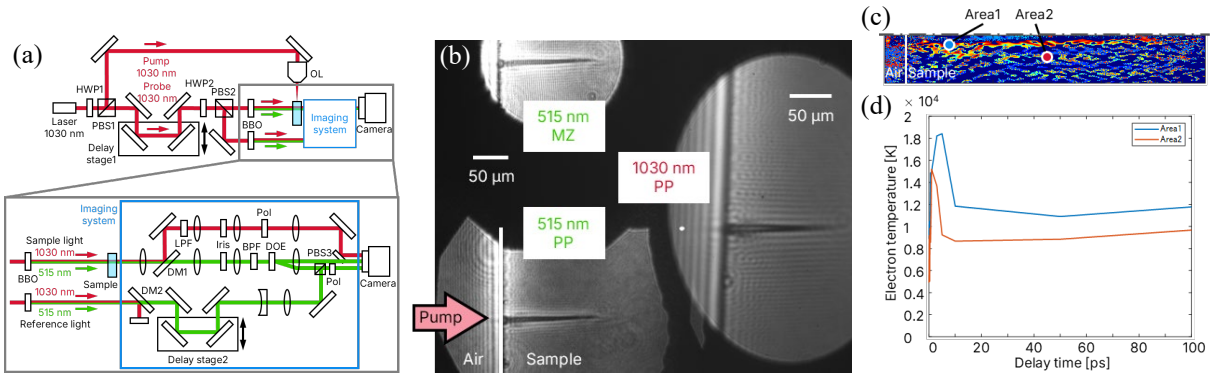


Fig. 1 (a) Experimental setup of single-shot imaging system. (b) Image taken using the single-shot system: transmission pump-probe method (PP) and Mach-Zehnder interferometry (MZ). (c) Electron temperature distribution calculated from Fig. 1(b). (d) Time evolution of the electron temperature.

[1] Y. Ito, et al., Commun. Phys., 3, 1-6 (2020).
[2] C. Kerse, et al., Nature, 537, 84-88 (2016).

© 2025年 応用物理学会

尿素結晶のフェムト秒レーザー誘起二次核形成の干渉観測

Interferometric observation of femtosecond laser-induced secondary nucleation of urea crystal

奈良先端大物質[1]，奈良先端大メディルクス[2]，阪大院工[3]，東北大院理[4]
○釣 優香[1,2]，丸山 美帆子[3]，塚本 勝男[4]，吉川 洋史[3]，細川 陽一郎[1,2]
Div. Mat. Sci., NAIST[1], MLC, NAIST[2], Grad. Sch. Eng., Osaka Univ.[3], Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.[4]
○Y. Tsuri[1,2], M. Maruyama[3], K. Tsukamoto[4], H.Y. Yoshikawa[3], Y. Hosokawa[1,2]
E-mail: tsuri.yuka@ms.nasit.jp

レーザーを用いた結晶化は、時空間的に結晶核形成や結晶成長を制御できる技術として期待されている。我々はフェムト秒レーザーを過飽和溶液や結晶に集光照射し、タンパク質や有機化合物の結晶化制御を実現してきた。例えば、過飽和溶液中の尿素結晶にフェムト秒レーザーを照射すると、破壊された微小な結晶片が溶液中に飛散し、二次的な核形成を誘導することができる[1]。本研究では、このようなレーザーが誘導する尿素の二次核形成に対して、干渉計を用いた高速度観察を行い、結晶化現象に伴う濃度変化の観測に取り組んだ。

He-Ne レーザーを光源としたマッハ・ツェンダー型干渉計を用いた。ビームスプリッターを通して参照光と試料光に分割し、試料光はガラスキュベット（1 mm）に導入した。ガラスキュベットには過飽和尿素水溶液（1.3 mg in 1 mL H_2O）を分注し、自然核形成した尿素結晶を準備した。結晶に焦点を合わせて透過干渉像を観察するために、参照光及び試料光はそれぞれ対物レンズ（10×, NA = 0.25）に導入した後ビームスプリッターを通して干渉縞を形成し、凸レンズで高速度カメラ（1,000 fps）に結像した。また、試料光と同一光路上で LED 照明光とロングパスフィルターを用いて、同時に CMOS カメラで透過像の観察を行った。Ti:Sapphire フェムト秒レーザー（800 nm, 80 μJ/pulse, 100 fs）は対物レンズ（10×, NA = 0.25）を通して、試料光に対して垂直方向から単一パルスを結晶表面に集光照射した。Fig. 1(a)に示すように、レーザー照射によって破壊された結晶片が集光点から数百 μm の位置まで飛散した後成長した。Fig. 1(b)に高速度観察された透過干渉像を示す。レーザー照射後 1 ms で干渉縞が大きく歪む様子が観察された。この縞の歪みは結晶片が観察された位置で生じていることから、飛散した微小な結晶片の成長に伴う濃度減少を示唆している。縞の歪み量から濃度変化を評価すると、元の溶液に対して 0.7%程度の濃度減少が急激に生じたと推定され、レーザーを用いた時空間的な結晶化制御によって、結晶化初期過程の高速度干渉観察が実現できた。

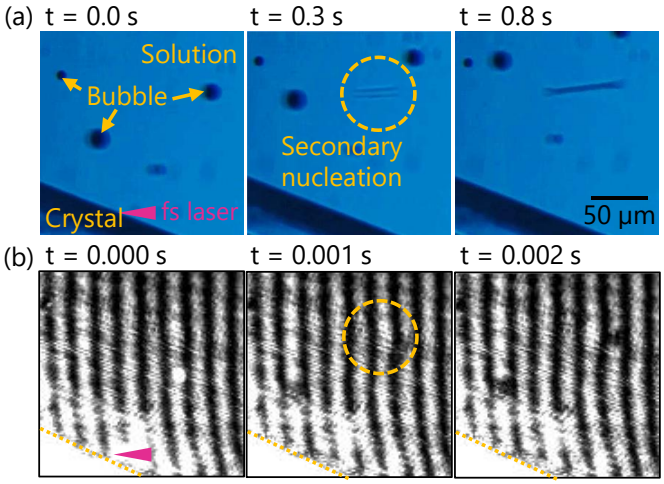


Fig. 1 (a) Transmission image of laser-induced secondary nucleation. (b) High-speed transmission interference image. fs laser was irradiated at t = 0 s.

[1] H.Y. Yoshikawa *et al.*, Cryst. Growth Des. **6**, 302 (2006).

© 2025年 応用物理学会

レーザー誘起前方転写における光吸収体の影響

Influence of optical absorption patterns in Laser-Induced Forward Transfer

北大院工[1]，○爲本 龍汰[1]，小出 照瑛[1]，山根 啓作[1]，戸田 泰則[1]，森田 隆二[1]

Hokkaido Univ.[1], ◦R. Tamemoto[1], S. Koide[1], K. Yamane[1], Y. Toda[1], R. Morita[1]

E-mail: ryota07091131@eis.hokudai.ac.jp

レーザー誘起前方転写法（Laser-Induced Forward Transfer, LIFT）[1]は、インクジェット方式では困難な高粘性材料や固体材料など、多様な物質のパターニングを可能にする非接触型転写技術である。一方、LIFT の転写挙動は使用するドナー材料の流体力学的・光学的特性に依存し、同一のレーザー照射条件でも材料により飛翔挙動が異なる[2]。これは、パルス光の照射により生成されるキャビテーションバブルの初期過程が、ドナー材料の特性によって変化するためと考えられるが、転写メカニズムの詳細は未だ十分に解明されていない。そのため、LIFT のプロセス制御やパターニング精度向上に向けて、バブル生成とその後の吐出のダイナミクスの理解が重要である。

本研究では、ドナー層の光吸収形態がバブルダイナミクスおよびジェット形成に与える影響を調査することを目的として、黒ナノインクを 5 %混合したグリセリン溶液（厚さ~ 40 µm）をドナー材料として用い、金蒸着ガラス（厚さ~300 nm）を吸収層として挟む場合と、吸収層を用いず直接光パルスを照射する場合を比較観察した。LIFT 光源には、パルス幅~130 ps、中心波長 800 nm の光渦（トポロジカルチャージ $\ell = 2$）を用い、0.6 ns から 10 µs までのバブルおよびドナー吐出の挙動を、上面および側面の二視点からのシングルショット観測により捉えた（Fig.1 (A),(B)）。

吸収層を用いた場合には、照射から数ナノ秒後にバブルが生成されて急速に膨張し、その後の収縮に伴いジェットが形成された。一方で、吸収層を用いない場合には、照射から数百ピコ秒で光強度分布に対応した微小なバブル群が形成され緩やかに膨張し、ジェット形成後も膨張を続けた（Fig.1 (C)）。これらの結果は、吸収層を介した場合には局所的な加熱により単一バブルの急速な膨張・収縮を通じてジェットが形成されるのに対し、吸収層がない場合にはナノインク粒子がレーザーのドーナツ状強度分布に沿ってバブル核生成の起点となり、分布に対応した微小なバブル群が同時に膨張することでドナーが押し出され、ジェット形成に至ることを示唆している。

現在、ドナー材料の種類を変えて観測を進めており、詳細は講演で報告する。

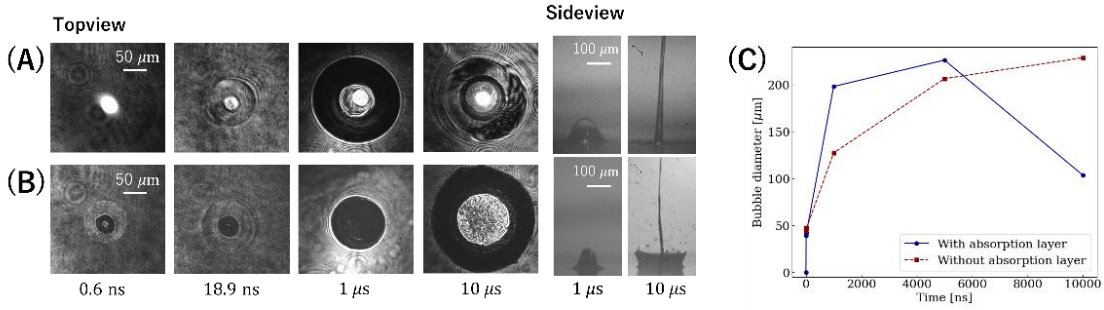


Fig.1: Time-resolved single-shot images of bubble dynamics and jet formation (A) with an absorption layer, and (B) without an absorption layer. (C) Temporal evolution of bubble diameter in both cases.

References:

1) J. Bohandy et al., Journal of Applied Physics 60 1538-1539 (1986).
2) C. Boutopoulos et al., Microfluidics and Nanofluidicss **16**, 493–500 (2014).

© 2025年 応用物理学会

シングルショット GHz バーストモード超短ベッセルパルスによるガラス基板の超高アスペクト比直接穴あけ加工

Ultra-high aspect ratio direct hole drilling of glass substrates by a single-shot GHz burst mode ultrafast laser Bessel pulses

エンプラス研究所 [1], 理研 光量子 [2], 東京農工大 [3] ○宮原 勇兵 [1,2], 君塚 元一 [1,2], 田中 源基 [1], 柳沼 涼祐 [1,2], 川端 祥太 [2,3], 小幡 孝太郎 [2], 岡田 俊範 [1], 杉岡 幸次 [2]

Enplas Laboratories[1], RIKEN Center for Advanced Photonics [2], Tokyo Univ. of Agri. and Tech.[3]

○Yuhei Miyahara[1,2], Genichi Kimiduka [1,2], Motoki Tanaka[1], Ryosuke Yaginuma[1,2], Shota Kawabata[2,3], Kotaro Obata[2], Toshinori Okada[1] and Koji Sugioka[2]

E-mail: yh-miyahara@enplas.com

近年、次世代半導体技術として注目されるガラス貫通電極 (Through Glass Via: TGV) の形成方法の開発が加速している。パルス間 (イントラパルス) の間隔が数百ピコ秒オーダーの超高繰り返しレーザーパルス列で構成される GHz バーストモード超短パルスレーザーとベッセルビームを組み合わせることにより、シングルショットで超高アスペクト比の直接穴あけ加工が可能なことが報告された[1]。しかし、詳細な加工条件や穴あけ加工メカニズムは不明であり、穴の周辺に発生するクラックも問題となっている。本研究では、高品質かつ高アスペクト比の直接穴あけ加工法を確立するため、ガラス基板に GHz バーストモードの様々な条件 (イントラパルス数、ピークパワー、強度分布) を系統的に変化させながら、詳細な加工特性を検討した。

実験は、GHz バーストモード超短パルスレーザー (中心波長 1030 nm、パルス幅 0.219 ~ 10 ps、イントラパルス間隔 205 ps (4.88 GHz)) をアキシコンレンズ (頂角 5°) と縮小光学系を用いてベッセルビームを整形し、厚さ 1.1 mm のホウケイ酸ガラス(D263Teco)に照射した。Fig. 1 に、(a) パルス幅 0.98 ps、イントラパルス数 P = 5、ほぼ均一なピークパワー約 40 MW のイントラパルスからなるバーストパルスをシングルショットで照射した試料と、(b) その試料をエタノールに浸漬し、エタノールが形成した穴の途中まで侵入している様子を、それぞれ光学顕微鏡により側面から観察した結果を示す。時間の経過とともにエタノールが表面から裏面まで浸透したため、穴径 φ1.1 μm、アスペクト比 1000: 1 の貫通ビアが形成されていることを確認した。講演では、GHz バーストモードの様々な条件で作製した試料の観察結果から貫通ビア形成に必要な加工条件や穴あけ加工メカニズムについて検討した結果を報告する。

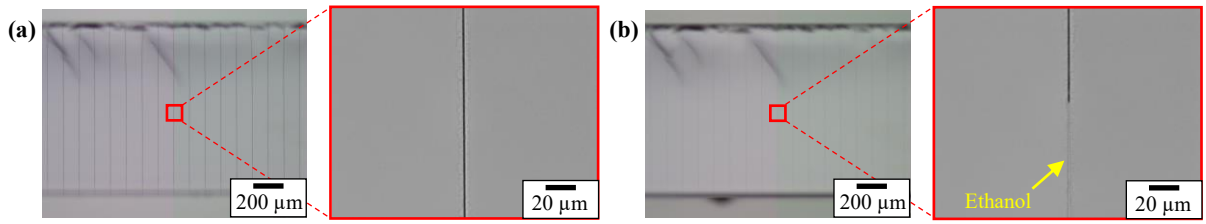


Fig. 1 Optical microscope images of samples irradiated with single burst pulses containing five intra-pulses (a) before and (b) after ethanol immersion.

[1] T. Guilberteau et al., Micromachines, **15**(11), 1313 (2024).

© 2025年 応用物理学会

レーザー微細加工による圧電特性の向上

Enhancement of Piezoelectric Properties by Laser Microfabrication

名古屋工業大学[1]，東京理科大学[2]，東京科学大学[3]

○(M2)寺島 日海[1]，宋 俊東[2,3]，柴尾 直樹[2]，小野 晋吾[1]，

春本 高志[3]，史 蹟[3]，中嶋 宇史[2]，岡村 総一郎[2]

Nagoya Institute of Technology[1], Tokyo University of Science[2], Institute of Science Tokyo[3]

°Hiumi Terashima[1], Jundong Song[2,3], Naoki Shibao[2], Shingo Ono[1],

Takashi Harumoto[3], Ji Shi[3], Takashi Nakajima[2], Soichiro Okamura[2]

E-mail: h.terashima.451@stn.nitech.ac.jp

1. はじめに

機械-電気変換効果を有する圧電材料は、センサやアクチュエータに応用されている。特にMEMS 分野では、圧電薄膜が用いられているが、基板拘束により変形が制約され、圧電効果が低下してしまうという課題がある。これに対して、微細構造を形成して拘束を緩和する方法が注目されている。本研究では、レーザー加工により大面積に微細構造を形成して圧電効果の向上を図った。

2. 実験方法

材料には、代表的な圧電材である PZT ($Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3)$) を用いた。化学溶液法により Pt/Ti/$SiO_x$/Si 基板上に厚さ 10μm の PZT 薄膜を堆積した[1]。その後、DC スパッタ法により、厚さ 100nm の Pt 電極を形成した。

微細構造は、集光したフェムト秒レーザー(波長:1030nm, パルス幅:290fs)を試料表面上に走査することで作製した。集光フルエンスとパルス数を制御することで、サイズの異なる構造体を複数種類作製した(2~20μm)。加工後は、700℃で 5 分間アニール処理を行い、加工によって生じた損傷の回復を試みた。

共焦点レーザー顕微鏡(CLSM)を用いて、作製した溝の形状観察を行った。カソードルミネッセンスおよびエネルギー分散型 X 線分光法(EDS)により、加工による欠陥状態および組成の変化を評価した。印加電圧に対する変位をレーザードップラー振動子で測定することで、圧電定数を算出した。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に溝幅(w)20μm, 溝深さ(h)15μm の溝の CLSM 像を示す。ガウシアンビームの強度分布に従った溝形状が確認できる。EDS マッピングより、レーザー照射部は酸化されており、未照射部にはデバイスに必要な上部電極が残っていることも確認した。

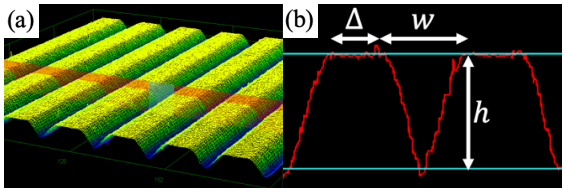


Fig.1 (a) The 3D and (b) cross-sectional image of microstructures, observed by CLSM

Fig.2 には、アスペクト比(h/Δ)が 0.63, 0.52, 0.33 の 3 種の構造体に対して、50~100V の電圧を印加した際の圧電定数を示す。構造体は薄膜よりも大きな圧電応答を示した。また、アスペクト比の増加に伴い、基板拘束が緩和され、圧電定数が向上した。これは解放された領域近くの材料体積分率が増えるためと考えられ、先行研究[2]と矛盾しない結果となった。

当日は、レーザー照射による加工面の特性変化についても詳しく説明する。

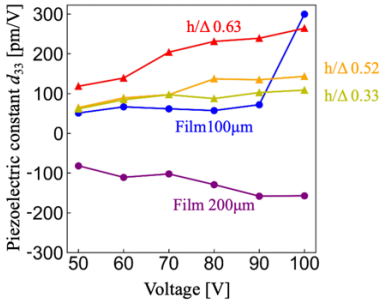


Fig.2 The piezoelectric constant under 50~100V

4．参考文献

[1] T. Iijima, S. Ito, and H. Matsuda, Jpn. J. Appl. Phys. 41 6735 (2002)

[2] R. Keech, L. Ye, J. L. Bosse, et al, Adv. Funct. Mater. 1605014 (2017)

© 2025年 応用物理学会

レーザーアブレーション法による onion-like carbon で被膜された SiC ナノ微粒子の作製および特性評価

Fabrication and characterization of onion-like carbon-encapsulated SiC nanoparticles by laser ablation

東京理科大学院先進工，○(M2)横田　葵，宮島　顕祐
Tokyo Univ. of Sci.，○Aoi Yokota, Knsuke Miyajima
E-mail: 8424545@ed.tus.ac.jp

液中レーザーアブレーション(LA: Laser Ablation)法は、液体中で固体ターゲットにパルスレーザー光を照射することによってナノ微粒子を作製する物理的手法である。液中 LA 法では、レーザー条件や溶媒の種類の選択によって微粒子特性を柔軟に制御することが可能である。SiC は、優れた物理的特性を有しており、パワーエレクトロニクス分野への応用が注目されている。我々はこれまでに、ヘキサン中でのレーザーアブレーション(LA)法によって SiC ナノ微粒子が生成されることを報告した[2]。しかし、無被膜状態のナノ微粒子は、表面の不均一性によって酸化が促進され、機能劣化を招く可能性がある。酸化を抑制するためには、微粒子表面を化学的安定性に優れた物質で被膜し、外部環境との反応を防ぐ必要がある。本研究では、液中 LA 法によって OLC に被膜された SiC(SiC@OLC)ナノ微粒子の作製に取り組み、その構造および光学特性評価を行った。

まず、ヘキサン中で graphite 基板をアブレーションすることで炭素過剰な環境を構築した。次に、4H-SiC 基板をターゲットとした graphite コロイド溶液中での LA 法によって SiC@OLC ナノ微粒子を作製した。アブレーションには波長 800 nm、繰り返し周波数 1 kHz、パルス幅 3 ps のレーザー光を用い、フルエンスは graphite 基板に対しては 0.96 J/cm^2、4H-SiC 基板に対しては 2.87 J/cm^2 とした。graphite 基板と 4H-SiC 基板への LA 時間の組み合わせを(a) 30 min、90 min、(b) 6 min、10 min、(c) 6 min、10 min(間欠的に超音波を印加)で作製した微粒子の TEM 像を Fig.1 に示す。矢印は SiC@OLC ナノ微粒子を示しており、条件(b)及び(c)で多く観測された。条件(a)では(b)と比べて、amorphous 膜で覆われ凝集している微粒子が多く存在しており、過剰な LA 時間は graphite 微粒子の OLC シェル化を阻害することが示唆された。また、条件 (c)では(b)と比べて、小さい SiC@OLC ナノ微粒子が存在していた。LA 時の間欠的な超音波印加が、小さい SiC ナノ微粒子に対する OLC シェル形成を促進することが明らかになった。

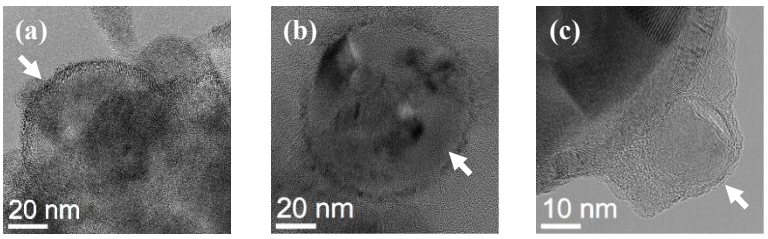


Fig. 1 TEM image of SiC@OLC NPs. (a) graphite: 30 min, 4H-SiC: 90 min. (b) graphite: 6 min, 4H-SiC: 10 min. (c) graphite: 6 min, 4H-SiC: 10 min with an intermittent application of ultrasound.

[1] X. L.Wu, *et al*., Phys. Rev. Lett. **94**, 026102, (2005).
[2] 横田葵，他，第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-P04-2, (2024).
謝辞：本研究（の一部）は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業（課題番号：JPMXP1225UT0110）の支援を受けて行われた.

© 2025年 応用物理学会

液中レーザーアブレーションを用いたEu賦活ストロンチウムアルミネート緑色蛍光体微粒子の作製

Preparation of Eu doped Strontium Aluminate Green Phosphor Microparticles by Laser Ablation in Liquid

法政大院理工，°(M2)髙嶋　優斗，中村　俊博

Hosei Univ., °Yuto Takashima, Toshihiro Nakamura

E-mail: nakamura@hosei.ac.jp

1. はじめに

液中レーザーアブレーションは簡易かつ簡便な方に微粒子を生成可能な手法であり，金属や半導体など様々な材料系で研究が行われている．[1] 酸化物やフッ化物を母体とした無機蛍光体においても液中レーザーアブレーションによる微粒子が生成[2]され，微粒子化に伴う後方散乱低減による発光デバイスへの寄与が期待されている．本研究では，代表的な蓄光材料[3]として知られており，母体組成比や価数を制御することで比較的容易に発光波長の異なる蛍光体を制御できるEu賦活ストロンチウムアルミネート蛍光体[4]の液中レーザーアブレーションによる微粒子作製を検討する．今回，緑色発光を示すEu^{2+}賦活$SrAl_2O_4$蛍光体に対してアブレーションによる微粒子化の最適化を目的として研究を行った．

2. 試料作製

ターゲットである$SrAl_2O_4:Eu^{2+}$蛍光体は，$SrCO_3$，Al_2O_3，Eu_2O_3，と溶融剤であるH_3BO_3粉末を混合し，グラファイト保護管に入れ3時間窒素雰囲気下で熱処理を行い作製した．Eu賦活濃度を1~25%の範囲で変化させた．試料を石英セルに分散したエタノール中で撹拌させながらYAG:Ndパルスレーザー(波長355nm,周波数15Hz,パルス幅5ns,照射パワー30mW)の集光したレーザー光を3時間照射し，上澄み液に分散した微粒子を試料とした．

3. 実験結果と考察

Fig.1は微粒子分散液に紫外レーザーを照射した様子を示す．図より，生成された蛍光体微粒子はいずれもターゲットと同様の緑色発光を示すことから，$SrAl_2O_4:Eu^{2+}$が微粒子化したものと考えられる．またEu賦活濃度に依存して光散乱の様子が異なっており，生成される粒径サイズや粒子生成量が異なることが示唆される．Fig.2に発光ピーク強度のEu濃度依存性，挿入図に試料の発光スペクトルを示す．比較のためターゲット材料のピーク強度もあわせてプロットした．図より微粒子の発光強度の増加量は，ターゲット材料に比べて大きいことが確認でき，これはEu賦活濃度が高い試料ほど微粒子の生成収量が高く，濃度に対して最適地を持つと考えられる．

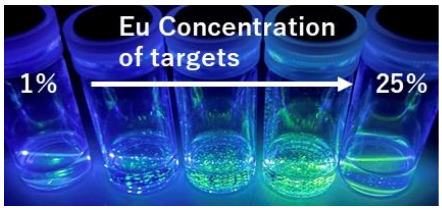


Fig. 1: Picture of the microparticle samples dispersed in ethanol under UV illumination.

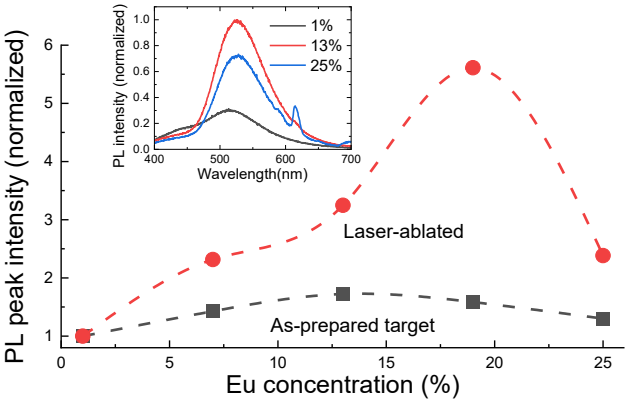


Fig. 2: Photoluminescence (PL) peak intensity of laser ablated and as-prepared target phosphors as a function of doped Eu concentrations. Inset shows the corresponding PL spectra.

参考文献: [1] D. Zhang et al.: *Chem. Rev*, 2017, **117**, 3990. [2] H. Wang et al.: *Appl. Phys. Express* 2015, **8**, 115001. [3] J. Xu and S. Tanabe: *J. Lumin.* 2019, **205**, 581. [4] D. Dutczak et al.: *Phys. Chem. Chem. Phys*, 2015, **17**, 15236.

© 2025年 応用物理学会

光熱材料を用いたポリイミド基板上へのレーザー誘起グラフェン形成の基礎的評価

Effects of Photothermal Materials for Laser-induced Graphene Formation on Polyimide

北海道大，○寺本匡希，Lee Do Hoon，竹井邦晴

Hokkaido Univ., ○Masaki Teramoto, Do Hoon Lee, Kuniharu Takei

E-mail: teramoto.masaki.n2@elms.hokudai.ac.jp

【はじめに】レーザー誘起グラフェン(LIG) は、優れた電気・機械特性とその拡張性から、フレキシブル電子デバイスへの応用が期待されている。近年、酸化亜鉛(ZnO)ナノ粒子をポリイミド(PI)基板上にコーティングすることで、光熱効果により LIG 形成が促進されることが報告された[1]。本研究では、ZnO 以外の光熱材料が LIG 形成に与える影響の基礎的評価を行ったので報告する。

【実験方法】代表的な光熱材料である酸化グラフェン(GO)、多層カーボンナノチューブ(MWCNT)、MXene 等を、厚さ 125 µm の PI 基板上にコーティングし、各材料について異なる厚みの光熱材料膜を形成した。赤外線 CO_2 レーザーを用いて単線状に LIG を形成し、光学顕微鏡観察および抵抗測定により、LIG 形成に必要な閾値レーザー出力を決定した。さらに、ラマン分光解析と断面 SEM 解析により、LIG の品質および構造特性を評価した。

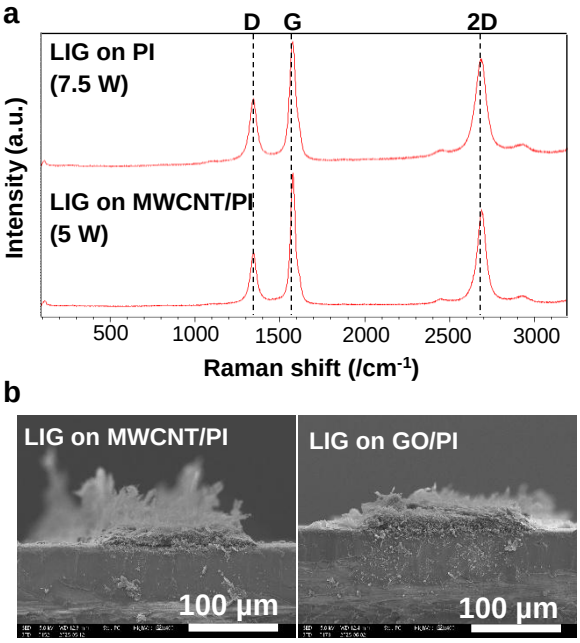


Fig.1 (a) Raman shift of LIGs on PI and MWCNT/PI. (b) Cross-sectional SEM images of LIG on MWCNT/PI and GO/PI.

【実験結果】LIG が形成されるレーザー出力の閾値は、MXene が 4.25 W、GO が 4.75 W、MWCNT が 5.00 W と材料ごとに異なり、いずれも PI 単体での閾値 6.25 W より低い値を示した。また、すべての材料で膜厚の増加に伴う閾値の低下が確認できた。ラマン分光解析により得られたピーク強度比 I_D/I_G および I_{2D}/I_G は、それぞれ 0.60～0.78、0.77～0.88 と各材料で比較的安定しており、光熱効果により低出力レーザーでも同様な質の LIG 形成が可能であることがわかった(図 1a)。LIG 断面の SEM 解析では、光熱材料をコーティングした場合の LIG の厚さは 44～78 µm、PI 単体での LIG の厚さが 130 µm と大きな差が見られた。さらに、光熱材料によって LIG の多孔質構造・非多孔質構造の形成の様子が大きく異なることが分かった。MWCNT や MXene では多孔質構造の LIG が形成されたが、GO では多孔質構造がほとんどみられなかった(図 1b)。

【まとめ】本研究では、複数種類の光熱材料が PI 基板上への LIG 形成に与える影響を評価した。結果から、光熱効果により低レーザー出力での LIG 形成が可能となり、光熱材料が LIG 構造制御にも活用できる可能性を示した。

【謝辞】本研究は、基盤研究 A、学術変革領域研究 B「進化トロニクス」、村田学術振興財団の支援のもと実施されたものである。

【参考文献】[1] D. H. Lee, et al., *ACS Nano* **2024**, *18*, 32255−32265.

© 2025年 応用物理学会

レーザー駆動バブルによる Au ナノロッド/SiO_2 複合体の連続描画

Continuous laser writing of Au nanorod/SiO_2 aggregates by laser-excited microbubble

山形大院理工 [1] ○中川 優大 [1]，皿井 優輝 [1]，西山 宏昭 [1]

Grad. Yamagata Univ. [1], ○Yuta Nakagawa [1], Yuki Sarai [1], Hiroaki Nishiyama [1]

E-mail: nishiyama@yz.yamagata-u.ac.jp

レーザー直接描画プロセスはマイクロスケールでの付加製造手法であり，集光部で生じる光重合や光酸化，焼結などを用いてパターンが形成される．有用な手法ではあるが光加工であるため，その適用は適切な光吸収強度とその後の光化学的反応経路を有する感光性材料に限定されてきた．一方，我々は，これまでに集光部での多光子還元反応を起点としたナノ粒子の集積固化プロセスの開発に取り組んできた[1-3]．同プロセスは感光性に関わらず，高透過性や導電性材料，半導体，生体親和性材料，量子ドットなど多様な機能性材料群でのマイクロパターン描画が可能である．

本研究では，金属核形成とバブル発生を分離したプロセスによって，Au ナノロッドと SiO_2 ナノ粒子複合体の連続描画を行った．両材料ともに照射したレーザー波長に対して感光性を持たないにも関わらずパターニングが可能であった．

光源として，中心波長 517 nm，パルス幅 88 fs のフェムト秒レーザーパルスを対物レンズで集光走査した．図 1 は，Au ナノロッドと SiO_2 ナノ粒子を共分散した溶液中でのレーザー走査で Ag ライン上に集積固化したラインの SEM 像である．断面観察から，ラインは Au ナノロッドと SiO_2 ナノ粒子のコンポジット構造で構成されていることが分かった．複合体のプラズモニック特性およびナノロッドの配向性評価についても行った．当日はそれらの詳細について報告する．

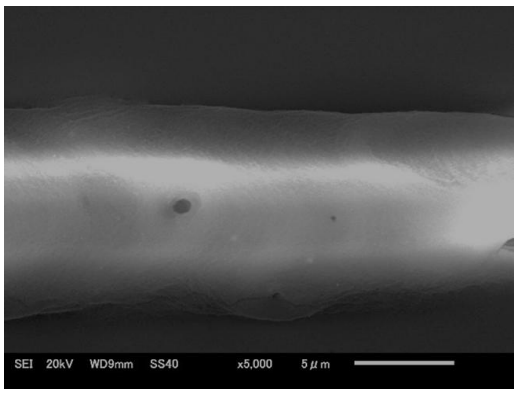


Fig.1 SEM image of Au nanorod/SiO_2 nanoparticle composite line formed by laser-excited microbubble.

[1] H. Nishiyama, et al., Scientific Reports, 9 (2019) 14310.

[2] H. Nishiyama, et al., Optical Materials Express, 14 (2024) 216.

[3] ChemRxiv 10.26434/chemrxiv-2025-34kg0

© 2025年 応用物理学会

フェムト秒レーザー二光子励起マイクロバブルの位置安定性の評価

Stability of femtosecond laser two-photon excited microbubble

山形大院理工 [1]，山形大工 [2]

○熊谷 温人 [1]，青山 昌央 [1]，鈴木 紗和 [1]，鈴木 快 [2]，西山 宏昭 [1]

Grad. Yamagata Univ. [1], Yamagata Univ. [2],

○Haruto Kumagai [1], Masaharu Aoyama [1], Sawa Suzuki [1], Kai Suzuki [2], Hiroaki Nishiyama [1]

E-mail: nishiyama@yz.yamagata-u.ac.jp

レーザー直接描画プロセスはシンプルなマイクロ付加製造手法であり，集光部で生じる光重合や焼結などを用いてパターンが形成される．多くの応用事例が報告されてきたが光加工であるため，その適用は適切な光吸収と反応経路を有する感光性材料に限定されてきた．一方，我々は，これまでに二光子反応を起点としたマイクロバブル発生とそのナノ粒子集積固化プロセスの応用である二光子バブルプリンティングに取り組んできた[1-3]．同プロセスは感光性に関わらず，高透過性や導電性材料，生体親和性材料，量子ドットなど多様な機能性材料群でのマイクロパターン描画が可能である．

本研究では，ナノ粒子集積源として機能するマイクロバブルの位置安定性について評価した．特に，光熱変換源となる金属核形成とバブル発生を一度のレーザー照射で行う方式と，これらを分離して行う方式でのバブル位置を検証した．

光源として，中心波長 780 nm，パルス幅 130 fs のフェムト秒レーザーパルスを対物レンズで集光走査し，走査方向前方からバブルおよび集光部近傍の流体観察を行った．図 1 は，金属核形成とバブル発生を一度のレーザー照射で行う方式での観察像である．走査方向に対して左右対称な対流が観察され，この流速場は走査中も安定であった．一方，金属核形成とバブル発生を分離した方式では，対流は必ずしも安定せず，左右対称，時計回り，反時計回りの流れが次々と現れた．当日は，対流観察および流体解析の詳細を報告する．

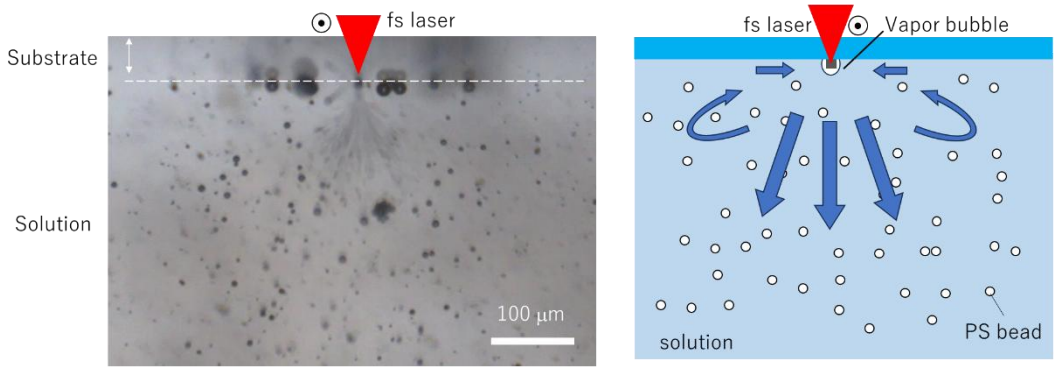


Fig. 1 Frontal view around the laser focus in two-photon bubble printing.

[1] H. Nishiyama, et al., Scientific Reports, 9 (2019) 14310.

[2] H. Nishiyama, et al., Optical Materials Express, 14 (2024) 216.

[3] ChemRxiv 10.26434/chemrxiv-2025-34kg0

© 2025年 応用物理学会

加工閾値以下の超短パルスレーザー照射による PEEK の結晶化度変化

Change in Crystallinity of PEEK Induced by Sub-Threshold Ultrafast Laser Irradiation

秋田大[1]，東大物性研[2]，徳島大[3]

○高橋 実佑[1]，高林 圭佑[2]，遠藤 翼[2]，小林 洋平[2]，富田 卓朗[3]，山口 誠[1]

Akita Univ.[1], ISSP, Univ. Tokyo[2], Tokushima Univ.[3]

○Miyu Takahashi[1], Keisuke Takabayashi[2], Tsubasa Endo[2], Yohei Kobayashi[2],

Takuro Tomita[3], and Makoto Yamaguchi[1]

E-mail: m8025605@s.akita-u.ac.jp

超短パルスを用いた加工は材料を非熱的に除去、改質できることから注目を集めている。熱影響を避けられるという観点から加工対象として、熱可塑性高分子材料が注目されている。[1] 熱可塑性高分子の加工において、機械的特性を評価する上で、結晶化度は重要な指標の一つとなる。[2] 我々は、機械的強度、耐薬品性に優れた熱可塑性高分子である PEEK (Poly Ether Ether Ketone)を加工対象に、超短パルスレーザー照射を単一パルスで照射し、パルス幅の増加に伴う加工閾値フルエンスと結晶化度が低下し始めるフルエンスの関係について報告した。[3] 今回、照射痕が観察されないが、結晶化度が変化する条件に着目して報告する。

試料には、結晶化度が 21%の PEEK フィルム(Victrex, 1000-150G, 20 mm×20 mm ×150 μm)を用いた。波長 1.03 μm、パルス幅とピークフルエンスをそれぞれ 0.3~10 ps、 0.2 J/cm^2~4 J/cm^2 で系統的に変化させた各条件をシングルショットで照射した。スポット径は 1/e^2 強度半径で 52 μm であった。図 1 にパルス幅 10 ps、フルエンス 4 J/cm^2、3.4 J/cm^2、2 J/cm^2 の照射痕を示す。

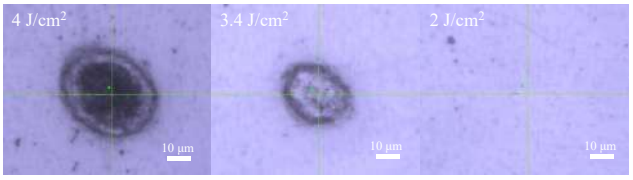


Fig.1 Optical images of laser irradiation spot.
(10 ps, 4 J/cm^2, 3.4 J/cm^2, 2 J/cm^2)

図 1 に 3 通りのフルエンスで照射した試料の光学顕微鏡像を示す。フルエンスの低下に伴い、照射痕が小さくなり、2 J/cm^2 では照射痕が観察できなかった。この条件において顕微ラマン散乱分光測定を行ったところ、結晶化度が変化していた。

パルス幅が 10 ps、フルエンスが 2J/cm^2 の条件における光学顕微鏡像および測定位置に対する結晶化度の変化を図 2(a)、(b) にそれぞれ示す。図 2(a)に示す線上にてライン測定を行った。図 2(b)より照射位置に近づくにつれて結晶化度が減少することが観測された。

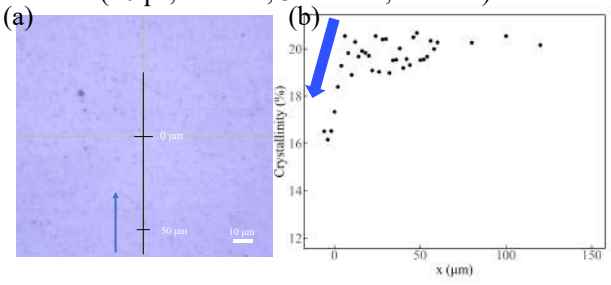


Fig.2 Distribution of crystallinity. (10 ps, 2 J/cm^2)

[1] Qianliang Li, et al., procedia CIRP 94(200-845)

[2] M. Yamaguchi, et al., Appl. Poly. Sci. (2022), 139(8), e51677.

[3]高橋実佑　他、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 16p-K506-10

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.6 Laser processing

[9p-N306-1~11] 3.6 Laser processing

[9p-N306-1]

Ultra-high-speed and high-aspect-ratio laser drilling by combining Bessel beam with TSL processing

Yanming Zhang[1], Takumi Koike[1], Reina Yoshizaki[1], Guoqi Ren[1], Akihiro Shibata[2], Sota Kiriake[1], Ryota Hasegawa[1], Ikuo Nagasawa[2], Keisuke Nagato[1], Naohiko Sugita[1], ○Yusuke Ito[1] (1.Univ. Tokyo, 2.AGC)

[9p-N306-2]

GHz-Burst Femtosecond Laser Ablation of Silicon at 515 nm Wavelength

○Ashkan MomeniBidzard[1], Shota Kawabata[1], Kotaro Obata[1], Koji Sugioka[1] (1.RIKEN, RAP)

[9p-N306-3]

Laser processing of dielectrics using extremely short pulses generated by a Yb-based femtosecond laser

○(M1)Konosuke Kawanaka[1], Haruyuki Sakurai[1], Shotaro Kawano[1], Bo-Han Chen[2], Ching-Yu Hsieh[2], Jia-Xuan Su[2], Shang-da Yang[2], Kuniaki Konishi[1] (1.The Univ. of Tokyo., 2.National Tsing Hua Univ.)

[9p-N306-4]

High-speed micromachining of glass by selective laser absorption into electron-excited region

○Guoqi Ren[1], Huijie Sun[1], Takumi Koike[1], Kota Takabayashi[1], Keiichi Nakagawa[1], Naohiko Sugita[1], Yusuke Ito[1] (1.Univ. Tokyo)

[9p-N306-5]

Femtosecond laser fabricated Tesla structured glass microfluidics integrated with SERS substrate for gas sensing

○Shi Bai[1], Kazunari Ozasa[1], Koji Sugioka[1] (1.RIKEN)

[9p-N306-6]

First-principles study of anisotropic optical absorption in sapphire

○Mizuki Tani[1], Shotaro Kawano[2], Haruyuki Sakurai[2], Tomohito Otobe[1] (1.KPSI, 2.The Univ. of Tokyo)

[9p-N306-7]

Investigation of Femtosecond Laser-Induced Shock Wave Characteristics by Time-Resolved Measurement of Displacement Distribution

○(M2)Kenta Tokumi[1], Yusuke Ito[1] (1.Univ. of Tokyo)

[9p-N306-8]

Pressure-driven graphitization under femtosecond laser irradiation

○(D)Weiye Jin[1,2], Huijie Sun[2], Yusuke Ito[2], Jiayun Pei[1], Haiyan Zhao[1] (1.Tsinghua Univ., 2.the Univ. of Tokyo)

[9p-N306-9]

Surface deformation analysis of AFM detected vibrations induced by femtosecond lasers at anthracene crystal

○(D)Yuhau Ye[1], Yuka Tsuri[1,2], Yoichiroh Hosokawa[1,2] (1.Div. Mat. Sci., NAIST, 2.MLC, NAIST)

[9p-N306-10]

Design of Polarization and Intensity Distribution for Laser Drilling of Micro Odd-Shaped Hole

○Akio Mizutani[1], Atsushi Kitamura[1] (1.OMU)

[9p-N306-11]

Extending the extrapolability of neural network-based laser processing simulators

○Shuntaro Tani[1] (1.RAP, RIKEN)

ベッセル TSL 加工法による超高速・超高アスペクト比穴あけ加工の実現

Ultra-high-speed and high-aspect-ratio laser drilling by combining Bessel beam with TSL processing

東大院工[1], AGC[2]　張艷明[1]，小池匠[1]，吉﨑れいな[1]，任国旗[1]，柴田章広[2]，桐明颯汰[1]，
長谷川亮太[1]，長澤郁夫[2]，長藤圭介[1]，杉田直彦[1]，○伊藤佑介[1]
Univ. Tokyo[1], AGC[2]　Y. Zhang[1], T. Koike[1], R. Yoshizaki[1], G. Ren[1], A. Shibata[2], S. Kiriake[1],
R. Hasegawa[1], I. Nagasawa[2], K. Nagato[1], N. Sugita[1], ○Y. Ito[1]
E-mail: y.ito@mfg.t.u-tokyo.ac.jp

次世代型の半導体において，ガラス基板の活用が期待されている．しかしながら，ガラスはその硬さと脆さゆえに，著しく加工が困難である．近年では，エッチングを活用した加工法が主流となりつつあるが，工程の多さや，環境負荷が問題となっている．そこで，エッチングを使わない加工技術として，レーザ加工が注目されている．しかし，従来のレーザ加工法では，半導体用途で要求される微細な穴形状（深さ 1 mm 以上、直径 100 μm 以下の貫通穴）を 1 つ作るために，数 10 秒を要する[1]．実用上，1 秒間に 1000 個以上の微細穴を形成することが求められるため，ブレークスルーとなる革新技術の開発が望まれている．

本研究では, 当グループがこれまで開発してきた過渡選択的レーザ加工法（TSL 加工法: Transient and Selective Laser 加工法）[2]に，ベッセルビームを組み合わせた「ベッセル TSL 加工法」を開発することにより，従来比 100 万倍速の超高速加工が実現することを示した[3]．まず，ベッセルビームに整形したピコ秒レーザ（パルス幅 5 ps）で，ガラス基板内部に電子の励起した細長いチャネル領域を過渡的に生成する．そして，励起した領域にのみ選択的にマイクロ秒レーザ（同様にベッセルビームに整形）を吸収させる（Fig. 1(a)）．これにより，厚さ 1 mm のガラス基板に対し，加工時間 20 μs で直径 3 μm の貫通孔形成を実現した（Fig. 1(b)）．さらに，加工時間の上昇に伴い，直径を拡大できる制御性を備えていることを明らかにした．

本手法は，次世代型半導体内におけるガラスコア基板やガラスインターポーザ基板への加工法として活用されることが期待される．

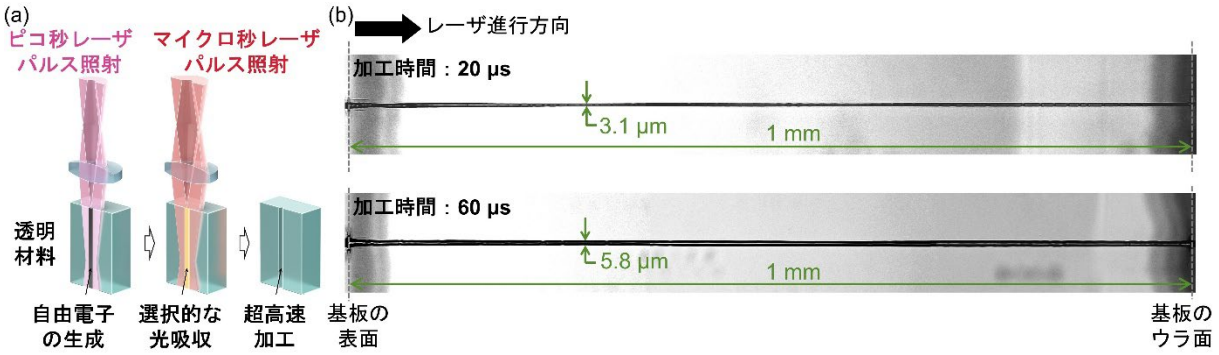


Fig. 1 (a) Bessel TSL processing. (b) 1-mm through-hole generated in a glass substrate.

[1] P. Balage, *et al.*, *Int. J. Extrem. Manuf.* 5, 015002 (2023).
[2] Y. Ito, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 113(6), 061101 (2018).
[3] Y. Zhang, *et al., Sci. Adv.* 11, eadv4436 (2025).

© 2025年 応用物理学会

GHz-Burst Femtosecond Laser Ablation of Silicon at 515 nm Wavelength

(P) Ashkan Momeni[1], Shota Kawabata[1,2], Kotaro Obata[1], Koji Sugioka[1]*

[1]RIKEN Center for Advanced Photonics, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan

[2]Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan

E-mail: ksugioka@riken.jp

Femtosecond lasers operating in gigahertz (GHz) burst mode have recently emerged as a transformative technique in laser processing, offering significant improvements in both efficiency and quality [1]. Extensive studies on burst mode laser processing of silicon (Si) have shown that ablation efficiency is highly dependent on laser parameters, including intra-burst repetition rate, pulse fluence, and the number of pulses per burst (intra-pulses). In Si ablation at infrared (IR) wavelengths using GHz burst femtosecond laser pulses, the burst duration and the intra-pulse number can critically influence ablation efficiency and processing quality [2, 3]. Although Si ablation at IR wavelengths has been extensively studied, GHz burst mode laser ablation of Si at green wavelengths remains uninvestigated.

In this paper, we present both experimental and simulation studies of green-wavelength GHz burst mode laser ablation of Si, accompanied by an analysis of the underlying mechanisms. As Figure 1 shows, the experimental results indicate that employing GHz burst mode laser at 515 nm enhances Si ablation efficiency by a factor of 2.4 for 25 intra-pulses compared to the conventional single-pulse irradiation. Numerical simulation results suggest that the enhancement in ablation efficiency may arise from a transient increase in absorption caused by the interaction of successive intra-pulses within the GHz burst with Si.

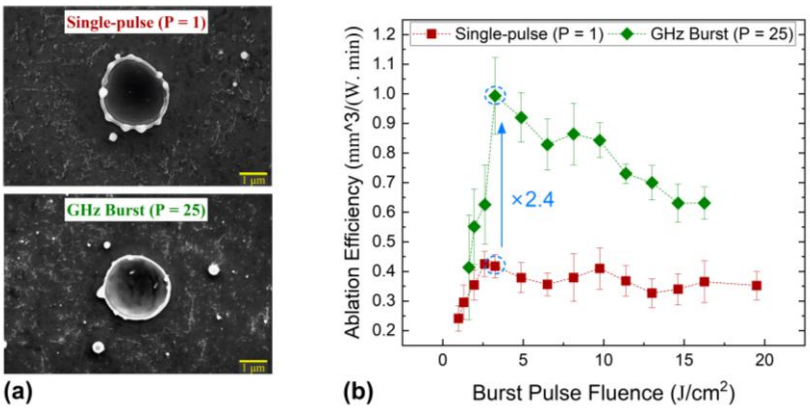


Figure 1. *(a) SEM images of laser-induced craters on the silicon surface created using single-pulse mode (P = 1) and GHz burst mode (P = 25) laser ablation, both at a burst pulse fluence of 3.25 J/cm². (b) Comparison of silicon ablation efficiency under single-pulse and GHz burst pulse irradiation across various fluences.*

[1] C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, et al. Nature 537, 84–88 (2016).
[2] F. Caballero-Lucas. K. Obata, and K. Sugioka: Int. J. Extrem. Manuf., 4, 015103 (2022).
[3] G. Bonamis, E. Audouard, C. Hönninger, J. Lopez, K. Mishchik, E. Mottay, and I. Manek-Hönninger, Opt. Express 28, 27702-27714 (2020)

© 2025年 応用物理学会

Yb 系固体レーザーの極超短パルスによる誘電体レーザー加工

Laser processing of dielectrics using extremely short pulses generated by a Yb-based femtosecond laser

東大院理 [1]，国立清華大 [2]
○(M1)川中 厚之介 [1]，櫻井 治之 [1]，川野 将太郎 [1]，陳柏翰 [2]，謝景俞 [2]，蘇家軒 [2]，
楊尚達 [2]，小西 邦昭 [1]

The Univ. of Tokyo.[1] National Tsing Hua Univ.[2]
Konosuke Kawanaka[1], Haruyuki Sakurai[1], Shotaro Kawano[1] , Bo-Han Chen[2],
Ching-Yu Hsieh[2], Jia-Xuan Su[2], Shang-da Yang[2], Kuniaki Konishi[1]
E-mail: kkonishi@ipst.s.u-tokyo.ac.jp

フェムト秒パルスを用いたレーザー加工は、熱影響を抑えられることから微細加工に広く用いられており、現状では数百 fs 程度のパルス幅のレーザーが主に使用されている。一方で、さらにパルス幅の短い極超短パルス(~10 fs)では高いピーク電場により、誘電体における初期電子励起過程が多光子イオン化からトンネルイオン化へと移行し、加工精度が大きく向上することが報告されている[1,2]。近年、Ti: Sapphire レーザーに代わって、より高い平均パワーを有する Yb ベースの超短パルスレーザーが加工用光源として注目されているが、パルス幅が 100 fs 以下の超短パルスを安定して発生することは困難であった。一方、薄いガラス基板を適切な間隔で配置することによって効率的なスペクトル広がりと短パルス化を実現するマルチプレート圧縮法[3]の登場により、高出力かつ高安定な超短パルス生成が可能となった。この手法を用いることで Yb ベースの極超短パルスレーザー光源を微細加工に応用できる可能性が高まっている。

本研究では、Yb ベースの高出力フェムト秒超短パルスレーザー(CARBIDE CB3-80-0800-20-HB; Light Conversion)とマルチプレート圧縮法を組み合わせた光学系により得られたサブ 10 fs を含む超短パルスを用いて、誘電体の加工特性を評価した。合成石英に対して、中心波長 1030 nm、繰り返し周波数 4 kHz、パルスエネルギー7.5 μJ の超短パルスを、9 fs、20 fs、230 fs、1 ps のそれぞれのパルス幅で 5 パルス照射した結果の SEM 像を Fig.1 に示す。パルス幅が 230 fs から 20 fs になると加工品質が劇的に向上し、さらに 9 fs では加工穴の均一性がより向上していることが明らかになった。当日は、先行研究[1]との比較やさらに詳細な解析結果についても議論を行う予定である。

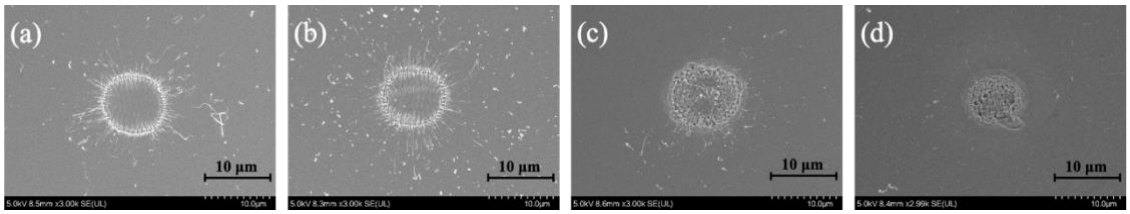


Fig. 1. SEM images of fused silica processed with pulse durations of (a) 9 fs, (b) 20 fs, (c) 230 fs, and (d) 1 ps. Pulse energy was set to 7.5 μJ/pulse; 5 shots per condition.

[1] M. Lenzner et al., Phys. Rev Lett. 80, 4076 (1998). [2] B. Chimier et al., Phys. Rev. B 84, 094104 (2011). [3] C.- H. Lu et al., Optica 1, 400-406 (2014).

© 2025年 応用物理学会

High-speed micromachining of glass by selective laser absorption into electron-excited region

Univ. Tokyo, ◦Guoqi Ren, Huijie Sun, Takumi Koike, Kota Takabayashi, Keiichi Nakagawa, Naohiko Sugita, Yusuke Ito

E-mail: g.ren@mfg.t.u-tokyo.ac.jp

Fabrication techniques of microholes in glass substrates are urgently required because of the wide applications, such as through glass vias (TGV) used in advanced packaging. Ultrafast laser machining of glass microholes has been widely studied, due to the high laser intensity and the small heat-affected zone. However, severe cracks are generated around the processing regions [1], which greatly degrades the precision. In recent years, GHz burst mode ablation [2], and laser induced deep etching (LIDE) [3] have been developed for precision fabrication of microholes in glass, but the processing speed is low. Transient and selective laser processing method (TSL) [4] achieves the high-speed and crack-free micromachining of glass. However, it shows that the induced plasma filament is not sufficiently heated, which limits the further improvement of machining speed.

In this study, we revealed the mechanism of plasma filament generation and laser heating of filament. Based on the mechanism study, we achieved the high-speed crack-free micromachining in silica glass. The speed is 20 times faster than that of the precious reported TSL. The experimental setup for the high-speed machining is shown in Fig. 1(a). The machining dynamics were captured using a high-speed camera. The results are shown in Fig. 1(b), indicating that a microhole with a depth around 84 μm was generated within 2 μs. This study enhances the understanding of laser-material interactions and contributes to the advancement of techniques for fabricating high-aspect-ratio holes in transparent materials.

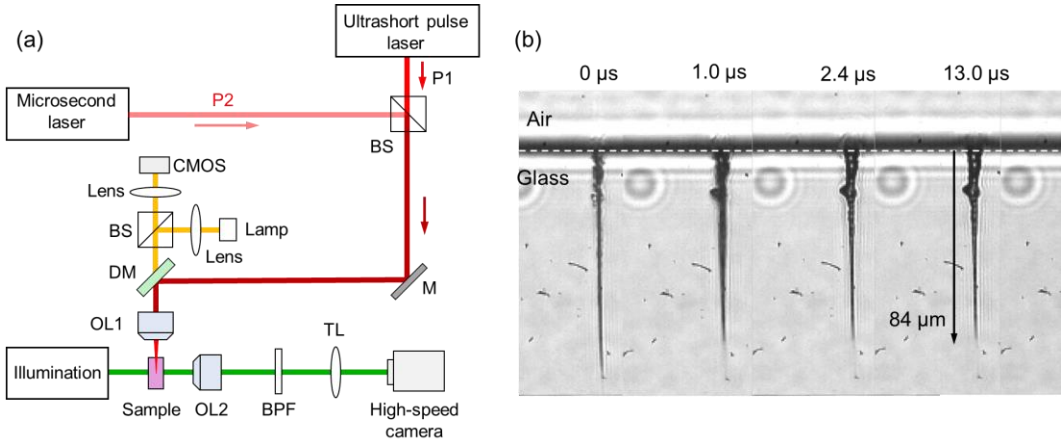


Fig. 1 (a) Experimental setup. BS: beam splitter; DM: dichroic mirror; M: mirror; OL: objective lens. (b) Results.

Reference

1. Y. Ito, et al., Appl. Phys. A 124, 181 (2018).
2. C. Kerse, et al., Nature 537, 84 (2016).
3. R. Santos, et al., IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 1922–1927 (2020).
4. Y. Ito, et al., Appl. Phys. Lett. 113, 061101 (2018).

© 2025年 応用物理学会

Femtosecond laser fabricated Tesla structured glass microfluidics integrated with SERS substrate for gas sensing

Shi Bai[1], Kazunari Ozasa[1], Koji Sugioka[1]

E-mail: ksugioka@riken.jp

Microfluidic SERS chips are powerful and versatile platforms for trace detection, which are widely used in health monitoring and biomedicines [1]. It has been demonstrated the human cancers can be diagnosed by analyzing the components of breath using SERS technique in recent years [2]. However, control of flow speed of breath in SERS analysis is critical for accurate diagnosis, which lacks discussions in the studies of practical gas sensing. In this study, we fabricated Tesla structured glass microfluidic integrated with SERS substrate by femtosecond laser processing for gas sensing, as shown in Figure 1. The typical fabricated Tesla structure has a length of the straight segment of 1.8 mm, valve width of 0.12 mm, height of 2.025 mm, and valve side-channel leaving angle of 12°. The SERS substrate was composed of nanostructured gold film, decorated by tungsten oxide nanoparticles. The femtosecond laser-induced periodic surface structures (LIPSS) were created on gold film and the tungsten oxide nanoparticles were synthesized on nanostructured gold film by laser induced hydrothermal growth. The control of flow speed using Tesla structure was discussed, showing the geometry of the Tesla structure determined the flow speed in microchannel. The SERS performances were evaluated, and the enhancements were estimated to develop volatile organic compounds (VOC) gas sensor. Owing to optimized Tesla structured microfluidic SERS chip, we successfully realized the gas sensing in human breathing.

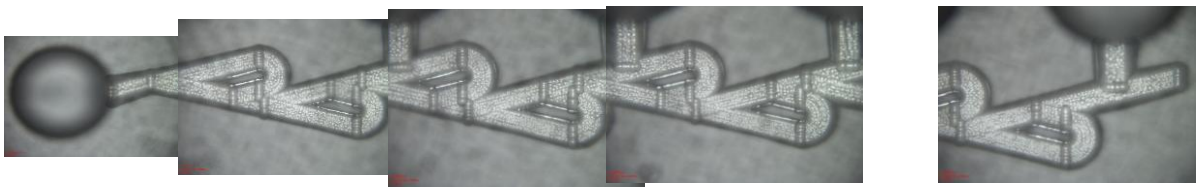


Figure 1. Tesla structured glass microfluidics fabricated by femtosecond laser assisted selective etching.

Reference:

[1] S. Bai et al. Opto-Electronic Advances. 2022, 5, 210121.

[2] X. Qiao et al. Advanced Materials. 2017, 1702275.

© 2025年 応用物理学会

サファイアの異方的光吸収に関する第一原理計算

First-principles study of anisotropic optical absorption in sapphire

[1]QST 関西研，[2]東大院理　○谷 水城[1]，川野将太郎[2]，櫻井治之[2]，乙部 智仁[1]

[1]KPSI [2]The Univ. of Tokyo., ○Mizuki Tani[1], Shotaro Kawano[2], Haruyuki Sakurai[2], and Tomohito Otobe[1]

E-mail: tani.mizuki@qst.go.jp

サファイアはその高硬度・高熱伝導率といった特性から、GaN 系 LED の基板材料など幅広い応用を持ち、重要なレーザー加工材料の一つとされている [1]。近年、レーザー加工効率が結晶方位によって最大で数割異なることが報告されており、これが結合エネルギーの異方性に起因する可能性が指摘されている [2]。可視域における複屈折は屈折率で高々1 %程度と小さいことがわかっているが [3]、8〜9 eV 付近の吸収端領域における光学定数の異方性や、非線形吸収特性の結晶方位依存性についてはデータが足りず十分に理解されていない。

本研究では、SALMON に実装された時間依存密度汎関数理論（TDDFT）に基づくシミュレーションにより [4]、サファイアの広帯域の光応答を調査する。 図 1 左に複素屈折率スペクトル、図 1 右に吸光度スペクトルを示す。複素屈折率では全体として異方性が小さい一方で、吸光度では真空紫外域において最大で数倍程度の強い異方性が現れ、また光学ギャップにおいても約 2.5%の差が見られた。 これらの結果は、サファイアの吸収端やその近傍における光学的性質の結晶方位依存性が、加工特性の異方性に寄与する可能性を示唆するものである。

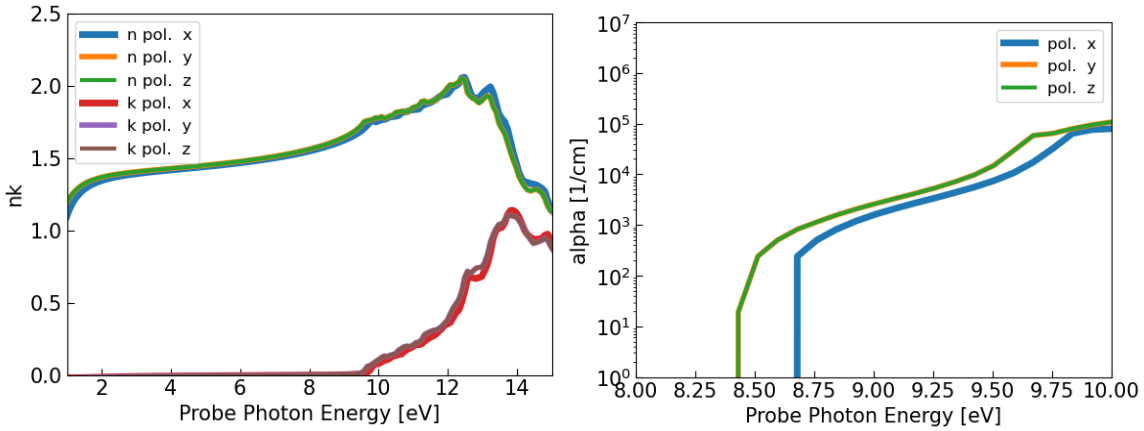


図 1 サファイアの複素屈折率(左図)および吸光度スペクトル(右図)

参考文献

[1] M, Gedvilas, J, Mikšys, J. Berzinš, V. Stankevič, and G. Račiukaitis, Sci. Rep. **7**, 5218 (2017).

[2] Q. Wena, P. Zhanga, G. Chengb, F. Jianga, X. Luc, Ceram. Int. **45**, 23501 (2019).

[3] J. Morikawa, A. Orie, T. Hashimoto, and S. Juodkazis, Sci. Rep. **8**, 3800 (2010).

[4] M. Noda , et al., Comput. Phys. Commun. **235**, 356 (2019)

© 2025年 応用物理学会

変位分布の時間分解計測によるフェムト秒レーザ誘起衝撃波の特性調査

Investigation of Femtosecond Laser-Induced Shock Wave Characteristics by Time-Resolved Measurement of Displacement Distribution

東大院工　○(M2)徳味 健太，伊藤 佑介

Univ. of Tokyo, ○Kenta Tokumi, Yusuke Ito

E-mail: tokumi@mfg.t.u-tokyo.ac.jp

フェムト秒レーザを固体試料に照射することで試料内に発生する衝撃波は，レーザ加工や高圧物質科学において重要な役割を果たす．例えば，フェムト秒レーザショックピーニング加工はレーザで誘起された衝撃波による残留応力付与で材料表面の特性を変化させる加工法である．また，フェムト秒レーザ誘起衝撃波により高圧を物質に短時間付与することで，高圧相が凍結される [1]．これらの加工法や高圧状態実験において，レーザ誘起衝撃波の各パラメータ（衝撃波伝播速度，粒子速度や圧力）の時間発展を詳細に把握することが重要である．これまで，フェムト秒レーザを光源に用いる干渉計測によって，ピコ秒以上の時間分解能でフェムト秒レーザ誘起衝撃波の計測が行われてきた．K. T. Gahagan らは，フェムト秒レーザがホウケイ酸ガラス基板を通過してアルミニウム薄膜に照射された際の，薄膜の自由表面の 2 次元変位分布を時間分解マイケルソン干渉計によって計測した [2]．また，N. Nakanii らによって，フェムト秒レーザをアルミニウム薄膜に直接照射した際の，薄膜背面の速度が周波数領域干渉計によって計測された [3]．

本研究は，フェムト秒レーザ誘起衝撃波のより精密な調査を目的とし，レーザ照射位置の変動に起因する誤差を抑制できる 2 次元変位分布計測法を用いて，透明材料を通過しないフェムト秒レーザの直接照射により誘起される衝撃波の計測を行う．

石英ガラス基板上に成膜したアルミニウム薄膜の表面にフェムト秒レーザを照射し，衝撃波を発生させた．この衝撃波が薄膜と基板の界面に達した時の界面の 2 次元変位分布を，時間分解マイケルソン干渉計により計測した（Fig. 1）．各時刻で計測された変位の時間微分を行い，薄膜背面の速度の時間波形を得ることができた．

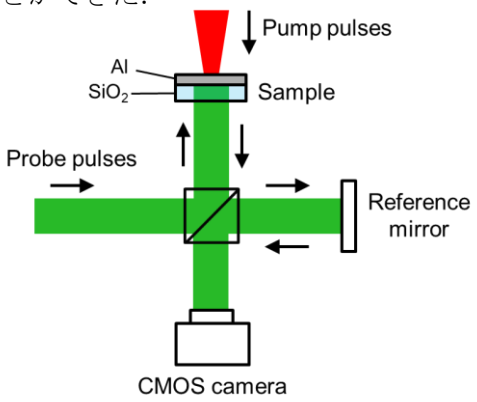


Fig. 1 Experimental setup for time-resolved measurement of displacement distribution.

[1] T. Sano, *et al*., Appl. Phys. Lett. **83**, 3498–3500 (2003).
[2] K. T. Gahagan, *et al*., J. Appl. Phys. **92**, 3679–3682 (2002).
[3] N. Nakanii, *et al*., J. Appl. Phys. **137**, 153108 (2025).

© 2025年 応用物理学会

Pressure-driven graphitization under femtosecond laser irradiation

Tsinghua Univ. [1], Univ. Tokyo[2], ◦(D) Weiye Jin[1,2] ,Huijie Sun[2], Yusuke Ito[2], Jiayun Pei[1], Haiyan Zhao[1]

E-mail: jwy20@mails.tsinghua.edu.cn

Laser-induced graphene (LIG), a porous graphene structure directly written on polymers by laser irradiation, has emerged as a promising platform for on-demand patterning of carbon-based electronics, sensors, and energy devices. Despite growing research interest, the influence of transient pressure generated during femtosecond laser–matter interactions has received limited attention. In this work, we develop a comprehensive investigation framework by integrating ultrafast pump–probe interferometry, large-scale molecular dynamics (MD) simulations, and explainable artificial intelligence (XAI) to uncover the role of transient pressure in the femtosecond LIG process. Time-resolved imaging reveals the formation of localized pressure waves during laser irradiation of polyimide, establishing pressure as a fundamental component of the laser–induced transformation. MD simulations further indicate that elevated pressure facilitates the ordering and stacking of graphene layers, enhancing the continuity and planarity of graphitic networks. Through XAI analysis, we quantitatively evaluate the influence of multiple parameters and identify pressure as a key determinant in the structural evolution. These findings shed light on a previously underexplored factor in LIG and open new possibilities for precision control in laser-directed carbon nanomanufacturing.

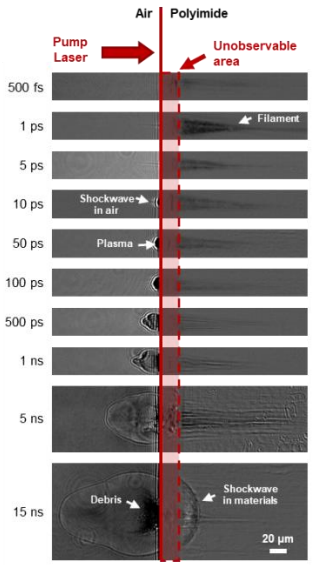


Fig.1 Time-resolved imaging of a single femtosecond laser pulse interacting with polyimide

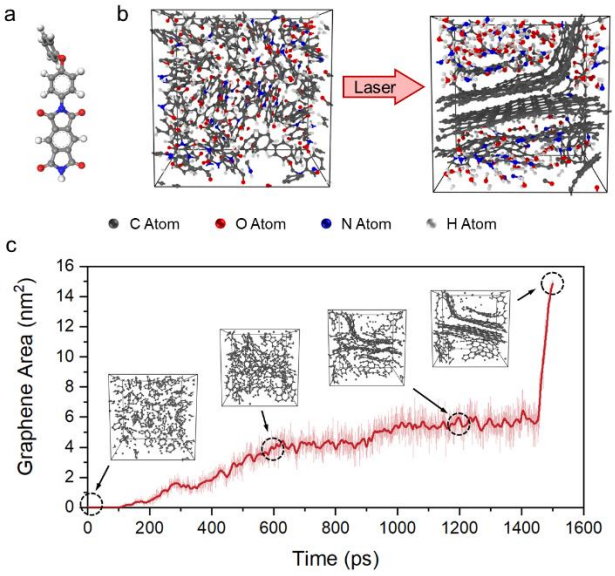


Fig.2 Molecular dynamics model of laser-induced graphene formation

© 2025年 応用物理学会

Surface deformation analysis of AFM detected vibrations induced by femtosecond lasers at anthracene crystal

Div. Mat. Sci., NAIST [1], MLC, NAIST [2],

○Yuhau Ye [1], Yuka Tsuri [1,2], Yoichiroh Hosokawa [1,2]

E-mail: ye.yu_hau.yx3@naist.ac.jp

When an intense femtosecond (fs) pulse is focused on an object, an impulse is generated which propagates on the surface as a shock wave and a stress wave. We have developed a method to detect the waves by an atomic force microscope (AFM) cantilever contacted near the laser focal point. Previously, we applied this method to an organic crystal and succeeded in detecting vibrational responses as an acoustic wave propagating on the crystal [1]. The vibrational response detected is presumed to reflect the state and structure of the crystal surface, but this is not clear. In this study, we applied this method in combination with partial least squares discriminant analysis (PLS-da), a statistical analysis method, to evaluate the extremely slight deformation of anthracene crystal surface with nanometer-scaled spatial resolution.

The vibration was induced by a single pulse of an amplified Ti:Sapphire femtosecond laser (800 nm, 150 fs, 32 Hz, 4000 nJ/pulse) which was introduced through an objective lens (20×, N.A. 0.46) into an inverted microscope and focused on a millimeter-sized anthracene crystal surface. The vibrations were detected by an AFM cantilever (qp-SCONT, spring constant: 0.011 N/m) in contact with the crystal surface, and the temporal responses were recorded by an oscilloscope. All the horizontal distance between the cantilever and laser focused position was fixed 150 μm. Fifty vibrational responses were measured as original vibrations. Then, laser pulses scanned a 150 μm × 100 μm area between the cantilever and the laser focused position with 60 nJ/pulse which was significantly lower than the ablation threshold energy. To assess the differences after scanning, we enhanced the pulse energy to record another fifty vibrational responses at the same location. Fig. 1(a) and 1(b) show the vibrational response before and after scanning and its frequency components obtained by fast Fourier transform. To clarify the differences, we carried out PLS-da on the frequency components. The score plots of the two PLS components that maximize the differences of the frequency components was shown in Fig. 1(c). This result indicates that scanning induces deformations on the crystal surface, and that these differences can be detected by the vibrational response. This novel application can detect subtle changes at the surface for future studies of molecular alignments and mechanical properties at crystal surfaces.

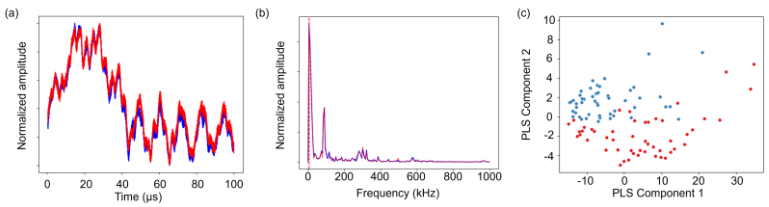


Fig.1 (a) Vibrational waveform and (b) frequency domain corresponding to the PLS-da score plots in (c). Red and blue indicated vibrations before and after low energy femtosecond laser scanning, respectively.

[1] Yuhau Ye, et al., Oral presentation (23p-13M-4) at the 71th JSAP spring meeting, March 2024.

© 2025年 応用物理学会

微小異形穴レーザ加工のための偏光・強度分布の設計

Design of Polarization and Intensity Distribution for Laser Drilling of Micro Odd-Shaped Hole

大阪公大工，○水谷 彰夫，北村 篤史

Osaka Metropolitan Univ. ○Akio Mizutani and Atsushi Kitamura

E-mail: mizutani@omu.ac.jp

産業部品の精密化，小型化が進み，四角や十字，星型など複雑な形状をもった微細な穴加工が求められている．その加工法の一つとして，偏光分布を持つビームによるアブレーション加工が提案されている[1]．偏光方向により加工部材への吸収率が異なるため，偏光配置を工夫することで，微細で鋭い角を持った深い穴が加工できる．加工穴内での反射による偏光変化を考慮した加工シミュレーションと実験結果はよく一致した[2]．しかし，偏光分布のビーム設計手法は未確立であった．そこで目的の加工形状を入力として加工表面での偏光・強度分布を設計する手法を提案する．

Fig.1 に偏光・強度分布の設計の流れを示す．加工シミュレータは，集光面での偏光・強度分布を入力することで加工形状を出力する．加工部材は厚さ 0.1mm のステンレス板とし，表面に集光した．照射パルス数 4000，波長 800 nm，繰り返し周波数 1kH を条件とした．出力された加工形状と目的の加工形状の差の二乗誤差を評価関数として設け、誤差が最小になるように最適化を行うことで所望の加工形状に対する偏光・強度分布を設計できる．集光面での偏光・強度分布は微小区画に分割して表現するが，分割した微小区画の値全てを設計パラメータとすると膨大すぎるため，レーザ光を次数 (00)~(33) までの HG（Hermite-Gaussian）ビームで展開することで，パラメータを削減した．また，加工シミュレータは光線を複数本に分割し，1 本ごとに光線追跡を行うため計算コストが高い．そこで，加工シミュレータの代理モデルとして深層学習モデルである U-net を構築し，偏光・強度分布の入力から加工形状の出力を 65×65 の分割数で 1 秒程度と高速に求めることで，偏光・強度分布の設計を可能にした．U-Net の平均絶対誤差は 2%程であった．

Y 字穴加工用に代理モデルと差分進化法を用いて設計した偏光・強度分布，U-Net による加工形状の予測値，加工シミュレーションの結果を Fig.2 に示す．偏光・強度分布の赤矢印は偏光方向を表している．設計した偏光・強度分布を入力して得られた U-Net での予測結果と加工シミュレーションの結果はどちらもほぼ一致し，目標形状に近い加工形状となった．

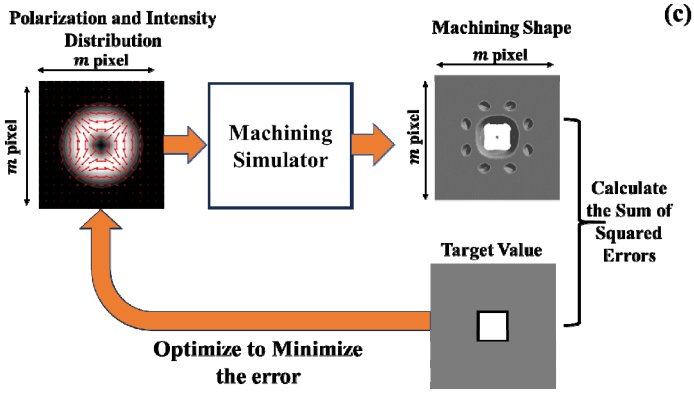


Fig.1 Design of polarization and intensity distribution using machining simulator.

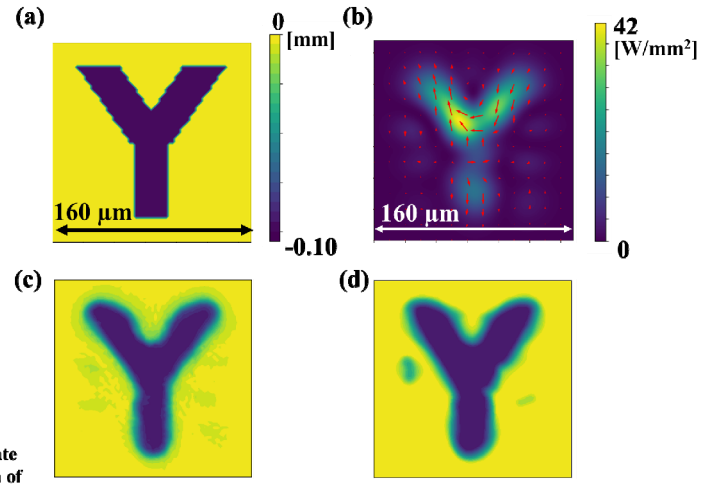


Fig. 2 Design results of polarization and intensity distribution with a Y-shaped target. (a) Target shape, (b) Designed polarization and intensity distribution, (c) Predicted machining shape by U-Net, (d) Machining shape by machining simulator (Ground Truth).

参考文献

[1] H. Kikuchi et al., " Jpn. J. Appl. Phys **55**, 042701 (2016).

[2] 隈川顕 他:精密工学会 2021 秋予稿集 p. 192-193.

© 2025年 応用物理学会

深層ニューラルネットワークレーザー加工シミューレーターにおける外挿性の拡大

Extending the extrapolability of neural network-based laser processing simulators

理研光量子[1]　○谷 峻太郎[1]

RAP, RIKEN[1]

E-mail: shuntaro.tani@riken.jp

超短パルスレーザー光源技術の進展に伴い、バースト加工やパルスエネルギー変調加工など様々な時間領域の自由度を活用したレーザー加工技術が誕生し、加工の更なる高効率化・高品質化・多機能化が実現されてきている[1, 2]。一方、これらの自由度により加工パラメーター空間の次元は大幅に増大し、次元の冪乗で拡大する加工パラメーター空間は莫大なものとなっている。光源技術の進展による恩恵を使い尽くすためには加工パラメーター最適化をデジタル空間で行うことを可能とする技術、加工デジタルツインの開発が重要である。一方、本質的にマルチスケールかつ平衡状態から遠く離れたレーザー加工現象を物理方程式のみで記述することは未だ困難であり、加工現象を再現する有効モデルとしては現象論に頼らざるを得ないのが現状である。我々は深層学習を用いた現象論ベースの加工シミュレーターにより予測可能範囲の拡大に取り組み、レーザーの照射位置やパルスエネルギー列の変調に対する補外性を実現してきた。一方、レーザーパラメーターそのものに対する補外性が課題となっていた。

本研究ではレーザーパルス照射による格子構造変化を対象として、さまざまなレーザーパラメーターに対する加工・測定実験を全自動で行い、これらのデータを用いてレーザー加工パラメーターに対して格子構造変化を予測する深層ニューラルネットワークシミュレーターを開発した。時間領域における補外性を組み込む学習を行うことで、パルス幅について学習範囲外の補外性を実現する手法の開発に成功した。

[1] K. Obata et al., *Int. J. Extrem. Manuf.* **5** 025002 (2023)

[2] K. Shimahara et al., *Commun. Engineering* **2**, 1 (2023)

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[7p-N221-1~11] 3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[7p-N221-1]

[The 58th Young Scientist Presentation Award Speech] Distributed reflectometry using destructive interference

○Haruyuki Kubota[1], Keisuke Motoda[1], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU)

[7p-N221-2]

Research on improving the performance of optical time domain reflection measurements using asynchronous optical sampling

○(M2)Hayato Yoshimura[1], Naoki Yamaguchi[1], Sze Y Set[2], Shinji Yamashita[1] (1.Tokyo Univ., 2.RCAST, Tokyo Univ)

[7p-N221-3]

Multicore fiber Bragg grating bending sensor based on incoherent OFDR using two-photon absorption process in Si-APD

○Yuta Kurihara[1], Shinta Tsuzuki[1], Takuma Serizawa[1], Yosuke Tanaka[1] (1.TUAT)

[7p-N221-4]

Detection of fiber splicing points using Brillouin optical correlation-domain reflectometry

○Ryo Inoue[1], Shuto Tsurugai[1], Keita Kikuchi[1], Yosuke Mizuno[2], Heeyoung Lee[1] (1.SIT, 2.YNU)

[7p-N221-5]

Sub-5-cm spatial resolution achieved in POF-based BOCDR

○Keita Kikuchi[1], Shimbu Shirai[2], Seiga Ochi[2], Shuto Tsurugai[1], Yosuke Mizuno[2], Heeyoung Lee[1] (1.SIT, 2.YNU)

[7p-N221-6]

A Novel Fabrication Method for Transversely Disordered Optical Fiber Using Tellurium Oxide-Based Glass

○(M2)Yusuke Ota[1], Asuka Nakatani[1], Takenobu Suzuki[1], Yasutake Ohishi[1] (1.Toyota Univ.)

[7p-N221-7]

Dispersion Tuned Swept Laser Setup and Optimization for OCT

○(M2)Hongxu Chen[1], Yifan Ma[2], Naoki Yamaguchi[2], Sze Yun Set[2], Shinji Yamashita[1] (1.Tokyo Univ., 2.Rcast)

[7p-N221-8]

Strain and temperature dependences of Brillouin frequency shift in high-NA fibers

○Shu Iwasaki[1], Keita Kikuchi[1], Natsuho Yagishita[2], Shimbu Shirai[2], Yosuke Mizuno[2], Heeyoung Lee[1] (1.SIT, 2.YNU)

[7p-N221-9]

Tensile dependence of transmission loss in acrylic POFs processed by hot-water tapering

○Shuto Tsurugai[1], Riki Yamamoto[1], Keita Kikuchi[1], Yosuke Mizuno[2], Heeyoung Lee[1] (1.SIT, 2.YNU)

[7p-N221-10]

Analysis of the Polarization and Wavelength Dependence of Photonic Lanterns

○(D)Rodrigo Itzamna Becerra Deana[1,2], Joseph Lamarre[1,2], Raphael Maltais-Tariant[1], Nicolas Godbout[1,2], Stephane Virally[1], Caroline Boudoux[1,2] (1.Poly Montreal, 2.Castor Optics)

[7p-N221-11]

Seismic Vibration Monitoring Utilizing Optical Fiber Sensors and YOLO-v7

○(DC)Pradeep Kumar[1], Ruchi Dahiya[2], KM Priyanka[2] (1.Department of Electro-Optical Engineering National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan., 2.Department of Electronics and Communication Engineering Netaji Subhas University of Technology, Delhi, India.)

弱めあう干渉を用いた分布型光反射計の提案

Distributed reflectometry using destructive interference

○ 久保田 晴之、元田 圭佑、水野 洋輔　横浜国立大学 大学院工学研究院
○Haruyuki Kubota, Keisuke Motoda, and Yosuke Mizuno　Faculty of Engineering, Yokohama National University
E-mails: kubota-haruyuki-bc@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバに沿った反射率分布を取得する光反射計は位置分解の手法で時間領域、周波数領域、相関領域の 3 種類が存在する。本研究では相関領域法（OCDR）[1]に注目する。

OCDR では、レーザ出力光に周波数変調を施し、測定ファイバ（FUT）内に生成される「相関ピーク」を掃引することで分布測定を実現する[1]。従来はこの相関ピークが測定点として利用されてきたが、相関ピーク以外の位置を測定点とする手法は報告されていない。

そこで本研究では、相関ピークと対になる「相関ディップ」に着目し、そこで得られる最大帯域幅での反射スペクトルのパワーを用いる新たな OCDR を提案する。一般に、相関ディップでは、反射スペクトルの帯域幅が変調振幅の 2 倍となるため、その帯域上の最大周波数領域を測定することで FUT の反射率分布を取得する。以下では、本手法の動作を実験的に検証する。

2. 原理

従来の OCDR では、レーザ出力光に周波数変調を施し、入射光と参照光に分岐した上で、反射光と参照光の位相が一致する FUT 上の位置に「相関ピーク」を生成し、ここからの反射光のみを選択的に検出する（**Fig. 1(a),(b)**）。さらに、変調周波数 f_m を制御して相関ピークを掃引することで、分布測定を実現する。

一方、本研究の OCDR では、反射光と参照光の位相がπずれる位置（相関ディップ）において観測される反射スペクトルに着目する（**Fig. 1(a),(c)**）。相関ディップでは、変調振幅 Δf の 2 倍となる最大帯域幅の反射スペクトルが得られるため、その周波数帯（$2\Delta f$）におけるパワーを測定することで、相関ディップに対応する位置からの反射光のみを選択的に検出できる。また、相関ディップも相関ピークと同様に変調周波数 f_m を変化することで FUT に沿った掃引が可能となり、分布測定が実現できる。ただし、変調振幅 Δf は変調周波数 f_m に依存して変化するため[2]、$2\Delta f$ も随時変化し、従来の OCDR のように電気スペクトラムアナライザ（ESA）のゼロスパン機能を用いて単一周波数のパワー変動を直接測定する手法は困難となる。

本研究では変調周波数付近における Δf が f_m に対し線形に変化することを実験的に確かめ、測定中に観測周波数帯を線形に制御することで問題を解決した。実験で用いた変調波形を **Fig. 2** に示す。変調波形の振幅を周期的に変化させ反射スペクトルの帯域幅を制御することで、測定レンジを固定したまま空間分解能を向上させることができる。

3. 実験

実験には、先に提案された OCDR とブリルアン OCDR（BOCDR）[3]のハイブリッド実験系[4]を用いた。波長 1550 nm、線幅 2 MHz のレーザを用いた。参照光路には 2 km の遅延ファイバを挿入した。変調周波数は約 2131.31 kHz から約 2233.57 kHz まで変化させ、変調振幅は約 2.3 GHz とした。ESA で 4.55 GHz から 5.05 GHz のスペクトルを取得した。次に、ローカルでパワーを取得する周波数範囲を 5.0055 GHz–4.6490 GHz まで線形に変化させた。分解能帯域幅は 3 MHz, ビデオ帯域幅は 1 kHz とした。1 測定点ごとに 400 点のスペクトルを足し合わせて平均した。測定点は 2197 点であった。

FUT の構成を **Fig. 3** に示す。2 箇所の PC コネクタおよび開放端で比較的強い反射が生じるようにした。開放端付近には曲げ損失を印加して、フレネル反射は抑制した。

FUT に沿った反射率分布測定の結果を **Fig. 4** に示す。2 箇所の PC コネクタと開放端における強い反射が明瞭に検出された。各ピークの半値全幅は約 24 cm であった。従来の相関ピークを用いる場合と比較して、ノイズフロアが平坦である特徴を持つことが分かる。

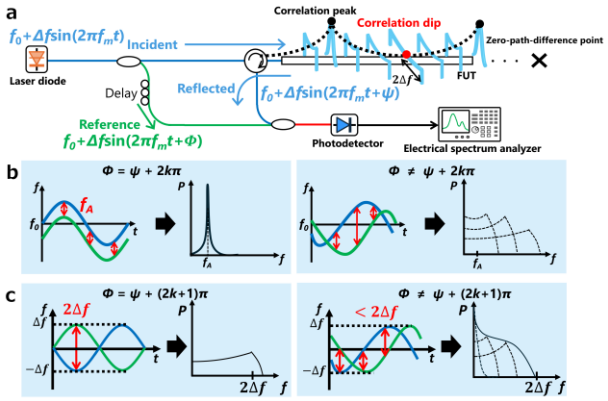


Fig. 1. (a) Schematic of experimental setup. (b) Principle of correlation-peak-based detection. (c) Principle of correlation-dip-based detection.

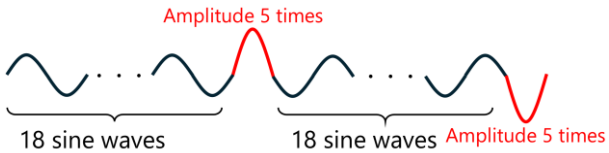


Fig. 2. Modulation waveform used in experiment, consisting of 37 sinusoidal cycles per period.

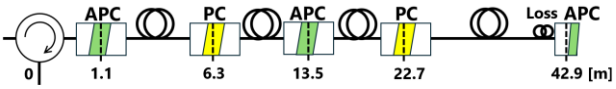


Fig. 3. Structure of FUT.

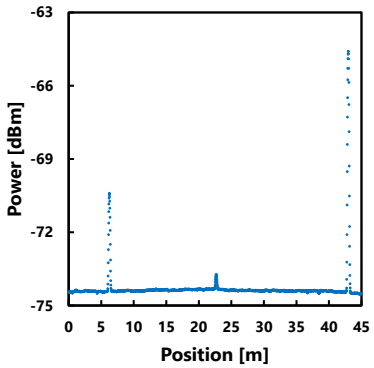


Fig. 4. Measured reflected power distribution.

4. 結論

本研究では、相関ディップを測定点とする新しい OCDR の動作を実証し、ノイズフロアが従来法に比べ平坦であるという特徴を発見した。今後は、本手法に最適な変調波形の調査や BOCDR/A への適用、本手法の更なる利点の探索などを行っていく計画である。

参考文献

[1] K. Hotate, et al., J. Lightwave Technol. **11**, 1701 (1993).
[2] K. Noda, et al., Appl. Phys. Express **12**, 022005 (2019).
[3] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
[4] H. Kubota, et al., Opt. Fiber Technol. **90**, 104129 (2025).

© 2025年 応用物理学会

非同期光サンプリングによる光時間領域反射計測の性能向上に関する研究

Research on improving the performance of optical time domain reflection measurements using asynchronous optical sampling

東大工[1]，東大先端研[2] ○(M2)吉村 駿人[1]，山口 尚紀[1]，セット ジイヨン[2]，山下 真司[1]

Tokyo Univ.[1], RCAST, Tokyo Univ[2], ○Hayato Yoshimura[1], Naoki Yamaguchi[1],

Sze Y Set[2], Shinji Yamashita[1]

E-mail: yoshimura-hayato766@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

ファイバの非破壊的検査を目的に、光ファイバに光を入射させて反射して帰ってきた光の情報から光ファイバの特性を検査する光リフレクトメトリという技術が存在する。また、光リフレクトメトリの一種である光時間領域反射系（OTDR）とは、光パルスを入射し、そのパルスが反射して帰ってくるまでの時間を計測することにより反射点の位置を検出する技術である。この OTDR の分解能は、使用する光パルスのパルス幅によって決定されている。しかし、従来の OTDR は、光検出器の帯域制限によって使用できる光パルスの幅が制限されてしまっており、分解能が高いものでも 1cm 程度に制限されていた。そこで、光領域でサンプリングを行う光サンプリングと呼ばれる技術を導入することで高速なパルスをサンプリング可能にし、この制限を突破する光サンプリング OTDR という方式が提案されている[1]。しかし先行研究においては、測定方式の問題により、複数反射点の検出が難しいという課題が存在した。本研究では、この光サンプリング OTDR に Fig1 に示すような擬似ランダム符号化ピコ秒パルスを用いた相関計測方式を導入することにより、長レンジにわたって複数の反射点を判別可能な光サンプリング OTDR を提案する。

Fig2 に現在構想している光サンプリング OTDR の構成図を示す。10Gb/s の PRBS 信号源を被測定ファイバに入力し、その反射信号を光サンプリングにより取得、最後に、光サンプリングによって所得した参照経路の信号との相互相関をソフトウェアにより計算する。相互相関ピークの位置から参照信号と反射信号の到達時間差を取得し、距離測定を行うという原理である。このような OTDR システムの実現に向け、繰り返し周波数 10GHz、パルス幅 2ps のモード同期レーザからの信号を光サンプリングにより観測する実験を行った。Fig3 に示すように、パルス幅 2ps 程度のパルス列の復元に成功している。

参考文献：[1] S. Wang, X. Fan, and Z. He, IEEE Photonics J., vol. 9, no. 6, pp. 1–10, Dec. 2017,

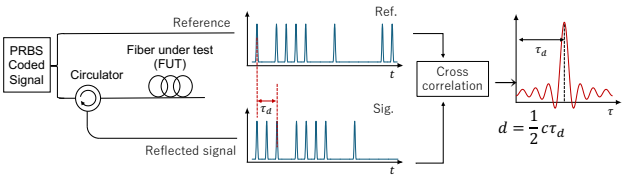


Fig1. Correlation OTDR

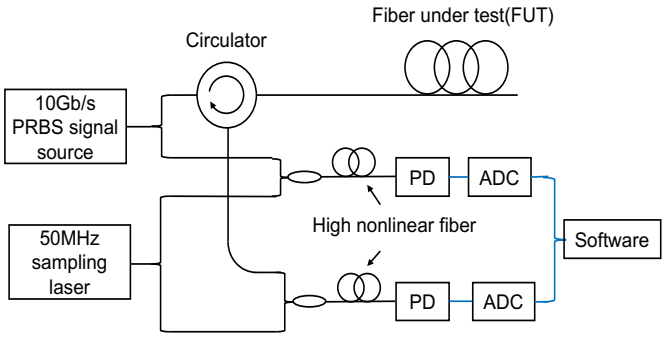


Fig2. Optical sampling OTDR setup

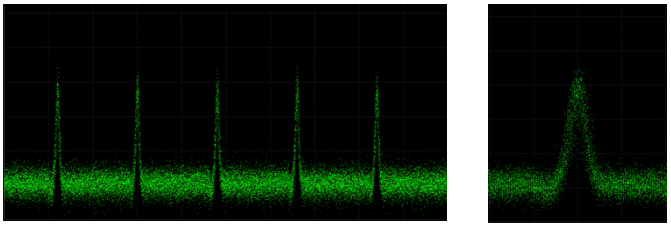


Fig3. Observed pulse train

© 2025年 応用物理学会

Si-APD 二光子吸収応答を用いたインコヒーレント OFDR によるマルチコア光ファイバ回折格子型曲げセンサ

Multicore fiber Bragg grating bending sensor based on incoherent OFDR using two-photon absorption process in Si-APD

農工大工，○栗原 優太，都築 伸太，芹澤 琢磨，田中 洋介
Tokyo Univ. of Agri. & Tech., ○Yuta Kurihara, Shinta Tsuzuki, Takuma Serizawa, Yosuke Tanaka
E-mail: tyosuke@cc.tuat.ac.jp

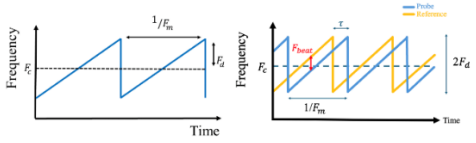
1. はじめに

光ファイバセンシングは，小型，軽量，電磁ノイズへの耐性などの利点から，構造ヘルスモニタリングや医療分野で応用されている．Bragg grating を複数コアに加工した MCFBG(Multicore fiber Bragg grating)による曲げセンサは，曲げ半径と曲げ方向を同時測定できる．この曲げセンサは，光源の波長を掃引したり，広帯域光源を用いたりすることで，各コアの grating の Bragg 波長を得る．しかし，複数のコアからの反射光を1台の受光器で検出すると反射スペクトルが重なる．そこで，一般に複数の受光器や光路の切り替え等が行われるが，システムが複雑化する．我々の以前の研究では，異なる grating で反射して受光器に到達するプローブ光の伝搬長が互いに異なるようにし，Si-APD (Silicon avalanche photodiode)による二光子吸収応答を利用した強度相関測定を利用して反射光を識別した[1]．しかし，その際に行う離散的な強度変調周波数掃引による測定時間の長時間化が課題であった．

本研究では，Si-APD による二光子吸収応答を利用した I-OFDR (Incoherent optical frequency domain reflectometry)法を用いることで MCFBG による曲げセンシング測定時間の短縮化を確認したので報告する．

2. 原理と実験

I-OFDR 法ではプローブ光と参照光に Fig.1(a)のような周期的なチャープ信号で強度変調を加える．検出される信号の周波数F_{beat}はプローブ光と参照光の伝搬光路差に比例する(Fig.1(b))．



(a) (b)

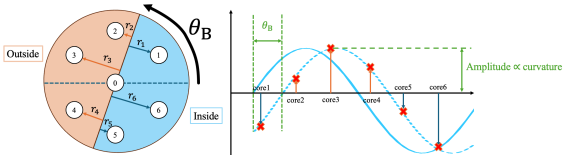
Fig.1 (a)Intensity modulation signal and (b) generation of beat signal in I-OFDR.

Fig.2(a)に本研究で使用した MCFBG の断面図を示す．中心コアの外周に 6 コアが均等に配置されている．破線を通り紙面に垂直な面を基準面とし，そこからθ_B回転した面と紙面との交線を曲げの内側領域と外側領域の境界線として実線で示す．光ファイバに曲げが加わると外側領域は伸び，内側領域は縮み，中心コアでは伸縮の影響はキャンセルされる．これにより，曲げの中心，外側，内側で Bragg 波長に異なる変化が生じる．マルチコア光ファイバ断面において中心コアを原点とする極座標をとり，各コア座標の方位角に対して曲げによる Bragg 波長の変化をプロットした結果を Fig.2(b)に示す．これらの点は原理的に正弦波曲線でフィッティングできる．このとき，正弦波の振幅が曲率，初期位相が曲げの向きに対応する．提案手法では，光源と各コアの間に異なる長さの光ファイバを挿入し，距離差を I-OFDR で検出することで，各コア FBG からの反射スペクトルを一括して分離、識別できる． 波長 1.55 μm 帯のレーザ光をプローブ光と参照光に用い、それらの伝搬距離差がΔLのとき，ビート周波数

$$F_{beat} = \frac{2nF_dF_m\Delta L}{c} \quad (1)$$

の信号が Si-APD 二光子吸収応答により検出される．Si-APD は，通常 1.55 μm 帯に感度を持たないが，高強度の光が入射すると，二光子吸収応答により光強度の二乗平均に比例した光電流が生じる．この特性により，広帯域な強度相関測定ができる．強度変調周波数の掃引時間は，反射スペクトル測定のためのプローブ波長掃引時間に比べ十分に短く，測定時間は波長掃引に要する時間が支配的となる．その結果，従来手法で数分要した測定時間が，本手法では 10 秒以下になる．

Fig.3 に 1 例として半径 8 cm の円周に沿って MCFBG を曲げた際の測定結果を示す．ここから得られた曲率半径は 9.3 cm であった．



(a) (b)

Fig.2 (a) Sectional view of MCFBG and (b) Bragg wavelength shift of each core as a function of core position (azimuth angle).

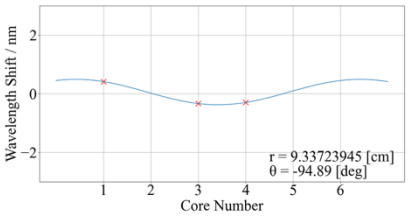


Fig.3 Sinusoidal curve fitting of the Bragg wavelength shift of the grating in each core.

3. まとめと今後の予定

Si-APD 二光子吸収応答を用いた I-OFDR 法による MCFBG 曲げセンサを提案し，原理確認実験を行った．今後は，測定誤差低減および多点化に向けた検討を進める．

4. 参考文献

[1] N. Sonoda, et. al., “Multipoint bending measurement using multicore fiber Bragg grating and two-photon absorption process in Si-APD,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 22, pp. 25736-25742, Nov.15, 2021.

謝辞

本研究は，JSPS 科研費（JP24K00894）の助成を受けた．

© 2025年 応用物理学会

ブリルアン光相関領域反射計を用いた光ファイバ融着点の検出

Detection of fiber splicing points using Brillouin optical correlation-domain reflectometry

○井上 諒[1]、鶴谷 柊人[1]、菊地 啓太[1]、水野 洋輔[2]、李 ひよん[1]
[1]芝浦工業大学 大学院理工学研究科 [2]横浜国立大学 大学院工学研究院

○Ryo Inoue[1], Shuto Tsurugai[1], Keita Kikuchi[1], Yosuke Mizuno[2], and Heeyoung Lee[1]
[1]Shibaura Institute of Technology [2]Yokohama National University
Emails: af20077@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

近年、光ファイバを用いたセンシング技術の研究開発が急速に進んでいる。特に光ファイバ中で生じるブリルアン散乱を用いた歪・温度センサは、周波数情報に基づいて比較的高精度に歪・温度の分布を測定できるため、構造物の健全性診断への応用が期待されている。これまでに、自然ブリルアン散乱を用いた「ブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）」など、種々のブリルアンセンサが提案されている[1]。

2 本の光ファイバを接続する一般的な手法として融着接続がある。この過程で接続部分の被覆（樹脂）を取り除く。この作業により融着接続部の光ファイバの強度が劣化する。長期的な信頼性を確保するには破断を防ぐために光ファイバに歪（伸び）が生じないことが重要となる。一方、圧縮歪はそのような悪影響を及ぼさない。

融着部を保護する手段の 1 つとして、熱収縮スリーブを使用する方法がある。スリーブはファイバの周囲に収縮し接着される。ここで、スリーブ内部でファイバに歪（伸び）が印加されている可能性がある。そのため、一般的に使用される温度において、ファイバが圧縮されていることを確認することが重要である。これまでにモード間干渉を用いた熱収縮スリーブによる圧縮歪の測定[2]が提案されているが、多点化が困難である。

そこで本研究では、分布型歪センサである BOCDR を用いて熱収縮スリーブによる圧縮歪の分布測定を行う。

2. 原理と実験系

BOCDR では、光波コヒーレンス関数の合成法[3]に基づき、周波数変調された信号光と参照光を干渉させることで、測定ファイバ（FUT）中に「相関ピーク」と呼ばれる測定位置を生成する。その後、相関ピークを FUT に沿って掃引することで、その各位置におけるブリルアン利得スペクトル（BGS）の分布を取得する。ここから、歪や温度の情報に読み替え可能なブリルアン周波数シフト（BFS）の分布が得られる。

用いた BOCDR の実験系を **Fig. 1** に示す。レーザから出力される光をポンプ光と参照光に分岐する。ポンプ光はサーキュレータを介して FUT に入射し、FUT から戻ってくるブリルアン散乱光（ストークス光）と参照光を干渉させる。その光干渉信号を光検出器（PD）で電気信号に変換し、電気スペクトラムアナライザ（ESA）によって BGS として観測する。実験では波長 1550 nm のレーザ光を入射し、EDFA 1, 2, 3, 4 によってそれぞれ 20.0 dBm, 24.0 dBm, 4.3 dBm, 4.2 dBm に増幅した。レーザの変調振幅を約 2.8 GHz とし、変調周波数を 7.567–7.755 MHz の範囲で掃引した。また、ここから算出される測定レンジと空間分解能はそれぞれ 13.5 m, 4.6 cm である。

FUT の構成を **Fig. 2** に示す。FUT として約 11.8 m のシリカ単一モードファイバ（SMF）を用いた。3 種類の熱収縮スリーブ ((a), (d) FPS-1, 住友電気工業製, (b) SPX3-60S, 日東工業製, (c) SPX3-40S, 日東工業製）を用いた。(a), (b), (c)の各位置には融着点はなく、融着時と同様になるように被覆（樹脂）を除去した。また、(d)では実際に融着接続を行い、スリーブを装着した。ESA の分解能帯域幅, ビデオ帯域幅, 掃引時間, 平均回数はそれぞれ 3 MHz, 1 kHz, 20 ms, 70 回とした。

3. 実験結果

各熱収縮スリーブ付近の BFS の歪分布測定結果を **Fig. 3** に示す。それぞれの BFS 分布は **Fig. 2** の記号に対応している。結果より、各熱収縮スリーブによって圧縮歪が印加されていることがわかる。室温・無歪で BFS は約 10.86 GHz であり、それぞれのスリーブ位置ではそれぞれ 10.820 GHz, 10.826 GHz, 10.830 GHz, 10.822 GHz となった。それぞれ-0.080%, -0.068%, -0.060%, -0.076%の圧縮歪に相当する。以上の結果より、融着接続部の診断ツールとして BOCDR を用いることが有効であることが示された。

今後は傾斜利用 BOCDR を適用し、高速測定を可能にし、超理論空間分解能効果を利用しさらなる長距離化を進める。

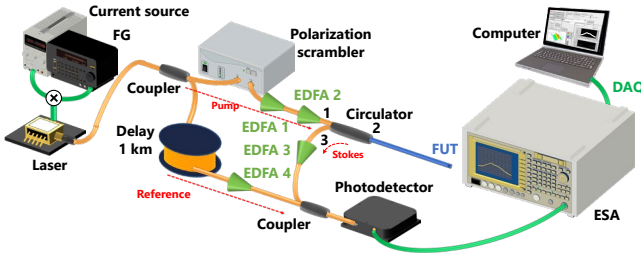


Fig. 1. Experimental setup of BOCDR. FG: function generator, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, FUT: fiber under test, ESA: electrical spectrum analyzer, DAQ: data acquisition.

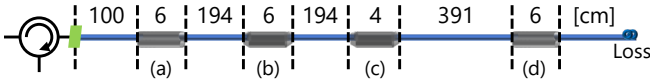


Fig. 2. FUT structure.

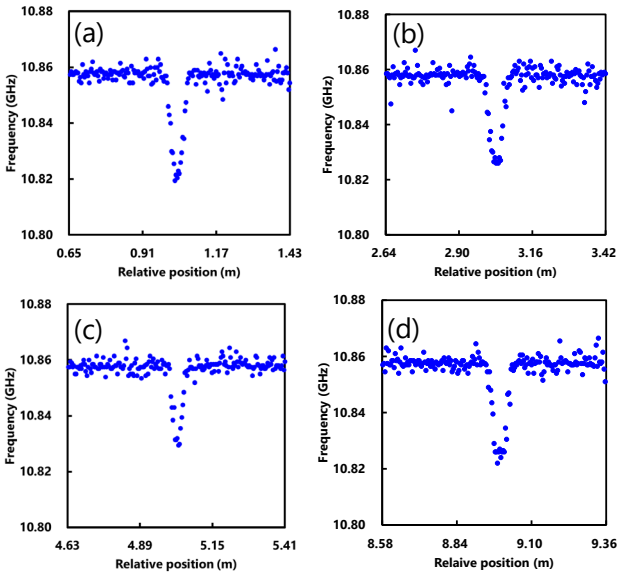


Fig. 3. BFS distributions measured around each heat-shrink sleeve. Symbols (a)–(d) correspond to the positions defined in Fig. 2.

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
[2] T. Veng, et al., *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25**, 1517 (2013).
[3] K. Hotate, et al., *J. Lightw. Technol.* **24**, 2541 (2006).

© 2025年 応用物理学会

POF-BOCDR を用いた 5cm 未満の空間分解能の実現

Sub-5-cm spatial resolution achieved in POF-based BOCDR

○菊地 啓太[1]、白井 振武[2]、越智 星河[2]、鶴谷 柊人[1]、水野 洋輔[2]、李 ひよん[1]
[1]芝浦工業大学 理工学研究科 [3]横浜国立大学 工学研究院
○Keita Kikuchi[1], Shimbu Shirai[2], Seiga Ochi[2], Shuto Tsurugai[1], Yosuke Mizuno[2], and Heeyoung Lee[1]
[1] Shibaura Institute of Technology [2] Yokohama National University
E-mails: af20098@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

「ブリルアン光相関領域反射計(BOCDR)」は、測定ファイバ(FUT)中のブリルアン散乱の周波数シフトに基づき、最高 cm オーダの空間分解能における歪・温度分布測定が可能であるため、注目を集めている。

BOCDR の FUT として、これまで、シリカ単一モードファイバ(SMF)が主に用いられてきたが、数 10%以上の歪にも耐えることができるプラスチック光ファイバ(POF)の利用も進んでいる[2]。

BOCDR では、測定系に入射するレーザ光に周波数変調を施すことで位置分解を実現するが、その空間分解能Δzは周波数変調における変調振幅Δfに依存することが報告されている[3,4]。

Δfを大きく設定することで、Δzの向上が可能だが、レイリー散乱に起因して生じるノイズスペクトル$\Delta N(=2\Delta f)$がブリルアン利得スペクトル(BGS)に重畳することを避ける必要があるため、POF を用いる場合は、Δfはブリルアン周波数シフトf_B(約 2.8 GHz)の半分以下に設定する必要がある。しかし、我々は最近、測定レンジd_mの半分よりも、サーキュレータから FUT の開放端までの長さLを短くすることにより、レイリーノイズΔNの拡がりは抑制可能であることを示した[5]。また、$L \le d_m/2$における、ΔNの理論式も導出した[6]。しかし、導出した理論式では、サーキュレータのシリカ SMF と POF における屈折率の不整合が考慮されていなかった。

そこで本研究では、屈折率の不整合を考慮に入れた、新たなΔNの理論式を導出し、その有効性を実証する。さらに、新たな理論に基づき、POF-BOCDR において最高となる、5 cm 未満の空間分解能における温度分布測定の実証を行う。

2. 原理

BOCDR における理論空間分解能Δzと測定レンジd_mは、以下の式で与えられる[3,4]:

$$\Delta z \approx \frac{c\Delta\nu_B}{2\pi n f_m \Delta f} \tag{1}$$

$$d_m = \frac{c}{2nf_m} \tag{2}$$

ここで、f_mは変調周波数、cは真空中の光速、$\Delta\nu_B$はブリルアン帯域幅（POF では約 105 MHz[2]）、nはコアの屈折率（n_{Silica}: 約 1.46, n_{POF}: 約 1.35）である。

次に示すのは、サーキュレータから FUT の開放端まで、屈折率が一定である場合の、ΔNの理論式である[6]。

$$\Delta N = 2\Delta f \sin\left(\frac{\pi L}{d_m}\right) = 2\Delta f \sin\left(\frac{2\pi f_m}{c} nL\right) \tag{3}$$

このように、ΔNは、nに依存する。サーキュレータのシリカ SMF と POF の屈折率の不整合を考慮に入れた場合、サーキュレータと POF の長さをそれぞれL_{cir}、L_{POF}とすると、ΔNは次のようになる。

$$\Delta N = 2\Delta f \sin\left\{\frac{2f_m}{c}(n_{\mathrm{Silica}}L_{\mathrm{cir}} + n_{\mathrm{POF}}L_{\mathrm{POF}})\pi\right\} \tag{4}$$

3. 実験

標準的な BOCDR の実験系[6]を用い、式(4)の有効性を検証した。サーキュレータはL_{cir}が 0.2, 1.1 m の 2 つと、L_{POF}が 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 m である 4 つを用意し、計 8 パターンにおけるレイリーノイズスペクトル幅ΔNを測定した。全てにおいて、Δf=1.9 GHz に設定し、測定位置が FUT 終端になるようにf_mを調整した。L_{POF}に対する、実測したΔNと、式(3)と式(4)に基づくΔNの理論値を **Fig. 1** に示す。L_{cir}がいずれの場合においても、新たに示したΔNの理論値と実測値が一致していることが確認できる。特に、L_{cir}がL_{POF}に比べ長い場合、より正確にΔNを表現可能であることが確認できる。

続いて、**Fig. 2** に示す FUT の構成を用いて、温度分布測定を実証した。f_mを 14.5549–14.5583 MHz の範囲で掃引した。式(2)より、測定レンジは約 7.6 m となり、許容できる変調振幅の最大値は約 6.76 GHz であるが、BGS の信号対雑音比を考慮し、実験では 5.75 GHz に設定した。このとき、式(1)より、理論空間分解能は 4.4 cm となる。25 cm の POF の中央 10–15 cm における 5 cm 区間を 55°C に加熱した。測定した BGS 分布とそこから算出した BFS 分布を **Fig. 3** に示す。加熱

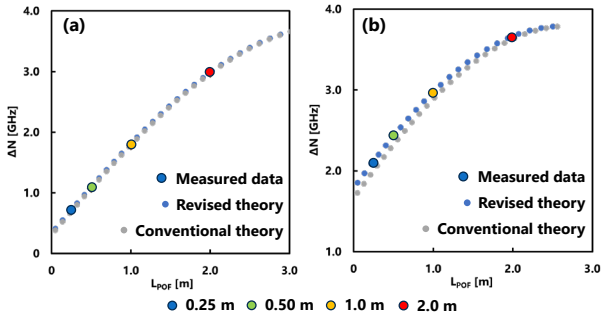


Fig. 1. Rayleigh noise bandwidth ΔN vs. L_{POF}, for L_{cir}= (a) 0.2 m and (b) 1.1 m.

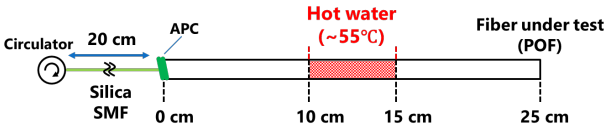


Fig. 2. Structure of the fiber under test. APC: angled physical-contact connector, SMF: single mode fiber.

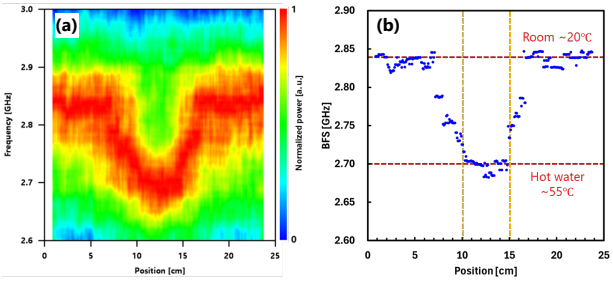


Fig. 3. Measured distributions of (a) BGS and (b) BFS.

を施した 10–15 cm において、室温に対する温度変化 35°C に相当する、-140 MHz の BFS の変化が確認できる(POF における BFS の温度依存係数: -4.0 MHz[2])。また、加熱区間の周辺で BFS が変化しているのは温度伝搬によるものであると考えられる。以上より、従来の POF-BOCDR における最高空間分解能 7 cm を超えた、4.4 cm の空間分解能における温度分布測定を実証した。

4. まとめ・今後の予定

本研究では、POF-BOCDR におけるレイリーノイズスペクトル幅ΔNの理論式において、従来、考慮されていなかった、サーキュレータにおけるシリカ SMF と POF の屈折率の不整合を考慮したΔNの新たな理論式を導出し、実験的に有効性を検証した。特に、L_{cir}がL_{POF}に比べ長い場合、より正確にΔNを導出できることが分かった。さらに、従来の POF-BOCDR における最高空間分解能 7 cm を超えた、4.4 cm の空間分解能における温度分布測定を行い、5 cm 区間の温度変化を検出した。今後は、変調周波数による空間分解能向上と両立を図ることで、1 cm 未満における空間分解能の実現を目指す。

参考文献

[1] A. H. Hartog, *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors* (CRC Press, Boca Raton, 2017).
[2] Y. Mizuno, et al., Appl. Phys. Lett. **97**, 021103 (2010).
[3] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
[4] Y. Mizuno, et al., J. Lightwave Technol. **28**, 3300 (2010).
[5] K. Kikuchi, et al., Sci. Rep. **14**, 8112 (2024).
[6] S. Ochi, et al., Opt. Fiber Technol. **90**, 104144 (2025).

© 2025年 応用物理学会

酸化テルル系ガラスを用いた新規ランダム断面構造光ファイバの作製

A Novel Fabrication Method for Transversely Disordered Optical Fiber Using Tellurium Oxide-Based Glass

豊田工大　○(M2)太田裕友, 中谷明日佳, 鈴木健伸, 大石泰丈

Toyota Tech. Inst. ○Yusuke Ota, Asuka Nakatani, Takenobu Suzuki, Yasutake Ohishi

E-mail: sd24414@toyota-ti.ac.jp

1. 緒言

赤外領域における高解像度なイメージ伝送の実用化のための課題として、赤外透過率および解像度の低さが挙げられる。本研究では、赤外透過率の高い二酸化テルルを主成分としたガラスを選択し、ファイバ構造としてランダム断面構造光ファイバ(TDOF: Transversely Disordered Optical Fiber)[1]を採用した。TDOF とは、長手方向には一様でありながら、断面方向には無秩序な屈折率分布を持つ光ファイバである。この構造では、光の局在化による高解像度伝送が期待されるが、同種の屈折率の偏りによりクラスタが形成され、画像品質が劣化するという課題がある。この課題を解決するため、新たな断面構造モデルを提案する(図 1 (a)参照)。この断面構造を持つ TDOF の作製を行うことにより、赤外領域での高解像度なイメージ伝送の実現を目的とした。

2. TDOF の作製

本研究で作製した TDOF は、屈折率の異なる二種類のガラスを事前に組み合わせ、それらをランダムな向きに多数充填することで断面構造を形成している。この作製手法により、屈折率分布のランダム性を保ちつつ、クラスタの形成を抑制できると期待される。断面内の構造ピッチはビーム伝搬法(BPM)により最適化を行い、波長 1.55μm の赤外光を効果的に伝搬させるためには、構造サイズが 3-6μm であることが適切だと見積もられた。得られた TDOF の断面を光学顕微鏡により観察した結果、構造は断面全体にわたり均一かつランダムに形成されており、局所的なクラスタや欠陥が抑えられていることを確認できた(図 1 (b)参照)。また SEM を用いた詳細な観察により、設計に基づいた適切な構造サイズおよび形状を有していることを確認した(図 1 (c)参照)。

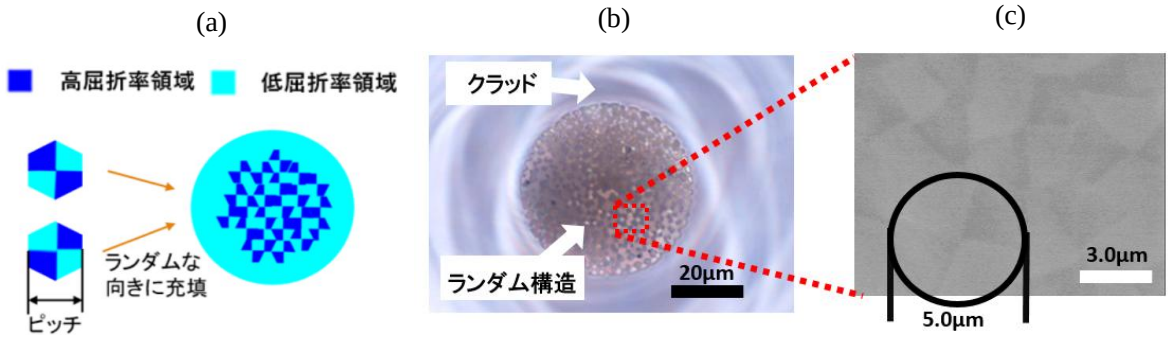


図 1(a)新規構造の TDOF　(b)作製した TDOF の光学顕微鏡画像　(c)作製した TDOF の SEM 画像

[1] S.Karbasi *et al.*, “Observation of transverse Anderson localization in an optical fiber,” Opt. Lett. 37, 2304-2306 (2012).

© 2025年 応用物理学会

OCT に向けた分散チューニングレーザの構成及び最適化に関する検討

Dispersion Tuned Swept Laser Setup and Optimization for OCT

東大工[1]，東大先端研[2] ○(M2)陳 泓旭[1]，麻 一凡[2]，山口 尚紀[2]，
セット ジイヨン[2]，山下 真司[1]

Tokyo Univ.[1], RCAST, Tokyo Univ.[2], ◦Hongxu Chen[1], Yifan Ma[2], Naoki Yamaguchi[2],
Sze Yun[2], Shinji Yamashita[2]

E-mail: jchenhongxu@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

光干渉断層撮像技術(Optical Coherence Tomography)は非破壊・非接触のイメージング技術として、μm レベルでの空間分解能や数 mm の測定範囲などの特徴を持っており、医療診断や産業測定などの用途によく使用されている。その中で Swept-Source OCT があり、広波長帯域で、波長掃引可能な光源が求められている。波長選択手法として、ファブリペロー型波長可変フィルタを挿入するなどがあったが、機械的な変調動作により光源の掃引速度が制限されるという欠点が存在する。

そこで図 1 のように共振器中に高波長分散を持つ cFBG(chirped Fiber Bragg Grating)を挿入することにより、LN 光強度変調器を使い強度変調をして、能動モード同期を行いながら変調周波数を周期的に変化させることによって、変調周波数に応じて発振波長を掃引させる分散チューニング手法を提案した。このシステムに、電気信号により波長を制御できるので、原理的に高速掃引と広波長帯域の両立が実現できる。先行研究には、788.2MHz~795.2MHz の変調範囲で 50nm の波長掃引、100kHz までの掃引速度を実現した[2]。本研究では、共振器を 10.1m にし、半導体増幅器(BOA1004P)を利用して、変調周波数を最適化として 779.8MHz~789.8MHz に設定することにより、図 2 に示すように 80nm の波長掃引範囲、125kHz までの安定掃引を成功させた。また、図 3 の OCT 動作を模擬するための干渉計を利用し、10kHz、40kHz、80kHz、125kHz 掃引速度において距離に対する干渉信号の強度変化を図 4 .(a)の点像関数(PSF)に表す。6dB roll-off を最大 1.5mm の所で確認した。さらに、変調周波数を 1.39GHz まで上げる場合の安定掃引発振も成功させ、図 4.(b)に示すように最大 6dB roll-off 点を 2.5mm まで延長することを実現した。

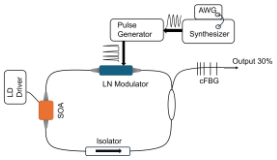


図 1.分散チューニングレーザ構造

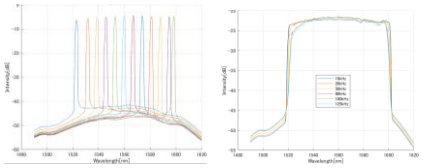


図 2.(a)発振スペクトル (b)掃引範囲

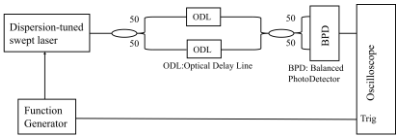


図 3．干渉計

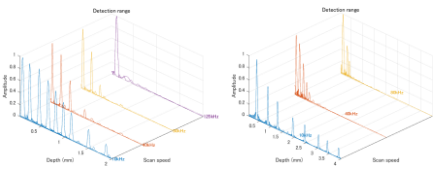


図 4.(a)779.8~789.8MHz (b)1.393~1.403GHz

参考文献：[1] R. Huber, et al, Optics express 13, 3513–3528 (2005).

[2] T. Shirahata, el al, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology,38(23),6492-6498, Dec, 2020.

© 2025年 応用物理学会

高 NA ファイバにおけるブリルアン周波数シフトの歪および温度依存性

Strain and temperature dependences of Brillouin frequency shift in high-NA fibers

○岩嵜 脩[1]、菊地 啓太[1]、柳下 夏穂[2]、白井 振武[2]、水野 洋輔[2]、李 ひよん[1]
[1]芝浦工業大学 理工学研究科 [2]横浜国立大学 工学研究院

○Shu Iwasaki[1], Keita Kikuchi[1], Natsuho Yagishita[2], Shimbu Shirai[2], Yosuke Mizuno[2], and Heeyoung Lee[1]
[1] Shibaura Institute of Technology [2] Yokohama National University
E-mails: af21017@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

分布型光ファイバセンサは、ファイバに沿った歪や温度の測定が可能であるため、インフラモニタリング技術としての応用が期待され、研究開発が盛んに行われている。中でも、ブリルアン散乱を用いたセンシング技術は、散乱光の周波数シフト量に基づき、比較的高精度な歪・温度の測定が可能であるため、注目を集めている[1]。

ブリルアン散乱光の周波数は、入射光に対して、ブリルアン周波数シフト(BFS)だけダウンシフトする。BFS は、光ファイバに印加された歪や温度変化に対して線形に変化するため、BFS の測定によりファイバの歪や温度の推定が可能となる。BFS の歪依存係数や温度依存係数は、光ファイバの構造や材質によって異なる。これまで、シリカ単一モードファイバ(SMF) [2,3]を始め、種々の高非線形ファイバ[4]、フォトニック結晶ファイバ[5]、プラスチックファイバ[6]など、様々な光ファイバの BFS の歪・温度依存特性が調査されている。

一方、開口数(NA: Numerical aperture)が 0.2 や 0.3 を超える、高 NA シリカファイバは、ファイバレーザや光集積回路など、様々な場面で応用されている。これまでに、10 km 以上の長距離の高 NA ファイバを用いて、ブリルアン利得係数や誘導閾値などは報告されている[7]。一方で、BFS の歪・温度依存性は検証されていない。

そこで本研究では、**Table 1** に示す高 NA ファイバ 4 種類に対し、ブリルアン利得スペクトル(BGS)の観測と、BFS の歪・温度依存係数を測定し、それぞれ比較を行った。

2. 実験

自己ヘテロダイン検波系(**Fig. 1**)を利用し、**Table 1** に示す 4 種類のファイバ(THORLABS)、それぞれ 1 m の BGS を観測した。レーザからは波長 1550 nm の光を入射し、EDFA1、2、3 の出力は、それぞれ 27、1.9、5.0 dBm とした。

温度依存係数の測定では、測定するファイバ全長をホットプレートに貼り付け、温度を均一に保つためアルミホイルで覆った。40–90℃で 10℃毎に BGS を観測した。

歪依存係数の測定においては、室温 23℃の下で、ファイバの両端を固定ステージとマイクロメータ付き可動ステージに固定し、可動ステージの位置を調整して、歪を印加した。ある程度引張した状態を 0%とし、0.1%まで 0.02%ずつ印加したときの BGS を測定した。BFS は、BGS のピークパワーにおける周波数として算出した。

3. 実験結果

室温 23℃、歪を印加していないときにおける各 BGS をまとめたものを **Fig. 2** に示す。10.8 GHz 付近に観測できるのはサーキュレータの第 2 ポート部分におけるシリカ SMF による BGS である。NA が高くなるにつれ、BFS の値は小さくなっている。一方で、信号対雑音比（SNR）は大きくなっていることが確認できる。これは、NA が高くなるにつれ、モードフィールド径(MFD)や有効断面積が小さくなるためと考えられる。高 NA ファイバとシリカ SMF における、測定した BFS の温度依存係数と歪依存係数の NA 依存性を **Fig. 3** に示す。歪と温度、両方において、NA が高くなるにつれ、依存係数は小さくなった。NA に対して歪・温度依存係数が異なるのは、NA や MFD を各値に設定するため、コア径やコアに添加される Ge 量が調整されることに起因する可能性がある。

4. まとめ・今後の予定

本研究では、これまで調査されていなかった高 NA ファイバにおける BFS の歪・温度依存係数の測定を行った。NA が高くなるにつれ、BFS の歪・温度依存係数はともに、小さくなる傾向が得られた。これにより、高 NA ファイバは歪や温度以外に BFS を変化させ得るその他の物理量(圧力など)の安定なセンシングに有効である可能性がある。

今後は、高 NA ファイバにおける BGS の SNR が、シリカ SMF よりも比較的高いことを活かし、高精度かつ高分解能における歪・温度分布測定の実証を目指す。

Table 1 Parameters of high-NA fibers (THORLABS) and single-mode fibers used at 1550 nm.

	UHNA1	UHNA3	UHNA4	UHNA7	SMF
NA	0.28	0.35	0.35	0.41	0.13
Core Diameter	2.5 μm	1.8 μm	2.2 μm	2.4 μm	~8 μm
MFD	4.8 ± 0.3 μm	4.1 ± 0.3 μm	4.0 ± 0.3 μm	3.2 ± 0.3 μm	~10 μm

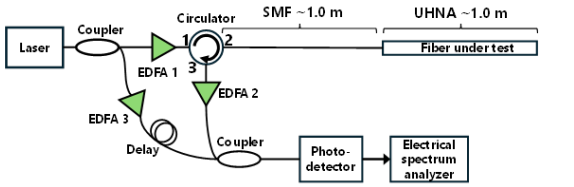


Fig. 1. Experimental setup for Brillouin characterization. EDFA: erbium-doped fiber amplifier.

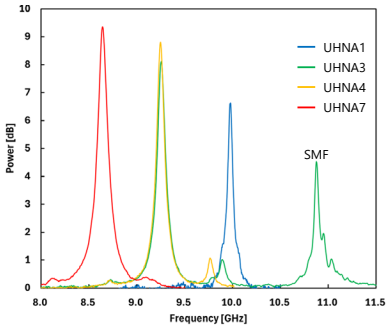


Fig. 2. Brillouin scattering spectra in UHNA 1, 3, 4, 7 and SMF.

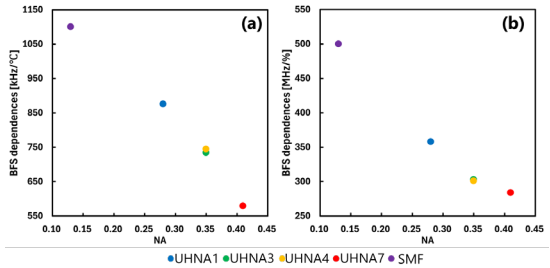


Fig. 3. NA dependence of the (a) temperature and (b) strain coefficients of the BFS.

参考文献

[1] A. H. Hartog, *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors* (CRC Press, Boca Raton, 2017).
[2] T. Horiguchi et al, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **1**, 107 (1989).
[3] T. Kurashima et al, *Appl. Opt.* **15**, 2219 (1990).
[4] Y. Mizuno, et al., *Appl. Phys. Express* **2**, 112402 (2009).
[5] W. Zou, et al., Opt. Express 20, 11083 (2012).
[6] Y. Mizuno, et al., *Opt. Lett.* **35**, 3985 (2010).
[7] L. Jiang, et al., *Opt. Commun.*, **459**, 125040 (2020).

© 2025年 応用物理学会

熱湯テーパを施したアクリル POF における透過損失の引張依存性

Tensile dependence of transmission loss in acrylic POFs processed by hot-water tapering

○鶴谷 柊人[1]、山本 理喜[1]、菊地 啓太[1]、水野 洋輔[2]、李 ひよん[1]
[1]芝浦工業大学 大学院理工学研究科 [2]横浜国立大学 大学院工学研究院

○Shuto Tsurugai[1], Riki Yamamoto[1], Keita Kikuchi[1], Yosuke Mizuno[2], and Heeyoung Lee[1]
[1]Shibaura Institute of Technology [2]Yokohama National University

Emails: af20095@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

光ファイバを用いた分布型センシングは、橋梁やトンネルの構造ヘルスモニタリングにおいて注目されている。従来用いられてきたシリカファイバは比較的脆く、ひずみ耐性が数%と低いため、柔軟で高いひずみ耐性（数十%以上）を持つプラスチック光ファイバ（POF）が有望な代替材料として注目されている。

しかし、POF はコア径が大きくマルチモード伝搬によるモード干渉や信号の不安定性を引き起こしやすく、センサの性能向上も困難である。これらの課題の改善策として、テーパ加工（コア・クラッド径の縮小）によりモード数を抑制し、光パワー密度を高める手法が有効である[1–3]。

テーパ加工には化学エッチング法などがあるが、安全性などの問題があった。これらに対し、POF の低いガラス転移温度を活かした熱湯テーパ加工法[3]が提案され、安全かつ等方的な加熱が可能な低コスト技術として期待されている。これまでに、全フッ素化 POF [4]のみならず、安価で広く流通しているアクリル POF への熱湯テーパ加工法の適用が実証されているが、その透過損失の傾向についての報告はなかった。

そこで本研究では、アクリル POF に対して熱湯テーパ加工を施し、加工後の光透過特性と引張ひずみに対する損失変化を評価するとともに、熱湯への浸漬時間が光伝送特性と加工性に与える影響を調査した。

2. 実験系

熱湯テーパ加工のための独自に構築した装置を用いて、アクリル系 POF の段階的な引張試験を行った。使用したファイバは、外径 500 μm の SI 型 POF（材質：PMMA）で、全長 1 m のうち中央 140 mm 部分を約 97 °C の熱湯に浸した。一方の端を固定し、もう一方を自動ステージで 0.2 mm/s の一定速度で引っ張った。蒸発による水位低下を防ぐため、熱湯は適宜補充し、一定の水深と温度を保った。

Fig. 1 に装置構成を示す。波長 650 nm のレーザからの光を POF に入射し、透過光は単一モードファイバ（SMF）を通して光スペクトラムアナライザ（OSA）でリアルタイムに観測した。また、熱湯への浸漬時間が光伝送特性と加工性に与える影響を調べるため、5 秒、60 秒、600 秒と浸漬時間を変化させ、破断するまでの最大引張距離と、加工中の発光状態を調査した。

3. 実験結果

初期の光伝送損失は−40 dB 程度であり、600 秒加熱後も同等であったことから、熱による伝搬損失の増加は無視できるほど小さいといえる。いずれの浸漬時間の場合においても、加熱領域（140 mm）を約 120%程度まで引き伸ばすことができた。**Fig. 2**（600 秒）に示すように、テーパ部の発光状態はどの浸漬時間でもほぼ同じで、時間が加工品質に与える影響は小さいと考えられる。

続いて、125%まで引張したときの透過光と損失の傾向について **Fig. 3**(a),(b)に示す。ひずみが 100%を超えると光損失が急増した。これは、テーパ部に白濁が生じ始めたためである。白濁化の原因は、内部に微小なクラックや気泡が発生したことによると考えられる。**Fig. 4** にはテーパ部の外径分布を示す。テーパ部の外径は約 350 μm であり、外径は約 30%縮小した。

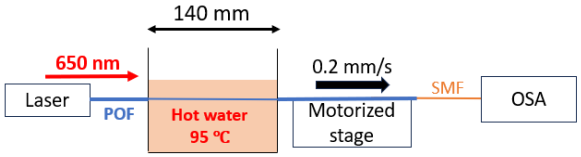
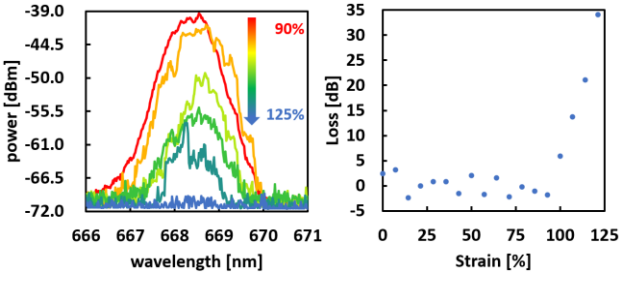


Fig. 1. POF tapering setup using hot water.



Fig. 2. Emission profiles of the tapered region under tensile strain from 0% to 120% (with a pre-immersion time of 600 s).



(a) (b)

Fig. 3. (a) Variation in transmitted spectra during elongation. (b) Relationship between transmission loss and strain calculated from the spectra.

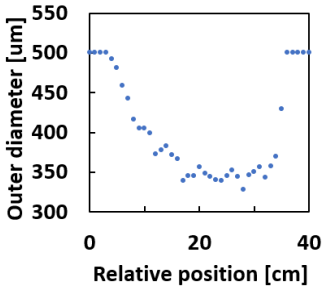


Fig. 4. Outer diameter profile of the tapered POF after 120% elongation.

参考文献

[1] N. Hayashi, et al., *J. Appl. Phys.* **115**, 173108 (2014).
[2] H. Ujihara, et al., *Appl. Phys. Express* **8**, 072501 (2015).
[3] Y. Mizuno, et al., *Appl. Phys. Express* **10**, 062502 (2017).
[4] Y. Koike et al., *NPG Asia Mater.* **1**, 22 (2009).

© 2025年 応用物理学会

Analysis of the Polarization and Wavelength Dependence of Photonic Lanterns

Rodrigo Itzamná Becerra-Deana,[1,2] Joseph Lamarre,[1,2] Raphael Maltais-Tariant,[1] Nicolas Godbout,[1,2] Stéphane Virally,[1] and Caroline Boudoux[1,2]
[1] Polytechnique Montréal, Montréal, Canada. [2] Castor Optics, Saint-Laurent, Canada.
Caroline.boudoux@polymtl.ca

1. Introduction

Photonic lanterns (PL) are fiber-based spatial (de)multiplexers, innovative waveguide devices that transfer light bidirectionally between multimode and single-mode waveguides [1]. Mode-selective photonic lanterns (MSPLs) are a subset of PLs that map transverse modes in a multimode section one-to-one with single-mode fibers in a bundle. The diverse applications of PLs span astrophysics, telecommunications, and biophotonics [1-3].

PLs' key characteristics are near-lossless performance (lower than 1dB of excess loss), large operational bandwidth (up to 500nm) [3], and high modal isolation (higher than 20dB) in the case of MSPLs. Some limitations of traditional PLs, such as single-mode compatibility, robustness, or scalability, can be addressed by using double-clad or graded-index fibers [4,5], which are the object of this paper. We present some intriguing characteristics of the optical profile response of various PLs, which depend on wavelength and polarization.

2. Methodology

Various types of 3-mode PLs are fabricated by fusing and tapering a fiber bundle of multiple double-clad fibers, making it into a few-mode or multimode structure within tens of microns in diameter. These fiber bundles are inserted into a low-index capillary tube to limit unwanted mechanical deformations. We devised a full setup to characterize the response of these PLs depending on input wavelength and polarization. This setup is presented in Fig. 1.

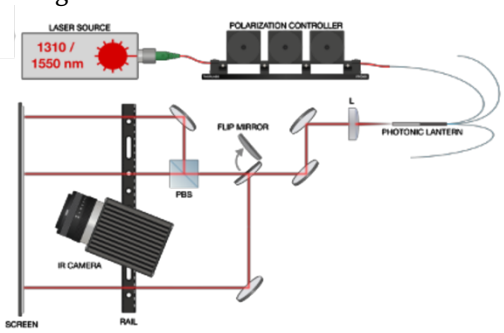


Fig 1. Optical setup

3. Results

All photonic lanterns fabricated for this project exhibit near-lossless performance, maintaining excess losses below 0.5 dB across a broad wavelength range of 500 nm. Fig. 2 shows a far field image of the output of the multimode section of two specific PLs when illuminated at various wavelengths and in various polarization states at one input of the bundle. Specifically, Fig. 2a shows the images for a regular PL, and Fig. 2b the images for an MSPL. On the left of each subfigure, the image is obtained when both polarization states are present. On the right, two orthogonal polarization states are shown. The images for the regular PL reveal significant changes in optical profiles depending on the wavelength and the polarization state of the illumination. In contrast, the MSPL images are very similar for all illumination cases.

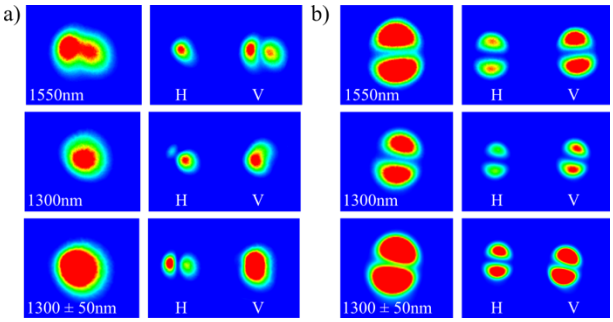


Fig 2: Far field images of the output of a) a regularPL, and b) an MSPL, for illuminations at various wavelengths and polarization states. The different wavelength cases are 1300 and 1550 nm narrow band, and a wideband case with a source spanning the 1250-1350 nm interval.

4. Conclusion

The output of standard PLs varies largely depending on the wavelength and the type of polarization of their illumination. In contrast, MSPLs provide stable optical properties across different conditions of illumination.

Acknowledgements

The authors thank Mikaël Leduc for his invaluable input and acknowledge funding from HORIZON EUROPE, European Research Council, MIRAQLS project, and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

References

[1] T. A. Birks, et al, Adv. Opt. Photon. **7** (2015)
[2] R. Maltais-Tariant, et al, Biomed. Opt. Express **14** (2023)
[3] N. K. Fontaine, et al, Proceedings of the IEEE **110** (2022)
[4] A. M. Velázquez-Benítez, et al, Sci Rep. **8** (2018)
[5] R. I. Becerra-Deana et al, J. Light. Technol. **43** (2025)

© 2025年 応用物理学会

Seismic Vibration Monitoring Utilizing Optical Fiber Sensors and YOLO-v7

Pradeep Kumar [1*], Ruchi [2], KM Priynaka[2]

[1]Department of Electro-Optical Engineering, National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan

[2]Department of Electronics and Communication Engineering, Netaji Subhas University of Technology, Delhi, India

E-mail: t111999408@ntut.org.tw

Introduction

Seismic vibration monitoring plays a critical role in assessing structural integrity and detecting seismic events in industrial and civil infrastructures [1]. Traditional methods, while accurate, often lack scalability and real-time responsiveness. To overcome these challenges, this study proposes a novel approach that combines Fiber Bragg Grating (FBG) sensors with a YOLOv7-based deep learning framework. FBG sensors offer high sensitivity, electromagnetic immunity, and distributed sensing capabilities. A single FBG sensor is employed to detect seismic vibrations simulating seismic activity, with the recorded data processed by a customized YOLOv7 model. Although typically used for object detection [2], YOLOv7 is adapted here to classify vibration patterns in real time, offering a scalable and cost-effective solution for intelligent structural health monitoring.

Methodology

A simulation-based framework was developed using a single FBG sensor modeled on the CP-8000 (Citpo Technologies Co., Ltd.), featuring a 1550.0 nm central wavelength, 40 Hz frequency range, and ±10 m/s² dynamic range [3]. Synthetic seismic vibration signals, converted to wavelength shifts (1549.4–1550.8 nm), represent FBG responses under four levels of simulated seismic intensity. The vibration or strain-to-wavelength shift follows [2]:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2\eta_{\text{eff}}, \quad \frac{\Delta\lambda_{\text{Bragg}}}{\lambda_{\text{Bragg}}} = (1 - p_e)$$

Simulated wavelength shifts from 1549.2 to 1550.6 nm represent realistic FBG responses under strain.

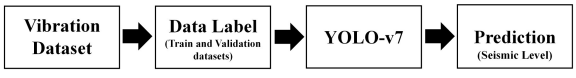


Fig. 1 YOLO-v7-based seismic vibration detection framework.

Four synthesized vibration intensity levels were generated. These time-series vibration signal levels were used to train a YOLOv7 model for classifying seismic vibration levels, as illustrated in Fig. 1, enabling real-time monitoring through deep learning integration.

Result and discussion

Fig. 2 presents the YOLO-v7 model's predictions for four distinct seismic vibration levels, visualized through time-series plots of wavelength shifts. The top left plot shows the “No Seismic” condition, where the waveform remains mostly flat, indicating no vibration. The top right represents “Level 1” with small fluctuations, suggesting mild vibrations. The bottom left plot, labeled “Level 2,” shows increased oscillations, indicating moderate seismic activity. Finally, the bottom right plot illustrates “Level 3,” with frequent and sharp spikes, reflecting high-intensity vibrations. These plots demonstrate the model’s capability to distinguish seismic levels based on variations in wavelength over time.

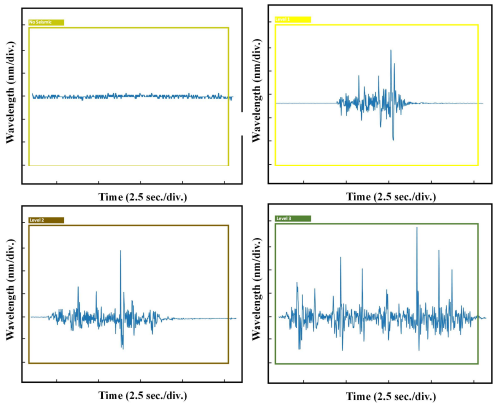


Fig.2 YOLOv7 predictions for four seismic levels based on wavelength

Conclusion

This study presents a novel approach to seismic vibration monitoring by integrating a single FBG sensor with a YOLO-v7 deep learning model. Simulated data representing four seismic vibration levels were used to train the model, which successfully classified time-series patterns of seismic intensity. The repurposed YOLO-v7 model demonstrated strong performance in recognizing vibration signals, despite being originally designed for image detection. This hybrid system offers a scalable, real-time, and cost-effective solution for structural health monitoring. Future work will focus on implementing the system in real-world conditions and expanding detection capabilities to multiple sensing points.

References

[1] Z. Qiu, Y. Zhang, J. Zhang, Y. Teng and X. Wang, "A Study on Low-Frequency FBG Acceleration Transducer for Seismic Monitoring," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 3, pp. 2522-2530, 1 Feb.1, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2023.3341860.

[2] P. Kumar, G.-L. Shih, C.-K. Yao, S. T. Hayle, Y. C. Manie, and P.-C. Peng, “Intelligent vibration monitoring system for smart industry utilizing optical fiber sensor combined with machine learning,” Electronics, vol. 12, no. 20, p. 4302, 2023, doi: 10.3390/electronics12204302.

[3] Citpo Technologies Co., Ltd., “CP-8000 FBG Accelerometer,” Citpo Technologies, [Online]. Available: https://citpo.com.tw/?action=index&lang=en. [Accessed: Jun. 17, 2025].

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[8a-N402-1~12] 3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[8a-N402-1]

[The 58th Young Scientist Presentation Award Speech] Observations of the upper atmosphere with resonance-scattering Ca/Ca^+ lidar

○Ayaka Hashimoto[1], Mitsumu K. Ejiri[2,3], Sota Kobayashi[1], Sayako Miyoshi[1], Hikaru Miyagi[1], Ken'ichi Nakagawa[1], Takuo T. Tsuda[1], Keisuke Hosokawa[1], Takuji Nakamura[2,3], Masayuki Katsuragawa[1,2] (1.Univ. of Electro-Comms., 2.National Inst. of Polar Res., 3.The Grad. Univ. for Advanced Studies (SOKENDAI))

[8a-N402-2]

Accurate measurement of water isotope spectra using CRDS

○Koji Hashiguchi[1], Ikuhiko Saito[1], Daniel Lisak[2], Agata Cygan[2], Roman Ciurylo[2], Hideki Ogura[1] (1.NMIJ/AIST, 2.UMK)

[8a-N402-3]

Development of a phase stabilization method for one-photon interference in quantum communication

○(D)Yohei Sugiyama[1], Akito Ozawa[1], Tomoyuki Horikiri[1,2], Daisuke Akamatsu[1], Feng-Lei Hong[1,2] (1.Grad. Sch, Eng. Sci., YNU, 2.IMS, YNU)

[8a-N402-4]

Simultaneous detection of f_{ceo} and f_{beat} using a single-branch architecture with a dual-pitch PPLN waveguide for optical lattice clock networks

○Kenichi Hitachi[1], Hiromitsu Imai[1], Kota Nishiyama[1,2], Mayuri Nakagawa[2], Tomoya Akatsuka[1], Haruki Sanada[1], Katsuya Oguri[1] (1.NTT BRL, 2.NTT NS Lab.)

[8a-N402-5]

Suppression of spectral interference by bending antiresonant hollow-core fibers for precision spectroscopy

○(M1)Yu Abe[1], Takashi Kato[1], Akifumi Asahara[1], Yuxi Wang[2], Trivikramarao Gavara[2], Wonkeun Chang[2], Kaoru Minoshima[1] (1.UEC, 2.NTU)

[8a-N402-6]

Optically induced nonlinear mechanical response of a fiber-type microresonator

○Hideki Arahari[1], Motoki Asano[1], Hiroshi Yamaguchi[1], Hajime Okamoto[1] (1.NTT Basic Res. Labs.)

[8a-N402-7]

Fabrication of Fluoride Fiber Spectroscopic Cells via Femtosecond Laser Processing and Their Application to Mid-Infrared Spectroscopy of Sake Constituents

○(M2)Gakuto Ishida[1], Masaya Sugimoto[1], Hiyori Uehara[2], Shigeki Tokita[3], Kenji Goya[1], Yoshiaki Nishijima[4] (1.Akita Prefectural Univ., 2.National Institute for Fusion Science., 3.Kyoto Univ. Institute for Chemical Research., 4.YOKOHAMA National Univ.)

[8a-N402-8]

Simultaneous dispersive mid-infrared spectroscopy of absorption and reference beams for breath analysis

○Tsubasa Endo[1], Kotaro Nakagawa[1], Luxiang Wang[1], Takayuki Terazono[1], Osamu Komeda[2], Hiroyuki Suto[2], Hiroaki Saitoh[2], Yohei Kobayashi[1] (1.ISSP, Univ. Tokyo, 2.Toyota Motor Corp.)

[8a-N402-9]

Enhancement of sensitivity of 8~12 μm mid-infrared spectroscopic system for breath diagnosis

○Takayuki Terazono[1], Yukihiro Akiyama[1], Tsubasa Endo[1], Kotaro Nakagawa[1], Osamu Komeda[2], Hiroyuki Suto[2], Hiroaki Saitoh[2], Yohei Kobayashi[1] (1.ISSP, Univ. Tokyo, 2.Toyota Motor Corp)

[8a-N402-10]

Development of cavity ring-down spectroscopy using sideband scanning of an electro-optic modulator

○(M1)Daiki Hashimoto[1], Ryohei Terabayashi[1], Ningwu Liu[1], Shotaro Kitajima[1], Norihiko Nishizawa[1], Hideki tomita[1] (1.Nagoya Univ.)

[8a-N402-11]

Measurement of gas temperature based on a narrow-band infrared camera

○Hideki T. Miyazaki[1], Takeshi Kasaya[1], Masahiro Saito[1], Kazuya Kimoto[1], Yutaro Tsuiki[1], Tetsuyuki Ochiai[1] (1.NIMS)

[8a-N402-12]

Enhancing spatial resolution in SRS imaging of high-refractive-index samples using a solid immersion lens

○Yuki Sano[1], Hiroyuki Omiya[2], Takashi Takahashi[2], Yasuyuki Ozeki[1] (1.Univ. Tokyo, 2.Tokyo Electron)

共鳴散乱 Ca/Ca⁺ライダーによる超高層大気観測

Observations of the upper atmosphere with resonance-scattering Ca/Ca⁺ lidar

電通大[1]，極地研[2]，総研大[3]
○(D)橋本 彩香[1]，江尻 省[2,3]，小林 蒼汰[1]，(M2)三好 咲也子[1]，宮城 晃[1]，
中川 賢一[1]，津田 卓雄[1]，細川 敬祐[1]，中村 卓司[2,3]，桂川 眞幸[1,2]
Univ. of Electro-Comms.[1], National Inst. of Polar Res.[2], The Grad. Univ. for Advanced Studies (SOKENDAI)[3]
Ayaka Hashimoto[1], Mitsumu K. Ejiri[2,3], Sota Kobayashi[1], Sayako Miyoshi[1], Hikaru Miyagi[1],
Ken'ichi Nakagawa[1], Takuo T. Tsuda[1], Keisuke Hosokawa[1], Takuji Nakamura[2,3], Masayuki Katsuragawa[1,2]
E-mail: hashimoto@mklab.es.uec.ac.jp

地球大気全体をシステムとして捉える上では、中性大気から電離大気までを一つながりの大気として捉えることが重要である。なかでも、中性大気から電離大気へと遷移する中間圏・下部熱圏領域はその相互作用も複雑であるが、この領域に分布する流星起源の金属原子・イオンは、中性大気と電離大気の相互作用を明らかにする上で重要な手がかりとなる。共鳴散乱ライダーはこれらの金属種を、中性大気および電離大気のトレーサーとし、地上から高い時間・高度分解能で物理量（密度、温度、速度）観測が可能な数少ない手法の一つである。本研究では、地上からのライダー観測で唯一、中性とイオンの両状態の観測が大気の吸収を受けずに可能であるカルシウムをターゲットとし、先進的なレーザー技術を用いることで、両状態の同一時空間観測を実現できる共鳴散乱ライダーを開発した。本研究の中核をなすレーザーシステムは、レーザー共振器の出力結合ミラーの反射特性を精密に設計することで、カルシウムとカルシウムイオンの共鳴波長に対応する二波長（Ca：422.7918 nm×2、Ca^+：393.4770 nm×2）を、単一のレーザー共振器で同時に安定発振させる優れた性能をもつ。

本講演では、開発したライダーシステムにより、カルシウム両状態の同時観測を試験的に一晩にわたり行った結果を示す（Fig. 1）。観測時における送信ビームの平均パワー、時間分解能、高度分解能は以下の通りである。カルシムに対しては、0.2 W、30 s、15 m であり、カルシウムイオンに対しては、0.4 W、30 s、30 m である。本ライダーシステムを運用し、同一時空間におけるカルシウムとカルシウムイオンの詳細な振舞いを捉えることに成功した。両状態の観測結果は一見類似した振る舞いを示しているが、詳細に比較することで、カルシウムイオンが高度 100 km 付近において高密度な層を形成していること、また、カルシウムがカルシウムイオンに対して低高度の層において相対的に高い密度を示す傾向が明らかとなった。当日は、観測結果の詳細に加えて、開発したライダーシステムの概要および同時観測の進捗状況についても報告したい。

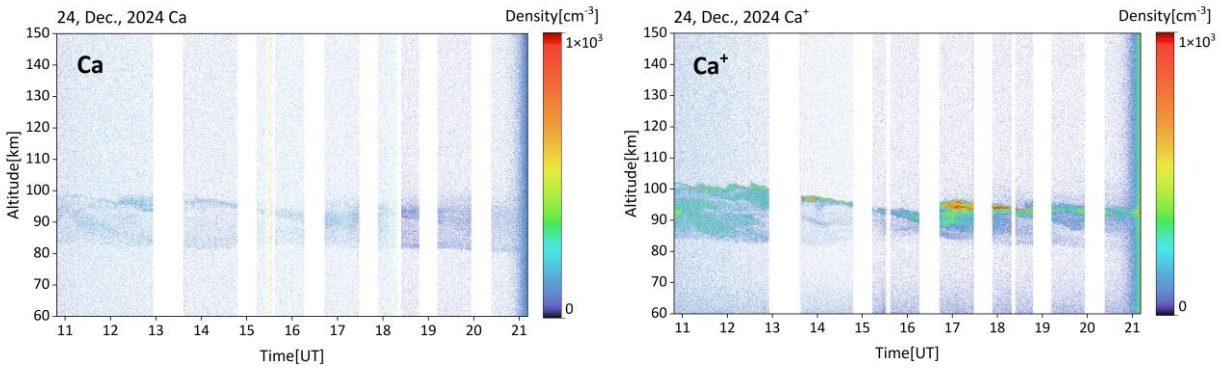


Fig. 1. Simultaneous observation of Ca and Ca^+ for an entire night (at Tachikawa; 24, Dec., 2024).

© 2025年 応用物理学会

CRDS を用いた水の同位体の高精度スペクトル測定

Accurate Measurement of Water Isotope Spectra Using CRDS

産総研[1], ニコラス・コペルニクス大学[2]

○橋口 幸治[1], 斉藤 郁彦[1], Lisak Daniel[2], Cygan Agata[2], Ciuryło Roman[2], 小倉 秀樹[1]

NMIJ/AIST[1], UMK[2]

○Koji Hashiguchi[1], Ikuhiko Saito[1], Daniel Lisak[2], Agata Cygan[2], Roman Ciuryło[2], Hideki Ogura[1]

E-mail: koji.hashiguchi@aist.go.jp

現在の実用的な温度標準である 1990 年国際温度目盛（ITS-90）において、水の三重点の温度（約 0.01 ℃）は、温度計の校正に必須な温度定点の一つとして用いられている。この三重点温度は水の同位体比に影響を受けることが報告されており、三重点温度の実現精度の向上、及び、温度計校正の信頼性の確保のためには、水の同位体比の精確な情報が必要である。ところが、水の同位体の測定、なかでも存在比が低く、他の同位体の影響も受けやすい $H_2{}^{17}O$ の測定は難易度が高く、そのため、三重点セル内に用いられている水の同位体比、特に $H_2{}^{17}O$ の存在比についての精確な情報を得ることは困難な状況にある。

そこで本研究では、水の同位体比、特に $H_2{}^{17}O$ の存在比を精確に測定することを目指し、水の同位体の吸収スペクトルを高精度に測定可能となる、キャビティリングダウン分光法（CRDS）を用いた測定装置の開発を行った。これまでに、ハイフィネスな共振器を用いることで高感度化を達成し（波長計制御型 CRDS[1,2]）、また、得られた吸収スペクトルを詳細に解析して $H_2{}^{16}O$ の各分光パラメータの決定等を行ってきた[3,4]。本研究の目的である微量な $H_2{}^{17}O$ の測定にも十分な感度を達成している。また、$H_2{}^{17}O$ の吸収スペクトル測定の際、通常は $H_2{}^{17}O$ の吸収線が他の存在率の高い水（$H_2{}^{16}O$ や $H_2{}^{18}O$）の吸収線に埋もれてしまうことが多い。本研究では、測定する波長域を選択し、さらに圧力を下げてそれぞれの吸収線の線幅を狭くすることで吸収線同士の干渉を減らした。本発表では、$H_2{}^{17}O$ を含めた、水の同位体の吸収スペクトルの測定結果について、及び、スペクトル解析の結果について紹介する。

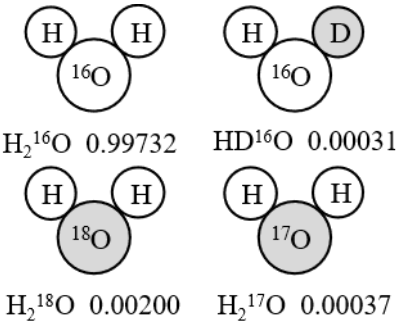


Fig. 1 Abundance ratios of major water isotopes

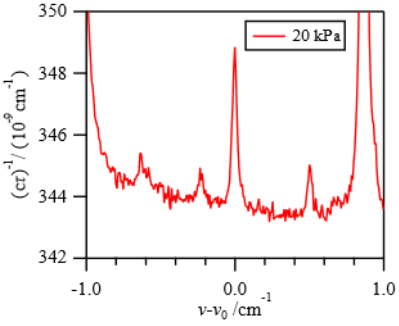


Fig. 2 Absorption spectra of water isotopes

本研究は、JSPS 科研費 JP22H02113 の助成、JST、さきがけ、JPMJPR23JA の支援、及び、JST、CREST、JPMJCR2104 の支援を受けたものである。

[1] K. Hashiguchi et al., Sens. Actuators A 241, 152 (2016).

[2] K. Hashiguchi et al., AIP Advances 9, 125331 (2019).

[3] K. Hashiguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 61, 014001 (2022).

[4] K. Hashiguchi et al., JQSRT. 311, 108784 (2023).

© 2025年 応用物理学会

量子通信における一光子干渉に向けた位相安定化手法の開発

Development of a phase stabilization method for one-photon interference in quantum communication

横浜国大理工[1], 横浜国大 IMS[2] ○(D)杉山陽平[1], 小澤亮斗[1], 堀切智之[1,2], 赤松大輔[1], 洪 鋒雷[1,2]

Grad. Sch. Eng. Sci., YNU.[1], IMS, YNU.[2]

○Yohei Sugiyama[1], Akito Ozawa[1], Tomoyuki Horikiri[1,2], Daisuke Akamatsu[1], Feng-Lei Hong[1,2]

E-mail: sugiyama-yohei-jh@ynu.jp

一光子干渉は量子鍵配送や量子もつれ共有等の長距離量子通信に必要不可欠なベル測定手法である。従来は一光子干渉の可視度を保つため、「Dual-band stabilization (DBS)[1]」を用いてファイバー長を制御していた。しかし、この手法は光子とレーザーで周波数が異なるため長期的なファイバー長制御が困難であった。また、光子―レーザー間の相対周波数変動を抑制するために高価で複雑な光コムが必要であった。本研究では、新しいファイバー長制御手法「Triple-band stabilization (TBS)」とそれに対応したレーザー安定化手法「SHG-SFG stabilization」を提案・実証し、簡便で位相変動の小さい位相安定化手法の開発に成功した。

図 1 は TBS のセットアップである。光子発生に用いるポンプレーザーと 2 台の制御用レーザーを合波し分岐させる。これらの光は 25 km ファイバー×2 を伝搬し、再び合波した後検出される。検出器 2 で観測された信号の二倍波と検出器 3 で観測された信号をミキシングし、検出器 1 で観測される位相変動を予測して音響光学装置（AOM）に feedback することで検出器 1 の位相変動は

$$\delta\varphi_1 = \frac{2\pi n}{c}\left[\left(f_1 - (2f_2 - f_3)\right)\delta(\Delta L) + \left(\delta f_1 - (2\delta f_2 - \delta f_3)\right)\Delta L\right] \quad \cdots\text{式(1)}$$

となる。nはファイバー屈折率、cは真空中の光速、$f_i(i = 1,2,3)$はそれぞれのレーザー周波数、ΔLはファイバー干渉計のファイバー長差であり、δfと$\delta(\Delta L)$はそれらの変動量である。次に、1 つの非線形結晶を用いてf_2の二次高調波（SHG）と、f_1、f_3のレーザーの和周波（SFG）が等しくなるようにレーザー（f_3）に feedback する（SHG-SFG stabilization（図 2））。これにより、「$2f_2 - (f_1 + f_3) = 0$」、「$2\delta f_2 - (\delta f_1 + \delta f_3) = 0$」が成立し、式(1)の位相変動が大幅に抑制できる。

図 3 は$\Delta L = 10$ m時の位相ノイズ Power spectral density (PSD)である。赤線は DBS&光コム（従来手法）、青線は TBS&「SHG-SFG stabilization」（本手法）を用いた場合である。本手法により、簡便な実験装置を用いて従来手法よりも位相ノイズ PSD を低減することに成功した。

図 1

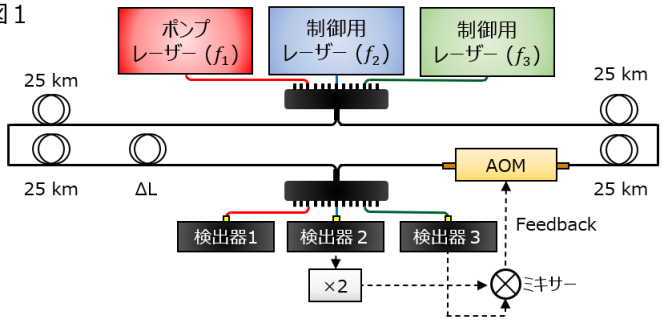


図 2

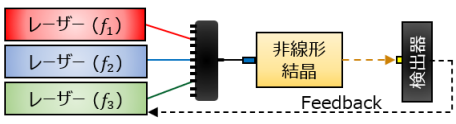
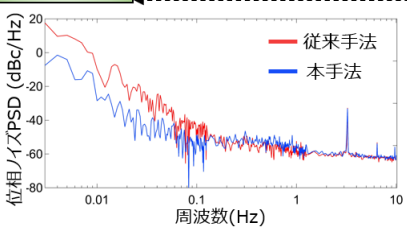


図 3



[1] Pittaluga, M. *et al.* *Nat. Photon.* **15**, 530–535 (2021).

© 2025年 応用物理学会

デュアルピッチ PPLN 導波路を用いた光格子時計ネットワーク用シングルブランチ構成による f_{ceo}、f_{beat} 同時検出

Simultaneous detection of f_{ceo} and f_{beat} using a single-branch architecture with a dual-pitch PPLN waveguide for optical lattice clock networks

NTT 物性研 [1]，NTT NS 研 [2] ○日達 研一 [1]，今井 弘光 [1]，西山 公太 [1,2]，中川 真由莉 [2]，赤塚 友哉 [1]，眞田 治樹 [1]，小栗 克弥 [1]

NTT BRL [1], NTT NS Lab. [2], ○K. Hitachi[1], H. Imai[1], K. Nishiyama[1,2], M. Nakagawa[2], T. Akatsuka[1], H. Sanada[1], K. Oguri[1]

E-mail: kenichi.hitachi@ntt.com

光格子時計の高精度な光周波数を通信波長帯へ変換することは、遠隔地間の時計比較において重要である。従来はキャリアエンベロープオフセット（f_{ceo}）および光コムと 1397 または 698 nm レーザーとのビート信号（f_{beat}）を別経路で生成するマルチブランチ構成が報告されているが、分岐間ノイズによる不安定性に課題があった。この問題はシングルブランチ構成により解消されているが[1]、1397 nm レーザーを経由しており、構成が複雑で、堅牢化や小型化に課題があった。

本研究では、698 nm の光格子時計レーザーから通信波長帯への高安定な周波数変換を実現するために、デュアルピッチ周期分極 LN（PPLN）導波路を用いたシングルブランチ構成を提案・実証した。具体的には、2200 nm 帯からの第 2 高調波発生（SHG）により f_{ceo} を、1397 nm 帯からの SHG により 698 nm レーザーとの f_{beat} を生成した（図(a)参照）。これらの波長変換を同一導波路内で生成することで、マルチブランチ構成に起因する分岐間ノイズの影響を構造的に排除し、1397 nm レーザーを用いないシンプルな波長変換を実現した。

実験系を図(b)に示す。200 MHz の Er 添加ファイバレーザーを光源としてスーパーコンティニウム光を生成し、デュアルピッチ PPLN 導波路に入射した。出力のうち 1100 nm 成分を取り出して f_{ceo} を検出し、また出力光と 698 nm のレーザー光を合波することで f_{beat} を検出した。得られた信号は、周波数安定化に十分な SN 比（分解能帯域幅 100 kHz で 30 dB 以上）であった（図(c), (d)参照）。本成果は、1397 nm レーザーを用いずに高精度な周波数変換を可能とする手法であり、光格子時計ネットワークの堅牢化に貢献すると期待される。

[1] N. Ohmae *et al.*, Appl. Phys. Express, **10**, 062503 (2017).

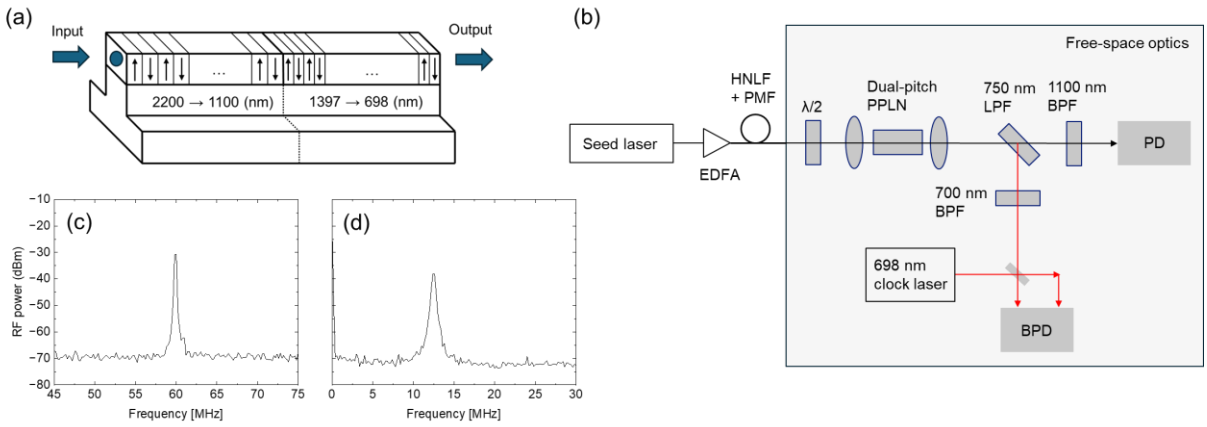


Fig. (a) Schematic of dual-pitch PPLN waveguide. (b) Experimental setup. (c) f_{ceo} signal. (d) f_{beat} signal.

© 2025年 応用物理学会

精密分光計測に向けた反共振中空コアファイバの曲げによるスペクトル干渉抑制に関する研究

Suppression of spectral interference by bending antiresonant hollow-core fibers for precision spectroscopy

電通大 [1], 南洋理工大学 [2],
○(M1) 阿部 夢羽 [1], 加藤 峰士 [1], 浅原 彰文 [1], Yuxi Wang[2], Trivikramarao Gavara[2], Wonkeun Chang[2], 美濃島 薫 [1],
UEC[1], NTU[2], ○Yu Abe[1], Takashi Kato[1], Akifumi Asahara[1], Yuxi Wang[2], Trivikramarao Gavara[2], Wonkeun Chang[2], and Kaoru Minoshima[1]
E-mail: k.minoshima@uec.ac.jp

近年、中空コアファイバをサンプルセルとして用いるガス分光に注目が集まっている。長尺ファイバを利用した光とガスの相互作用長延伸による高感度化が可能なことから、特に中赤外光を用いたデュアルコム分光法などへの応用が期待される。中でも、反共振中空コアファイバ（Antiresonant Hollow-Core Fiber: AR-HCF）は、そのシンプルな構造と低損失伝搬特性から注目を集めている[1]。しかし、中空コアファイバ中を光が伝搬する際に高次モードが生じ、モード干渉によって生じるスペクトル干渉縞が分光計測における課題となっている。その解決法として、ファイバの曲げによってスペクトル干渉を抑制する方法が報告されている[2]が、分光計測への応用性を拡大するためには、AR-HCF の構造や光源特性等に依存した、より詳細な研究が必要である。そこで本研究では、精密分光計測への応用を目的とし、AR-HCF におけるファイバの曲げによるスペクトル干渉抑制の詳細評価を行った。

本研究では、南洋理工大学で設計・製造された AR-HCF を用いて実験を行った（図 1(a)）。図 1(b)に実験系を示す。光源には Er 添加ファイバレーザーを用いた。長さ 1 m の AR-HCF の両端にファイバの外径に合ったフェルールを取り付け、SMF と AR-HCF はバットカップリングによって結合し、その隙間からガスを封入した。最終的な結合効率は 15 %となった。まず、大気で満たされた AR-HCF を直線状または円状に設置したときの透過光スペクトルを、円の曲率半径を変えて測定した。その結果、曲率半径が小さくなるほどスペクトル干渉縞が抑制され、元の光源スペクトル形状に近づくことが確認された。次に、AR-HCF の片側を真空にし、他方からアセチレン(0.1%)および窒素(99.9%)ガスを 8 気圧で封入したところ、それぞれのファイバセル内の圧力は 4 気圧で一定となった。図 1(c,d)にそのとき得られた透過光スペクトルとその拡大図を示す。ファイバを直線状に設置した際には顕著であったスペクトル干渉縞（上段）が、曲率半径 32 mm のリールに 2 周巻きつけて設置したところ抑制され（下段）、大きく歪んでいた吸収スペクトルを明瞭に得ることができ、精密分光計測への有用性が示された。

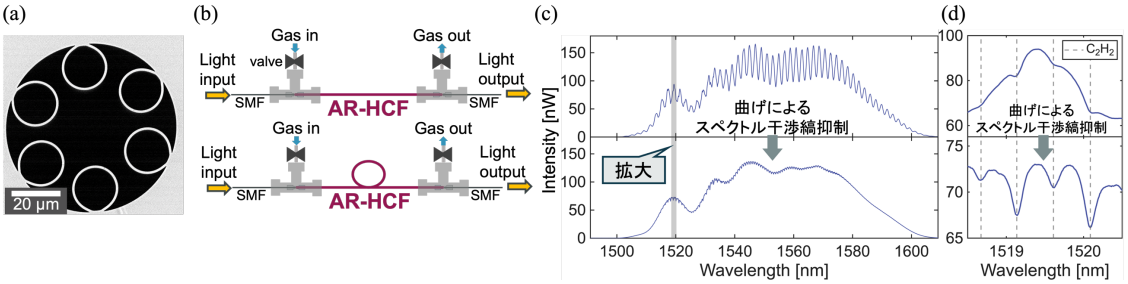


図 1 (a)AR-HCF の断面図 (b)実験系 (c)アセチレン封入時のスペクトル (d) (c)の拡大図（波線は HITRAN）

Acknowledgement 本研究は JSPS 二国間共同研究の成果である。

[1] Deng and W. Chang, "Geometrical Scaling of Antiresonant Hollow-Core Fibers for Mid-Infrared Beam Delivery," *Crystals* **11**, 420 (2021).
[2] Y. Wang, and W. Chang, "Understanding bending-induced loss and bending-enhanced higher-order mode suppression in negative curvature fibers," *Opt. Express* **29** (15), 23622-23636 (2021).

© 2025年 応用物理学会

光により誘起されるファイバ型微小共振器の非線形機械応答

Optically induced nonlinear mechanical response of a fiber-type microresonator

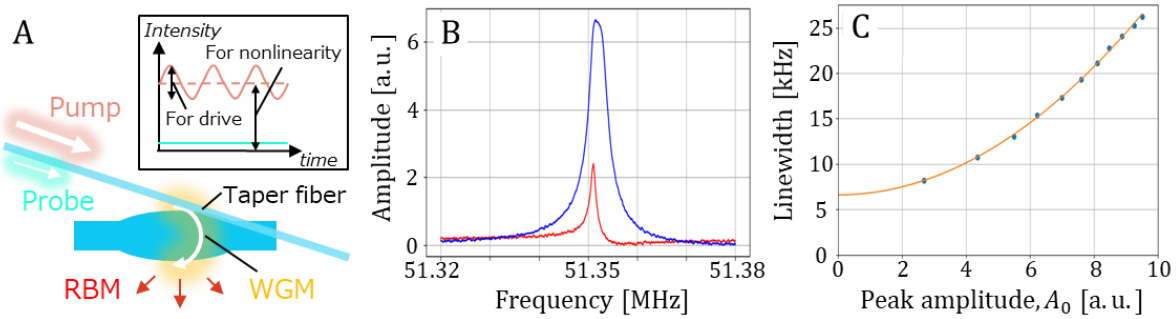
NTT 物性基礎研, ○荒張秀樹, 浅野元紀, 山口浩司, 岡本創

NTT Basic Res. Labs., ○Hideki Arahari, Motoki Asano, Hiroshi Yamaguchi, and Hajime Okamoto

E-mail: hideki.arahari@ntt.com

ボトル形状のファイバ型微小共振器は、ボトルを周回する光ウィスパリングギャラリーモード（WGM）を用いて動径方向の機械振動モード（Radial Breathing Mode: RBM）を励起・検出可能な光機械共振器である（図 A）[1]。この共振器の機械応答に強い非線形性を誘起できれば、メカニカルな双安定状態や散逸レートの能動的制御による信号処理技術への応用が視野に入る。しかしながら、このボトル型共振器は機械変位量が小さく、構造変形に由来する非線形性を生み出すのは困難であった。そこで本研究では、強い光機械相互作用に由来する非線形機械応答の観測を試みた。

実験では、シリカガラスファイバ（直径 80 μm）の微細加工により作製したボトル型共振器に光ファイバ細線（直径 1 μm）を直交して接触させ、プローブ光（1520 nm、1 mW）と強度変調したポンプ光（1550 nm、140 mW）を共振器に結合させた（図 A）。ここで、非線形な光機械相互作用はポンプ光の平均強度により、また、機械 RBM の励振強度は光変調強度（印加電圧）により制御した。ポンプ光の変調周波数を機械共振周波数（～51 MHz）近傍で掃引し、機械振動による光共鳴の変化をプローブ光でロックイン測定することにより機械 RBM の周波数応答を観測した（図 B）。その結果、励振が強いほど振幅が増大するとともに、線幅も広がることが確認された（図 C）。線幅が振幅の 2 乗に比例していることから、３次の非線形ダンピング効果[2]が顕著に表れていることが明らかとなった。その理由として、非線形な光機械相互作用が機械振動に対して遅延して作用するためと考えられる[3]。この遅延は、光が共振器内に留まる時間と機械振動周期が同程度であることによって生じる。今後は、光共振器の調節を介した遅延時間の制御により、非線形ダンピングのさらなる増強や非線形ばね効果の誘起に取り組む。



A: Schematic of the experimental setup. The inset shows optical intensity profile illustrating modulation and DC roles. **B:** Mechanical response with the optical intensity modulation with the modulation voltage of 1.0 V (red) and 9.0 V (blue). **C**: Parabolic relationship between the peak amplitude and the mechanical linewidth. The blue dots correspond to the experimental data and the orange line shows the parabolic function fitted to the data.

[1] M. Asano et al., Laser & Photon. Rev. 10, 603 (2016). [2] M. Dykman, “Fluctuating Nonlinear Oscillators” (Oxford, New York, 2012). [3] C. C. Rodrigues, et al., Nat. Commun. 12, 5625 (2021).

© 2025年 応用物理学会

フェムト秒レーザ加工によるフッ化物ファイバ分光セルの構築と清酒成分の中赤外分光分析

Development of a Fluoride Fiber Spectroscopic Cell by Femtosecond Laser Processing for Mid-Infrared Analysis of Sake Components

秋田県大[1]，核融合研[2]，京大化研[3]，横浜国大[4] ○(M2)石田 岳土[1]，杉本 尚哉[1]，上原 日和[2]，時田 茂樹[3]，西島 喜明[4]，合谷 賢治[1]

Akita Prefectural Univ.[1], National Institute for Fusion Science.[2], Kyoto Univ. Institute for Chemical Research.[3], Yokohama National Univ.[4], ○Ishida Gakuto[1], Masaya Sugimoto[1], Hiyori Uehara[2], Shigeki Tokita[3], Yoshiaki NISHIJIMA[4], Kenji Goya[1]

E-mail: M26L001@akita-pu.ac.jp

1. 緒言

本研究では、フッ化物ファイバに対し、フェムト秒レーザ加工[1]によりマイクロ流路構造を形成し、液体試料の赤外分光計測に適した分光セルを構築した。作製した構造体を用いたグルコース水溶液の測定により、濃度に応じた吸収応答が得られることを確認している。日本酒の製造工程を対象とし、グルコースやエタノールの成分変化を捉える赤外分光測定への応用を通じて、発酵過程の可視化や品質管理の定量化に資する手法の実現を目指す。

2. センサ作製

センサ構造は，フェムト秒レーザを用いてフッ化物ファイバの表面より樹脂被覆，クラッド，コアを選択的に除去し，マイクロ流路を形成することにより作製した．加工対象のファイバには，フッ化物ガラスファイバを用いた．これは中赤外領域において高い透過性を有するため，赤外分光用途に適する．また，熱伝導性が低く割れやすいという材料特性から，熱的影響の小さいフェムト秒レーザによる加工が有効である．加工に際しては，設計したセンサ構造を元に X-Y-Z ステージ上に固定したファイバを移動させ，レーザ光を照射する．ファイバのクラッドを除去し，コアまで達するマイクロチャネルを形成した．これにより，液体試料を導入可能なインライン型の開口構造 (Fig. 1) が得られる．センサ構造は，導波路特性を保持しつつ，外部より液体を導入し，光と試料が接触する構造を実現している．これにより，赤外吸収による透過率変化を検出可能な分光セルとして機能する．

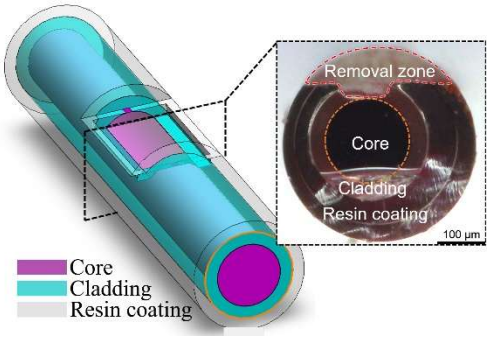


Fig. 1 Schematic cross-sectional (a) and side view (b) of microfluidic channel functioning as spectral sampling cell.

3. 測定実験

作製したセンサ構造の有効性を検証するため，中赤外分光による液体試料の吸収測定を行った．測定には，中赤外波長帯に対応した光源および検出器を備える分光システムを用いた．参照光はフッ化物ファイバに光結合され，センサ部を透過した後，ファイバ出射端より出力され，検出器にて光強度を記録した．液体試料としては，吸収特性の濃度依存性が明瞭なグルコース水溶液を用いた．グルコースは C-H 結合の吸収により 3400 nm 付近に特徴的な吸収を示す．質量%濃度を段階的に変化させた複数の試料を用い，吸収スペクトルの濃度依存性を評価した．Fig. 2 に示す測定結果から，特定波長における透過率の変化量と濃度との相関が得られセンサの定量応答特性を確認した．

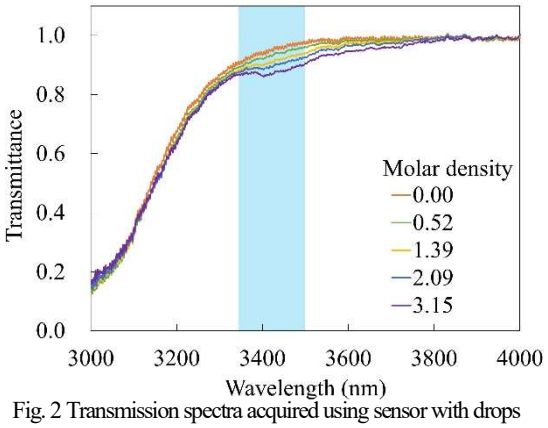


Fig. 2 Transmission spectra acquired using sensor with drops of aqueous glucose solution

4. 結論

本研究では，フェムト秒レーザ加工を用いてフッ化物ファイバ表面に微細なマイクロ流路を構築し，液体導入可能なインライン型分光セルを実現した．レーザの非熱的加工特性を活かすことで，材料損傷を抑えつつ高精度かつ再現性良くセンサ構造を形成することが可能であった．独自に設計した理論モデルとの比較により，作製したセンサを用いてグルコース水溶液の赤外吸収特性を評価した結果，吸収波長帯に対応した明瞭な吸収特性が確認された．また，グルコースの濃度変化に対する応答も確認され，定量的な分光応答が得られることを示した．今後は，日本酒試料に対しても透過スペクトルの取得を行い，複合成分による吸収特性の観測を行い，成分定量モデルの構築や，発酵状態のリアルタイム可視化を実現するための信号処理手法の開発を進める．

参考文献

[1] K. Goya, T. Itoh, A. Seki, and K. Watanabe, Sens Actuators B Chem 210, 685 (2015).

© 2025年 応用物理学会

呼気診断に向けた吸収光・参照光の同時中赤外分散分光

Simultaneous dispersive mid-infrared spectroscopy of absorption and reference beams for breath analysis

東大物性研[1]，トヨタ自動車[2] ○遠藤 翼[1]，中川 耕太郎[1]，王 麓翔[1]，寺薗 隆之[1]，米田 修[2]，須藤 裕之[2]，斎藤 広明[2]，小林 洋平[1]

ISSP, Univ. Tokyo[1], Toyota Motor Corp.[2], ○Tsubasa Endo[1], Kotaro Nakagawa[1], Luxiang Wang[1], Takayuki Terazono[1], Osamu Komeda[2], Hiroyuki Suto[2], Hiroaki Saitoh[2], Yohei Kobayashi[1]

E-mail: t.endo@issp.u-tokyo.ac.jp

中赤外領域は分子種依存の光吸収が多数存在することから分子の指紋領域と呼ばれ、中赤外分光を用いて呼気中の混合した揮発性有機化合物(VOC)を識別することで簡便・迅速・非侵襲に疾病やストレスの診断を行う呼気診断の実現が期待されている[1]。とりわけ、我々は高速性に優れた分散型分光に着目し、Ge イマージョングレーティング(EGIG)を用いた 3 μm 帯[2] (Fig. 1)および 8-12 μm 帯[3]の中赤外分光システムを構築してきた。呼気雰囲気下において ppm から ppb のレベルで希薄に混合した様々な VOC を識別するにはさらなる性能向上が求められるが、分散型分光の高感度化・実用性向上においては、中赤外光源の不安定性が重大な障害である。中赤外光源のスペクトルが時間とともに変動することで、参照スペクトルと吸収スペクトルにずれが生じ、時間積算による感度向上や長時間の連続測定が制限される問題がある。我々は以前に、特異値分解を用いた参照スペクトル推定の手法を提案[4]し、その手法を用いて 1 ppb レベルの希薄ガス検出を報告した[2]。一方で当該手法は、大気圧下における多量の水分などのブロードで強い吸収がある信号への適用に制限があり、呼気への応用では効果が必ずしも大きくない。

今回我々は、ガスセルを通した吸収光と、ガスセルを通さない参照光とを同時に測定することで、光源の変動による影響を軽減することを検討した。講演では新しい測定系の構成と分光結果について議論する。

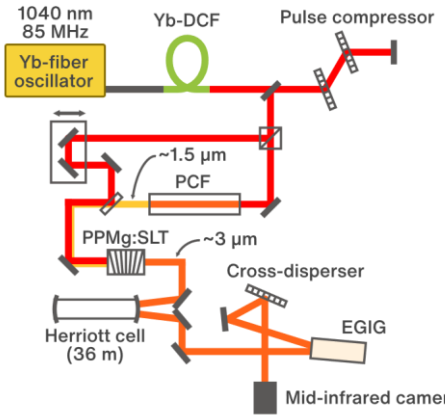


Fig. 1. Schematic of our dispersive 3 μm mid-infrared spectroscopy system [2]. DCF: double-clad fiber. PCF: photonic crystal fiber. EGIG: extremely-high-order germanium immersion grating.

[1] Q. Liang, et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 118(40), e2105063118 (2021).

[2] T. Endo, et al., in CLEO 2024 (Optica Publishing Group, 2024), paper SF3A.4.

[3] 寺薗 隆之，秋山 由洸，遠藤 翼，小林 洋平．第 72 回応用物理学会春季学術講演会 (2025).

[4] S. Tani, et al., Opt Express 30, 36813 (2022).

© 2025年 応用物理学会

呼気診断に向けた 8～12 μm 中赤外分光系の高感度化

Enhancement of sensitivity of 8~12 μm mid-infrared spectroscopic system for breath diagnosis

東大物性研[1]，トヨタ自動車株式会社[2]，○寺薗 隆之[1]，秋山 由洸[1]，遠藤 翼[1]，
中川 耕太郎[1]，米田 修[2]，須藤 裕之[2]，斎藤 広明[2]，小林 洋平[1]

ISSP, Univ. Tokyo[1], Toyota Motor Corp.[2], ○Takayuki Terazono[1], Yukihiro Akiyama[1], Tsubasa Endo[1], Kotaro Nakagawa[1], Osamu Komeda[2], Hiroyuki Suto[2], Hiroaki Saitoh[2], Yohei Kobayashi[1]

E-mail: terazono@issp.u-tokyo.ac.jp

中赤外周波数領域は、分子の振動に由来する吸収が多く存在することから、分子の指紋領域と呼ばれ、人間の呼気診断や環境測定など多岐にわたる応用が期待され、研究が進められてきた。特に、呼気診断においては、リアルタイムに複数種類の希薄な分子(~1 ppm)を測定する必要があるため、高速かつ高分解能であり、さらに高い信号対雑音比(SNR)を有する分光系が求められる。そこで我々は、Ge 製超高次回折格子(EGIG)とヘリオットセルを用いた 2 つの帯域（3~5 μm , 8~12 μm）における中赤外分散型分光系を構築し本学会にて報告を重ねてきた[1, 2] 。しかし、8~12 μm の実験系は SNR が比較的低く、600 ms (30 フレーム)の積算時間で SNR130 程度が限界だった。そこで、SNR 向上を目指し Yb 増幅器の改良と PCF 端面にエンドキャップを施すことで中赤外光強度を 100 μW から 200 μW に増幅し、本学会 2025 年春季学術講演会で報告した。今回、さらに 1 mW までのパワー増幅と SNR 1000 を達成したので、改めて 8~12 μm 帯域中赤外分散型分光系について報告する。

実験のセットアップを Fig.1 に示す。繰り返し周波数 100 MHz の Yb 添加ファイバーレーザー光源を使用し、1 μm の基本波とフォトニック結晶ファイバー(PCF)において発生した白色光のうち 1.1 μm の光を用いた GaSe 結晶中での差周波発生により中赤外光源を作製した。中赤外光を光路長が 31.2 m のガス入りヘリオットセルに入射し、透過光を EGIG とクロスディスパーザーにより 2 次元に分散させて、中赤外カメラにより分光画像を検出した(Fig.1)。その後、アラン分散を用いた解析を行い SNR の評価を行った(Fig.2)。当日は、高感度化を達成した実験系とサンプルガスの吸収分光の結果を報告する。

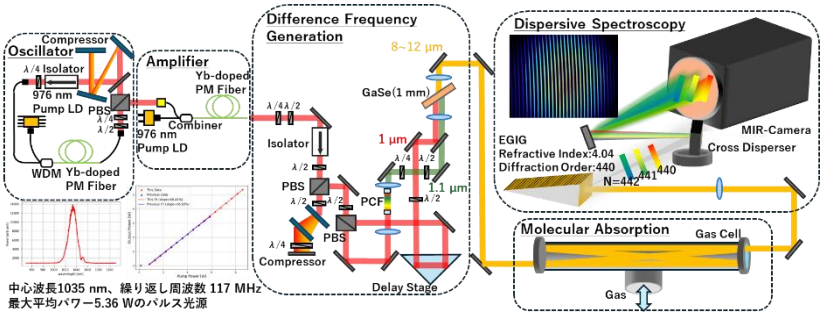


Fig. 1. Experimental setup.

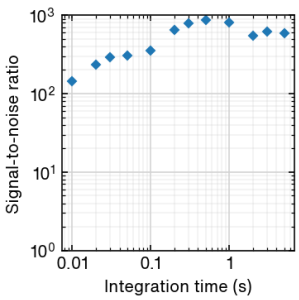


Fig. 2. Allan variance plot.

[1] 多屋 奏一，他 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 16p-A502-13 (2023).
[2] 石塚 悠也，他 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 25p-E302-5 (2022).

© 2025年 応用物理学会

電気光学変調器によるサイドバンド掃引を用いたキャビティリングダウン分光法の開発

Development of cavity ring-down spectroscopy using sideband scanning of an electro-optic modulator

名古屋大[1] ○(M1) 橋本 大輝[1], 寺林稜平[1], 劉 寧武[1], 北島 将太朗[1], 西澤 典彦[1], 富田 英生[1]

Nagoya Univ.[1] ○(M1) Daiki Hashimoto[1], Ryohei Terabayashi[1], Ningwu Liu[1],

Shotaro Kitajima[1], Norihiko Nishizawa[1], Hideki Tomita[1]

E-mail: terabayashi.ryouhei.e6@f.mail.nagoya-u.ac.jp

1. 緒言

キャビティリングダウン分光法（CRDS）は、高フィネス光共振器による多重反射を利用した共振器強化型吸収分光の一種であり、放射性核種等の微量同位体を含む分子などの高精度定量分析が実現可能な手法として着目されている。CRDS にて吸収スペクトルを測定する場合、高フィネス光共振器の共鳴条件に対し十分狭線幅な連続発振レーザーの発振周波数を掃引し、高精度に記録する必要がある。そこで本研究では、電気光学変調器(Electro-optic modulator : EOM)による位相変調により生成されたサイドバンド光を CRDS のプローブ光として利用し、その周波数を掃引・記録して吸収スペクトルを測定する手法を開発した。

2. EOM 掃引を用いたキャビティリングダウン分光法

CRDS では 2 枚の高反射率ミラーで構築される共振器内にレーザー光を入射させ、共振器内でレーザー光が増幅・蓄積されたのちその透過光を観測する。入射光を遮断すると透過光強度は、共振器内の光損失量に依存した指数関数減衰を示す。この減衰時間を波長ごとに記録し吸収スペクトルを取得することで共振器内吸収物質の光吸収量、すなわち吸収物質の量的情報を取得する。本手法では、キャリア光を高安定な光周波数参照にロックし、EOM サイドバンド光で減衰信号を取得し吸収スペクトルを測定する。EOM への RF 周波数を光周波数の相対変化量として記録することにより CRDS スペクトルの横軸を追加の光周波数計測を用いずに高精度に決定することができる。EOM 掃引を用いた CRDS の原理実証のために 1.65 μm 帯の分布帰還型半導体レーザー（DFB-DL）を用いた実験体系を構築した。概要を Fig.1 に示す。本体系を用いてサイドバンド光の減衰信号を取得する基礎実験を行い、ノイズレベルを通常の CRDS と比較した。本手法による分子吸収スペクトルの実測と基礎特性評価の結果について報告する。

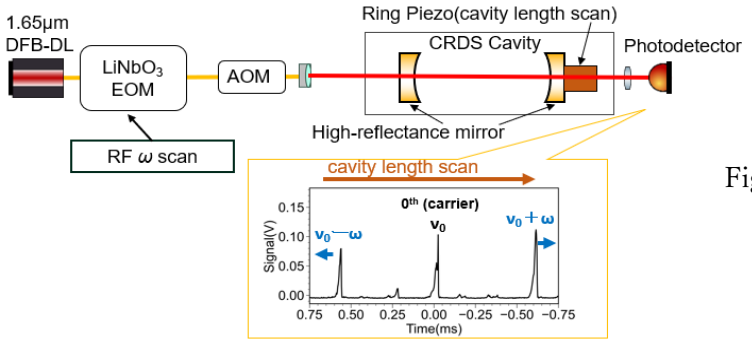


Fig.1 The experimental schematic

謝辞: 本研究の一部は JST CREST(JAMJCP2104)、および科研費若手研究(JSAP23K13686)による助成を受けたものです。

© 2025年 応用物理学会

狭帯域赤外カメラを用いたガス温度計測

Measurement of gas temperature based on a narrow-band infrared camera

NIMS ○宮崎 英樹，笠谷 岳士，齋藤 正浩，木本 一也，對木 雄太朗，落合 哲行

NIMS ○H. T. Miyazaki, T. Kasaya, M. Saito, K. Kimoto, Y. Tsuiki, T. Ochiai

E-mail: MIYAZAKI.Hideki@nims.go.jp

我々は、二酸化炭素（CO_2）の吸収波長に合わせた狭帯域赤外カメラ[1]を用いた、CO_2 の排出量計測技術を開発している[2]。ガスを透過した赤外光の強度はガスの濃度だけでなく温度にも依存するため、排出量の定量計測にはガスの温度の把握が重要である。逆に、赤外光透過強度の温度依存性を利用すれば、画像からガスの温度を簡便に計測することができる。

温度 T_b の背景物体（とりあえず完全黒体と仮定）から熱放射された赤外光が柱密度ζ_g（濃度と厚さの積）、温度 T_g のガスを透過した時の強度 I_g は、輻射輸送方程式を用いて式(1)で表される[3]。

$$I_g = e^{-\alpha_g \zeta_g} I_b(T_b) + \left(1 - e^{-\alpha_g \zeta_g}\right) I_b\left(T_g\right) \qquad (1)$$

ただし、α_g: 吸光係数, $I_b(T)$: 温度 T におけるプランク放射強度。

ガスがない時 $I_0 = I_b(T_b)$ と比べた輝度変化 ΔI は式(2)で表され、

$$\Delta I = I_g - I_0 = \left(1 - e^{-\alpha_g \zeta_g}\right)\left[I_b\left(T_g\right) - I_b(T_b)\right] \qquad (2)$$

背景温度 T_b とガス温度 T_g の大小関係により明暗が入れ変わる。$T_b = T_g$ となる瞬間、ガスは見えなくなる。

このことを利用すると、ガスの背景に温度可変の熱放射光源を置き、その温度を高速に変化させながらガスの映像を取得しておき、ガスが見えなくなった瞬間の光源温度 T_b としてガス温度 T_g を求めることができる。測りたいガスが CO_2 を含まない場合にも、CO_2 をトレーサーとして混合すれば温度測定が可能になる。現実には、背景の光源は完全黒体ではなく、実際の温度より低いある等価温度 T_b'の完全黒体のように見える。従って、正確にはガスが見えなくなる瞬間の背景の等価温度 T_b'としてガスの温度がわかる。

室温付近のガス（CO_2 濃度 9%、流量 11 SLM）に対して背景温度を 10℃から 40℃まで変化させたときの観測例を Fig. 1 に示す。(a) 背景が低温の時（$T_b' < T_g$）、ガスは明るく、(c) 高温の時（$T_b' > T_g$）、ガスは暗く見える。その間に、(b) ガスが背景と同じ輝度となり（$T_g = T_b'$）、見えなくなる瞬間がある。この瞬間は、前のフレームとの差分画像の分散が極小となる時として判別でき [Fig. 1(d)]、この例では T_g = 23.5℃と計測された。講演では、ガス温度に分布がある場合も含むいくつかの事例について計測結果を紹介する。

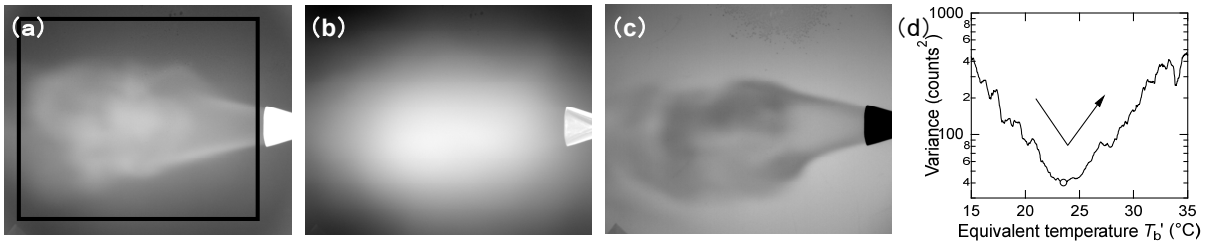


Fig. 1 CO_2 gas images for (a) $T_b' < T_g$, (b) $T_b' \sim T_g$, and (c) $T_b' > T_g$.
(d) Total variance of subtracted images within the area shown in (a) vs T_b'.

謝辞 PRISM、NIMS センサ・アクチュエータ研究開発プロジェクト、市村清新技術財団、JSPS 科研費（JP22K18990, JP23K26576）、鉄鋼環境基金、（株）フォトニックラティス、豊島慶大氏、農業・食品産業技術総合研究機構に感謝します。一部の成果は NEDO の委託業務（JPNP14004）の結果得られました。

参考文献 [1] https://www.youtube.com/watch?v=fcmFokIiq2Q. [2] 宮崎他，応物学会 2025 春，14a-K304-7. [3] R. Siegel and J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer* (Hemisphere, 1980).

© 2025年 応用物理学会

高屈折率材料に対する誘導ラマン散乱顕微法における固体浸漬レンズを用いた空間分解能の向上

Enhancing spatial resolution in SRS imaging of high-refractive-index samples using a solid immersion lens

東大 [1], 東京エレクトロン [2], °(D2) 佐野由季 [1], 大宮裕之 [2], 高橋孝 [2], 小関泰之 [1]
Univ. Tokyo[1], Tokyo Electron[2], ○Yuki Sano[1], Hiroyuki Omiya, Takashi Takahashi, Yasuyuki Ozeki[1]
E-mail: sano@ginjo.t.u-tokyo.ac.jp

誘導ラマン散乱 (SRS) 顕微法は、高速かつ非標識で分子振動を可視化できる手法として、生体イメージングを中心に盛んに研究されてきた [1,2]。近年では SRS の応用範囲が拡大し、材料計測への展開も注目されている [3]。しかし、代表的な半導体材料であるシリコン (Si) に対する SRS 計測の報告は依然として報告がなかった。これは、従来の SRS 顕微法では Si の光吸収が大きく、計測が困難であるためである。Si 表面の計測にはエピ検出が有効であるが、Si 内部の測定は従来の光源の波長では難しい。著者らはこれに対し、光通信波長帯の光源を用いた SRS 顕微法を開発することで Si 基板内部のひずみを可視化することに成功した [4]。しかし、Si のような高屈折率材料においては、集光時に空気との屈折率差によってビームが軸方向に広がり、空間分解能の低下を招くという課題があった。そこで本研究では、高分解能観察手法として知られる固体浸漬レンズ (SIL) [5, 6]を本システムに導入した。具体的には、直径 5 mm の Si 半球からなる固体浸漬レンズを用い、有効開口数 (NA) を Si の屈折率倍増加させることで、空間分解能の向上を試みた。

図 1a に実験の概略図を示す。試料には、レーザー損傷により表面構造が形成された Si ウエハを用い、SIL を設置した状態と未設置の状態で加工痕の SRS イメージングを行った。図 1b および 1d に、SIL を用いない場合および用いた場合の横方向 SRS 強度画像を示し、それぞれの断面プロファイルを図 1c および 1e に示す。加工痕に対するプロファイルの半値全幅 (FWHM) を比較すると、SIL 非使用時には 3.4 μm であったのに対し、SIL 使用時には 2.8 μm へと縮小された。また、図 1f および 1h に示す深さ方向の SRS ピークシフト画像と、対応する断面プロファイル (図 1g, 1i) から、軸方向の FWHM が 125 μm から 22 μm と著しく改善されたことが確認された。これらの結果は、高屈折率試料に対する SRS 顕微法において、SIL の導入が横方向・軸方向の空間分解能を向上させる有効な手段であることを示している。詳細は講演にて報告する。

[1] J.-X. Cheng *et al.,* 'Stimulated Raman scattering microscopy: Techniques and applications' (Elsevier, 2021). [2] J. X. Cheng and X. S. Xie, Science 350, aaa8870 (2015). [3] Q. Cheng *et al.*, Matter 4(5), 1460-1483 (2021). [4] 佐野ら、秋季応物 19p-A37-7 (2024). [5] S. M. Mansfield, G. S. Kino, Appl. Phys. Lett. 57, 2615–2616 (1990). [6] C. D., Poweleit, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 73(16) 2275-2277 (1998).

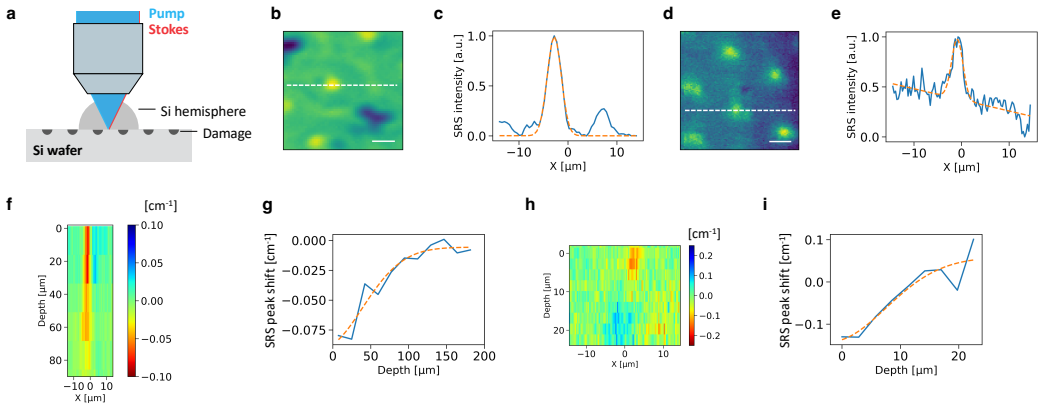


図 1 a. Si 半球を用いた高分解能 SRS 計測の模式図。b-e. Si 半球なし (b-c) および Si 半球あり (d-e) の横方向の SRS 強度画像と断面プロファイル。f-i. Si 半球なし (f-g) および Si 半球あり (h-i) の深さ方向の SRS ピークシフト画像と断面プロファイル。

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[9a-N402-1~7] 3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[9a-N402-1]

Proposal of Frequency Domain Optical Correlation by Using DSB Modulation for Arbitrary Waveform Measurement

○Sho Omori[1], Kazuma Yamane[1], Tatsutoshi Shioda[1] (1.Saitama Univ.)

[9a-N402-2]

Image Analysis of Removal Process of Biofilm Using Laser Light Scattering

○Naomichi Yokoi[1], Yoshihisa Aizu[2] (1.Chitose Inst. Sci. Tech., 2.Muroran Inst. Tech.)

[9a-N402-3]

Proposal for Distance Measurement using a Resonant Two-mode Low Coherence Comb with a Waveplate-based Fabry-Perot Cavity.

○Kenta Arai[1], Kanyo Tanabe[1], Satoshi Kanai[1], Yuki Sekiguchi[1], Tatutoshi Shioda[1] (1.Saitama Univ.)

[9a-N402-4]

UV LED optical sensing of nitrogen oxide and hydride

○Kosuke Sato[1], Yoshihisa Kunimi[1] (1.Asahi Kasei)

[9a-N402-5]

Extreme Learning Machine Based on φ-OTDR with Phase Modulation and Heterodyne Detection

○(M2)Daichi Hitotsumatsu[1], Kaoru Minoshima[2,1], Naoya Kuse[3] (1.Tokushima Univ., 2.UEC, 3.post LED Inst.)

[9a-N402-6]

Remote Double-pulse LIBS Measurements Using a Femtosecond Laser System

○Toshihiro Somekawa[1], kazuhiko Inoguchi[1], Chosrowjan Haik[1], Taniguchi Seiji[1], Kurahashi Shinri[1] (1.Inst. Laser Tech.)

[9a-N402-7]

Remote Detection of Sparkling Carbonated Water Using Hyperspectral Raman Imaging Lidar

○Shusuke Isogai[1], Shinri Kurahashi[1], Toshihiro Somekawa[1,2] (1.Inst. for Laser Tech., 2.Inst. Laser Eng., Osaka Univ.)

DSB 変調を用いた周波数領域光相関法による任意波形計測の原理検証

Proposal of Frequency Domain Optical Correlation by Using DSB Modulation for Arbitrary Waveform Measurement

埼玉大理工 [1]，○(M2)大森翔 [1]，(M1)山根和眞 [1]，塩田達俊 [1]

Saitama Univ. [1], ○(M2)Sho Omori[1], Kazuma Yamane[1], Tatsutoshi Shioda[1]

E-mail: tshioda@mail.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

超高速な現象かつ不可逆な反応として挙げられる化学反応の反応素過程などのフェムト秒オーダーで一度きりしか生じない現象を解析するためには，高分解能で任意波形をワンショット計測できる技術が必要である．以上の要件を満たす従来の手法では，フェムト秒の時間分解能に設定した際にナノ秒の計測レンジで計測することは困難である．より長い時間の計測が可能になればより長い時間で発生する現象の計測ができ，汎用性の向上につながる．そこで，我々は任意過渡波形を高時間分解能かつ長い計測レンジで計測できる手法として周波数領域光相関法(FDOC)を提案した．この手法では，周波数の掃引によって周波数領域で取得した入力信号の相関値を逆フーリエ変換することで入力信号を取得する．今回はこの手法による任意波形計測の原理検証として DSB 変調を用いて複数パターンでの波形計測を行った結果について報告する．

2. 実験方法

実験系を Fig.1 に示す．中心周波数が 193.3THz である分岐帰還形半導体レーザ(DFB-LD)を光源とする光信号に 1 つ目の強度変調器(IM)とパルスパターンジェネレータ(PPG)を用いて幅 100 ps，周期 500 ps の時間窓で切り出しを行い計測対象信号を作成した．この周期信号は Fig.1 に示すように 2 つのパターンを作成した．これを 2 つ目の強度変調器(IM)で 1 GHz 間隔で 1～20 GHz までシグナルジェネレータ(SG)を用いて周波数掃引を行い DSB 変調し，その出力をパワーメータで取得した．このとき DSB 変調により信号同士の周波数差が 2 倍となる．従って，計測される周波数範囲は変調信号の周波数掃引範囲の 2 倍となる．実験では変調周波数を 0GHz から 20GHz まで掃引することで，40GHz の計測周波数範囲を得た．またその値に解析処理と逆フーリエ変換処理することで波形再現を行った．

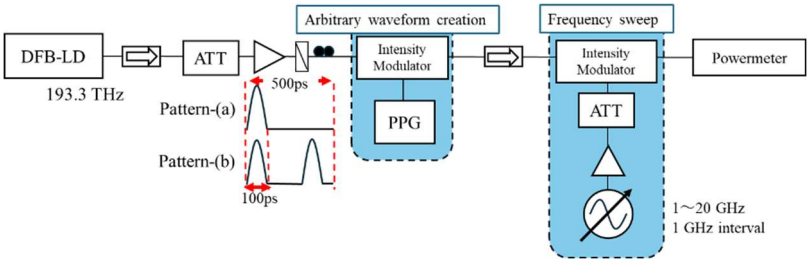


Fig.1 Experimental setup

3. 結果

Fig.2 の(1)はパターン(a)と(b)のそれぞれの光サンプリングオシロスコープで測定した波形を示す．(2)ではパワーメータで測定した値を解析処理して得られた相関値をそれぞれ示す．(3)では(2)の結果を逆フーリエ変換することで得られた再現波形を示す．パターン(a)の(1)と(3)を比べると同じ位置にピークが表れたことがわかる．同様にパターン(b)の(1)と(3)を比べると同じ位置にピークが表れている．以上の 2 つから異なるパターンの時間波形を今回, 25 ps の時間分解能で 500 ps の計測範囲で周波数領域光相関法による任意波形計測が可能であることが確認できた．

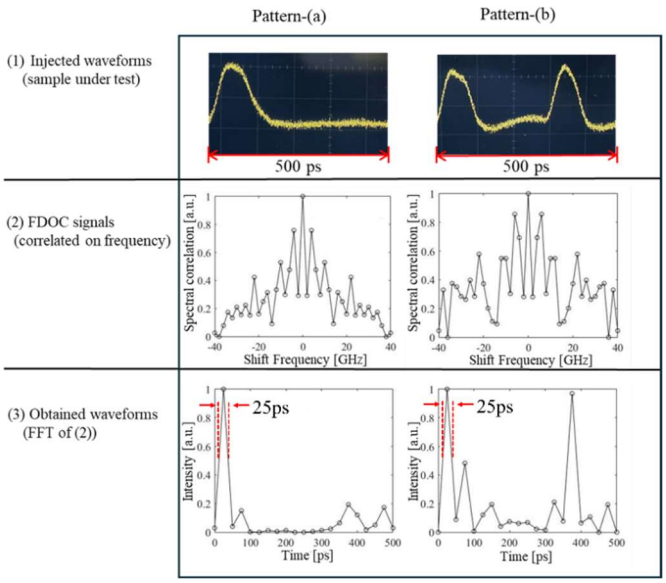


Fig.2 Measurement results for pattern-(a) and (b)

参考文献

[1] S. Ohmori *et al.*: CLEO2025, PS200.168 (2025).

[2] 大森翔 他: 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-A37-10 (2024).

© 2025年 応用物理学会

レーザー光散乱を利用したバイオフィルム除去過程の画像解析
Image Analysis of Removal Process of Biofilm Using Laser Light Scattering

公立千歳科技大理工[1], 室蘭工大院[2] ○横井 直倫[1], 相津 佳永[2]
Chitose Inst. Sci. Tech.[1], Muroran Inst. Tech.[2], ○Naomichi Yokoi[1], Yoshihisa Aizu[2]
E-mail: n-yokoi@photon.chitose.ac.jp

１．はじめに

2019 年に発生した新型コロナウィルス感染症によるクラスターの発生源として院内感染に注目が集められたが, その要因の一つとして各種医療器具の内面に形成されるバイオフィルムの関与が指摘されている. 一方, バイオフィルムの検出には現場からのサンプルの抽出が必要であり, しかもサンプルの解析に熟練と時間を要していた. 著者らは従来から, レーザー照射下にあるバイオフィルムに由来する光散乱パターンの画像解析を行ない, その形成過程を定量評価してきた.[1,2] 今回, 予めガラス製試験片の表面に生成したバイオフィルムに超音波を照射し, 照射時間に応じた除去状態を CMOS イメージセンサにより撮像し, それらの画像処理に基づくバイオフィルム除去過程の解析の可能性を検討したので報告する.

２．測定原理

Fig.1は, バイオフィルムの生成から除去, 画像検出に到る一連の過程を示した概略図である. まず, Fig.1左図のように水槽に水温30℃, 体積濃度1%, 体積3Lのバクテリア含有水を入れ, 底面にガラス製試験片を4週間浸してバイオフィルムを生成する. 次に, Fig.1右図のように下面にバイオフィルムを伴う試験片に純水中にて周波数が50kHzの超音波を照射しつつ, 波長635nmで出力4.5mWの半導体レーザー(LD)により試験片を一様に照明し, その透過散乱光を倍率0.5倍のテレセントリックレンズを伴うCMOSイメージセンサにより画像検出する. なお, 超音波の照射時間は3分間に設定し, 5秒間隔で照射開始時を含め計37枚の光散乱パターンを取得する.

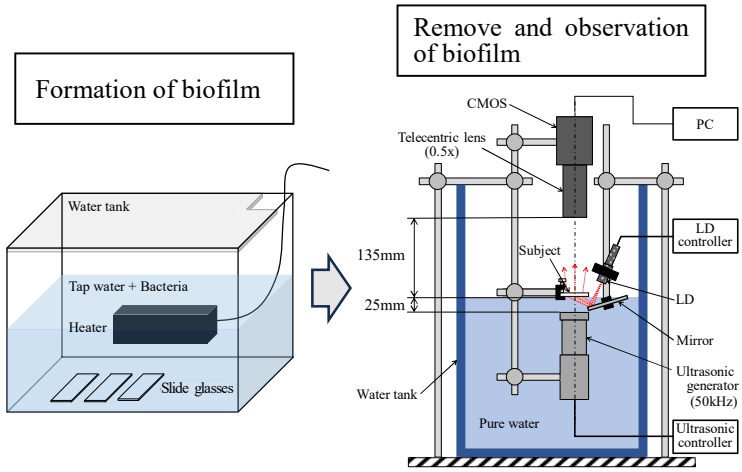


Fig.1 Schematic diagram of a process of formation, remove and observation of biofilm.

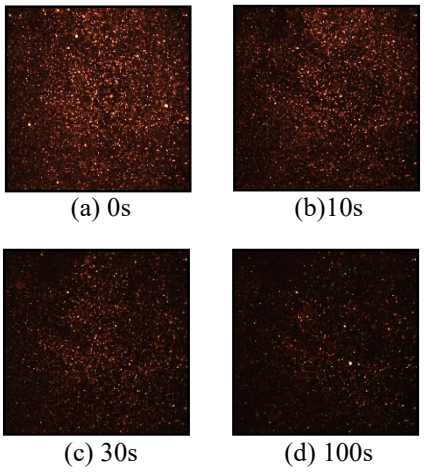


Fig.2 Light scattering patterns obtained for 0, 10, 30, and 100s after.

３．測定結果

Figs.2(a)~(d)は, 超音波照射の開始時, および開始後 10, 30, 100 秒後に対応する LD の照明下で取得したバイオフィルムに由来する光散乱パターンの一例である. Fig.2(a)に比較して, Fig.2(b)では画像輝度が明らかに低下していることが分かる. さらに, Figs.2(c), (d)と超音波の照射時間が増すにつれて画像輝度が緩やかに低下し続ける様子も見て取れる. このような照射時間の増加に伴う画像輝度の低下は, 洗浄によるバイオフィルムの占有領域の縮小を反映したものと考えられる. 以上より, 超音波の照射下におけるバイオフィルムの除去過程を, 画像解析に基づき定量評価できる可能性がある.

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業学術研究助成基金助成金（基盤研究(C) 23K03884）の支援を受けて行われた.

参考文献: 1) N. Yokoi, T. Yuasa, I. Niskanen, J. Räty, K. Hibino, H. Funamizu, and Y. Aizu, “Estimation of the growth of biofilm using light scattering patterns,” Proc. SPIE **12608**, 126080J (2023).
2) N. Yokoi, T. Yuasa, I. Niskanen, J. Räty, K. Hibino, H. Funamizu, and Y. Aizu, “Monitoring of the formation of biofilm inside a glass tube using light scattering patterns,” Opt. Rev. **31**(2), 225-235 (2024).

© 2025年 応用物理学会

波長板を用いたファブリ・ペロー共振器による 共振 2 モードの低コヒーレンスコムによる距離計測法の提案

Proposal for Distance Measurement using a Resonant Two-mode Low Coherence Comb with a Waveplate-based Fabry-Perot Cavity.

埼玉大理工，○(M1)新井健太，田邊寛洋，(M2)金井聡志，関口優紀，塩田達俊

Saitama Univ. , ○Kenta Arai, Kanyo Tanabe, Satoshi Kanai, Yuki Sekiguchi, Tatsutoshi Shioda

E-mail: tshioda@mail.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

近年, インラインでの自動化された表面形状検査システムの需要が高まっている. 計測速度と μm 分解能の計測するうえで, 環境による数 100 Hz の振動による影響を受けないためには, μs 以下[1]の計測速度を満たした計測器が必要になる. そこで精度と速度を両立したものとしてデュアルコム分光法がある. しかし, 光源に用いられる光コムは各波長が位相同期され, 高価かつ大型といった課題がある.

そこで, 我々は, 低コヒーレンス光源と複屈折素子を用いた共振器[3]を組み合わせることで, 距離計測が可能な手法を新たに提案する. 本手法では, 共振器に直接低コヒーレンス光を入射し低コヒーレンスコム[2]を発生させた. 複屈折素子として半波長板（HWP）によって 偏光軸毎に共振器内の光路長差を与えることで, 2 つの異なる FSR のコムを発生させている. 2 つのコム間の干渉から距離情報を取得できる手法である. 今回, 本手法の基本原理の実験結果を報告する.

2. 実験方法・結果

偏光分離型マイケルソン干渉計を元にした実験系を Fig. 1 に示す. 広帯域光源から射出された光をショートパスフィルタ(SPF)とロングパスフィルタ(LPF)で中心波長 950 nm, 帯域幅約 100 nm でフィルタリングした後, 偏光子(POL)を用いて 45°に切り出した. HWP を含む R:T=99.5:1 の 2 枚の半透明鏡(HM)で作成した共振器を作製した. このとき HWP を傾けて挿入することで周期差が 10 fs となる低コヒーレンスデュアルコム光を得た. これを偏光ビームスプリッター(PBS)で 2 光路に分け, 参照ミラーを 200 nm ステップで掃引したときの時間波形をオシロスコープにより取得した. 干渉次数毎の低コヒーレンスコム干渉波形のピークがオシロスコープの時間軸上に繰り返し現れ、それぞれ 0 次, 1 次, 2 次. . . とした. Fig. 2 にそのピーク位置を横軸として参照ミラーを掃引したときの光強度を平均値から減算した振動成分を取得したデュアルコム干渉波形を示した. 参照ミラーの掃引により干渉波形の中心位置が移ろう様子が見える. Fig. 3 に各次数に対する干渉ピークの位置を示した. 次数間の間隔ずれは約 3.3 μm であった. これより, 2 つの低コヒーレンスコムによるデュアルコム分光法での距離計測が可能であることが確認できた. また, 共振器内の HWP の角度を変化させると干渉の移ろい間隔が変化することが確認された. 今後は, 複屈折素子の複屈折測定や厚さ測定に応用する予定である.

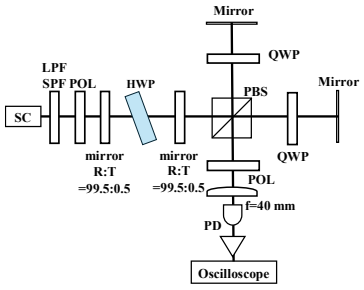


Fig. 1 Experimental setup.

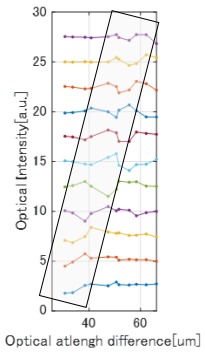


Fig. 2 Dual-combs interferogram.

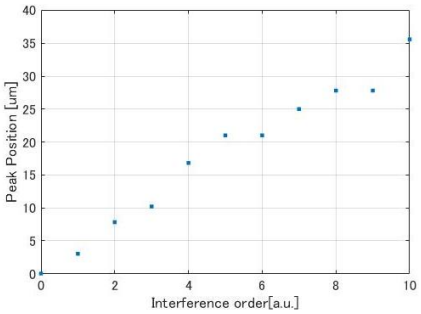


Fig. 3 Peak position vs. interference order

3. 参考文献

[1] T. Awane, T. Q. Banh, T. Shioda, “High-speed 2D Single-shot Surface Profilometry for Industrial Inspection under Vibrational Environment,” OSA Laser Congress, LM4B Sep.2019, Vienna, Austria.
[2] 関口 他, 「低コヒーレンスデュアルコム分光法を用いた複屈折計測の提案」春応物 2024, 25a-12B-5.
[3] 田邊 他, 「空間光学系における偏光干渉を用いた低コヒーレンスデュアルコム分光法の提案と距離計測への応用」 秋応物 2024, 20a-P01-3.

© 2025年 応用物理学会

酸化態窒素・アンモニア態窒素の紫外線 LED 式光学センシング

UV LED optical sensing of nitrogen oxide and hydride

旭化成 次世代化合物半導体開発部 ○佐藤 恒輔，國見 仁久

Asahi Kasei , Next Generation Compound Semiconductor Development Dept.,

○Kosuke Sato, Yoshihisa Kunimi

E-mail: sato.kdd@om.asahi-kasei.co.jp

大気中や河川・海中に過剰放出された酸化態窒素（NO_x、NO_x^-）、アンモニア態窒素（NH_x、NH_4^+）は、メトヘモグロビン血症や呼吸器疾患等のヒトへの健康被害、富栄養化や温暖化等の地球環境への被害をもたらす。この酸化態窒素、アンモニア態窒素を計測する手法はイオン選択電極、半導体式センサ、赤外線光学式センサ等が知られている。今回、波長 220～240 nm の紫外線 LED を光源として用いることで、水中の NO_3^-濃度および気中の NH_3 濃度を紫外線光学式に計測できることを見出した [1]。光源に LED を用いることで、従来機器と比較して小型化できる、電池駆動できる、長寿命化できる、メンテナンス頻度を下げることが出来るなどの利点がある。下図は 235 nm LED を光源として用いた際の水中の $NaNO_3$ の濃度（図 a）の変化、あるいは 229 nm LED を光源として用いた際の N_2 中の NH_3 の濃度を変えた際の検出器の信号の変化を示しており、濃度の変化に伴い検出器の信号が変化することを確認した。本結果により、波長 220～240 nm LED が、光学式センサの光源として用いることが出来ることが実証された。

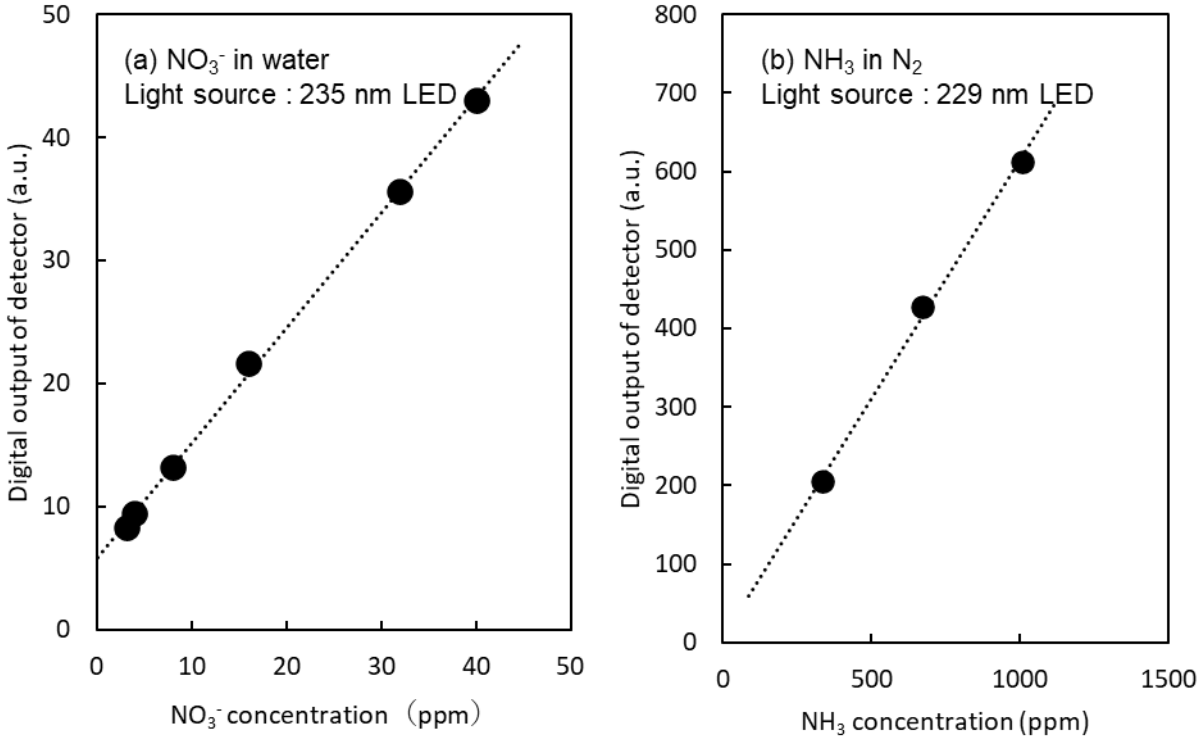


図　220-240 nm LED を光源として用いた (a) NO_3^-、(b) NH_3 の測定結果

[1] K. Sato, Y. Kunimi, Proceeding of SPIE Vol. 13386, 1338609 (2025).

© 2025年 応用物理学会

位相変調とヘテロダイン検出を用いたφ-OTDR に基づく極限学習機械

Extreme Learning Machine Based on φ-OTDR with Phase Modulation and Heterodyne Detection

○ 一松 大智[1], 美濃島 薫[1,2], 久世 直也[3]
[1]徳島大学, [2]電気通信大学, [3]ポスト LED フォトニクス研究所
○ Daichi Hitotsumatsu[1], Kaoru Minoshima[1,2], Naoya Kuse[3]
Tokushima University[1], The University of Electro-Communications[2], Institute of Post-LED Photonics[3]
E-mail: kuse.naoya@tokushima-u.ac.jp

AI の演算に光を用いる光コンピューティングでは演算の高速化と低消費電力化の両立が期待されている。ニューラルネットワークの一種である極限学習機械（Extreme Learning Machine, ELM）は、高速な学習と演算量の削減を特徴とする。ELM では、入力層から隠れ層への重みには、入力を高次元に射影するランダム行列を用いて、隠れ層から出力層への重みのみを線形手法で最適化する。光 ELM にはデータを重畳する次元として時間、周波数、空間を用いる手法が報告されており、これらはいずれも光学現象のランダム性を入力層から隠れ層へのランダムな重みに対応させて用いている。我々はシステムの簡易さ、演算速度の観点から、光ファイバーからのレイリー後方散乱光(RBS 光)を用いる時間次元の光 ELM[1]に注目している。しかし、[1]では強度変調された光の微弱な RBS 光を直接フォトディテクタで検出する。このため、検出前に光増幅が必要であり、それに伴って光信号対雑音比(OSNR)が悪化する問題が生じていた。そこで本研究では、RBS 光の高 OSNR での増強を実現するために、データを信号パルスの位相に重畳し、その RBS 光をヘテロダイン検出する手法を報告する[2]。

Figure 1(a)に実験セットアップを示す。1559 nm の狭線幅 CW レーザーは 2 つの経路に分岐され、一方は信号パルス、もう一方はローカルオシレーター光（LO 光）として使用される。入力データは、任意波形生成器（AWG）によって駆動される位相変調器（PM）により光の位相に重畳され、さらに音響光学変調器（AOM）によってパルス化される。この信号パルスは 100 m の光ファイバーに注入され、ファイバー内で生じるレイリー後方散乱（RBS）によって、高次元空間への射影を実現するランダムな重み付けが実行される。続いて、RBS 光は光サーキュレータによって分離され、LO 光と干渉させたのち、差分フォトディテクタ（BPD）で検出される。得られた干渉信号はミキサーによって周波数が下方変換され、オシロスコープ（OSC）で A/D 変換された後、コンピュータ上でリッジ回帰による出力層の学習に用いられる。Figure 1 (b)にヘテロダインにより得られた出力信号を示す。LO 光強度を 100 倍に増加させると、出力信号の振幅が 10 倍に増大し、光増幅器を用いることなく高 OSNR な信号増強が可能となった。次に、本セットアップを用いてアイリス分類と母音分類を実行した。入力データは、アイリス分類では 4 次元から 24 次元に、母音分類では 12 次元から 62 次元に RBS を通して高次元化された。Figure 1(c) は、混同行列を示しており、分類精度はアイリス分類では 0.85 から 0.95 へ、母音分類では 0.83 から 0.92 に改善した。

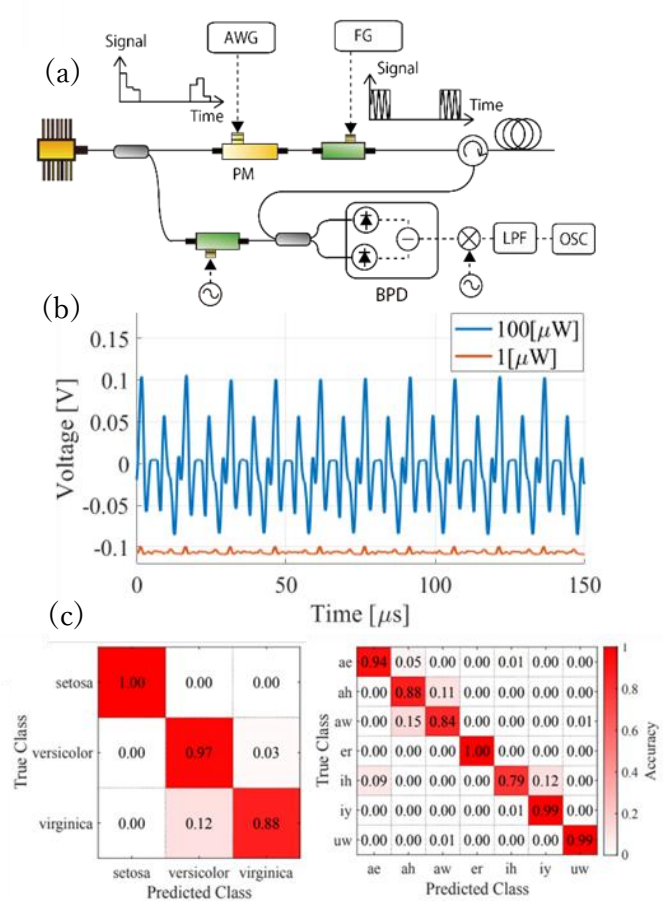


Figure 1 (a) Experimental setup. (b) Photo detected signals with varying local oscillator power (red: 1 μW, blue 100 μW). (c) Classification results (left: Iris, right: Vowel)

[1] B. Redding et al. Communications Physics 7: 75 (2024)
[2] Hitotsumatsu et al., Opt. Lett. 50: 3485–3488 (2025)

© 2025年 応用物理学会

フェムト秒レーザーを利用したリモートダブルパルス LIBS 計測

Remote Double-pulse LIBS Measurements Using a Femtosecond Laser System

(公財) レーザー技術総合研究所

○染川智弘，猪口和彦，ハイク・コスロービアン，谷口誠治，倉橋慎理

Institute for Laser Technology

○T. Somekawa, K. Inoguchi, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, and S. Kurahashi

E-mail: somekawat@ilt.or.jp

どのような有害物質が発生しているのか不明な災害現場において、安全かつ速やかに有害物質を検知・識別することは、除染作業、負傷者への治療、二次被害の拡大を防ぐ点から重要であるが、作業員の安全を確保するためには、数十 m 程度離れた位置からの測定が求められている。そこで、フェムト秒レーザーを用いたレーザー誘起ブレークダウン分光 （Laser Induced breakdown Spectroscopy: LIBS）法による有害物質を遠隔で同定・識別する手法の開発を行っている。これまでに、偏光子を 2 枚用いた独自のダブルパルス光学系を用いて、100 ps 程度のパルスの間隔を取ることで LIBS 信号を 5 倍程度増強させることに成功した（Somekawa et al., 2016）。本発表では、1 m 離れた Cu 試料に対するフェムト秒ダブルパルス LIBS の結果について報告する。

Fig. 1(a)は、フェムト秒ダブルパルス LIBS システムを利用した 1 m 離れた Cu 板の LIBS スペクトルである。橙がシングルパルスの結果であり、灰がダブルパルスでパルス間遅延 0 ps の結果である。ダブルパルスの 2 つのパルス出力の合計が、シングルパルスの出力とほぼ同じになるように調整しており、これらの 2 つのスペクトルに大きな変化はないが、パルス間遅延を 100 ps にした青のスペクトルでは、強度が大きくなっていることがわかる。Fig .1(b)がパルス間遅延時間と信号増強率の関係である。Fig. 1(a)での 515.2 nm の信号強度を利用し、パルス間遅延 0 ps とそれぞれの遅延時間との比を信号増強率としている。信号増強率は遅延時間を増加すると、ゆるやかに増加し、100 ps 程度で 4 倍程度の増強が確認できる。

謝辞：本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。関係各位に深く感謝の意を表します。

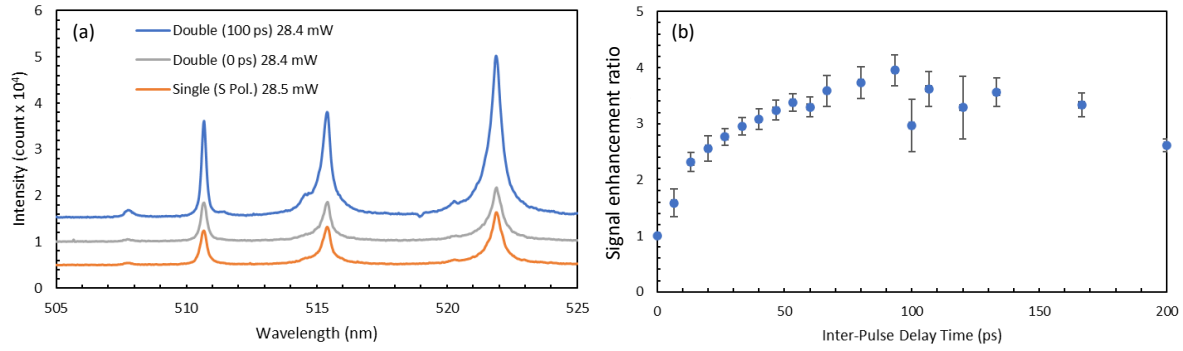


Fig.1 (a) Remote double-pulse LIBS spectrum and (b) a signal enhancement ratio as a function of the inter-pulse delay at 515.2 nm.

© 2025年 応用物理学会

ハイパースペクトルラマンイメージングライダーによる炭酸水の測定

Remote Detection of Sparkling Carbonated Water Using Hyperspectral Raman Imaging Lidar

レーザー総研[1]，阪大レーザー研[2]

○磯谷舟佑[1]，倉橋慎理[1]，染川智弘[1,2]

Inst. for Laser Tech.[1], Inst. Laser Eng., Osaka Univ.[2]

○S. Isogai[1], S. Kurahashi[1], and T. Somekawa[1,2]

E-mail: isogai.shusuke@ilt.or.jp

2018 年の国連気候変動に関する政府間パネルでは、全世界的に大規模な CO_2 排出削減を実施する必要性を指摘しており、自然界で最大級の CO_2 吸収源である海洋の効果解明が求められている。海洋生態系に蓄積される CO_2 は「ブルーカーボン」と呼ばれ、すでに排出されてしまった CO_2 を吸収する効果があり、特に、大型海藻による炭素吸収はそのポテンシャルの大きさが期待されている。また、大気中への CO_2 排出の超大量削減技術の一つとして、火力発電所や製鉄所等の集中発生源から排ガス中の CO_2 を回収し、海底下地層に貯留する海底下 CCS に大きな期待が寄せられているが、万が一の漏洩に対する漏洩検知手法や漏洩後の環境影響評価手法などの監視技術の開発が不可欠である。こうしたブルーカーボンによる CO_2 削減効率の評価、海底下 CCS 実施地における CO_2 漏洩モニタリング技術の開発によって海域での脱炭素に貢献するためには、海藻近傍や海底での海中 CO_2 濃度の水深・空間分布情報の把握が求められており、海水中の CO_2 ガスの挙動や漏洩を効率よくモニタリングすることが可能な、水中ライダー技術を開発している。

本発表では、海底下 CCS での漏洩モニタリングに向けたハイパースペクトルラマンイメージングライダー[1]を利用した炭酸水の測定結果（Fig. 1）を紹介する。

謝辞：本研究は JST、CREST、JPMJCR24J3 によって遂行しました。ご協力いただいた方々に感謝の意を表します。

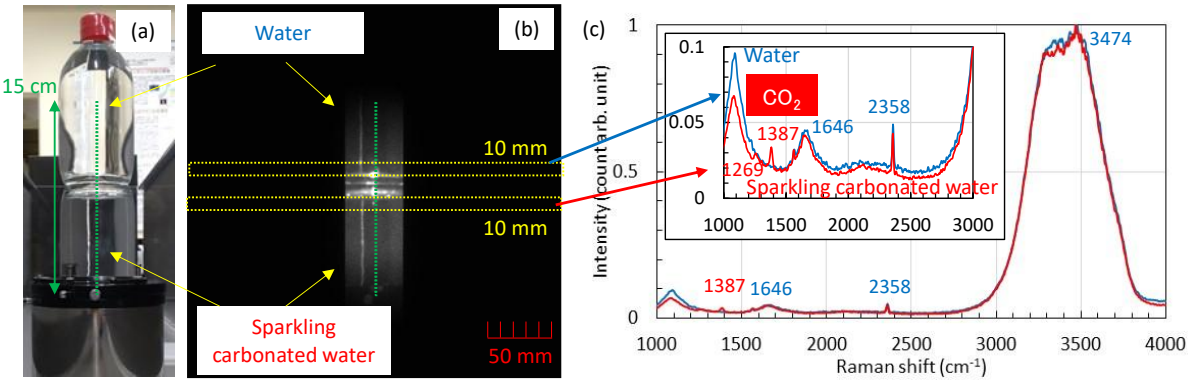


Fig. 1 (a) Water samples, (b) zeroth-order diffraction images with slit widths of 2 mm, and (c) remote Raman spectra of water and sparkling carbonated water located 6 m away in the air.

[1] T. Somekawa, S. Kurahashi, S. Matsuda, A. Yogo, and H. Kuze: Opt. Lett., **57** (2025)57.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation : 3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[9p-P03-1~29] 3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[9p-P03-1]

Optical coherence tomography with multiple light sources for simultaneous measurements of tomographic structure and water content

○Tatsuya Kono[1], Keisuke kouma[1], Nobuhiko Ozaki[1] (1.Wakayama Univ.)

[9p-P03-2]

High-speed 3D tomographic measurement by symmetric comb interval sweep of broadband optical comb

○Sota Miura[1], Samuel Choi[1] (1.Niigata Univ.)

[9p-P03-3]

Improvement of scan-less SD-OCT by applying multi-wavelength back-propagation method

○Akito Sato[1], Samuel Choi[1] (1.Niigata Univ.)

[9p-P03-4]

Development of a Near-Infrared Raman Spectroscopy System Using an Optical Fiber Probe

○Asuka Suehara[1], Hisaya Oda[1], Hiromi Kimura-Suda[1] (1.Chitose Inst. of Sci. & Tec.)

[9p-P03-5]

Fundamental Study of Brillouin Scattering Spectroscopy Using an Optical Vortex Coronaguraph

○(M1)Takuma Miyamoto[1], Kohei Yamaguchi[1], Yu Tokizane[2], Eiji Hase[2], Takeshi Yasui[2] (1.Tokushima Univ., 2.pLED Tokushima Univ.)

[9p-P03-6]

Observation of the excitation number distribution of coherent phonons in SiC using Raman scattering spectroscopy

○KYOHEI YOSHIDA[1], Heishun Zen[2], Kan Hachiya[3], Hideaki Ohgaki[2] (1.Kumamoto Industrial Research Institute, 2.Kyoto Univ. IAE, 3.Kyoto Univ. GSES)

[9p-P03-7]

Comparison of digital signal correction methods in dual-comb spectroscopy

○Shogo Onoda[1], Ryusei Uchiyama[1], Naoki Takeshi[1], Yoshiaki Nakajima[1] (1.Toho Univ.)

[9p-P03-8]

Microfabrication of visible light cured resin using CW laser

○(M1)Aritomo Watanabe[1], Chikara Egami[1] (1.Shizuoka Univ.)

[9p-P03-9]

Real-time hologram reconstruction using microsphere arrayed optical storage

○(M1)Hinata Okubo[1], Chikara Egami[1] (1.Shizuoka Univ.)

[9p-P03-10]

DDS Nanoparticle Surface Measurement using Polarization Interferometric - nonlinear Confocal Microscope with MEMS Mirror

○(M1)Shun Hasegawa[1], Chikara Egami[1] (1.Shizuoka Univ.)

[9p-P03-11]
Fluorescence measurement of liquids in dark bottles using a single optical fiber probe compact spectrometer
○Koichi Muro[1] (1.Teikyo Univ.)

[9p-P03-12]
A Ladder-Shaped FBG Sensor Network using Time- and Wavelength-Division Multiplexing
○Keiji Kuroda[1] (1.Kitasato Univ.)

[9p-P03-13]
Real-time FBG sensor using Wavelength-Division Multiplexed Dual-wavelength differential detection technique
○Takumi Onimura[1], Keiji Kuroda[1] (1.Kitasato Univ.)

[9p-P03-14]
Characterization of refractive index sensor using POF-FBG
○Ariasu Tamura[1], Nonoka Kitamura[1], Andreas Ioannou[2], Kyriacos Kalli[2], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU, 2.CUT)

[9p-P03-15]
POF-FBG-based pressure sensing using power variations at Bragg wavelength
○Taiki Kumagai[1], Ryuki Ohata[1], Andreas Ioannou[2], Kyriacos Kalli[2], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU, 2.CUT)

[9p-P03-16]
Tactile sensing using hot-water-tapered plastic optical fibers
○Yuri Wada[1], Keita Kikuchi[1], Shuto Tsurugai[1], Yosuke Mizuno[2], Heeyoung Lee[1] (1.SIT, 2.YNU)

[9p-P03-17]
Brillouin gain spectrum characterization in plastic optical fiber with 20-μm core diameter
○(M2)Shimbu Shirai[1], Andreas Ioannou[2], Kyriacos Kalli[2], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU, 2.CUT)

[9p-P03-18]
Simulation of slope-assisted BOCDR characteristics based on periodic pseudo-random modulation
○Takumi Morikawa[1], Keita Kikuchi[1], Ryo Inoue[1], Yosuke Mizuno[2], Heeyoung Lee[1] (1.SIT, 2.YNU)

[9p-P03-19]
SNR improvement in periodic pseudo-random modulation BOCDR using PMF
○Tomohiro Shiozaki[1], Keita Kikuchi[2], Kohei Noda[3], Tomohiro Masuko[4], Yue Zhao[4], Ryosuke Nagata[4], Yuichi Machijima[4], Heeyoung Lee[2], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU, 2.SIT, 3.UTokyo, 4.LAZOC)

[9p-P03-20]
Distributed strain and temperature sensing using BOCDR with silica-based HNLF
○Ryo Shibazaki[1], Ryo Inoue[1], Keita Kikuchi[1], Yosuke Mizuno[2], Heeyoung Lee[1] (1.SIT, 2.YNU)

[9p-P03-21]
Dual-laser low-coherence BOCDR based on periodic pseudo-random modulation
○(M1)Ryuki Ohata[1], Keisuke Motoda[1], Takahiro Ishimaru[2], Hiroshi Takahashi[2], Kunihiro Toge[2], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU, 2.NTT)

[9p-P03-22]

Performance enhancement in BOCDR using convexity extraction algorithm

○Yuma Kosaka[1], Ryo Inoue[1], Ryo Mogami[1], Keita Kikuchi[1], Yosuke Mizuno[2], Heeyoung Lee[1] (1.SIT, 2.YNU)

[9p-P03-23]

High-speed BOCDR using sinusoidal modulation for Brillouin gain spectrum acquisition

○Yuki Sugiyama[1], Keisuke Motoda[1], Seiga Ochi[1], Kohei Noda[2], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU, 2.UTokyo)

[9p-P03-24]

Investigation of sensing-fiber coiling-radius effects temperature response in modal interference sensors

○Shinsuke Tanaka[1], Keita Kikuchi[1], Shuto Tsurugai[1], Yosuke Mizuno[2], Heeyoung Lee[1] (1.SIT, 2.YNU)

[9p-P03-25]

Proposal of optical low-coherence reflectometry using two lasers

○Yukinari Arakaki[1], Keisuke Motoda[1], Takahiro Ishimaru[2], Hiroshi Takahashi[2], Kunihiro Toge[2], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU, 2.NTT)

[9p-P03-26]

Minimization of field-deployed equipment in OCDR using inserted long fibers

○Natsuho Yagishita[1], Yuta Higa[1], Keisuke Motoda[1], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU)

[9p-P03-27]

Suppression of ghost peak effects in OCDR through polarization state optimization

○Yuto Sekine[1], Yuta Higa[1], Takaki Kiyozumi[1,2], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU, 2.UTokyo)

[9p-P03-28]

Experimental measurement of beat spectra in OCDR based on periodic pseudo-random modulation

○Yuta Higa[1], Takaki Kiyozumi[1,2], Keisuke Motoda[1], Takahiro Ishimaru[3], Hiroshi Takahashi[3], Kunihiro Toge[3], Yosuke Mizuno[1] (1.YNU, 2.UTokyo, 3.NTT)

[9p-P03-29]

Absolute Distance Measurement Based on Three-Wavelength Interferometry

○(M2)Yile Nan[1], Naoki Yamaguchi[1], Takaki Kiyozumi[1], Hayato Yoshimura[1], Sze Yun Set[2], Shinji Yamashita[1] (1.Tokyo Univ., 2.RCAST, Tokyo Univ.)

複数光源を用いた光干渉断層計による断層構造と水分の同時計測

Optical coherence tomography with multiple light sources for simultaneous measurements of tomographic structure and water content

和歌山大システエ　○(M2) 河野 竜也，小馬 啓輔，尾崎 信彦*
Wakayama Univ. ○T. Kono, K. Kouma, N. Ozaki
*E-mail: ozaki@wakayama-u.ac.jp

【はじめに】光干渉断層計(OCT)は、近赤外広帯域光干渉を利用して、サンプル内部の断層構造を非侵襲・非破壊に画像化する技術である[1]。断層構造画像は、層界面での屈折率差による反射光強度により得られるが、最近では、特定波長光に対する光吸収特性が、物質ごとに異なることを利用して、断層構造に加え、組織の化学組成に関する情報を同時に取得する技術の開発が進んでいる。例として、水の吸収係数が異なる二つの波長光源を用いて、水分量を計測する方法が報告されている[2,3]。異なる中心波長を持つ複数の広帯域光源を、一つの OCT システムで使用する際、光学系の波長依存性を考慮する必要がある。特に、分光スペクトルを用いて OCT 画像を取得する Spectral-Domain(SD)-OCT の場合、感度ロールオフが大きく変化する。感度ロールオフは、サンプル内の反射面位置の深さが増すにつれて信号強度が低下する現象であり、光源の中心波長と分光器の波長分解能に大きく依存する[4]。そのため、物質による光吸収評価の際には、それぞれの波長光に対する空気中での感度ロールオフを一致させた上で、サンプルからの反射光強度の低下を比較する必要がある。そこで、本研究では、波長が異なる複数光源に対して、感度ロールオフを一致させることができる SD-OCT を構築し、より定量的な水分量計測を目指した。

【実験手法】Fig. 1 に、構築した SD-OCT システムの概略図を示す。光軸方向の反射光強度分布は、サンプルと参照ミラーからの反射光によって生じる干渉スペクトルを、逆フーリエ変換して取得する。使用した広帯域光源は、水による光吸収が小さい中心波長 λ_1（= 1.07 μm）と比較的大きい λ_2（= 1.35 μm）の二種類の SLD 光源である。分光器には、光スペクトラムアナライザを用い、各光源に対して最適な波長分解能を選択できるようにした。その結果、Fig. 2 に示すように二つの波長光源の空気中での感度ロールオフを一致させることができた。これにより、水の光吸収特性の違いのみに基づいた反射光強度比較が可能となる。評価用サンプルとして、内部寸法 10 mm のガラス製キュベットを用意し、キュベットに水を含む場合と含まない場合で反射光強度がどのように変化するかを調べた。

【結果と考察】Fig. 3 に、二つの SLD 光源で取得した反射光強度分布の比較を示す。横軸はキュベット内の光路長を表し、水を含む場合を赤線で、含まない場合を黒線で示している。反射光強度分布からキュベットのガラス面（内側及び外側）の位置(A, B または A', B')が確認され、ピーク A と A'を比較すると、水を含む場合、光路長が水の屈折率倍拡張し、また反射光強度が低下した。この強度低下の原因は、(1)ガラスとの屈折率差の低下(屈折率整合)、(2)水の光吸収、(3)感度ロールオフ差、が考えられ、(3)は Fig. 2 で示したように差は無い。また、波長 λ_1 の光では水の吸収が無視できるほど少ないことが分かっており、波長 λ_2 と波長 λ_1 に対するそれぞれのピーク A と A'間の強度低下の差が、水の光吸収による強度低下と考えられる。その結果、水の光吸収は約-11.2 dB と見積もられた。以上から、今回構築した複数光源を用いた SD-OCT による断層構造と水分の同時計測の可能性が示された。

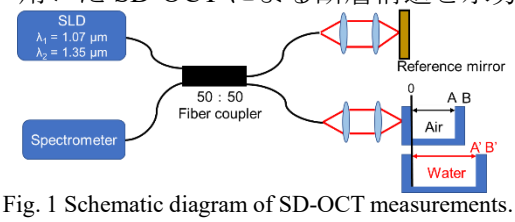


Fig. 1 Schematic diagram of SD-OCT measurements.

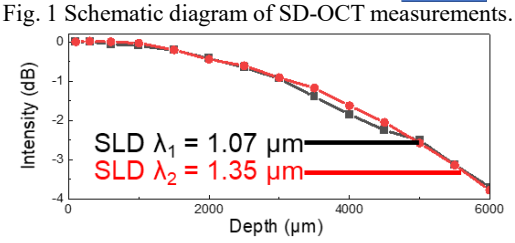


Fig. 2 Comparison of sensitivity roll-offs between the SLDs with different center wavelengths.

[1] D. Huang, et al., Science **254**, 1178 (1991).
[2] J. M. Schmitt, et al., J. Opt. Soc. Am. A **15**, 2288 (1998).
[3] T. Makino, et al., Opt. Rev. **30**, 158 (2023).
[4] M. H. Eggert, et al., Proc. of SPIE **8213**, 82131K (2012).

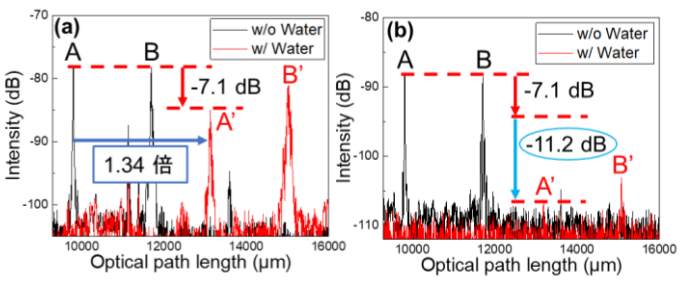


Fig. 3 Comparison of reflective intensity profiles obtained using SLDs with center wavelengths of (a) 1.07 μm and (b) 1.35 μm.

© 2025年 応用物理学会

広帯域光コムの対称的コム間隔掃引による高速３次元断層形状計測

High-speed 3D tomographic measurement by symmetric comb interval sweep of broadband optical comb

新潟大院自然研 ○(M2) 三浦　颯太，崔　森悦

Graduate School of Science and Technology, Niigata Univ.

E-mail: schoi@eng.niigata-u.ac.jp

1. 研究背景

光干渉計測技術は産業，医学，生物学分野等，多岐に渡って重要性が増している．筆者らはこれまで nm 精度のレーザ変位計と μm 精度の 3 次元コヒーレンス顕微鏡の機能を融合する，広帯域マルチギガヘルツコム光源を用いた新たな干渉計測法を提案した[1]．さらに，正弦波位相変調法を導入することで測定不能点の課題を克服し，Full-field な形状計測を実現した[2]．しかし，位相変調信号のサンプリングは撮像枚数の増大に繋がり膨大な量のデータ解析を要した．本研究では，フーリエ変換法[3]を取り入れた位相復元法を提案する．本手法は，対称的コム間隔走査によって実現できる位相定在の干渉縞パターンの特性を活用し，掃引時間と撮像枚数を大幅に節約できる．

2. 実験方法及び結果

Fig.1 に実験系を示す．波長λ=1555 nm の DFB レーザから Dual drive Mach-Zehnder modulator (DD-MZM)型光コム発生器を通してコム間隔 10 GHz の光コムを生成し，高出力 EDFA 及び非線形分散シフトファイバによる非線形効果によって帯域約 40 nm まで広帯域化した．コム間隔は RF 信号発生器で周波数変調することにより，9.995 GHz から 10.005 GHz まで 10 MHz の範囲で安定的に掃引できた．生成した広帯域マルチギガヘルツコムをマイケルソン型の干渉顕微鏡に入射し，測定物体の干渉像を高速赤外カメラ(865 fps, 640×512 px)により取得した．光路差 L を 1246 mm とすることで，深さ方向の測定レンジ約 610 μm を達成した．

本手法では，コム間隔が中心周波数成分を軸に対称的に掃引されるため，光のキャリア周波数は変化せず，干渉ピークの包絡線のみが検出される．干渉ピークの振幅は $\cos(2\pi L/\lambda)$ に比例し，ピーク付近では断層面の形状変化に応じた干渉縞が現れる．これより，取得した画像ごとにフーリエ変換法を適用することで，干渉強度分布による断層位置と位相分布による断層の表面形状を得ることができた．Fig.2 に掃引時間 57.8 ms，撮像枚数 50 枚で計測した，膜厚約 150 μm のガラス板のフルフィールド断層計測結果を示す．

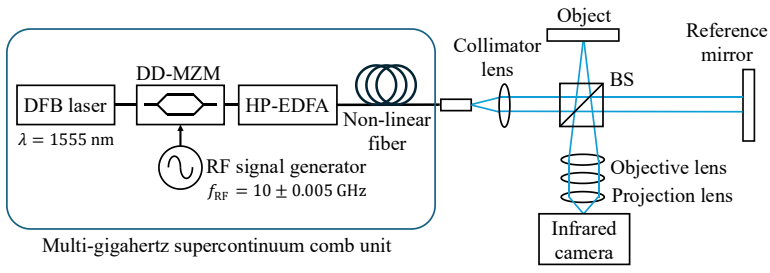


Fig. 1 実験系，広帯域マルチギガヘルツコムと干渉顕微鏡

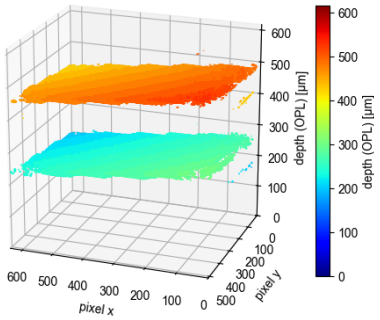


Fig.2 計測結果（膜厚 150 μm のガラス板の３次元断層分布）

３．まとめ

本研究では，DD-MZM と非線形光学効果によって広帯域化した光コムを用いて，ガラス板の 3 次元断層を計測した．また，フーリエ変換法を適用することにより，断層面の微小変位を反映した精密な形状を再現できることを確認した．

謝辞　本研究は科研費 24K21607 の助成によって行われた．

参考文献

[1] S. Choi et al., Opt. Express 29(11), 16749-16768 (2021).
[2] S. Choi et al., CThA6D-04, CLEO-PR2022, Sapporo, Japan (2022).
[3] M. Takeda et al., Opt. Soc. Am., **72**(1), 156-160 (1982).

© 2025年 応用物理学会

多波長逆伝搬法を適用したスキャンレス SD-OCT の改良

Improvement of scan-less SD-OCT by applying multi-wavelength back-propagation method

新潟大院自然科学研究科　○(M2)佐藤彬人、崔　森悦

Graduate School of Science and Technology, Niigata Univ.

E-mail: schoi@eng.niigata-u.ac.jp

広く普及している Spectral domain (SD)-OCT 方式は、機械的操作が必要な Time domain OCT 方式に比べて計測速度と SNR(Signal to Noise Ratio)に優れている。

しかし、従来の SD-OCT では、観測される干渉スペクトルの逆フーリエ変換によって物体の深さ方向の分布を得るため、周波数リサンプリング処理を要し、ミラー像（位相共役成分）が発生する。

これらの課題解決のために、本研究では、多波長逆伝搬法 (Multi-wavelength back-propagation method: MBP)を用いたスキャンレス SD-OCT 装置を提案した[1]。

本研究の実験系を Fig.1 に示す。MBP 法では、まず正弦波位相変調 (Sinusoidal phase modulation: SPM)により位相$\Phi(y)$と光場の振幅 B(y)を導出する。測定物体をミラーにした時の$\Phi(y)$分布と B(y)分布の例を Fig.2 に示す。断層の干渉光場 $U(L_B)$は逆伝搬演算によって

$$U(L_B) = \sum_{m=1}^{M} B(k_m) exp(j(\Phi_m(y_m) - k_m L_B))$$

となる。ここで m は受光部の各ピクセルの番号で総数は M である。逆伝搬距離 L_B で変化する$U(L_B)$の強度分布を表示することで断層像が得られる。MBP 法は位相を含む複素振幅の合波演算を行っているため、リサンプリングの必要がなく、バイアス成分やミラー像が抑制される。

本研究では、先行研究で制作した光学系の調整を行い、測定感度の向上を図った。Fig.3 に先行研究と本研究で得た 10 枚重ねたスコッチテープの断層計測結果の比較を示す。光学系の再調整により深さおよそ 500 μm~1000 μm の範囲において SNR が 6~12 dB 程度向上したことを確認した。

今後は、内耳蝸牛内の振動計測[2]など生体内部の振動を計測するために、本研究の多波長逆伝搬法を用いた SD-OCT に、広視野ヘテロダイン検波法[3]を適応し、断層と振動分布の同時計測を目指す。

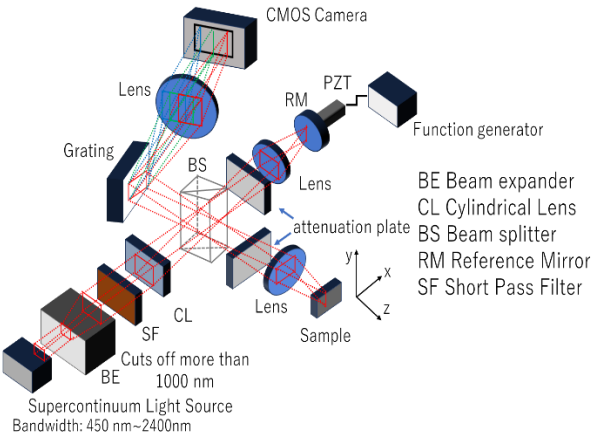


Fig.1Experimental system of SD-OCT.

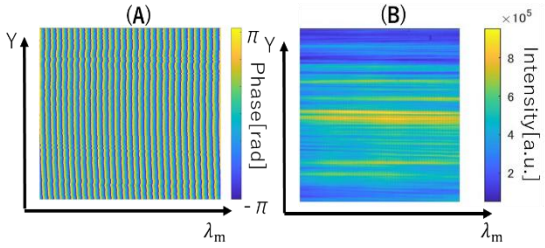


Fig.2 Phase and amplitude distributions derived by SPM acquired (A)Phase distribution $\Phi(y)$ and(B)Amplitude distribution B(y)

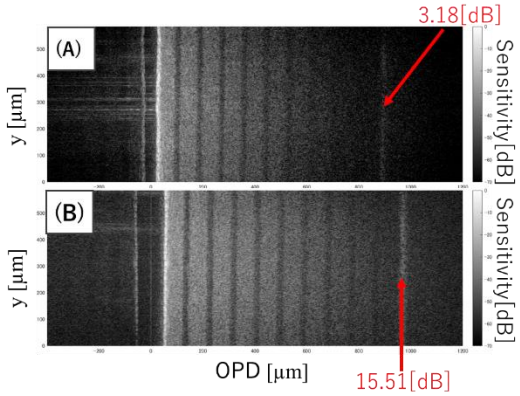


Fig.3 Comparison of tomographic measurement results for 10 layers of scotch tape, acquired by (A)previous research and (B)this research.

参考文献

[1] S. Choi, K. Otsuki, O. Sasaki, and T. Suzuki, Appl. Opt., 52 (16), 3726 - 3731 (2013)

[2] F. Nin, S. Choi, T. Ota, Z. Qi, and H. Hibino, Opt. Rev., 28, 239–254 (2021)

[3] Choi S, Maruyama Y, Suzuki T, Nin F, Hibino H, and Sasaki O, Opt Commun, 356, 343-349 (2015)

© 2025年 応用物理学会

光ファイバプローブを用いた近赤外ラマン分光装置の構築

Development of a Near-Infrared Raman Spectroscopy System Using an Optical Fiber Probe

公立千歳科技大院理工 ○(M1)末原 飛鳥，小田 久哉，木村-須田 廣美

Graduate School of Science and Engineering, Chitose Institute of Science and Technology

○Asuka Suehara, Hisaya Oda, Hiromi Kimura-Suda

E-mail: m2250160@photon.chitose.ac.jp

【はじめに】ラマン分光法は、物質に光を入射した際に発生する散乱光（ラマン散乱光）の光学特性を用いて物質の成分を分析が可能となる。測定試料に前処理を必要とせず、非破壊・非接触的に分子の構造や量に関する情報を測定できる特徴がある。そのため、医療分野をはじめとした様々な分野でラマン分光法は注目され、最近ではラマン分光用に光ファイバプローブが開発されラマン散乱光を使って生体内の情報を得られるなど自由度の高い測定が可能となった[1]。今回我々はラマン散乱光を利用した関節診断技術の確立を目的とし、光ファイバプローブを接続した近赤外ラマン分光装置の構築を行なった。

【実験内容】関節部分を測定するには光が皮膚を透過する必要があるため、透過率が高い波長域である 1 μm 帯を中心とした近赤外光領域に着目した。励起光源として Nd:YAG レーザー（1064 nm）を使用した。レーザー光をマルチモード光ファイバプローブに導入し、光ファイバプローブから出射した励起光をサンプルに入射した。発生した散乱光を同じ光ファイバプローブで集光し、出射した散乱光をロングパスフィルターによりレイリー散乱光を除去したのち分光器と InGaAs 検出器を用いてスペクトル観測を行なった。

【実験結果】本実験ではサンプルとして炭酸カルシウム粉末を用いた。参考のため既存の顕微ラマン分光装置（PHOTON Design 社 RSM-310）で測定した結果を図 1(a)に示す。102 cm^{-1}、231 cm^{-1}、666 cm^{-1}、1044 cm^{-1} に炭酸カルシウム特有のピークが得られた。新たに構築した光ファイバプローブ型近赤外ラマン分光装置での測定結果を図 1 (b)に示す。(a)の測定結果と同じ波数に炭酸カルシウム特有のスペクトルが観測された。その他試料の測定結果については、発表当日に紹介する予定である。

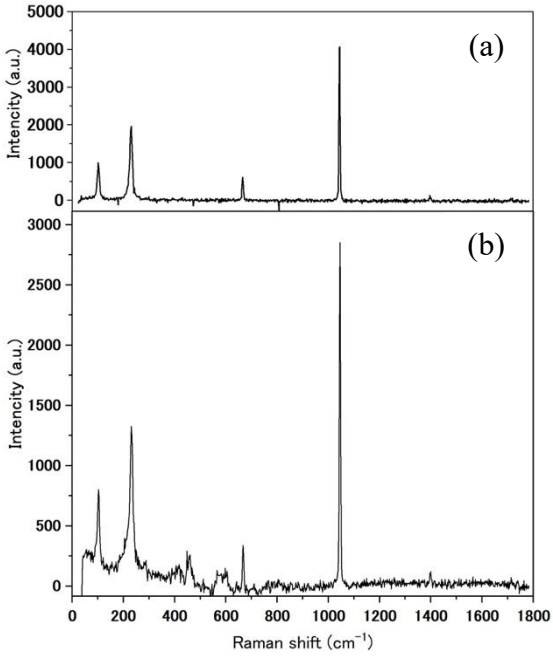


Fig. 1 Raman spectra of $CaCO_3$ of (a) Microscopic Raman spectrometer, (b) probe-type Raman spectrometer.

【参考文献】

[1] Yuichi Komachi, Hidetoshi Sato, Katsuo Aizawa, and Hideo Tashiro: APPLIED OPTICS, Vol **44**, Issue 22, pp.4722-4732 (2005).

© 2025年 応用物理学会

光渦コロナグラフを用いたブリルアン散乱分光法の基礎検討

Fundamental Study of Brillouin Scattering Spectroscopy Using an Optical Vortex Coronagraph

○(M1)宮本拓磨 [1], (M2)山口航平 [1], 時実悠 [2], 長谷栄治 [2], 安井武史 [2]

徳島大院創成 [1], 徳島大 pLED [2]

Takuma Miyamoto[1], Kohei Yamaguchi[1], Yu Tokizane[2], Eiji Hase[2] and Takeshi Yasui[2]

[1]Grad. Sch. Sci. Tech. Innov., Tokushima Univ.,[2]pLED, Tokushima Univ.

E-mail: tokizane@tokushima-u.ac.jp

生体組織の力学特性の計測は、医療診断から新たなバイオテクノロジーの開発に至るまで、多岐にわたる応用分野で不可欠である。生体の粘弾性といった力学特性を光によって非破壊、非侵襲に測定可能な、ブリリアン散乱計測[1]が注目されている。ブリリアン散乱計測は、試料に光を照射し、照射した光から数 GHz 程度シフトしたブリリアン散乱光を分光測定する手法である。しかし、ブリリアン散乱光は極めて微弱である(レイリー光に対して 6 桁以上小さい)ことや、周波数シフトが小さいことから、入射光によって生じるレイリー散乱光との分離が難しい。このため VIPA と呼ばれる分散型の分光素子と、コロナグラフと呼ばれる手法によって、分離が行われている[2]。コロナグラフは天文観測において、強度の高い恒星の周りに存在する微弱な惑星光を観測するための手法であり、恒星光と惑星光が地球に到達する角度の違いを利用して、恒星光を物理的に遮蔽して除去する。この手法が VIPA 素子で分離したレイリー光の除去に利用されている。

しかし、上記のブリリアン分光法では、光学系の不完全さに起因した回折光が生じ、測定の信号雑音比の低下が生じる。より高効率な背景光の除去が求められる。

本研究では、「光渦コロナグラフ」[3]をブリルアン散乱計測に適用することを提案する。原理検証のため光渦コロナグラフ光学系を構築し、ブリリアン散乱分光への適用可能性の検討を行った。

光渦コロナグラフは光渦が有する位相特異点を利用した遮光法であり、物理的な遮蔽を必要としない。原理的には背景光を完全に除去することが可能である。

Fig. 1 に実験系を示す。波長 532 nm の CW レーザー光を用い、レイリー散乱光（背景光, 図中赤色）とブリルアン散乱光（測定光、図中緑色）を模擬した光を、角度をつけてアイリス 1（PP1）に入射する。レンズ 1 でフーリエ面(FP1)上に集光した光は、そこに配置した L=2 の螺旋位相板によって光渦変調される。続いて、PP1 との共役面(PP2)に設けた Lyot ストップで不要光を除去し、その後の FP2 のフーリエ面に配置したカメラで背景光および測定光を同時に検出する。レイリー散乱に対応する背景光のみを入射し、PP2 面で測定した結果を Fig. 2 に示す。強度の低い部分が円環の内側に形成され、強度の高い背景光がその周辺に回折されていることが分かる。このパターンは Ring of fire と呼ばれ、強度の高い背景光が適切に位相変調され、軸上から除去できたことを意味する。Ring of fire を Lyot stop を通過させ、背景光を除去し FP2 面において測定光を適切に測定できる可能性が示された。今後は、FP2 面における背景光の消光を測定し、ブリリアン散乱分光に適用可能となる条件を調べる。

謝辞: 徳島大岸川博紀准教授には本研究の有益なご助言をいただきましたことを感謝します。

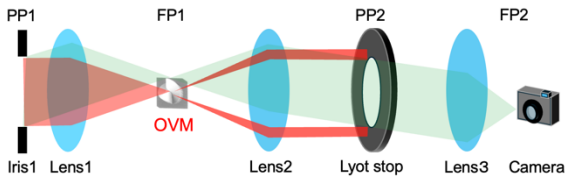


Fig.1 Optical vortex coronagraph optics
PP（Pupil Planes）, FP(Focal Planes)

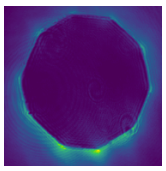


Fig.2 Ring of fire measured on PP2

参考文献

[1]E. Hase et. al, Exp. Dermatol **34**, e70081(2025).
[2]E. Edrei, et al., Opt. Express **25**(6),6896(2017).
[3]G. Foo, et al., Opt. Lett. **30**(24), 3308(2005).

© 2025年 応用物理学会

ラマン散乱分光法を用いた SiC における コヒーレントフォノンの励起個数分布の評価

Estimation of the excitation number distribution of coherent phonons in SiC using Raman scattering spectroscopy

熊本県産技セ [1], 京大エネ研 [2], 京大エネ科 [3] ○吉田　恭平 [1], 全　炳俊 [2], 蜂谷　寛 [3], 大垣　英明 [2]

Kumamoto Industrial Research Institute [1], Kyoto Univ. IAE [2], Kyoto Univ. GSES [3]

○Kyohei Yoshida [1], Heishun Zen [2], Kan Hachiya [3], Hideaki Ohgaki [2]

E-mail: k-yoshida@kumamoto-iri.jp

固体の格子振動（フォノン）は、物理的・電気的性質を決定する重要な因子である。近年、フォノンの吸収波長に一致する中赤外パルスレーザーを用いることで、特定のフォノンモードの選択励起（Mode-selective phonon excitation: MSPE）が可能となっている[1]。MSPE により固体材料の金属−絶縁体転移などの物性制御が実現すると考えられており、こうした物性を精密に制御するためには、選択励起されたフォノンの励起個数分布の詳細な評価を行うことが重要となる。本研究では、MSPE で選択励起された特定の周波数のフォノンの励起個数分布を定量的に評価する手法を確立することを目的とする。

我々は、これまでに中赤外レーザー(KU-FEL：以下 FEL)照射による炭化ケイ素（SiC）の MSPE を、アンチストークスラマン散乱(ASR)分光により実証した[1]。ラマン散乱光には、ASR 光に加えて、ストークスラマン散乱(SR)光が存在する。ここで、ASR と SR の光強度は、サンプルのフォノンの励起個数分布に対応する温度と式（1）の関係がある[2]。$\hbar$、ω_p、ω_i、k_B、T、$I_{ASR}(\omega_p)$、$I_{SR}(\omega_p)$ は、それぞれ、ディラック定数、フォノン周波数、励起光の周波数、ボルツマン定数、温度、ω_pの周波数を持つフォノンの ASR 光の強度、ω_pの周波数を持つフォノンの SR 光の強度である。

$$\exp\left(-\frac{\hbar\omega_p}{k_BT}\right)=\frac{(\omega_i-\omega_p)^4}{(\omega_i+\omega_p)^4}\frac{I_{ASR}(\omega_p)}{I_{SR}(\omega_p)}\cdots(1)$$

（1）式より、ASR 光と SR 光の強度比($I_{ASR}(\omega_p)/I_{SR}(\omega_p)$)から、プローブ光が照射されている時間の瞬間的なサンプルの有効温度（ω_pの周波数を持つフォノンの励起個数分布）として定量評価が可能となる。本研究では、サンプルとして 6H-SiC を用いた。光源として、波長 532 nm、パルス幅 7.5 ps、パルスエネルギー30 μJ のレーザーをプローブ光、波長 10.4 μm（LO フォノンの吸収波長）、パルス幅 0.6 ps（ミクロパルス）、マクロパルスエネルギー0.25 ～ 11 mJ の FEL をポンプ光とした。

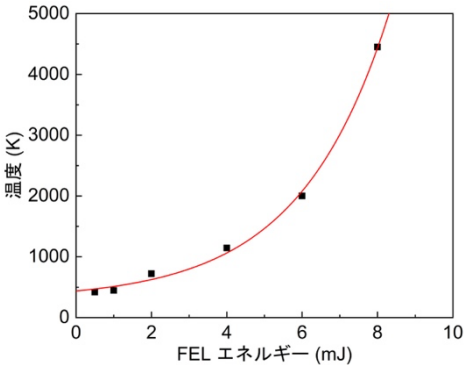


Fig.1 FEL energy dependence of the temperature estimated by Raman scattering spectroscopy in SiC.

図 1 に観測された ASR および SR の強度比から算出した LO フォノンの励起個数分布（温度換算）を示す。本結果より、FEL のエネルギーが増大するにつれ、LO フォノンの励起個数は、非線形に増加することがわかった。また、11 mJ のポンプ光を照射した時、温度が負の値となった。負の温度となった原因は、FEL 照射による反転分布の形成などの可能性等が考えられるが、現在、詳細は調査中である。本研究では、FEL のエネルギーと、MSPE で励起されるフォノンの励起個数分布の相関性について報告する。

[1] K. Yoshida, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 103, 182103 (2014) [2] S. D. McGrane, et al., *Appl. Spectrosc.*, 68, 1279 (2014)

© 2025年 応用物理学会

デュアルコムファイバレーザーにおけるデジタル信号補正手法の比較

Comparison of digital signal correction methods in dual-comb spectroscopy

東邦大[1] ○(B)斧田 将吾[1], 内山 竜成[1], (M2)武子 尚生[1], 中嶋 善晶[1]

Toho Univ.[1], ○Shogo Onoda[1], Ryusei Uchiyama[1], Naoki Takeshi[1], Yoshiaki Nakajima[1]

E-mail: yoshiaki.nakajima@sci.toho-u.ac.jp

デュアルコム分光[1]は、広帯域かつ高分解能なスペクトルを高速に取得可能な分光手法として注目されている．モード同期 Er ファイバレーザーを用いたデュアルコム分光計は、ガス分子の振動回転遷移による吸収線を一括して取得できることから、非接触でガス温度や濃度などの物理量を高精度に計測可能である．一方で，従来のデュアルコム分光計は、2 台のレーザーと周波数安定化制御を必要とし，装置が大掛かりで複雑、かつ高コストであるという課題があった．この課題を解決するため、我々はフリーランニング動作でも高い相対周波数安定性を有する、小型かつ堅牢なデュアルコムファイバレーザーの開発を進めてきた[2, 3]。これまでに、これらのレーザーを用いたガス分光を、周波数領域におけるデジタル信号補正[4]により実証している．しかし、リアルタイム信号処理の実現には、時間領域での補正手法の検討も必要である。

本研究では，繰り返し周波数 50.6 MHz の双方向動作型デュアルコムファイバレーザー[2]と $H^{13}CN$ ガスを用い，周波数領域および時間領域のデジタル信号補正手法を比較した．Fig. 1(b)に，繰り返し周波数差 Δf_{rep} = 144 Hz に設定した際の、各領域における補正による積算スペクトルを示す。この条件下では、時間領域での補正は困難であり，周波数領域での補正が有効であることを確認した．本講演では，Δf_{rep} の変化に伴うデジタル信号補正手法の有効性について、時間領域および周波数領域それぞれの観点から比較・検討した結果を報告する．本研究は NEDO の助成を受けた。

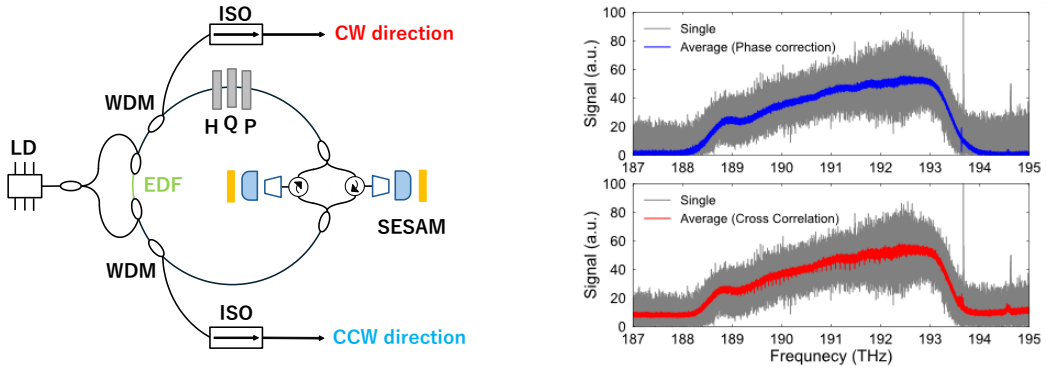


Fig. 1(a) Bi-directional dual comb fiber laser. (b) Digital correction in the time and frequency domains.

[1] I. Coddington, et al, Optica **3**, 414 (2016).

[2] Y. Nakajima, et al., Opt. Express **27**, 5931-5944 (2019).

[3] T. Yumoto, et al., Opt. Contin. **2**, 1867 (2023).

[4] 武子 尚生，他，第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-P04-3 (2025).

© 2025年 応用物理学会

CW レーザを用いた可視光硬化樹脂への微細加工

Microfabrication of visible light cured resin using CW laser

静岡大工[1] ○渡邉 有朋[1], 江上 力[1]
Shizuoka Univ.[1], ○Aritomo Watanabe[1], Chikara Egami[1]
E-mail: watanabe.aritomo.21@shizuoka.ac.jp

近年, 様々な分野で利用されるレーザ微細加工においては, 超短パルスレーザが主に用いられる. 超短パルスレーザを用いることで局所的に多光子吸収を誘起することができ, 熱を伴わない高精細な加工が可能となっている. しかし, このレーザは機材が高価かつ大型であること, 工業利用, 医療利用における高コスト化やメンテナンスのしにくさなどの課題がある. そこで, 私たちは安価でかつ小型である連続波(CW)レーザを用いたフォトンモードの微細加工手法を提案する.

本研究では, 可視光硬化樹脂 EXGT2002-1 に対してレーザの光強度と走査速度を調節することで反応時定数を操作し, 高精度な微細加工を行った. さらに, 反応時定数が光強度に対して非線形的な応答を示すことを確認し, 本研究の手法の有用性の検討を行った. 露光強度が高い領域では反応時間を短縮し, 低い領域では反応速度を長くすることで露光領域を制限している. Fig.1 は作製した硬化物の膜厚とドーズ量の関係を示した図である. 光強度が大きくなるにつれてドーズ量に対応する硬化膜厚の感度曲線がより急峻になることが確認され, 光強度に対して非線形的に応答していることが確認できた. Fig.2 は露光強度を $22.5\sim100kW/cm^2$, 走査速度を適宜設定して作製した硬化物である. 結果, 直線状の微細構造体を 3 次元造形することができた. 詳細については当日発表する.

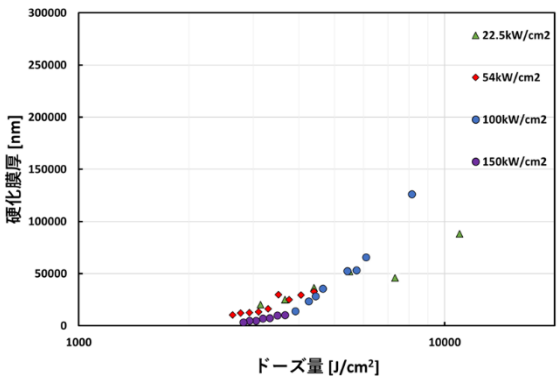


Fig.1 Relationship between film thickness and dosage of cured film produced.

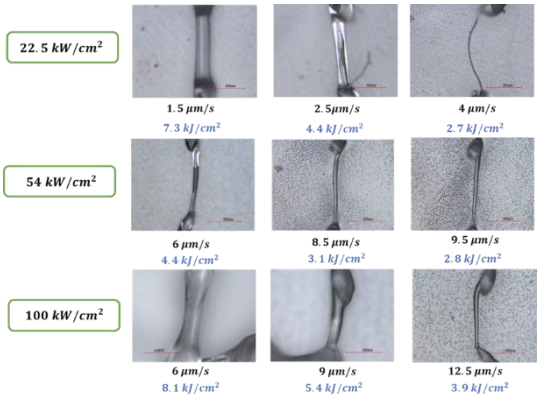


Fig.2 Top viewes of cured material prepared using proposed method in this study.

参考文献

[1] C.Egami, Y.Liu;「Laser fabrication of high-aspect-ratio holes and grooves in photoresist by time constant manipulation」Optics Communications 280 p.188-191 (2007)

© 2025年 応用物理学会

微小球配列型光ストレージによる実時間ホログラムの再生

Real-time hologram reconstruction using microsphere arrayed optical storage

静岡大工，(M1)大久保　陽向，江上　力
ShizuokaUniv., (M1)Hinata Okubo, Chikara Egami
E-mail：okubo.hinata.21@shizuoka.ac.jp

本研究ではフルオルセイン色素をドープした微小球を用いて非感光領域(バッファリング)を持つ微小球配列型ディスクを作製し，マイクロホログラムの記録・再生を行った．微小球のサイズは直径 3 μ m であり，ディスクの作製にはスピンコート法を用いた．バッファリング有する 2 次元配列された微小球は面内方向，光軸方向における記録密度を増加させ，ジッタフリーの再生が可能である．ホログラムの記録には，波長 473nm の青レーザを用いて，対向二光束干渉によって単一微小球に記録した．観測には共焦点光学系を利用した．

画像の記録・再生を行うために空間光変調器(SLM)を組み込んだ光学系に縮退四光波混合を用いて位相共役光を発生させることで，入力した 2 次元画像の実時間ホログラムの再生を行った(Fig.1 参照)．記録媒体として薄膜フィルムを使用し，CCD カメラで観測した実時間ホログラムの再生画像を以下に示す(Fig.2 参照)．SLM により入力画像の黒い部分が強度変調され，観測される位相共役光は入力画像の白い部分のみが現れていることが確認できる．同様に微小球での実時間ホログラムを再生することにより微小球で画像の記録・再生が可能であることが確認できる．詳細については当日発表する．

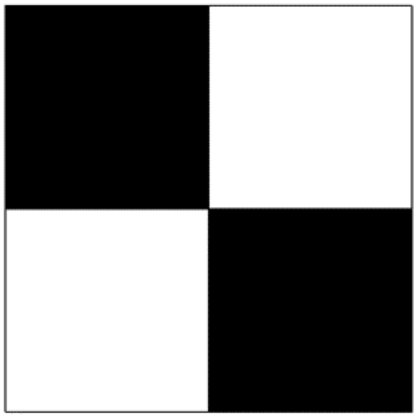


Fig.1. Input 2D image



Fig.2. Real-time hologram reconstructed image

© 2025年 応用物理学会

MEMS ミラーを用いた偏光干渉非線形共焦点顕微鏡による DDS 微粒子の表面計測

DDS Nanoparticle Surface Measurement using Polarization Interferometric - nonlinear Confocal Microscope with MEMS Mirror

静岡大工, (M1)長谷川 舜, 江上 力

Shizuoka Univ., Shun Hasegawa, Chikara Egami

E-mail: hasegawa.shiyun.21@shizuoka.ac.jp

本研究では光軸方向を高分解能で計測が可能な共焦点光学系と、平面方向を高分解能で計測が可能な偏光干渉計を組み合わせ、物質が有する 3 次の非線形光学特性を利用してコントラスト分解能を向上させることで非接触かつ低侵襲な計測を可能にする光学顕微鏡の実現を目指した。

光源として波長 638.5nm の CW(Continuous Wave)レーザを用い、DDS(Drug Delivery System)標準化サンプルとして、直径 200nm のキサンテン系色素ドープポリスチレン微粒子を使用し計測を行った。入射光強度は非線形性を発現できる$1.07MW/cm^2$に設定した。

本実験において平面方向の分解能を表す指標として CTF(Contrast Transfer Function)値を利用した。通常の共焦点顕微鏡のみを用いた光学系を使用し、微粒子全体の輪郭を計測した(Fig.1(a)参照)。その後偏光干渉計を用いて等方性領域における散乱光を打ち消し、異方性領域からの散乱光のみを計測することで CTF 値が大幅に上昇することを確認した(Fig.1(b)参照)。また MEMS ミラーを用いることで計測範囲を 33nm まで縮小させ、表面計測を行った。

以上，詳細に関しては当日紹介する。

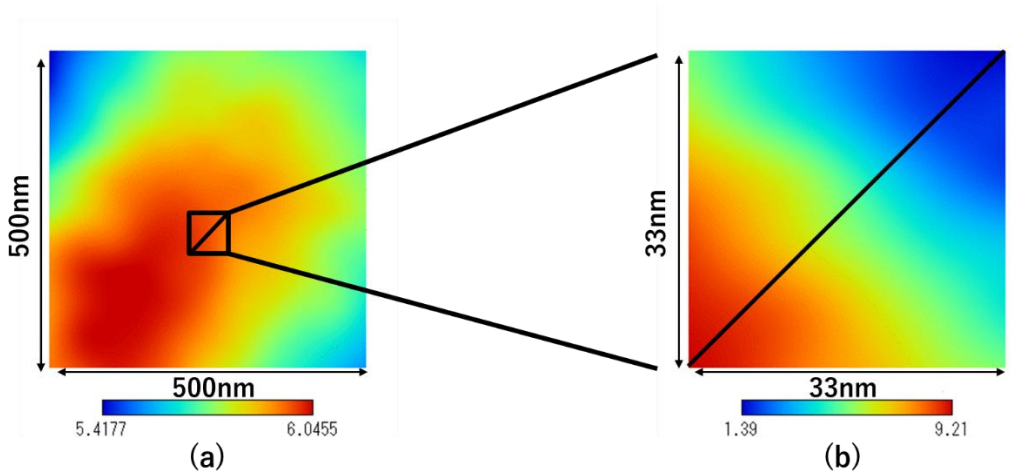


Fig 1 Xanthene dye-doped nanoparticles images
(a) The overall view of the nanoparticle with conventional confocal microscope.
(b) Surface of the nanoparticle with proposed confocal microscope.

© 2025年 応用物理学会

不透明ボトル内液体の単一光ファイバプローブ小型分光器を用いた蛍光計測

Fluorescence measurement of liquids in dark bottles using a single optical fiber probe compact spectrometer

帝京大理工[1] ○室 幸市[1]
Teikyo Univ.[1]
E-mail: muro@ics.teikyo-u.ac.jp

ビッグデータ活用へのセンサの普及を背景に、超小型分光器の適用分野が広がっている。そこで、我々は光源を搭載した単一光ファイバプローブ小型分光器を以前に提案した。この小型分光器は、白色光源を用いたスペクトル計測システムであった。今回、紫外線（UV）光源とし、溶液の蛍光をボトル（in-situ）中で観察するシステムを検討した。

１．単一光ファイバプローブ小型分光器

提案した単一光ファイバプローブ小型分光器の概略図を図１に示す．白色 LED の光源から照射される光は，ハーフミラーによって光ファイバに導入される．対象物から反射した光は同じ光ファイバを折り返し導波し，ハーフミラーを介して分光センサ［浜松ホトニクス社製マイクロ分光器 C12666MA2)］に受光される．

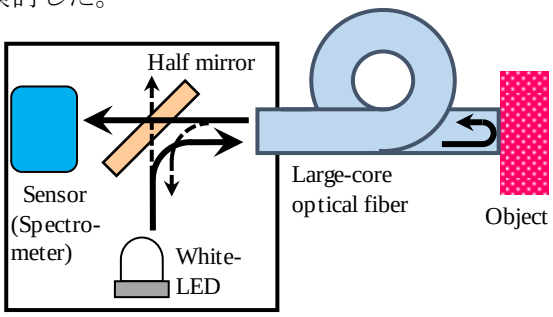


Fig. 1. Compact spectrometer with a single optical fiber probe.

２．溶液の蛍光計測

2-1. 反射システムによる蛍光計測：透容器

透明ガラス容器中の栄養ドリンク（energy drink）に対して、蛍光計測を検討した(図２)。励起光源は波長 395nm の LED である。透明容器の外側から励起光（中心発光波長 395nm の LED）を照射した場合の、透過システムでの蛍光スペクトル波長 480nm～750nm と同じ領域となっている。つまり、反射システムでの蛍光計測の可能性が分かる。

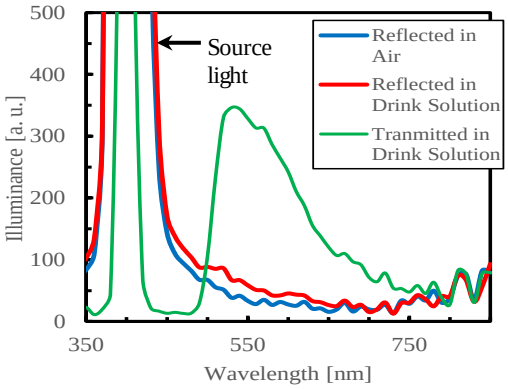


Fig. 2. Fluorescence measurement of liquids (drink solution) using a reflection system.

2-2. 透過システムによる蛍光計測：不透明容器

狭小のエリアでも計測が可能である。ここで、反射光（蛍光）が小さい場合等を考慮して、透過システムでの計測を提案した。光ファイバ先端に空間とミラーを設置し，空間に溶液を通すことで透過率を計測する。栄養ドリンクと水での、透過スペクトルを比較した、図３に示す。上記と同様に、波長 460nm 付近から 700nm にかけて、蛍光が観察できる。

３．むすび

光源を UV または近赤外（NIR）とすることで、モニターや分析器として応用出来ると考えられる。

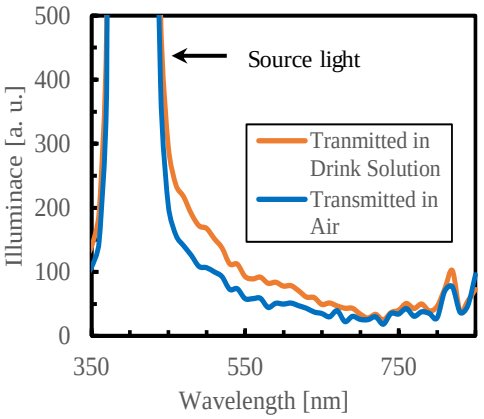


Fig. 3. Fluorescence measurement of liquid (drink solution) in bottle using a transmit system.

参考文献
[1] 室，坂井，永渕，第 66 回応物春季講演会，10a-PA2-9，(2019).
[2] 浜松ホトニクス，技術資料，マイクロ分光器 (2017).
[3] 室，第 67 回応物春季講演会，15a-PA2-12，(2020).

© 2025年 応用物理学会

時間・波長分割多重 Ladder 型 FBG センサーネットワーク

A Ladder-Shaped FBG Sensor Network using Time- and Wavelength-Division Multiplexing

北里大理 [1] ○黒田 圭司 [1]

Department of Physics, School of Science, Kitasato Univ. [1], ○Keiji Kuroda[1]

E-mail: kkuroda@kitasato-u.ac.jp

Fiber Bragg Grating(FBG)は、光ファイバーのコアに回折格子が形成されている光ファイバー型デバイスで、回折格子の周期によるブラッグ反射条件を満たす波長の光のみ反射する。FBG に温度変化や歪みが加わると、反射波長がシフトするためセンサーヘッドとして活用されている。センサーネットワークに求められる最も基本的な特性として多点化があるが、その方法としては時間分割多重(TDM), 波長分割多重(WDM)などが用いられる。その他にセンサーに求められる機能としては長距離、配置のフレキシブル性(位置、間隔、個数)、トラブル耐性、高精度性などがある。実際のセンサーネットワークでは断線等のトラブルが起こった場合、トラブル箇所を特定可能であることと異なるルートからアクセス可能であることが求められる。今回は Ladder 型のネットワークに TDM、WDM を併用したトラブル耐性多点センシングについて報告する。

図 1(a)に実験セットアップを示す。光源として DFB-LD (Distributed Feedback Laser)アレイを用い、直接変調によって波長 1530nm、1540nm、1550nm でパルス幅 4.9μs、波長間の遅延 5μs、繰り返し 1ms の三波長パルス列を発振させる。パルスは 90:10 カプラーで分割し 10%を波長マーカーの HCN セルへ送る。90%を等分割し信号光と参照光とし信号光は強度変調器(IM)で 70ns パルスにし、センサー部に入射する。図 1(b)にセンサー部を示す。50:50 カプラーで入射光を Upper と Lower の 2 経路に分割する。各径路には 90:10 カプラーが 30m 間隔で 3 段接続され、上下のカプラーはファイバーで結ばれセンサーラインを形成する。これにより Laddar 型の並列ネットワークを形成している。各ラインには波長の異なる FBG が直列に配置されている。(FBG1, FBG3, FBG5)、(FBG2, FBG4, FBG6)、及び FBG7 の波長はλ_1=1531.0nm、λ_2=1540.5nm、λ_3=1550.1nm でバンド幅(FWHM) と反射率はすべて共通でそれぞれ 0.2nm と約 90%である。 FBG1 と FBG2、FBG3 と FBG4、 FBG5 から FBG7 はそれぞれライン 1、ライン 2、ライン 3 に接続されている。よってセンサーライン内の FBG は WDM で、異なるラインの FBG は TDM で識別される。また信号光入射と反射光取り出しは Upper と Lower の 2 経路で並行して行われる。FBG 反射光は 50:50 カプラー通過後、参照光と再び混合され、ヘテロダイン検出される。カプラーの二つの出力は差動検出器によって検出され、光検出器(PD)で検出した HCN セル透過光強度とともにオシロスコープを通してパソコンで取り込む。繰り返し 30 秒の Ramp 電圧をレーザーの温度コントローラー(TEC)に印加することで温度(波長)自動掃引を行う。

図 2 に得られたビート信号を示す。λ_1とλ_2は 3 つのラインから、λ_3はライン 3 からの信号が検出されている。さらに各信号が 2 つのビートのペアとなっており、各ラインに 20m の遅延ファイバーを挿入することで Upper と Lower 両経路の信号が同時に検出されている。図 3 は波長を掃引することで、このビート信号から計算した反射スペクトルと HCN のマーカースペクトルである。十分な S/N 比で 7 FBG センサーヘッドのスペクトルが Upper と Lower 同時に測定されている。つまり多点化を行った上で、上下双方向からのアクセスが光スイッチなどを用いたラインの切替えなしで可能になったことを示している。講演ではネットワーク上のある箇所に断線が発生した場合でも、センシングとトラブル個所の識別が可能なことを報告する。

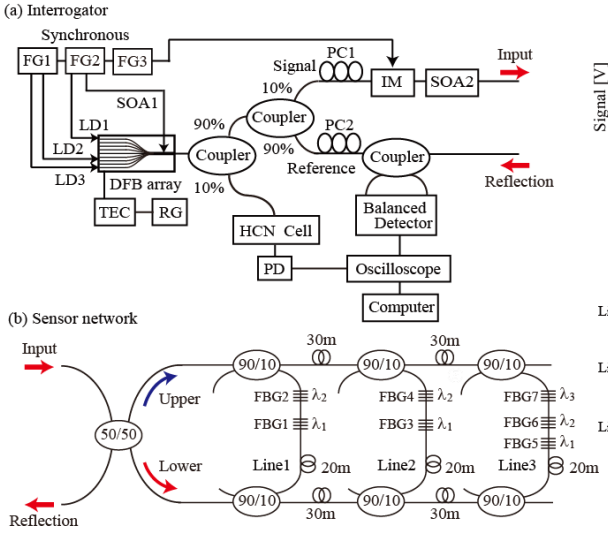


Figure 1

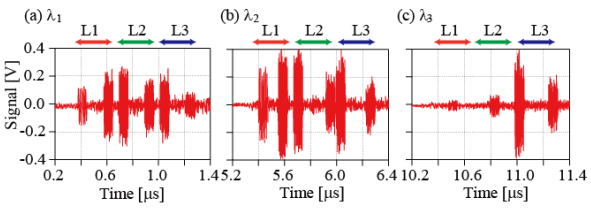


Figure 2

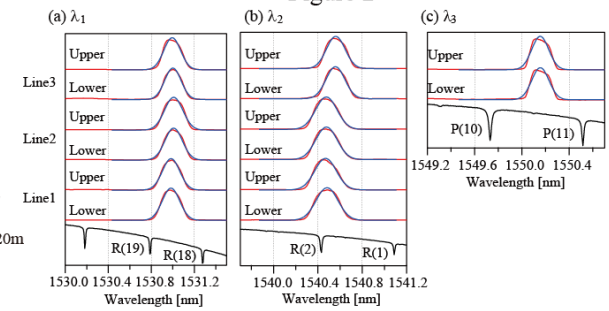


Figure 3

波長分割多重二波長差動検波リアルタイム FBG センサー

Real-time FBG sensor using Wavelength-Division Multiplexed Dual-wavelength differential detection technique

北里大理[1]，○(M2)鬼村 拓実[1]，黒田 圭司[1]

Department of Physics, School of Science, Kitasato Univ.[1], ○(M2) Takumi Onimura[1], Keiji Kuroda[1]

E-mail: onimura.takumi@st.kitasato-u.ac.jp

Fiber Bragg Grating(FBG)は、コアに回折格子が形成され、ブラッグの反射条件を満たす波長の光のみを反射する光ファイバー型デバイスである。FBG に温度変化や歪みが加わることで、回折格子の周期や屈折率が変化し、反射波長がシフトするためセンサーヘッドとして利用されている。二波長差動検波とは二波長パルスの FBG からの反射強度差より、FBG 反射ピーク波長を測定する手法である(図 1)。FBG の反射スペクトルをガウス関数と仮定し、等強度二波長パルスペアを入射した際の FBG 反射強度を対数領域で差をとることによって、次式のパルス電力比(Pulse Power Ratio：PPR)を得ることができる。

$$PPR = E + F \times \lambda_B$$

ここで各係数は

$$E = 10log_{10}\left(\frac{P(\lambda_1)}{P(\lambda_2)}\right) + (80log_{10}2)\left(\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}\right)\left(\frac{\lambda_2-\lambda_1}{{B_g}^2}\right), \quad F = (-80log_{10}2)\left(\frac{\lambda_2-\lambda_1}{{B_g}^2}\right)$$

と表され、λ_Bは FBG のブラッグ波長、λ_1とλ_2はパルスペアの波長、B_gは FBG 反射スペクトルの半値全幅を示している。PPR はλ_Bに対して線形に変化し、平均波長$(\lambda_1+\lambda_2)/2$がλ_Bと一致したとき 0 になる。PPR を測定することで光源の波長掃引なしで FBG の温度変化を確認し、高精度化可能のメリットがある。これまでの研究[1]では、上式の平均波長$(\lambda_1+\lambda_2)/2$、波長差$\lambda_2-\lambda_1$、半値全幅B_gを入力することによって、ブラッグ波長λ_Bをリアルタイムに決定することを行ってきた。更に本研究では波長の異なる FBG を 3 種類用意することにより、異なる波長を同時に測定できる波長分割多重化可能であることを確認した波長分割多重二波長差動検波リアルタイム FBG 温度センサーについて報告する。

光源として DFB(Distributed Feedback)レーザーアレイを用いた。複数の DFB レーザー(LD)と半導体光増幅器(SOA)から構成され、3 つの LD と SOA に直接変調することで 3 波長等強度パルスを発振させる。キャリア注入による熱の影響で共振器長が変化し、パルス内で周波数ドリフトが発生し掃引光源として利用できる。同時に SOA を単一パルス毎に幅の狭い 2 点で励起することでゲートとして用いることができる。その結果 1 台のレーザーから、波長の異なるパルスペアを 3 波長発振させることが可能である。DFB レーザーアレイからの出力光をサーキュレーター経由で FBG に入射させる。FBG からの反射光は光検出器で電気信号に変換された後オシロスコープで検出する。3 種の FBG のスペックは、反射率は共通で 1%、中心波長はそれぞれ 1531nm、1540.5nm、1550.1nm である。

波長λ_Bの計算に用いるパルスペアの平均波長はパルス発振時の波長を光スペクトルアナライザーで、FBG の半値全幅は DFB レーザーを用いたレーザー分光によって、波長差は Mach-Zehnder 干渉計による遅延自己相関測定でそれぞれ決定した値を用いた。図 2 に FBG の反射パルスペア波形を示す。左から 1531nm、1540.5nm、1550.1nm のパルスペアを表示しており、それぞれパルスの強度比が異なることが分かる。パルス比がそれぞれ変化することによって、ここからλ_Bを導くことができる。測定したパルス比を用いて Labview プログラムにより自動でλ_Bを計算および表示可能にした。現在、λ_Bを温度に変換した際の測定精度評価を行っており、詳細については講演で述べる予定である。

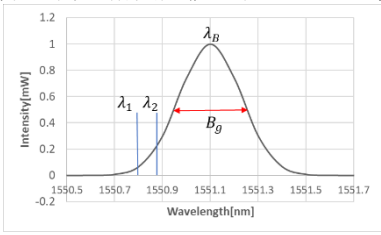


Figure 1

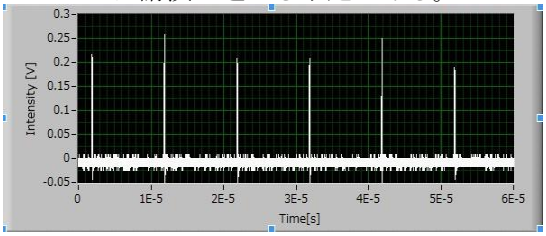


Figure 2

[1]鬼村拓実、黒田圭司、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会　19a-P06-10.

© 2025年 応用物理学会

POF-FBG を用いた屈折率センサの特性評価

Characterization of refractive index sensor using POF-FBG

○田村 有旦 [1], 北村 ののか [1], Andreas Ioannou[2], Kyriacos Kalli[2], 水野 洋輔 [1]
[1] 横浜国立大学 大学院工学研究院 [2] キプロス工科大学

○Ariasu Tamura[1], Nonoka Kitamura[1], Andreas Ioannou[2], Kyriacos Kalli[2], and Yosuke Mizuno[1]
[1]Faculty of Engineering, Yokohama National University [2]Cyprus University of Technology
E-mails: tamura-ariasu-xh@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバセンサは、電気センサにはない多くの利点を有しており、研究開発が急速に進展している。光ファイバセンサは、光ファイバ全長の任意の位置で物理量の測定が可能である分布型センサ[1]と、ファイバ・ブラッグ・グレーティング（FBG）[2] に代表される点型センサに大別される。一般に、点型センサは分布型センサと比較して測定精度が高いという特徴がある。本研究では、FBG を用いた点型センサに着目する。

シリカ単一モードファイバ（SMF）に描画した FBG は広く使用されているが、数%の歪によって破断するという問題があった。一方、プラスチック光ファイバ（POF）は数 10%を超える大きい歪への耐性を備えている。標準的なアクリル POF に描画した FBG に加え、近年では、通信波長帯で低い光伝搬損失を示す全フッ素化屈折率傾斜型（PFGI-）POF に描画した FBG が注目されている。

2022 年、我々は PFGI-POF に描画した FBG を用いた接触センシングを提案し、FBG と物体の距離が近づくにつれて透過光パワーが減少し、接触時に最小となることを明らかにした[3]。また、光サーキュレータを用いた反射型の構成でも、接触センシングの動作を実証した[4]。さらに、描画したグレーティング数が接触センサの動作特性に及ぼす影響も解明した[5]。一方で、変位や接触以外の物理量のセンシングについては調査がなされていない。

そこで本研究では、PFGI-POF-FBG が屈折率センサとして動作することを実証し、その特性を評価した。様々な屈折率の液体を滴下すると、透過スペクトルが変化し、屈折率が高いほど高波長側へシフトする傾向を確認できた。

2. 実験条件

用いた PFGI-POF は、コア（直径: 50 µm、屈折率: ~1.35）、クラッド（厚み: 10 µm、屈折率: ~1.34）、および、オーバークラッド（外径: 490 µm）の 3 層構造である。コアとクラッドは透明フッ素樹脂（CYTOP®）、オーバークラッドはポリカーボネートから構成される。フェムト秒レーザにより、長さ 0.4 m の PFGI-POF の中心付近のコアに 1 行ずつ直接グレーティングを描画することで FBG を作製した。グレーティングピッチは 4 µm、グレーティング数は 500、FBG の描画距離は 2 mm とした。

PFGI-POF-FBG に基づく屈折率センシングの動作検証に用いた実験系を **Fig. 1** に示す。1550 nm 帯の広帯域光源の出力光を PFGI-POF-FBG に入射し、透過光スペクトルを光スペクトラムアナライザ（OSA）で観測した。FBG 直上から水および濃度を調製した複数の砂糖水を滴下した。砂糖水は、20℃の水 20 mL に砂糖を 10 g, 20 g, 30 g, 40 g 溶かした 4 種類の水溶液を用いた（濃度はそれぞれ 33, 50, 60, 67 wt%）。屈折率は濃度におおよそ比例して増加することが知られており、1550 nm 帯における測定例[6]との比較により、それぞれの屈折率は 1.385, 1.412, 1.428, 1.438 と見積もられた。

3. 実験結果と考察

波長 1520–1620 nm における透過光スペクトルを **Fig. 2(a)**に示す。また、波長 1555 nm 付近の拡大図を **Fig. 2(b)** に示す。液体を滴下すると出力パワーは減少し、砂糖水の濃度が高くなるほどパワーの減少幅も大きくなった。さらに、濃度が高くなるとスペクトルが高波長側へシフトした。**Fig. 3** は、滴下した水溶液の屈折率に対する、1554.5 nm 付近のディップ波長の依存性である。屈折率が高くなるにつれ、ディップ波長のシフトが大きくなった。なお、FBG が描画されていない箇所に液体を滴下した場合に、透過スペクトルに変動がないことは確認済みである。

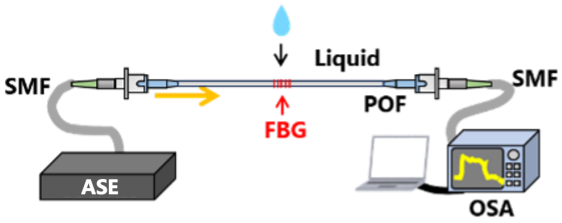


Fig. 1. Experimental setup. FBG: fiber Bragg grating, ASE: amplified spontaneous emission, SMF: single-mode fiber, OSA: optical spectrum analyzer, POF: plastic optical fiber.

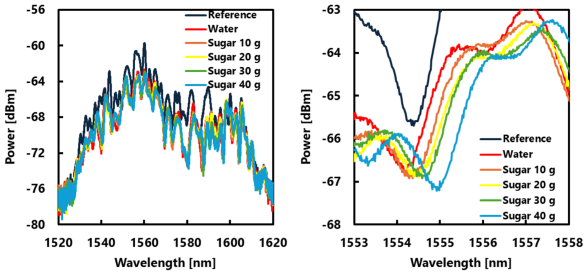


Fig. 2. (a) Broadband optical spectra measured with a POF-FBG: spectrum without any liquid added (reference) and spectrum with either water or sugar water added. (b) Magnified view around 1555 nm.

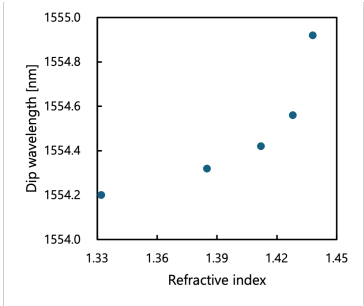


Fig. 3. Dependence of the dip wavelength around 1554.5 nm on the refractive index.

この特性を利用すれば、パワー領域よりも安定な波長領域において、屈折率センシングが可能になると考えられる。今後は、より詳細に特性を精査し、屈折率センシングに最適な波長帯を解明したい。

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., Light: Sci. Appl. **5**, e16184 (2016).
[2] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings* (Academic, San Diego, CA, 1999).
[3] K. Noda, et al., Appl. Phys. Express **15**, 122005 (2022).
[4] H. Javid, et al., Appl. Phys. Express **16**, 112001 (2023).
[5] N. Kitamura, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 028002 (2025).
[6] C.-H. Chen, et al., Sensors **10**, 4794 (2010).

© 2025年 応用物理学会

POF-FBG のブラッグ波長におけるパワー変化を活用した圧力センシング

POF-FBG-based pressure sensing using power variations at Bragg wavelength

○熊谷 太貴[1], 大畠 瑠己[1], Andreas Ioannou[2], Kyriacos Kalli[2], 水野 洋輔[1]
[1]横浜国立大学 大学院工学研究院 [2]キプロス工科大学 PhOSLab

○Taiki Kumagai[1], Ryuki Ohata[1], Andreas Ioannou[2], Kyriacos Kalli[2], and Yosuke Mizuno[1]
[1]Yokohama National University [2]Cyprus University of Technology
E-mails: kumagai-taiki-gx@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバを構造物に張り巡らせることにより健全性診断を行う光ファイバセンシング技術が注目を集めている。光ファイバセンサには大きく分けて点型と分布型に分類されるが、ここでは感度・精度が高い点型センサに焦点を当てる。点型センサの代表例としては、ファイバ・ブラッグ・グレーティング（FBG）を用いたセンサが挙げられる[1]。

現在、光ファイバセンサとしてシリカ光ファイバが多くの場面で用いられている。一方、プラスチック光ファイバ（POF）も、柔軟性が高く数 10%の歪にも耐え、コア径が比較的大きく接続が容易であることなど多くのメリットを有しており、センサ応用が進んでいる。特に、従来のアクリル POF の光伝搬損失が通信波長帯において比較的高いというデメリットを克服した全フッ素化屈折率傾斜型（PFGI-）POF への期待が高まっている[2]。

我々はこれまで、PFGI-POF に描画した FBG を用いた接触センシングの動作実証を行い[3]、反射型の構成での実装[4]や、グレーティング数が接触センシングの特性に与える影響の解明[5]などを推進してきた。しかし、これらの研究で使用された POF-FBG ではブラッグ波長が明瞭に観測されなかったほか、グレーティング数が 1 のときも反応を示したためグレーティングとしての特性を十分に活用できている状態ではなかった。その結果、感度や安定性に課題が残されていた。ブラッグ波長が明瞭な PFGI-POF-FBG を用いたセンシングの実現が望まれている。

そこで本研究では、ブラッグ波長が明瞭に観測される PFGI-POF-FBG を用いて、ブラッグ波長におけるパワー変化を利用した高感度な圧力センシングを実証した。

2. 実験

コアの直径が 20 μm、グレーティング数が 5000 の PFGI-POF-FBG を用いた。FBG の描画法としては、フェムト秒レーザを照射することにより、PFGI-POF のコアの断面に対してグレーティングを描画する plane-by-plane 法を用いた。

PFGI-POF-FBG に基づく圧力センシングの提案に用いた実験系を **Fig. 1** に示す。シード光が 1070 nm のスーパーコンティニューム（SC）光源からの超広帯域出力光を PFGI-POF-FBG に入射し、透過光スペクトルを光スペクトラムアナライザ（OSA）で観測した。大きさ 20×20×50 mm のゴム製の物体を PFGI-POF 上の 3 か所、(A) FBG から SC 光源側に約 20 cm 離れた点、(B) FBG 直上、(C) FBG から OSA 側に約 20 cm 離れた点、に押し当てて圧力を印加した。

3. 結果

まず、波長 1300-1600 nm における物体非接触時の透過光スペクトルを **Fig. 2** に示す。1550 nm 帯に明瞭なディップが観測された。このディップに着目し、FBG を加熱したときの 1547.5 nm 付近の透過光スペクトルの拡大図を **Fig. 3** に示す。多モード性によりこの範囲で 2 つのディップが観測されたが、その両方が加熱により短波長側にシフトしたため、これらのディップがブラッグ反射によるものであることが確認された。

次に、PFGI-POF 上の 3 か所に圧力を加えたときの透過光スペクトルの変化を **Fig. 4** に示す。点 A, C を加圧した場合は参照光と類似のスペクトルが観測されたのに対し、点 B（FBG）を加圧した場合のみ、短波長側のディップが浅くなる特異な挙動を示した。この特性は、高感度な点型圧力センサの原理として活用できる可能性がある。今後は、この特性を定量的に精査する。

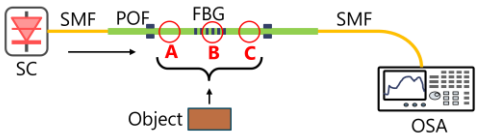


Fig. 1. Experimental setup. FBG: fiber Bragg grating, SC: super-continuum, SMF: single-mode fiber, OSA: optical spectrum analyzer, POF: plastic optical fiber.

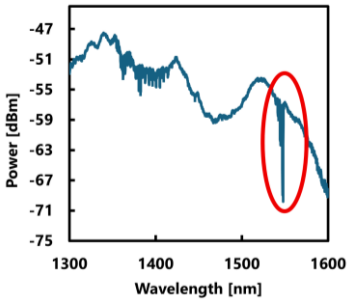


Fig. 2. Wideband optical transmission spectrum of the POF-FBG measured when the object was not touched.

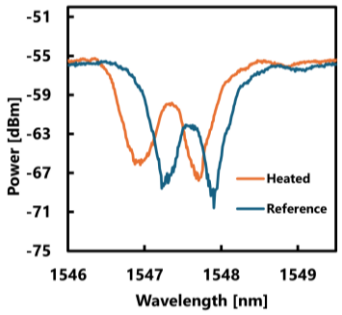


Fig. 3. Optical spectra around 1547.5 nm measured when the POF-FBG was not heated (reference; blue) and heated (orange).

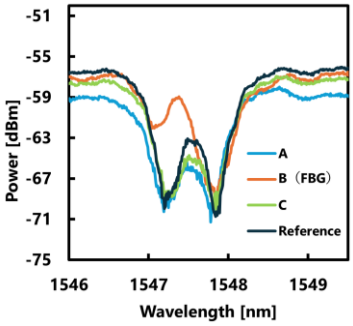


Fig. 4. Optical spectra around 1547.5 nm measured with no pressure applied anywhere (reference) and with pressure applied at points A, B (FBG), and C.

参考文献

[1] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings* (Academic, San Diego, CA, 1999).
[2] Y. Koike, et al., NPG Asia Mater. **1**, 22 (2009).
[3] K. Noda, et al., Appl. Phys. Express **15**, 122005 (2022).
[4] H. Javid, et al., Appl. Phys. Express **16**, 112001 (2023).
[5] N. Kitamura, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 028002 (2025).

© 2025年 応用物理学会

熱湯テーパ加工を施した POF による接触センシングの提案

Tactile sensing using hot-water-tapered plastic optical fibers

○和田 有理[1]、菊地 啓太[1]、鶴谷 柊人[1]、水野 洋輔[2]、李 ひよん[1]
[1] 芝浦工業大学 理工学研究科 [2] 横浜国立大学 工学研究院

○Yuri Wada[1], Keita Kikuchi[1], Shuto Tsurugai[1], Yosuke Mizuno[2], and Heeyoung Lee[1]
[1] Shibaura Institute of Technology [2] Yokohama National University
E-mails: af22113@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

光ファイバセンサは、電気センサにはない多くのメリットを有しており、社会の関心が高まっている。光ファイバセンサは分布型と単点型の大きく 2 種類に分類される。分布型センサは、光ファイバに沿った物理量の測定が可能であるが[1]、ここでは、比較的測定精度が高く、簡素な実験系で動作する単点型センサに注目する。

一般的なシリカ単一モードファイバは数%の歪で破断してしまうのに対し、プラスチック光ファイバ (POF) は、数 10%以上の歪にも耐えることができるため、測定ファイバとしての活用が期待されている。近年では、標準的なアクリル POF よりも、通信波長帯において著しく低い光伝搬損失を有する全フッ素化 (PF-) POF が脚光を浴びている[2]。

我々はこれまで、FBG が描画された PF-POF を用いた接触センサや[3,4]、局所的な圧縮が施された PF-POF を利用する屈折率センサ[5]を開発してきた。これらは、FBG や局所的な圧縮箇所において生じる散乱光が、接触物体や周囲の屈折率によって、反射や吸収、あるいは特有の干渉を引き起こすことにより、スペクトルパワーが変化することを利用する。しかし、POF-FBG の描画にはコストがかかり、ドライバーによる圧縮は簡易ではあるものの、再現性に欠ける。

そこで本研究では、安価かつ再現性の高い熱湯を用いた POF のテーパ加工技術[6]を利用し、局所的な外径変化点を持つ PF-POF を用いた新たな接触センンシングを提案する。

2. 実験条件

まず、コア径 50 μm の PF-POF (GigaPOF-50SR, Chromis Fiberoptics)に熱湯テーパ加工を施した。全長 35 cm の POF を用い、両端をスライドステージに固定させ、中央の 15 cm 区間を 95℃の熱湯に浸した。一方のみのスライドステージを 0.1 mm/s で 15 cm 引張した。引張後、簡易コネクタを取り付けた。テーパ加工後のファイバ全体の外径分布を **Fig. 1**(a)に示す。さらに、40–50 mm における外径分布を **Fig. 1**(b)に示す。引張した側のコネクタから約 43 mm 付近に約 150 μm の外径変化が生じていることが確認できる。

続いて、作製したサンプルと **Fig. 2** に示す実験系を用い、接触センシングの動作検証を行った。**Fig. 2** に示す(1),(2),(3)の各位置にゴム製の物体 (20 mm×10 mm ×60 mm) を置いた場合と、何も接触させていない場合における透過光スペクトルを観測した。接触は 20 mm×60 mm の面で行った。

3. 実験結果

観測した透過光スペクトルを **Fig. 3**(a)に示す。また、波長 1560 nm 付近の拡大図を **Fig. 3**(b)に示す。1560 nm 付近において、(1)に接触させたときのみ約 1 dB のパワーの減少が確認できる。**Fig. 4** に示すのは、光スペクトラムアナライザのゼロスパン機能を用いて、1560 nm におけるパワーの接触に対する時間変化を測定した結果である。測定開始から約 2 秒後に接触させ、約 8 秒後に接触を解除した。(1)の箇所においてのみ、接触状態に応じた顕著なパワー変化が生じていることを確認できる。以上より、POF 中の急激な外径変化点が、接触センサとして機能することを実証した。

4. まとめ･今後の予定

本研究では、安価に実証できる、熱湯テーパ加工を施した POF を用いた接触センサの提案を行った。熱湯テーパ加工により生成される、急激な外径変化箇所が接触センサの感度を有する点として機能することを実証した。

今後は、光の入射方向や外径変化量に対するセンシング感度への影響を調査する。また、屈折率センサ、荷重センサなどへの有効性も実験的に検証する。

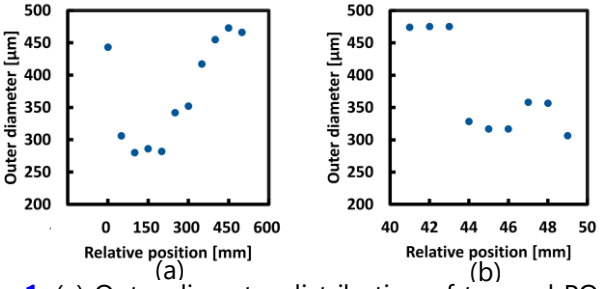


Fig. 1. (a) Outer diameter distribution of tapered POF. (b) Magnified view around 45 mm.

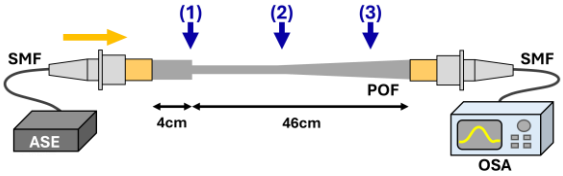


Fig. 2. Experimental setup. ASE: amplified spontaneous emission, OSA: optical spectrum analyzer, POF: plastic optical fiber, SMF: single-mode fiber.

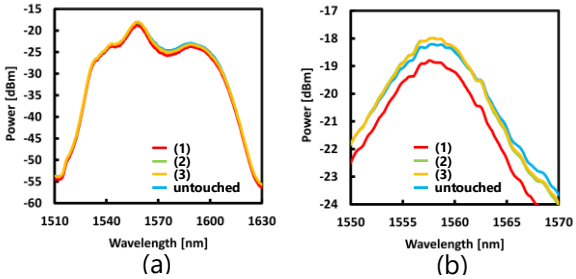


Fig. 3. (a) Wideband optical spectra measured with the tapered POF when the object was not touched and touched at points (1), (2), and (3). (b) Magnified view around 1560 nm.

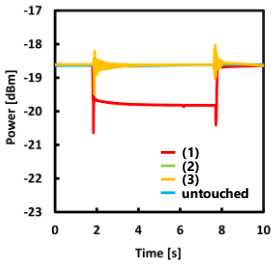


Fig. 4. Temporal power variations at 1560 nm when the object was touched at three points and when it was not touched.

参考文献

[1] A. H. Hartog, *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors* (CRC Press, Boca Raton, 2017).
[2] Y. Koike, et al., *NPG Asia Mater.* **1**, 22 (2009).
[3] K. Noda, et al., *Appl. Phys. Express* **15**, 122005 (2022).
[4] H. Javid, et al., *Appl. Phys. Express* **16**, 112001 (2023).
[5] Y. Mizuno, et al., *IEICE Electron. Express* **14**, 20170962 (2017).
[6] K. Mizuno, et al., *Appl. Phys. Express* **10**, 062502 (2017).

© 2025年 応用物理学会

コア径 20 μm の POF におけるブリルアン利得スペクトルの特性評価

Brillouin gain spectrum characterization in plastic optical fiber with 20-μm core diameter

○白井 振武[1], Andreas Ioannou[2], Kyriacos Kalli[2], 水野 洋輔[1]
[1]横浜国立大学 大学院工学研究院 [2]キプロス工科大学
○Shimbu Shirai[1], Andreas Ioannou[2], Kyriacos Kalli[2], and Yosuke Mizuno[1]
[1]Yokohama National University [2]Cyprus University of Technology
E-mails: shirai-shimbu-nd@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

社会インフラの経年劣化や災害による損傷が問題となっており、建造物の健全性を正確かつ高速に診断する技術の需要が高まっている。そこで、電気センサにはない多くのメリットをもつ光ファイバセンサが注目されている。特に、ブリルアン散乱を用いた光ファイバセンサは、歪や温度の分布情報を計測することができるため、研究開発の進展が著しい。

従来のブリルアンセンサには、主にシリカガラス光ファイバが用いられてきたが、歪への耐性が低く、数%の歪で破断するという問題があった。そこで、ガラス光ファイバよりも高い柔軟性を有し、数 10 %以上の歪にも耐えることができるプラスチック光ファイバ（POF）を用いたブリルアンセンサに注目が集まっている[1]。

POF には多くの種類が存在するが、ブリルアン散乱が観測されている唯一の POF は、アクリルに全フッ素化加工を施して 1550 nm 帯の伝搬損失を低減（約 250 dB/km）した、コア径 50 μm または 120 μm を有する屈折率傾斜型全フッ素化 POF（以下、単に POF と呼称する）である。これらを用いた歪および温度の分布測定も実証されている[1]。

POF におけるブリルアン特性、特にブリルアン利得スペクトル（BGS）のピークパワーは、コア径に依存して大きく変化すると考えられる。これまでに、コア径 50 μm および 120 μm の POF におけるブリルアン特性は解明されているが[2-4]、より小さいコア径を有する POF を用いた調査はなされていない。

そこで本研究では、コア径が 20 μm の POF を用いることで、ストークス光パワーの増強を図り、従来のコア径 50 μm、120 μm の POF と比較を行うことで、コア径の変化によるブリルアン特性への影響を調査した。

2. 実験と考察

POF 中の BGS を観測するための、自己ヘテロダイン検波に基づく実験系を **Fig. 1** に示す。1550 nm のレーザの 3 dBm の出力を 21 dBm まで増幅し、測定ファイバに入射した。測定ファイバには、コア径 20 μm、50 μm、120 μm の 3 種類の POF を用いた。長さは全て 2.3 m であり、補強層の材料はポリカーボネートである。各 BGS は電気スペクトラムアナライザ上で 50 回平均した。

Fig. 2(a)-(c)に、コア径 20 μm、50 μm、120 μm の POF における入射パワー 9、13、17、21 dBm での BGS を示す。コア径が小さくなるにつれ、BGS のピークパワーが増加した。**Fig. 2(a)**における室温・無歪でのブリルアン周波数シフト（BFS）は約 2.80 GHz であり、以前報告された 2.83 GHz よりやや低くなったが、これは室温の違いによるものと考えられる。**Fig. 2(b)(c)**に比べ、各 BGS に重畳しているノイズが小さいのは特筆すべきであり、各 BGS が明瞭に観測できた。**Fig. 2(b)**における BFS は約 2.72 GHz であり、他の POF の BFS [2]よりも 100 MHz 程度低い。これは、コア材料の差異に起因することがわかっている[5]。

Fig. 3 に、コア径 20 μm、50 μm、120 μm の POF における「BGS の高さ」（各スパンにおける最小パワーからピークパワーまでの差[dB]）の入射パワー依存性を示す。コア径が小さくなるにつれ、BGS の高さは増加した。コア径 50 μm の POF と比較して、コア径 20 μm の POF の方が約 2 dB 低い入射パワーで同等の BGS の高さを得られることが確認された。

以上より、コア径 20 μm の POF を用いることで、従来の POF よりも信号対雑音比（SNR）の高い歪・温度測定が可能となることが示された。

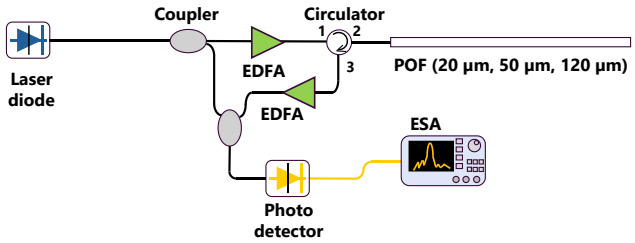


Fig. 1. Experimental setup for observing Brillouin gain spectrum in plastic optical fibers (POFs). EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer.

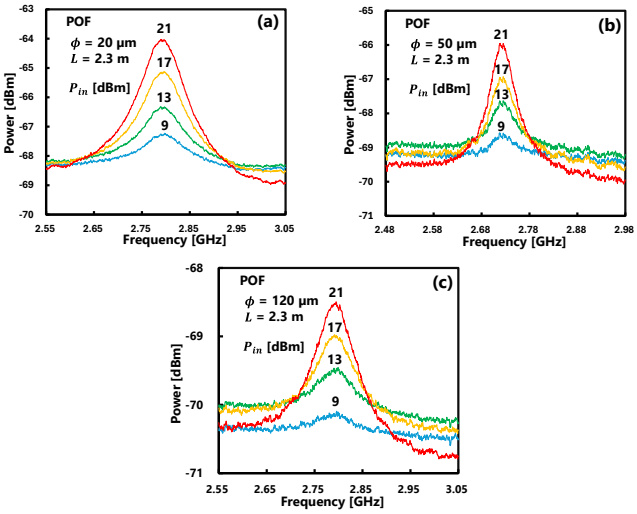


Fig. 2. BGS dependence on incident power P_{in} in POFs with core diameters of **(a)** 20 μm, **(b)** 50 μm, and **(c)** 120 μm.

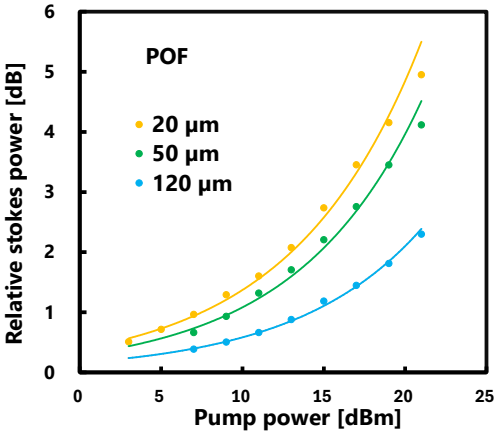


Fig. 3. BGS height plotted as a function of incident power P_{in} in POFs with core diameters of 20 μm, 50 μm, and 120 μm.

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., Photon. Res. **9**, 1719 (2021).
[2] Y. Mizuno, et al, Appl. Phys. Lett. **97**, 021103 (2010).
[3] Y. Mizuno, et al, Opt. Lett. **35**, 3985 (2010).
[4] K. Minakawa, et al, Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 042502 (2014).
[5] S. Shirai, et al, Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 038003 (2025).

© 2025年 応用物理学会

周期的擬似ランダム変調に基づく傾斜利用 BOCDR の特性シミュレーション

Simulation of slope-assisted BOCDR characteristics based on periodic pseudo-random modulation

○森川 拓海[1]、菊地 啓太[1]、井上 諒[1]、水野 洋輔[2]、李 ひよん[1]
[1] 芝浦工業大学 理工学研究科 [2] 横浜国立大学 工学研究院

○Takumi Morikawa[1], Keita Kikuchi[1], Ryo Inoue[1], Yosuke Mizuno[2], and Heeyoung Lee[1]
[1] Shibaura Institute of Technology [2] Yokohama National University
E-mails: af22065@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

光ファイバ中のブリルアン散乱を用いた光ファイバセンサは、散乱光の周波数シフト量(BFS)に基づき、比較的高精度な歪や温度変化の分布測定が可能であるため、インフラ建造物の健全性診断技術として、応用が期待されている[1]。中でも、測定ファイバ(FUT)の片端からの光入射によって動作し、ランダムアクセス性を有する、「ブリルアン光相関領域反射計(BOCDR)」[2,3]が注目を集めている。

標準的な BOCDR では、測定系に入射する光の周波数に正弦波による周波数変調を施すことで位置分解を実現する[2,3]。その際、測定レンジd_mと空間分解能Δzは周波数変調における変調振幅Δfと変調周波数f_mに依存する。ここで、f_mは、d_mとΔzの両者に対し反比例するため、標準的な BOCDR において、d_mとΔzはトレードオフの関係にある。しかし、最近、周期的な擬似ランダム波形を変調波形として用いることで、両者のトレードオフ関係を、大幅に緩和できることが報告されている[4]。これは、この手法において、Δzがf_mに依存せず、変調光の占有スペクトル帯域幅により決まるためである。

また、BOCDR では、ブリルアン利得スペクトル(BGS)の観測に、電気スペクトラムアナライザ(ESA)を用いる。しかし、ESA の周波数掃引は比較的低速であるため、高速動作を阻んでいた。そこで、提案されたのが「傾斜利用(SA-)BOCDR」[5]である。この手法では、BGS の傾斜部分における特定周波数のパワーを ESA のゼロスパン機能を用いて取得し、BFS と一対一対応させる。ESA の周波数掃引を使用しないため、リアルタイム動作が可能となる。これまで多くの SA-BOCDR に関する研究[5,6]が行われてきたが、周期的擬似ランダム変調に基づく SA-BOCDR は実証されていない。

そこで本研究では、正弦波変調と周期的擬似ランダム変調、両者に基づく SA-BOCDR のシミュレーションを行い、比較することで、周期的擬似ランダム変調 SA-BOCDR の有効性を検証する。

2. シミュレーション条件

シミュレーションは、[7]に示された方法に従い行った。FUT の構成を **Fig. 1** に示す。FUT 全長は 100 m とし、20、50、80 m 地点の 2.0 m 区間に 0.05%の歪を印加した。いずれの変調波形においても、変調周波数は 400 kHz とし、変調された入射光のスペクトル幅は 4 GHz とした。また、周期的擬似ランダム変調において、変調波形の 1 周期におけるノイズ点数は 500 点とした。測定レンジは、変調波形によらず、約 255 m であり、理論空間分解能はそれぞれ、正弦波変調で約 1.2 m、周期的擬似ランダム変調で約 0.25 m となる。歪印加や温度変化がない平常時の BFS を 10.800 GHz に設定し、10.795 GHz におけるパワー分布を、SA-BOCDR の結果として出力させた。

3. シミュレーション結果･考察

シミュレーションによって得られた、正弦波変調と周期的擬似ランダム変調における BGS 分布と、10.795 GHz におけるパワー分布を、それぞれ **Fig. 2** と **Fig. 3** に示す。まず、**Fig. 2**(b)と **Fig. 3**(b)の FUT 全長に対する SA-BOCDR の出力結果を比較する。正弦波変調の場合、FUT の中央付近では、歪印加がない場合のパワーは一定になっているのに対し、FUT の両端では、変化が生じていることが確認できる。一方、周期的擬似ランダム変調の場合、離散的な変化はあるものの、FUT 全長にわたり、パワーは一定となっている。これまで、SA-BOCDR では FUT に何も歪や温度変化が生じていない場合との差分を取ることで、FUT 両端におけるパワー変化を無視していたが、この手法は、歪や温度変化が分からない FUT を測定する場合適用が困難となる。周期的擬似ランダム変調では、この問題を解決できる可能性があるといえる。

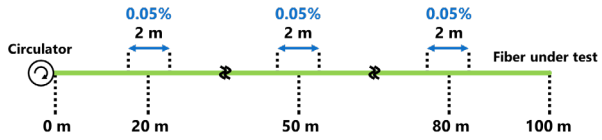


Fig. 1. Structure of fiber under test.

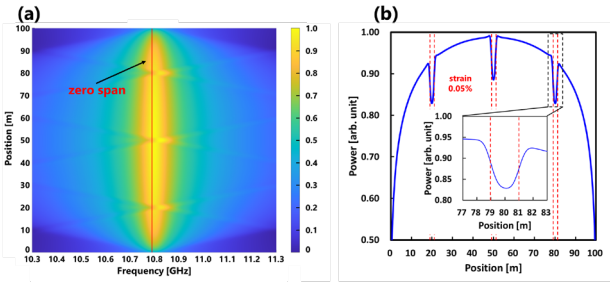


Fig. 2. Measured distributions of (a) BGS and (b) power at 10.795 GHz with sinusoidal modulation.

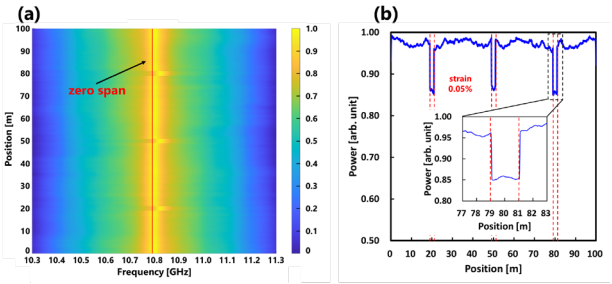


Fig. 3. Measured distributions of (a) BGS and (b) power at 10.795 GHz with periodic pseudo-random modulation.

また、**Fig. 2**(b)と **Fig. 3**(b)の 77–83 m 付近の拡大図を比較すると、正弦波変調に比べ、周期的擬似ランダム変調では、歪区間とパワー変化区間が正確に一致していることが確認できる。周期的擬似ランダム変調では、歪や温度変化の位置をより正確に把握することができる可能性がある。

4. まとめ･今後の予定

本研究では、シミュレーションによって、周期的擬似ランダム変調 SA-BOCDR の有効性を、正弦波変調との比較を行うことで検証した。正弦波変調に比べ、周期的擬似ランダム変調では、従来のように、歪印加がない場合の結果との差分を取る必要が無く、さらに、より正確に歪区間を測定できる可能性があることを示した。今後、実験によって、周期的擬似ランダム変調 SA-BOCDR の有効性を実証する。歪ダイナミックレンジや超理論空間分解能効果[6]についても検証を行う。

参考文献

[1] A. H. Hartog, *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors* (CRC Press, Boca Raton, 2017).
[2] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
[3] Y. Mizuno, et al., J. Lightwave Technol. **28**, 3300 (2010).
[4] K. Otsubo, et al., J. Lightwave Technol. **42**, 6233 (2024).
[5] H. Lee, et al., IEEE Photon. J. **8**, 6802807 (2016).
[6] H. Lee, et al., Opt. Express **24**, 29190 (2016).
[7] G. Zhu, et al., Appl. Phys. Express **14**, 052006 (2021).

© 2025年 応用物理学会

周期的擬似ランダム変調 BOCDR における PMF を用いた SNR の向上

SNR improvement in periodic pseudo-random modulation BOCDR using PMF

○塩﨑 智弘[1]、菊地 啓太[2]、野田 康平[3]、益子 友裕[4]、趙 越[4]、長田 遼介[4]、町島 祐一[4]、李 ひよん[2]、水野 洋輔[1]
[1]横浜国立大学 工学研究院　[2]芝浦工業大学 理工学研究科　[3]東京大学 工学系研究科　[4]レーザック
○Tomohiro Shiozaki[1], Keita Kikuchi[2], Kohei Noda[3], Tomohiro Masuko[4],
Yue Zhao[4], Ryosuke Nagata[4], Yuichi Machijima[4], Heeyoung Lee[2], and Yosuke Mizuno[1]
[1]Yokohama National University　[2]Shibaura Institute of Technology　[3]The University of Tokyo　[4]LAZOC, Inc.
E-mails: shiozaki-tomohiro-sf@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

スマートストラクチャの実現を目指し、長距離測定に適しており、軽量・細径で落雷や電磁ノイズの影響を受けず、センサ部に電源が必要ないなどの利点を有する光ファイバを用いた分布型の歪・温度センサに注目が集まっている。我々は、自然ブリルアン散乱の周波数シフトが歪や温度に依存する性質を用いた分布型センサ「ブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）」[1,2] の性能向上を推進している。

標準的な BOCDR は、測定レンジと空間分解能がトレードオフの関係にある。この問題を緩和する手法の一つとして、周期的擬似ランダム変調（PPRM）方式に基づく BOCDR が知られている[3]。これまでに、数 100 m の測定レンジと cm オーダの空間分解能の両立が報告されている。従来の PPRM-BOCDR では、測定ファイバ（FUT）としてシリカ単一モードファイバ（SMF）が用いられ、偏波状態はスクランブリングされていた。一方、FUT として偏波維持ファイバ（PMF）を用い、偏波状態を最適化することで信号対雑音比（SNR）を向上できることが、傾斜利用 BOCDR の場合に示されている[4]。PPRM-BOCDR においても PMF を用いることで SNR が向上する可能性があるが、これまでに実験的報告はなかった。

そこで本研究では、PPRM-BOCDR において、PMF を FUT として用い、偏波状態を最適化することで、SNR を向上できることを実証した。

2. 原理と実験系

今回用いた PPRM-BOCDR の実験系を **Fig. 1** に示す。光源は狭線幅半導体レーザであり、ファンクションジェネレータ（FG）による駆動電流の変調を通じ、出力周波数に周期的な擬似ランダム変調を施す。変調周期に対応した間隔で、複数の相関ピーク（測定点として機能）が立ち並ぶが、FUT 中にはただ 1 つの相関ピークが存在するように変調条件を調整する。変調周期を制御することで相関ピークを FUT に沿って掃引し、ブリルアン利得スペクトル（BGS）およびブリルアン周波数シフト（BFS）の分布測定を実現する。理論空間分解能は、変調された光源が占めるスペクトル帯域幅に反比例する。

FUT として、3 m の PMF（フジクラ製、PANDA 型）を用いた。参照光路に挿入した偏波コントローラと偏波スクランブラにより、3 つの偏波状態（SOP）: (a)最適化（BGS 最大化）、(b)スクランブル、(c)反最適化（BGS 最小化）、の下で分布測定結果を比較した。詳細な実験条件は紙面の都合で省略するが、1550 nm を用い、FUT への入射パワーは 23.0 dBm、各測定点での BGS の平均回数は 20 回とした。

3. 実験結果

まず、相関ピークを FUT の中心付近に生成し、理論空間分解能を 3.2 cm に設定したときの BGS（ノイズフロアで正規化）を各 SOP で比較した結果を **Fig. 2** に示す。BFS は 10.77 GHz 程度であった。SOP によって BGS の SNR が大きく異なることが確認できた。標準的なシリカ SMF を用いた PPRM-BOCDR では(b)程度のパワーが全長に渡って取得される（偏波スクランブリングを OFF にすると、(a)から(c)程度まで変動する）が、PMF を用いて SOP を最適化すると、(a)程度のパワーが全長に渡って取得できるため、分布測定の SNR が向上する。以下、これを確認する実験を行った。

各 SOP において、BGS 分布を測定した結果を **Fig. 3(a)–(c)**に示す。BGS のパワーを表すカラースケールは全て共通である。PMF を用いて SOP を最適化した(a)では、SOP をスクランブリングした(b)よりも、全長に渡って高いパワーの BGS が得られており、分布測定の SNR の向上が確認できた。

なお、PPRM-BOCDR に基づき、複数の PMF を螺旋状に埋め込んだ線状構造体の形状センシングも試行した。各 PMF に沿った歪分布を正確に計測することで、構造物の変形を推定する技術である。当日は、この試行結果についてもあわせて報告する。

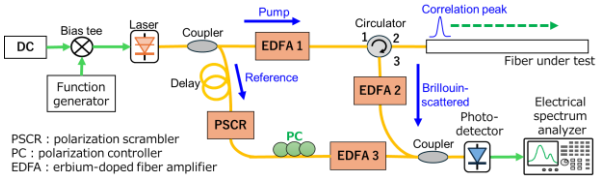


Fig. 1. Experimental setup of PPRM-BOCDR.

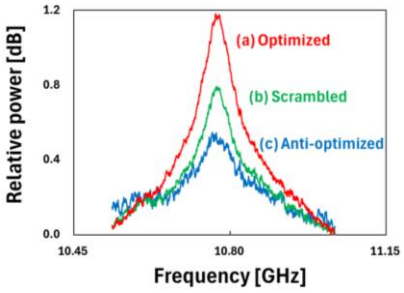


Fig. 2. BGSs measured at three different SOPs: (a) optimized, (b) scrambled, and (c) anti-optimized.

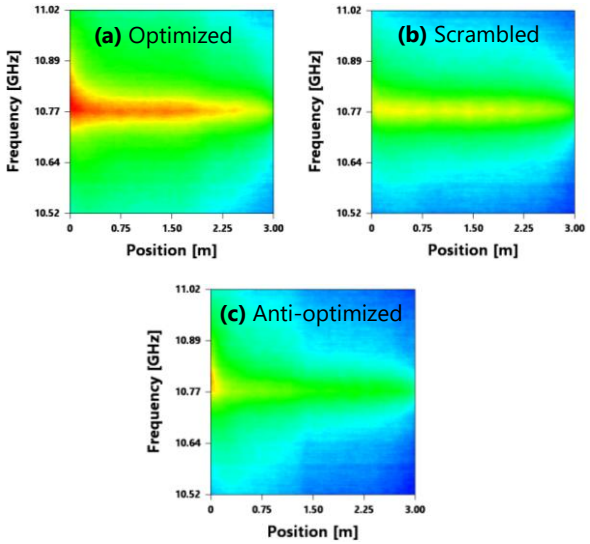


Fig. 3. BGS distributions along the PMF measured at three different SOPs: (a) optimized, (b) scrambled, and (c) anti-optimized. Color scale range: -61.7 to -63.5 dBm.

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
[2] Y. Mizuno, et al., J. Lightwave Technol. **28**, 3300 (2010).
[3] K. Otsubo, et al., J. Lightwave Technol. **42**, 6233 (2024).
[4] H. Lee, et al., OSA Continuum **2**, 874 (2019).

© 2025年 応用物理学会

シリカ系 HNLF を用いた BOCDR による歪・温度分布測定

Distributed strain and temperature sensing using BOCDR with silica-based HNLF

○柴崎 諒[1]、井上 諒[1]、菊地 啓太[1]、水野 洋輔[2]、李 ひよん[1]
[1]芝浦工業大学 大学院理工学研究科 [2]横浜国立大学 大学院工学研究院

○Ryo Shibazaki[1], Ryo Inoue[1], Keita Kikuchi[1], Yosuke Mizuno[2], and Heeyoung Lee[1]
[1]Shibaura Institute of Technology [2]Yokohama National University
Emails: af22035@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

近年、光ファイバを用いたセンシング技術の研究開発が急速に進んでいる。特に光ファイバ中で生じるブリルアン散乱を用いた歪・温度センサは、周波数情報に基づいて比較的高精度に歪・温度の分布を測定できるため、構造物の健全性診断への応用が期待されている。これまでに、自然ブリルアン散乱を用いた「ブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）」など、種々のブリルアンセンサが提案されている[1]。

BOCDR は測定ファイバの片端への光入射で動作し、mm オーダの空間分解能、ランダムアクセス性、低廉性を兼ね備える唯一の技術である。BOCDR では、光波コヒーレンス関数の合成法[2]に基づき、周波数変調された信号光と参照光を干渉させることで、測定ファイバ（FUT）中に「相関ピーク」と呼ばれる測定位置を生成する。その後、相関ピークを測定ファイバに沿って掃引することで、測定ファイバの各位置におけるブリルアン利得スペクトル（BGS）の分布を取得する。その後、歪や温度の情報に読み替え可能なブリルアン周波数シフト（BFS）の分布を抽出する。

BGS のパワーが最大となるときの周波数である BFS は、入射光の周波数に比べ低周波側にシフトする。BFS はファイバに印加される歪や温度変化に対しおおよそ線形に変化する。また、ファイバを構成する材料や構造などによって BFS とその歪依存係数と温度依存係数が異なる。

シリカ系高非線形ファイバ（HNLF）の歪・温度依存係数はヘテロダイン検波に基づき、それぞれ約 250 MHz、約 680 MHz と報告されている。これは FUT 全長に対する測定であり、分布測定は検証されていない。

そこで本研究では、シリカ系 HNLF を FUT として使用し、BOCDR の動作を検証する。歪と温度の分布測定を試行する。

2. 実験系

コア径約 3.5 μm、長さ 4.7 m のシリカ系 HNLF（SNF-09-007, フジクラ製）を FUT 用いた。BOCDR の実験系を **Fig. 1** に示す。レーザから出力される光を、ポンプ光と参照光に分岐する。ポンプ光はサーキュレータを介して HNLF に入射し、HNLF から戻ってくるブリルアン散乱光（ストークス光）と参照光を干渉させる。その光干渉信号を光検出器（PD）で電気信号に変換し、電気スペクトラムアナライザ（ESA）によって BGS として観測する。そのパワーが最大となる周波数が BFS である。実験では波長 1550 nm のレーザ光を入射し、EDFA 1, 2, 3 によってそれぞれ 24.0 dBm, 4.8 dBm, 3.9 dBm に増幅した。レーザの変調振幅を約 1 GHz とし、変調周波数を 6.40–7.15 MHz の範囲で掃引した。また、ここから算出される測定レンジと空間分解能はそれぞれ 15.9 m, 30.4 cm である。

まず、室温 22.8℃下での歪分布測定を行った。サーキュレータと FUT の接続部から 2.0 m 離れた地点から長さ 1 m の区間に 0.2%の歪を印加した。区間の両端を固定ステージとマイクロメータ付き可動ステージにテープで固定し、可動ステージの位置を調整して歪を印加し、分布測定を行った。

次に、温度分布測定を行った。加熱区間は歪分布測定時と同様に、FUT をホットプレートにテープで貼り付け、アルミホイルで上から覆い、90 ℃に加熱した状態で分布測定を行った。

3. 実験結果

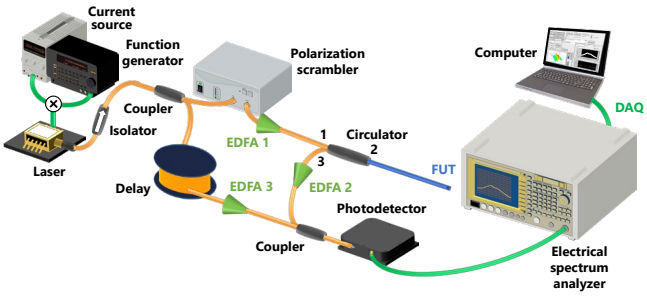


Fig. 1. Experimental setup. EDFA: erbium-doped fiber amplifier, FUT: fiber under test, DAQ: data acquisition.

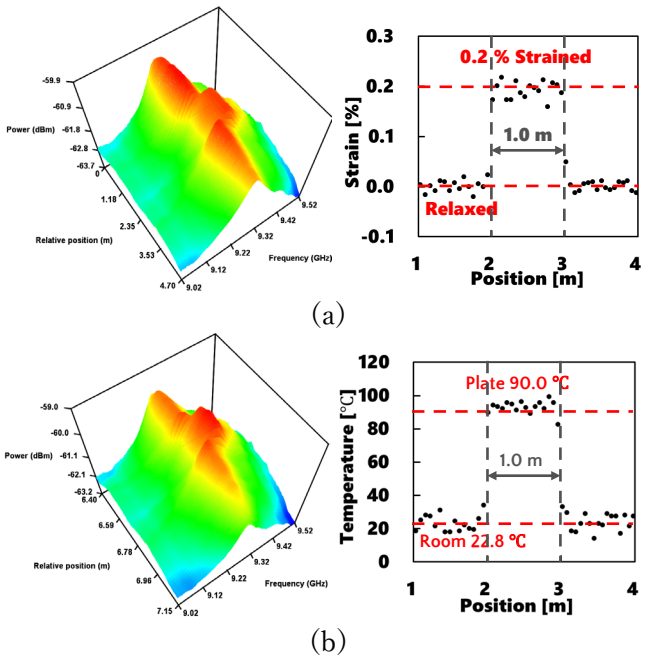


Fig. 2. Distributions of BGS (left) and BFS along the HNLF measured when a 1-m-long section was (a) strained or (b) heated.

BGS および BFS の歪分布測定結果を **Fig. 2(a)**に、温度分布測定結果を **Fig. 2(b)**に、それぞれ示す。赤い破線は歪印加前後、加熱前後を表している。黒いデータ点は算出された歪の値または温度の値を表している。HNLF の BFS は室温・無歪のとき約 9.27 GHz である。2–3 m の区間で、FUT に印加された歪、加熱の区間がそれぞれ検出されている。また、約 0.2 %の歪に相当する約 50 MHz 程度の BFS の増加, 室温から 90℃の温度変化に相当する約 46 MHz 程度の BFS の増加が観測されており、歪・温度分布を正しく計測できていることが確認できた。

シリカ系 HNLF 中の BFS は歪と温度の両方に比較的依存しにくいという性質は、BFS をシフトさせうる他の物理量の安定なセンシングやシリカファイバを併用した温度と歪の分離計測への応用が期待される。

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
[2] K. Hotate, et al., *J. Lightw. Technol.* **24**, 2541 (2006).

© 2025年 応用物理学会

周期的擬似ランダム変調に基づくデュアルレーザ LC-BOCDR の提案

Dual-laser low-coherence BOCDR based on periodic pseudo-random modulation

○大畠 瑠己[1]、元田 圭佑[1]、石丸 貴大[2]、高橋 央[2]、戸毛 邦弘[2]、水野 洋輔[1]
[1]横浜国立大学 大学院工学研究院　[2]NTT アクセスサービスシステム研究所
○Ryuki Ohata[1], Keisuke Motoda[1], Takahiro Ishimaru[2], Hiroshi Takahashi[2], Kunihiro Toge[2], and Yosuke Mizuno[1]
[1] Faculty of Engineering, Yokohama National University　[2] NTT Access Network Service Systems Laboratories
E-mails: ohata-ryuki-nc@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

社会インフラの経年劣化や損傷などを診断する技術として分布型光ファイバセンサが注目されている。特に、ブリルアン利得スペクトル（BGS）の周波数シフトに基づく「ブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）」は、測定ファイバ（FUT）の片端への光入射で動作し、高い空間分解能で歪や温度の分布測定が可能であるため、精力的に研究が推進されている[1]。

標準的な BOCDR では、正弦波周波数変調を施したレーザ光を 2 つに分け、一方は FUT に入射し、FUT から返ってくる散乱光をもう一方（参照光）と干渉させる。そして、2 光のヘテロダイン検波を通じて、電気スペクトルアナライザ（ESA）で BGS を観測する。しかし、高い周波数領域に対応している ESA や遅延線が必要になる上、分布測定時に測定位置によって空間分解能が変化するといった課題があった。

これらの問題を解決すべく提案された手法がデュアルレーザ BOCDR である[2]。これは、入射光と参照光に 2 つのレーザを用いる方式である。温度調節器（TEC）により、2 つのレーザ出力の中心周波数に差を設け、ビート信号の BGS を低い周波数帯へシフトさせて観測できる。しかし、デュアルレーザ BOCDR は、通常の BOCDR と同様、測定レンジと空間分解能の間にトレードオフの関係がある。

通常の BOCDR におけるこの問題を解決する手法として、周期的擬似ランダム変調に基づく低コヒーレンス（LC-）BOCDR が提案されている [3]。空間分解能は、変調されたレーザ光が占める帯域幅により決まり、正弦波変調の場合と比較して高い空間分解能を得ることができる。

そこで本研究では、周期的擬似ランダム変調に基づくデュアルレーザ LC-BOCDR を提案する。また、本手法により、11 m のシリカファイバを用いて歪分布測定の実証を行った。

2. 原理

BOCDR の性能を示す指標として、測定レンジd_mと空間分解能Δzがある[1,3]。周期的擬似ランダム変調に基づく LC-BOCDR における測定レンジd_mは、相関ピークの間隔で定義され、次式で与えられる。

$$d_m = \frac{c}{2\,n\,f_m} \tag{1}$$

ここで、cは真空中の光速、nはファイバコアの実効屈折率、f_mは変調周期の逆数（変調周波数）である。また、空間分解能Δzは最小の測定可能区間の長さであり、LC-BOCDR においては、次式で与えられる。

$$\Delta z = \frac{2\,c\ln 2}{\pi\,n\,\Delta\nu} \tag{2}$$

ここで、$\Delta\nu$は変調後のレーザ光が占める帯域幅である。(1)、(2)式より、それぞれの指標を決定づけるパラメータが異なっているため、測定レンジと空間分解能のトレードオフの関係が大幅に緩和される。

3. 実験

提案法を実証するために、約 11 m の FUT の 30 cm の区間に歪を印加し、歪分布測定を行った。**Fig. 1** に周期的擬似ランダム変調に基づく LC-BOCDR の実験系を示す。また、FUT の構成を **Fig. 2** に示す。FUT の先端付近に曲げ損失を印加することで、フレネル反射を抑制した。変調周波数f_mは 1 MHz、LD1、LD2 の温度はそれぞれ 25.17℃と 25.32℃、変調後のレーザ光が占める帯域幅$\Delta\nu$は両方とも 1.0 GHz であり、中心周波数差は 2.56 GHz とした。FG の変調波形の位相差を−118°から−158°まで掃引した。1 つの測定点あたりの平均回数は 20 回、FUT の測定点数は 101 点とした。また、測定レンジd_mは 104 m、理論空間分解能Δzは約 9 cm であった。

FUT 全長に沿ったブリルアン周波数シフト（BFS）と BGS の分布の測定結果を **Fig. 3** に示す。横軸はサーキュレータに一番近い APC コネクタからの距離を表している。BFS のシフトは、FUT に印加した歪の区間に対応する位置に現れた。FUT の

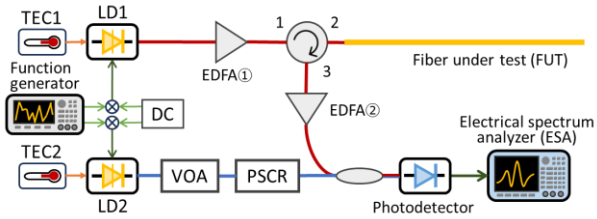


Fig. 1. Experimental setup of dual-laser LC-BOCDR based on periodic pseudo-random modulation. EDFA: erbium-doped fiber amplifier, LD: laser diode, PSCR: polarization scrambler, TEC: thermoelectric cooler, VOA: variable optical attenuator.

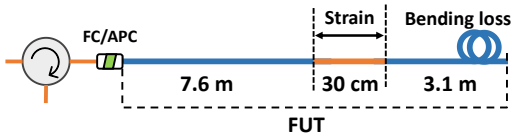


Fig. 2. Structure of the FUT.

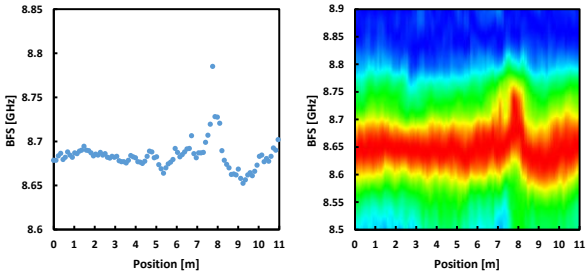


Fig. 3. Measured distributions of (a) BFS and (b) BGS over the full length of the FUT.

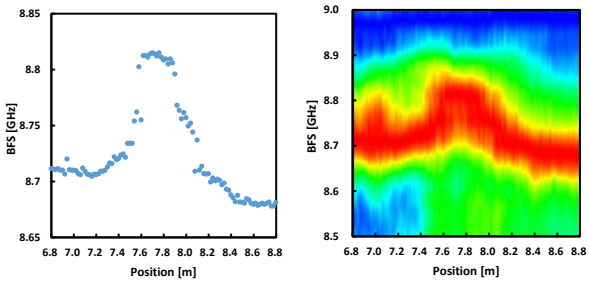


Fig. 4. Measured distributions of (a) BFS and (b) BGS around the strained section.

6.8~8.8 m の区間の BFS と BGS 分布を改めて細かく測定した結果を **Fig. 4** に示す。7.6 -7.9 m の 30 cm の区間で BFS がシフトしており、これは実際の歪印加区間に一致している。以上より、周期的擬似ランダム変調に基づくデュアルレーザ LC-BOCDR による歪分布測定を実証した。

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
[2] G. Zhu, et al., J. Phys. Photonics **7**, 025030 (2025).
[3] K. Otsubo, et al., J. Lightwave Technol. **42**, 6233 (2024).

© 2025年 応用物理学会

凸性抽出法に基づく BOCDR の性能向上

Performance enhancement in BOCDR using convexity extraction algorithm

○小坂 悠馬[1]、井上 諒[1]、最上 亮[1]、菊地 啓太[1]、水野 洋輔[2]、李 ひよん[1]
[1]芝浦工業大学 大学院理工学研究科 [2]横浜国立大学 大学院工学研究院

○Yuma Kosaka[1], Ryo Inoue[1], Ryo Mogami[1], Keita Kikuchi[1], Yosuke Mizuno[2], and Heeyoung Lee[1]
[1]Shibaura Institute of Technology [2]Yokohama National University
Emails: af22015@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

光ファイバ中で生じるブリルアン散乱を用いた歪・温度センサは、周波数情報に基づいて比較的高精度に歪・温度の分布を測定できるため、構造物の健全性診断への応用が期待されている。これまでに、自然ブリルアン散乱を用いたブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）や誘導ブリルアン散乱を用いた同解析法（BOCDA）など、種々の方式が提案されている[1]。

BOCDR は測定ファイバ（FUT）の片端への光入射で動作し、mm オーダの空間分解能、ランダムアクセス性、低廉性を兼ね備えた唯一の技術である。しかし、自然ブリルアン散乱を用いるため信号対雑音比（SNR）が比較的低く、高空間分解能での測定は背景雑音の影響を受けやすくなる。また、測定レンジと空間分解能の間にはトレードオフの関係があり、これを解決するために時間ゲート法や二重変調法などが提案されている。これらの手法は、データ処理を活用することでさらなる性能向上が見込まれる

BOCDA は誘導ブリルアン散乱によって高い SNR が実現されており、これまでに、取得したブリルアン利得スペクトル（BGS）を 2 階微分し、信号の凸性抽出を行うことで性能向上が実証されている[2]。凸性抽出法は BOCDR にも適用可能であると考えられ、測定精度、歪ダイナミックレンジ、および空間分解能が向上できる可能性があるが、これまでに報告はない。

そこで本研究では、BOCDR に対しても BGS の凸性抽出法を適用し、各種性能向上の可能性について実験的に検証する。

2. 原理

BOCDR では、光波コヒーレンス関数の合成法[3]に基づき、周波数変調された信号光と参照光を干渉させることで、FUT 中に「相関ピーク」を形成し、この位置が測定点として機能する。その後、相関ピークを FUT に沿って掃引することで、各位置における BGS の分布を取得する。それからブリルアン周波数シフト（BFS）の分布を取得し、歪や温度の情報に読み替える。観測される BGS は相関ピークから戻ってくる鋭い信号と、それ以外の位置から戻ってくる台形状の背景雑音の 2 つの成分の重ね合わせにより構成される。背景雑音が信号成分よりも高パワーとなる条件においては、従来法では正確な BFS の検出が困難になる。この問題を解決するために、凸性抽出手法を適用する。鋭い信号成分は高い凸性を示すのに対し、ノイズ成分の凸性は低いため、形状の特性に基づいて両者を区別することができる。

3. 実験結果

BOCDR の実験系を **Fig. 1** に示す。波長 1550 nm のレーザに正弦波変調を施した。まずダイナミックレンジの評価を行った。変調周波数と変調振幅をそれぞれ 847.6 kHz と約 0.5 GHz に設定した。これは、約 121 m の測定レンジと約 2.25 m の理論空間分解能に相当する。エルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）の出力は、それぞれ 20 dBm、24 dBm、4.5 dBm、4.1 dBm に設定した。FUT には長さ 5 m の単一モードファイバ（SMF）を使用し、室温を 23.4℃に維持しながら 3.55–4.00 m の 0.45 m の区間を 40–120℃まで加熱した。測定された BGS を **Fig. 2(a)**に示す。温度が上昇するとブリルアン散乱のピークは高周波側にシフトしたが、信号が背景雑音を下回り正確な BFS は検出困難となった。**Fig. 2(b)**は凸性抽出手法を適用した結果である。背景雑音が抑制され、温度による周波数シフトが明確に検出され、ダイナミックレンジの向上が確認できた。

次に、理論空間分解能よりも短い異常区間の検出を検証するため、長距離の FUT を用いた。変調周波数と変調振幅はそれぞれ 524–531 kHz と約 1.03 GHz に設定し、測定レンジは約 194 m、理論空間分解能は約 1.8 m とした。EDFA の出力は先の実験

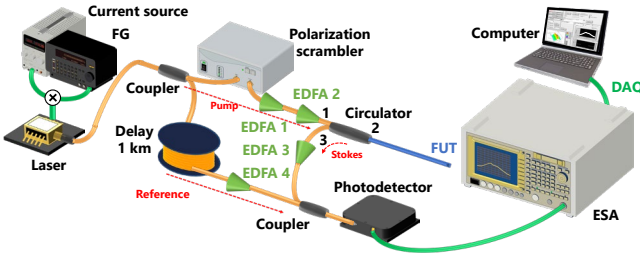


Fig. 1. Experimental setup. FG: function generator, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, FUT: fiber under test, ESA: electrical spectrum analyzer, DAQ: data acquisition.

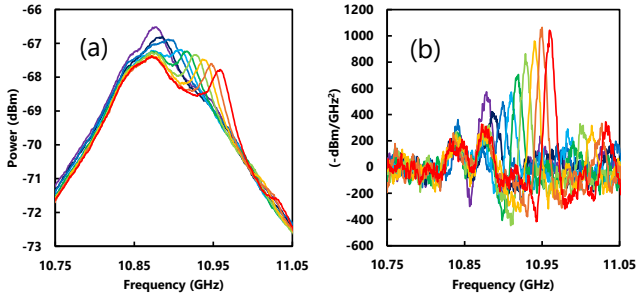


Fig. 2. (a) Measured BGS and (b) its convexity when different temperature changes are applied to the FUT.

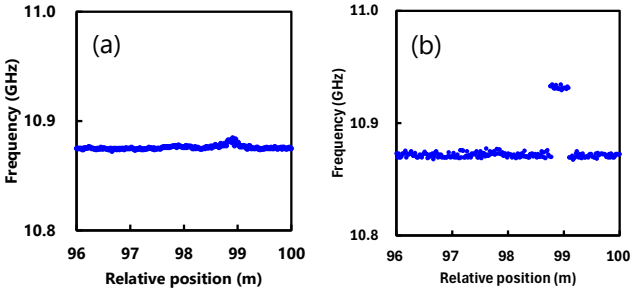


Fig. 3. BFS distributions measured (a) without and (b) with the convexity extraction algorithm.

と同様に設定した。FUT には全長 100 m の SMF を使用し、室温を 23.2℃に維持しながら 98.55–99.00 m の 0.45 m の区間を 80℃に加熱した。測定した BFS 分布を **Fig. 3(a)**に示す。加熱された部分の低い空間分解能と背景雑音により、従来手法ではブリルアン散乱信号を正確に検出できなかった。しかし、**Fig. 3(b)**に示すように凸性抽出手法の適用後、加熱による周波数シフトを検出することに成功した。この結果は、本手法により理論的な空間分解能よりも短い異常区間を検出でき、ハードウェアを一切変更することなく BOCDR の実質的な分解能を向上させることが可能であることを示している。

以上より、凸性抽出法が BOCDR にも適用可能であり、ダイナミックレンジや空間分解能を向上できる可能性があることを実証した。

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
[2] B. Wang, et al., *IEEE Access* **7**, 32128 (2019).
[3] K. Hotate, et al., *J. Lightw. Technol.* **24**, 2541 (2006).

© 2025年 応用物理学会

正弦波変調によって散乱スペクトルを取得する高速 BOCDR の提案

High-speed BOCDR using sinusoidal modulation for Brillouin gain spectrum acquisition

○杉山 侑希[1], 元田 圭佑[1], 越智 星河[1], 野田 康平[2], 水野 洋輔[1]
[1]横浜国立大学 大学院工学研究院 [2]東京大学 大学院工学系研究科
○Yuki Sugiyama[1], Keisuke Motoda[1], Seiga Ochi[1], Kohei Noda[2], and Yosuke Mizuno[1]
[1]Yokohama National University [2]The University of Tokyo
Emails: sugiyama-yuki-xm@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

社会インフラの経年劣化や自然災害による損傷が社会的な問題となっている。これらの損傷を測定する手段として、光ファイバセンサが注目されている。測定手法の一つに、測定ファイバ（FUT）のブリルアン周波数シフト（BFS）に基づく「ブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）」[1]が知られている。

一般に、BOCDR の動作速度は、電気スペクトラムアナライザ（ESA）の周波数掃引速度によって制限される。一方、これまでに、電圧制御発振器（VCO）を用いて、本来周波数領域であるブリルアン利得スペクトル（BGS）を時間領域に変換して高速に取得する手法が実現されている。この高速 BOCDR では、1 つの測定点における歪のサンプリングレートとして 100 kHz が達成されている[2]。

従来の高速 BOCDR では、VCO の掃引波形として鋸波が用いられてきた[2]。しかし、鋸波には高周波成分が多く含まれているため、高速動作では、その一部がファンクションジェネレータの対応周波数を超えてしまい波形が歪むという問題があった。

そこで本研究では、VCO の掃引波形として高周波成分を含まない正弦波を用いた高速 BOCDR を提案し、基本動作を実証する。

2. 原理

VCO の掃引波形を正弦波にした場合の高速 BOCDR の動作原理を **Fig. 1** に示す。紙面の都合で、詳細は省略する。正弦波では、繰り返し波形の上りと下りの部分があるため、ゼロスパン周波数と VCO に送る正弦波信号の初期位相を適切な値にすることで、BGS が対称に 2 つ分再生される。これを折り返して平均することで BGS や BFS を取得できる。

3. 実験

用いた実験系を **Fig. 2** に、FUT の構成を **Fig. 3** に示す。FUT には、長さ 5.0 m の標準的なシリカ単一モード光ファイバ（SMF）2 本を APC コネクタで接続したものを用いた。先端には曲げ損失を印加し、フレネル反射を抑制した。サーキュレータから 7.0-7.5 m 離れた 0.5 m の区間に 0.3%の歪を印加した。変調振幅は 1.2 GHz、変調周波数は 4162.5 から 4205.1 kHz までを 100 ms で掃引した。ESA で 20 回平均処理を行い、BFS 分布を測定した。このときの理論空間分解能は 0.2 m、測定レンジは約 24 m であった。ゼロスパン周波数は 3.42 GHz、VCO に送る信号の初期位相は-75°とした。

得られた BFS 分布を **Fig. 4** に示す。7.0-7.5 m の区間で BFS が高周波側にシフトしている。シフト量は+150 MHz 程度であり、SMF に印加した 0.3%の歪と良い一致を示している。

以上より、BGS 取得のための VCO に印加する掃引波形を鋸波から正弦波に変更した場合にも、高速 BOCDR が正しく動作することを示した。今後は、従来の方法と比較して、本手法の具体的な利点を実証していきたい。

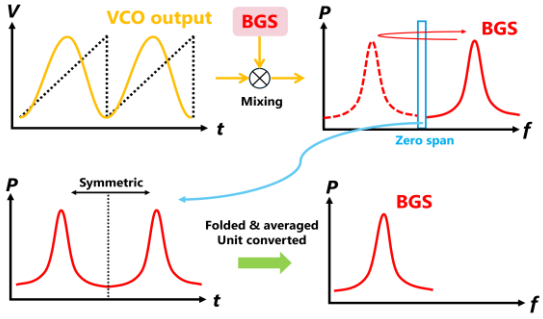


Fig. 1. Principle of BGS acquisition using sinusoidal modulation.

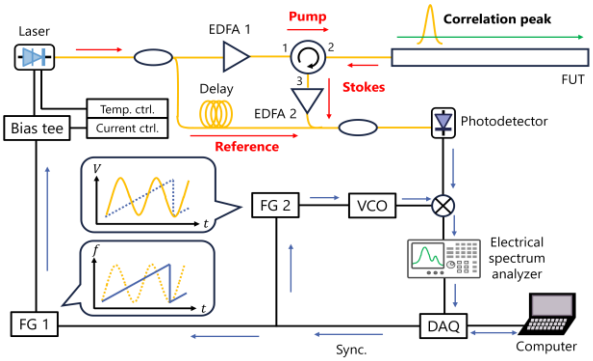


Fig. 2. Experimental setup of the proposed high-speed BOCDR. DAQ: data acquisition, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, FG: function generator, VCO: voltage-controlled oscillator.

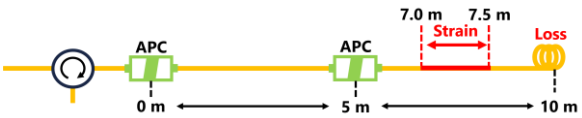


Fig. 3. Schematic structure of the FUT.

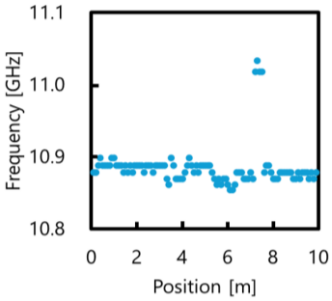


Fig. 4. Measured BFS distribution.

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
[2] Y. Mizuno, et al., Light: Sci. Appl. **5**, e16184 (2016).

© 2025年 応用物理学会

モード間干渉センサにおける測定ファイバ巻き半径が温度応答に及ぼす影響の検討
Investigation of sensing-fiber coiling-radius effects on temperature response in modal interference sensors

○田中 伸輔[1]、菊地 啓太[1]、鶴谷 柊人[1]、水野 洋輔[2]、李 ひよん[1]
[1] 芝浦工業大学 大学院理工学研究科　[2] 横浜国立大学 大学院工学研究院
○Shinsuke Tanaka[1], Keita Kikuchi[1], Shuto Tsurugai[1], Yosuke Mizuno[2], and Heeyoung Lee[1]
[1]Shibaura Institute of Technology　[2]Yokohama National University

1. はじめに

近年、光ファイバを用いた歪・温度センサの研究が活発に行われている。中でも、構成が単純で低コストという利点をもつ手法として、光ファイバ中のモード間干渉を利用したセンサが注目を集めている。このモード間干渉を効果的に観測する手法として、1 本の多モードファイバ（MMF）を 2 本の単一モードファイバ（SMF）で挟み込む「SMS 構造（SMF–MMF–SMF 構造）」が広く用いられている［1–5］。

SMS 構造では、入射光が MMF 中で複数の伝搬モードに分配され、それらのモードが再び SMF 内で干渉することで、透過光のスペクトルに特異な干渉パターンが現れる。この干渉パターンは、MMF に加えられる歪や温度変化によってシフトするため、そのシフト量を測定することで歪や温度を高感度に推定することが可能である。

この構造を初めて提案した Liu ら［1］は、長さ 1.8 m の屈折率傾斜型（GI）シリカ MMF を用い、1550 nm 帯において−18.6 pm/με の歪感度および+58.5 pm/°C の温度感度を報告した。また、Tripathi ら［2］は、温度感度の大きさと符号が MMF の構造や材料特性に強く依存することを示した。これを踏まえ、Huang ら［3］は標準的なアクリル製プラスチック光ファイバ（POF）を導入し、1570 nm 帯で +93.1 pm/°C の温度感度を実現している。さらに、Numata ら［4］は、コア径 62.5 μm、長さ 1.0 m の全フッ素化 GI 型 POF を用いて、1300 nm 帯において−112 pm/με の歪感度および 49.8 nm/°C という極めて高い温度感度を得たほか、中空コアファイバや四角コアファイバ［5］でも高感度化が報告されている。

しかし、多様な MMF が検討されてきた一方で，測定ファイバの巻き半径が温度応答へ及ぼす影響は十分に調査されていない。敷設自由度の向上を考えると，巻き取り配置を許容できるセンサが望ましい。

そこで本研究では、SMS 構造におけるモード間干渉センサについて、巻き半径と温度依存係数の関係を評価した。

2. 実験

今回用いた実験系を **Fig. 1** に示す。0.4 m のシリカ MMF を 1.0 m の 2 本の SMF で挟んで SMS 構造を形成した。超広帯域スーパーコンティニューム光源の出力光を入射し、透過光スペクトルを光スペクトラムアナライザで観測した。MMF は半径 2–14 cm の範囲を 3 cm 刻みで巻き，それぞれの状態で MMF 部を加熱しながら 1550 nm 帯のスペクトル変化を測定した。

巻き半径 2 cm における 1550 nm 付近の透過光スペクトルの温度依存性を **Fig. 2**(a)に示す。温度変化に伴い、ピークが短波長側にシフトした。ピーク波長の温度依存性はほぼ線形であり、その依存係数は−9.6 pm/°Cであった（**Fig. 2**(b)）。同様に、巻き半径 11 cm および 14 cm のときの透過光スペクトルの温度依存性を **Fig. 3**(a)および **Fig. 4**(a)にそれぞれ示す。温度依存係数は、それぞれ−30.3 pm/°Cおよび−13.6 pm/°Cであった（**Fig. 3**(b)および **Fig. 4**(b)）。データは省略するが、巻き半径 5 cm は−15.2 pm/°Cで、8 cm は−39.7 pm/°Cであった。また、すべての巻き半径において、室温に戻すとスペクトル形状は元に戻ることも確認した。なお、前後の SMF の全長を加熱したとき、いずれの場合も透過光スペクトルは変化しないことを確認した。

最後に、温度依存係数を巻き半径に対してプロットしたのが **Fig. 5** である。巻き半径が 2 cm から 8 cm まで増えるにつれて温度依存係数の絶対値は増加し、さらに大きくなると絶対値は減少に転ずる傾向が確認された。

以上より、SMS 構造に基づく温度センサでは、感度が MMF の巻き半径に依存することを示した。また、高感度な温度センシングの実現を目的とする場合、最適な曲げ半径

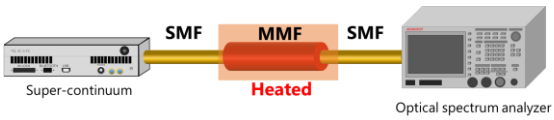
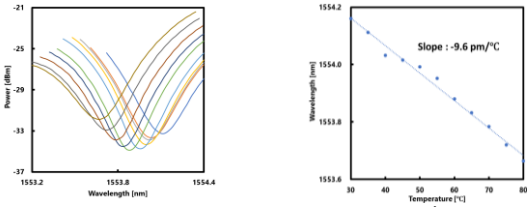
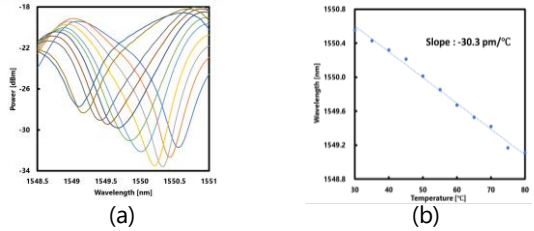


Fig. 1. Schematic of the experimental setup.



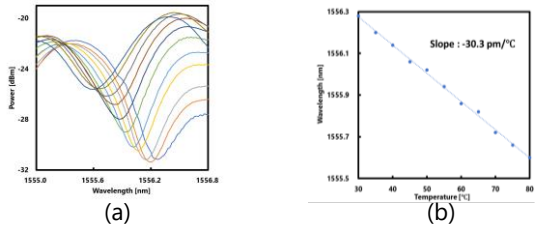
(a) (b)

Fig. 2. Temperature dependences of (a) transmitted spectrum and (b) dip wavelength (coiling radius: 2 cm).



(a) (b)

Fig. 3. Temperature dependences of (a) transmitted spectrum and (b) dip wavelength (coiling radius: 11 cm).



(a) (b)

Fig. 4. Temperature dependences of (a) transmitted spectrum and (b) dip wavelength (coiling radius: 14 cm).

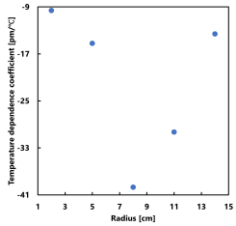


Fig. 5. Temperature sensitivity plotted as a function of the sensing-fiber coiling radius.

が存在することを明らかにした。今後は、本実験結果の再現性を確認するとともに、物理的原因について考察する予定である。

参考文献

[1] Y. Liu, et al., Appl. Opt. **46**, 2516 (2007).
[2] S. M. Tripathi, et al., J. Lightw. Technol. **27**, 2348 (2009).
[3] J. Huang, et al., Opt. Lett. **37**, 4308 (2012).
[4] G. Numata, et al., IEEE Photon. J. **6**, 6802306 (2014).
[5] K. Wang, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **61**, 078002 (2022).

© 2025年 応用物理学会

2 台のレーザを用いた光低コヒーレンス反射計の提案

Proposal of optical low-coherence reflectometry using two lasers

○新垣 将慈 [1]、元田 圭佑 [1]、石丸 貴大 [2]、高橋 央 [2]、戸毛 邦弘 [2]、水野 洋輔 [1]
[1] 横浜国立大学 大学院工学研究院　[2]NTT アクセスサービスシステム研究所
○Yukinari Arakaki[1], Keisuke Motoda[1], Takahiro Ishimaru[2], Hiroshi Takahashi[2], Kunihiro Toge[2], and Yosuke Mizuno[1]
[1] Faculty of Engineering, Yokohama National University　[2] NTT Access Network Service Systems Laboratories
E-mails: arakaki-yukinari-mx@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバを用いた高速大容量な通信網の昨今の急速な普及に伴い、通信網全体の健全性を評価する技術の需要が高まっている。そこで、光ファイバに沿った反射率や伝搬損失の分布を計測可能な手法として、光相関領域反射計（OCDR）が注目されている。

標準的な OCDR [1]では 1 つのレーザからの出力を 2 つに分け、参照光および測定ファイバ（FUT）への入射光として用いる。両者に周波数変調を施すことで、測定点として機能する「相関ピーク」をファイバ上に生成し、掃引することで分布測定を実現する。OCDR ではリアルタイム動作が可能で、空間分解能が高く、mm オーダでの分布検出が実証されている。しかし、導波路診断など、さらに高い空間分解能が必要となる場面も少なくない。

OCDR の光源として、低コヒーレンス光源を用いる方式が光低コヒーレンス反射計 (OLCR) [2]である。OLCR では、空間分解能が光源のコヒーレンス長によって決定されるため、μmオーダの極めて高い空間分解能が実現されている。しかし、原始的な OLCR は、機械駆動に基づく光遅延の可変機構を必要とするため、通常の OCDR と比較して動作速度が遅く、測定レンジが短いという問題があった。

そこで本研究では、可変光遅延を撤廃した OLCR を実現するため、2 台のレーザを用いた光低コヒーレンス反射計「デュアルレーザ（DL-）OLCR」を提案し、その基本動作を実証する。

2. 実験系と動作原理

DL-OLCR の実験系を **Fig. 1** に示す。2 台の狭線幅レーザダイオード（LD）を用意し、それぞれ LD1、LD2 とする。LD1 の出力光を FUT への入射光、LD2 の出力光を参照光として利用する。LD の出力周波数には、任意波形発生器 (FG) を用いて周期的な擬似ランダム変調を施す（周期的でない同一のランダム波形を、時間差を制御しながら出力するのは困難）。その結果、複数の相関ピークが周期的に形成されるが、FUT 内には 1 つの相関ピークが入るように条件を調整する。FUT 中の相関ピークから戻ってきた反射光と参照光のビート信号をフォトディテクタ（PD）で電気信号へと変換し、電気スペクトラムアナライザ（ESA）を用いて観測する。このとき ESA のゼロスパン機能により、一定の周波数でのスペクトルパワーを高速取得し、これを位置に対してプロットすることで反射パワー分布測定を実現する。

DL-OLCR の空間分解能Δzと測定レンジd_{m}は、以下の式で与えられる。

$$\Delta z = \frac{c\, 2 \ln 2}{\pi\, n\, \Delta\mu} \qquad (1)$$

$$d_{\mathrm{m}} = \frac{c}{2\, \pi\, f_{\mathrm{m}}} \qquad (2)$$

ただし、cは真空中の光速、nはファイバ中の屈折率、f_{m}は変調周波数、$\Delta\mu$はノイズ変調された光源が占める周波数帯域幅である。

3. 実験

DL-OLCR の動作実証として、全長約 52 m の FUT に対して反射パワー分布測定を行った。FUT の構成を **Fig. 2** に示す。多数のシリカ単一モードファイバを PC および APC コネクタで連結して構成した。

まず、FG の 2 チャンネル出力より、同一型番の 2 つの

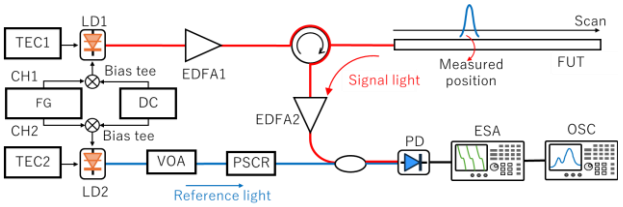


Fig. 1 Experimental setup of dual-laser OLCR. FG: function generator, DC: direct current, TEC: thermoelectric cooler, LD: laser diode, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, FUT: fiber under test, VOA: variable optical attenuator, PSCR: polarization scrambler, PD: photodetector, ESA: electrical spectrum analyzer, OSC: oscilloscope.

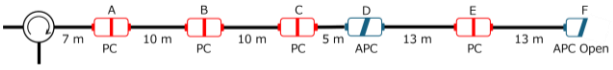


Fig. 2 Structure of fiber under test.

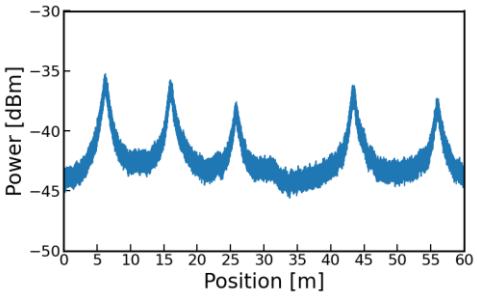


Fig. 3 Measured reflected power distribution.

LD の駆動電流に、それぞれ同一波形による周期的ランダム変調を施した。変調振幅の peak-to-peak 電圧を 1.5 $V_{p\text{-}p}$ とし、ノイズ点数を 50、変調周波数を 100 kHz とした。光源が占める周波数帯域幅$\Delta\mu$は 2.51 GHz、測定レンジd_{m}は 477 m である。両者の中心周波数には、温度コントローラを用いて 1.272 GHz の差を設けた。分布測定のため、参照光への変調の位相を 334°から 312°まで、50 ms で掃引した。ESA のゼロスパン機能を用い、1.272 GHz におけるスペクトルパワーを、測定位置の掃引と同期させてオシロスコープに表示した。平均回数は 128 回とした。

FUT に沿った反射パワー分布測定の結果を **Fig. 3** に示す。横軸はサーキュレータからの距離、縦軸は反射パワーである。明瞭な 5 つのピークが、FUT の 4 つの PC コネクタ(A,B,C,E)と APC コネクタ開放端 (F)に対応する位置に現れた。それぞれのピークにおける空間分解能は 1.5～2 m 程度であった。一方、PC コネクタや APC コネクタ開放端と比べて反射率の低い APC コネクタ (D)における反射ピークは、明確に検出することはできなかった。

外部変調方式などを用いて変調振幅をさらに増加させることは可能であるものの、得られた空間分解能は従来法よりも著しく低い。これは 2 つのレーザの発振周波数の時間変動に起因している可能性がある。今後は、性能劣化要因の解決を図り、機械駆動部の不要な新たな OLCR として確立させたい。

参考文献

[1] K. Hotate et al., J. Lightwave Technol. **11**,1701 (1993).
[2] K. Takeda, et al., Appl. Opt. **26**, 1063 (1987).

© 2025年 応用物理学会

長距離ファイバを用いた光相関領域反射計の現場持込機器の最小化

Minimization of field-deployed equipment in OCDR using inserted long fibers

○柳下 夏穂、比嘉 祐太、元田 圭佑、水野 洋輔
横浜国立大学 大学院工学研究院
Natsuho Yagishita, Yuta Higa, Keisuke Motoda, and Yosuke Mizuno
Faculty of Engineering, Yokohama National University
E-mails: yagishita-natsuho-wk@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバ通信の普及に伴い、通信網の健全性を評価する技術の需要が増加している。光相関領域反射計（OCDR）[1,2]は、反射率分布を高分解能で取得できる点から、局所的な反射損失や接続不良の検出に適している。

OCDR では、周波数変調されたレーザ光を測定ファイバ（FUT）に入射し、「相関ピーク」と呼ばれる測定点を FUT 中に生成、掃引することで、反射率の分布測定を実現する。OCDR の実験系には、大型な機器が多数必要であり、現場持込には課題があった。

そこで本研究では、OCDR の実験系において、長距離光ファイバ 2 本を用いて測定部とそれ以外の箇所とを分離することで、測定現場持込機器を最小化した構成を提案する。基本動作を実証し、従来法との性能比較を行う。

2. 原理

従来の OCDR の実験系を **Fig. 1** に示す。正弦波で周波数変調された光を FUT に入射し、反射光と参照光をヘテロダイン検波することにより観測を行う。FUT 上には「相関ピーク」と呼ばれる測定点が生成される。レーザの変調周波数を制御することにより、相関ピークの位置を FUT に沿って掃引し、反射率の分布測定を行う。

OCDR の実験系には変調レーザ、エルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）、音響光学変調器（AOM）、電気スペクトラムアナライザ（ESA）等の比較的大型のデバイスが多く含まれており、実験系全体を現場に持ち込むのは難しい場合がある。

本研究では **Fig. 2** に示すように、同程度の長さの長距離ファイバ 2 本を用いて、サーキュレータと FUT を実験系から分離する構成を提案する。これにより、測定の現場にはサーキュレータと FUT のみを持ち込めば動作することとなり、持込機器を最小化することができる。

3. 実験

提案する **Fig. 2** の実験系において、直接変調を施した光をカプラによって入射光と参照光に分岐し、入射光を EDFA で 15.6 dBm に増幅した。サーキュレータの第 1 ポートと第 3 ポートの直前に 2 km の長距離ファイバを接続し、FUT には **Fig. 3** に示すように意図的な PC/PC 接続による反射点及び、APC の開放端による反射点を設けた。FUT からの反射光は EDFA で-21.8 dBm に増幅した。参照光路においては、AOM で 80 MHz の周波数シフトを行い、偏波状態をスクランブリングした後、 EDFA で 2.5 dBm に増幅し、フォトディテクタで反射光とヘテロダイン検波した。変調振幅を 90.2 GHz、変調周波数を 1227.9 kHz–1215.3 kHz の範囲で掃引した。ESA のゼロスパン機能で 80 MHz の成分のみの時間変動を取得し、オシロスコープで 1024 回の平均処理を行い、観測した。また、サーキュレータ付近の長距離ファイバの接続の有無による性能の比較を行うために **Fig. 1** に示す実験系を用いて実験を行った。入射光路に 4 km の遅延線を設け、変調振幅、変調周波数などの条件は **Fig. 2** に示す実験系と等しい値を用いた。

4. 結果

従来の構成と提案する構成で得られた FUT に沿った反射率分布を **Fig. 4(a),(b)**にそれぞれ示す。両者とも **Fig. 3** に示す FUT における約 5 m, 6 m, 9 m, 14 m の位置に存在する反射点を正しく測定できていることが分かる。空間分解能を APC 開放端におけるピークの半値全幅とすると、従来法では 15.8 cm、提案法では 15.0 cm であり、同等であった。FUT の全長にわたってパワーが約 1 dB 減少している（長距離ファイバによる伝搬損失の影響と思われる）が、反射点検出への影響は小さい。

以上より、OCDR の実験系において、測定部を 2 km 遠方に分離した場合にも、正しい反射率分布測定が行えることを実証した。今後はさらに長距離の光ファイバを用いた場合やブリルアン OCDR [3]への適用を検討する。

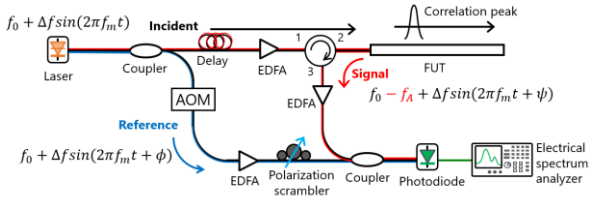


Fig. 1 Experimental setup of standard OCDR system. EDFA: erbium-doped fiber amplifier.

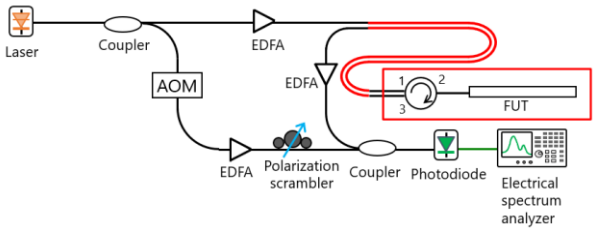


Fig. 2 Experimental setup of proposed OCDR system using inserted long optical fibers.

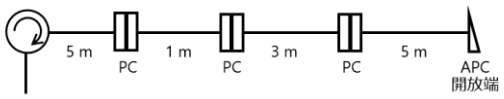


Fig. 3 Structure of the FUT.

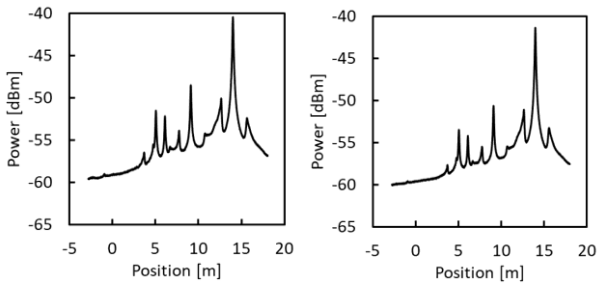


Fig. 4 Reflected power distributions measured with (a) standard OCDR and (b) proposed scheme.

参考文献

[1] Y. Hotate , et al., IEEE Photonics Technol. Lett. **14**, 179 (2002).
[2] T. Kiyozumi, et al., IEEE Trans. Instr. Meas. **73**, 7001711 (2024).
[3] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).

© 2025年 応用物理学会

OCDR における偏波状態の最適化によるゴーストピークの影響の抑制

Suppression of ghost peak effects in OCDR through polarization state optimization

○ 関根 勇翔[1], 比嘉 祐太[1], 清住 空樹[1,2], 水野 洋輔[1]
[1] 横浜国立大学 大学院工学研究院 [2] 東京大学 大学院工学系研究科
○Yuto Sekine[1], Yuta Higa[1], Takaki Kiyozumi[1,2], and Yosuke Mizuno[1]
[1] Yokohama National University, [2] The University of Tokyo
E-mails: sekine-yuto-ch@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバによる高速大容量通信ネットワークの普及に伴い、光ファイバの健全性診断の需要が高まっている。そこで、光ファイバに沿って反射率の分布を測定し接続不良点や破断点などを検出することができる手法として光相関領域反射計（OCDR）が注目されている。

OCDR ではレーザ光に周波数変調を行うことで「相関ピーク」と呼ばれる点を測定ファイバ（FUT）内で掃引することで分布測定を行うことができる[1]。正弦波変調に基づく標準的な OCDR においては、低周波ノイズを避けるために周波数シフタとして音響光学変調器（AOM）を用いる。その際、周波数シフトを行った場合にゼロスパン信号処理を行うと、本来のビートスペクトルに $f = 0$ で折り返されたビートスペクトルの負の周波数成分が重畳された状態で電気スペクトラムアナライザ（ESA）により観測される（**Fig .1(a)**）。その結果、**Fig. 1(b)**に示すように、本来のピークの両側にゴーストピークが現れ、ダイナミックレンジ（本来のピークからゴーストピークまでのパワーの差）が制限されてしまう。

ゴーストピークを抑制する手法として、変調振幅に対しその 1/2 倍より大きい周波数シフトを印加する手法[2]のほか、光源の周波数をランダムに変調させる手法[3]が知られているが、より簡素な手法が望まれている。

そこで本研究では、偏波状態の最適化を通じて、ゴーストピークの影響を抑制し、ダイナミックレンジを向上できることを実験的に示す。

2. 実験

Fig. 2 に示す OCDR の実験系を用いた。参照光路には、偏波コントローラと偏波スクランブラ（PSCR）を挿入した。ダイナミックレンジが最大となる場合、最小となる場合、および、PSCR を ON にした場合の 3 種類の偏波状態で測定結果を比較した。

測定ファイバの構成を **Fig. 3(a)**および **Fig. 3(b)**に示す。反射の大きい PC 開放端をもつ FUT-1、および、PC 開放端より反射の小さい APC 開放端をもつ FUT-2 を用いた。

ESA ではゼロスパン機能を用い、AOM の周波数シフト量と同じ 100 MHz におけるスペクトルをオシロスコープにより観測した。遅延線の長さは 5 km、掃引周波数は FUT-1 では 41.600 kHz～40.800 kHz、FUT-2 では 41.685 kHz～40.885 kHz とした。

3. 結果

FUT-1 における PC 開放端付近におけるスペクトルの測定結果を **Fig. 4(a)**に、FUT-2 における APC 開放端付近における測定結果を **Fig. 4(b)**に示す。**Fig. 4(a)**から、反射の大きい PC 開放端においては、メインピークが大きくなる場合ではゴーストピークも同時に大きくなったため、ダイナミックレンジの大きな向上は確認できなかった。一方で、**Fig. 4(b)**から、比較的反射の小さい APC 開放端においては、偏波状態の変化によるメインピークの大きさの変化がゴーストピークの変化と比べて大きく、PSCR の場合に 11.4 dB であったダイナミックレンジが、偏波状態の最適時には 14.3 dB となっており、約 3 dB の向上が達成できた。

以上の結果から、PC 開放端など光の反射が大きい反射点においては偏波状態の変化によるゴーストピークの影響の変化はあまり見られなかったものの、APC 開放端など比較的反射の小さい反射点においては偏波状態の最適化によりゴーストピークの影響が抑制され、ダイナミックレンジの向上が期待できることが示された。

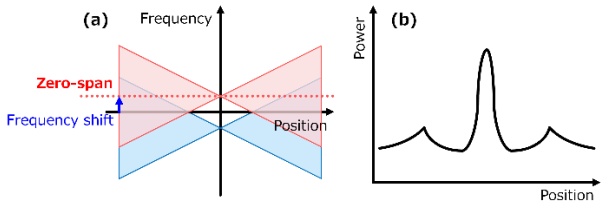


Fig. 1. (a) Principle of ghost-peak generation. (b) Ghost peaks around the main peak.

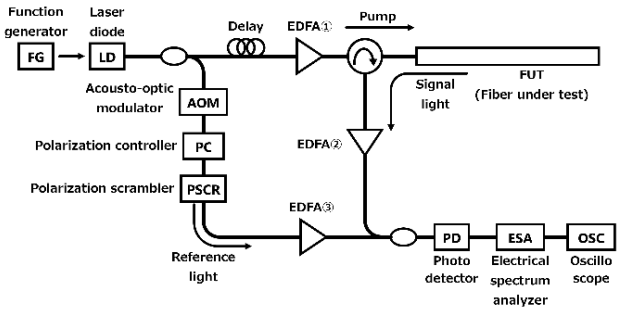
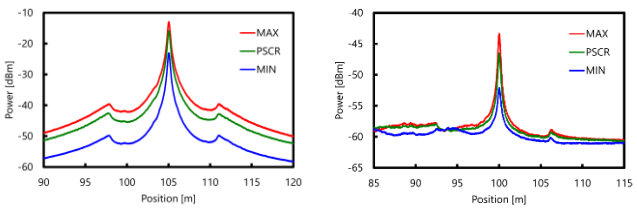


Fig. 2. Experimental setup of OCDR system.



(a) (b)

Fig. 3. Structures of (a) FUT-1 and (b) FUT-2.



(a) (b)

Fig. 4. Measurement reflected power distributions around the distal end: (a) FUT-1 with PC end and (b) FUT-2 with APC end.

参考文献

[1] K. Hotate, et al., J. Lightwave Technol. **11**, 1701 (1993).
[2] T. Kiyozumi, et al., J. Lightwave Technol. **42**, 6578 (2024)
[3] 比嘉祐太 他, 2025 春応物, 14p-K304-16.

© 2025年 応用物理学会

周期的擬似ランダム変調 OCDR におけるビートスペクトルの実測

Experimental measurement of beat spectra in OCDR based on periodic pseudo-random modulation

○比嘉 祐太[1]、清住 空樹[1,2]、元田 圭佑[1]、石丸 貴大[3]、高橋 央[3]、戸毛 邦弘[3]、水野 洋輔[1]
[1]横浜国立大学 大学院工学研究院 [2]東京大学 大学院工学系研究科 [3]NTT アクセスサービスシステム研究所

○Yuta Higa[1], Takaki Kiyozumi[1,2], Keisuke Motoda[1],
Takahiro Ishimaru[3], Hiroshi Takahashi[3], Kunihiro Toge[3], and Yosuke Mizuno[1]
[1] Yokohama National University [2] The University of Tokyo [3] NTT Access Network Service Systems Laboratories
E-mails: higa-yuta-fc@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバによる高速大容量通信ネットワークの普及に伴い、光ファイバの健全性診断の需要が高まっている。そこで、光ファイバに沿って反射率の分布を測定し、接続不良点や破断点などを検出できる手法として、光相関領域反射計（OCDR）[1]が注目されている。

OCDR においては、レーザ出力光に正弦波変調を施す手法が一般的である。一方、最近、この変調波形の 1 周期の中身を、ランダムな点列に置き換えた周期的擬似ランダム変調方式が提案された[2]。これまでに、本方式に基づく OCDR では、ゴーストピークと呼ばれるノイズが抑制できること[3]や、同様の条件下で正弦波変調に比べ空間分解能が高くなること[4]が報告されている。これらの性能の差は、両者のビートスペクトル（参照光と信号光のビート信号のパワーを、位置と周波数の関数として表示したもの）の差異に起因すると考えられていたが、その実測例の報告はなかった。

そこで本研究では、周期的擬似ランダム変調のビートスペクトルを実測し、正弦波変調との性能の差を議論する。

2. 原理と実験条件

OCDR では、レーザ出力光に周波数変調を施すことで、測定ファイバ（FUT）中に相関ピーク（測定点として機能）を生成する。変調周波数を制御することで相関ピークの位置を FUT に沿って掃引し、反射率の分布測定を行う。

用いた OCDR の実験系を **Fig. 1** に示す。正弦波変調と周期的擬似ランダム変調の差異は変調波形のみであるため、実験系は同様である。まず、レーザの出力光を、FUT への入射光 および ヘテロダイン検波のための参照光に分ける参照光は、音響光学変調器（AOM）により周波数シフトを施す。反射光と参照光のビート信号をフォトディテクタで電気信号に変換し、電気スペクトラムアナライザ（ESA）に入力する。ESA のゼロスパン機能により、AOM のシフト周波数におけるスペクトルパワーを高速取得し、これを各測定位置に対しプロットし、FUT に沿った反射パワーの分布情報を得る。

FUT の構成を **Fig. 2** に示す。100 m のシリカ単一モードファイバの APC コネクタ開放端の検出を行った。変調周波数（ランダム波形の場合は、周期の逆数）は、41.2398 kHz から 41.3398 kHz まで掃引した。これにより、相関ピークが約 6 m 掃引される。ESA のゼロスパン機能を用い、AOM の周波数シフト量に合わせ、100 MHz におけるスペクトルパワーの変化を、測定位置の掃引と同期させてオシロスコープで観測した。ビートスペクトルは、開放端付近約 3 m に対応する、変調周波数 41.2748 kHz から 41.3048 kHz まで等間隔に 1000 点取り、それぞれ 100±15 MHz のスペクトルを ESA により取得し、グラフ化した。

3. 実験結果

まず、反射パワー分布の測定結果を **Fig. 3** に示す。横軸は、APC 開放端の位置を 0 m としている。変調方式の違いにより、ピークの幅が異なった。ピークの半値全幅として空間分解能を見積もったところ、正弦波変調では 31.3 cm、周期的擬似ランダム変調では 5.6 cm であった。

次に、取得したビートスペクトルを **Fig. 4** に示す。反射率分布計測では、100 MHz でゼロスパン処理を行うため、**Fig. 3** の反射パワー分布計測結果は、ビートスペクトルの 100 MHz の部分のみをプロットしたものとなる。ビートスペクトルの中心、すなわち相対位置 0 m、100 MHz 付近に関して、ピークの太い正弦波変調では、パワーの高い部分が位置方向に広がっている一方、ピークの細い周期的擬似ランダム変調では、パワーの高い部分が広がっていない。

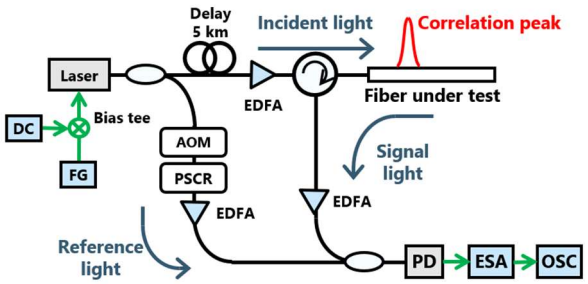


Fig. 1 Experimental setup of OCDR. AOM: acousto-optic modulator, DC: direct current, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, FUT: fiber under test, OSC: oscilloscope, PD: photodetector, PSCR: polarization scrambler.

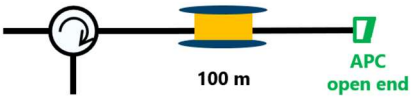


Fig. 2 Structure of the FUT.

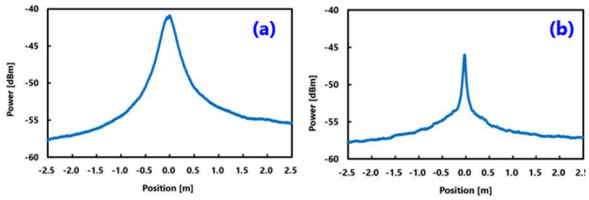


Fig. 3 Reflected power distributions measured with OCDR based on (a) sinusoidal modulation and (b) periodic pseudo-random modulation.

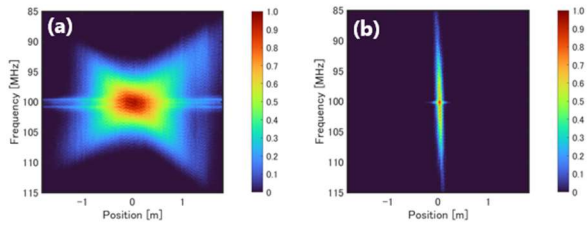


Fig. 4 Beat spectra measured with OCDR based on (a) sinusoidal modulation and (b) periodic pseudo-random modulation.

以上より、ビートスペクトルの観点から、同様の条件下で、正弦波変調に比べ空間分解能が高くなる原因を明示することができた。今後は、ビートスペクトルの形状の違いを理論的に説明するとともに、周期的擬似ランダム変調方式の性能限界を解明していく計画である。

参考文献

[1] K. Hotate, et al., Meas. Sci. Technol., **15**, 1, 148 (2004).
[2] K. Otsubo, et al., J. Lightw. Technol., 42, 6233 (2024).
[3] 比嘉ほか、2024 秋応物, 19a-P06-14.
[4] 比嘉ほか、2025 春応物, 14p-K304-16.

© 2025年 応用物理学会

３波長干渉計における合成波長法を用いた絶対距離測定

Absolute Distance Measurement Based on Three-Wavelength Interferometry

東大工[1]，東大先端研[2] ○(M2)南 以勒[1]，山口 尚紀[1]，清住 空樹[1]，吉村 駿人[1]，セット ジイヨン[2]，山下 真司[1]

Tokyo Univ.[1], RCAST, Tokyo Univ.[2], ○Yile Nan[1], Naoki Yamaguchi[1], Takaki Kiyozumi[1], Hayato Yoshimura[1], Sze Yun Set[2], Shinji Yamashita[1]

E-mail: nanyile16@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Multi-wavelength interferometry [1], a non-contact optical measurement technique based on interference, achieves both a wide measurement range and high accuracy, in contrast to single-wavelength interferometry, whose range is limited to one wavelength.

In this research, we utilize three-wavelength interferometry with dithering for absolute distance measurement. In the interferometric signal, both wavelength and phase vary as follows:

$$\frac{1}{\lambda_{AB}} = \frac{1}{\lambda_A} - \frac{1}{\lambda_B} \qquad (1)$$

$$\theta_{AB} = \theta_A - \theta_B (0 < \theta_{AB} < 2\pi) \qquad (2)$$

To obtain the interferometry wavelength λ_{12-23}, we first calculate the intermediate wavelengths λ_{12} and λ_{23} using Eq. (1), and then derive λ_{12-23} from these values. However, for a sinusoidal signal, the same amplitude may correspond to two phases, preventing phase determination [2] using Eq. (2). Therefore, we introduce a dithering technique, as shown in Fig. 1, enabling precise determination of θ_1, θ_2 and θ_3, by judging the upward or downward trend within the dithering region.

In the experiment, three-wavelengths light (λ_1 = 1560.695 nm, λ_2 = 1562.983 nm, λ_3 = 1565.717 nm) was generated by applying different currents to the multi-wavelength light source, passed through an SOA at 18 °C, and injected into the system (Fig. 2). By varying the phase with an optical delay line (ODL) continuously, the dithering waveform's amplitude and midpoint were extracted from its peak and trough. Consequently, an absolute distance of 0.45 cm was reconstructed from the dithered interferometric signal at a ODL setting of 25 ps, as shown in Fig. 3.

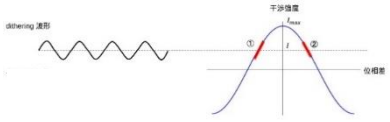


Figure 1. Principle of dithering.

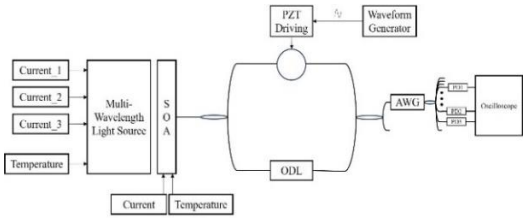


Figure 2. Schematic of the experimental system.

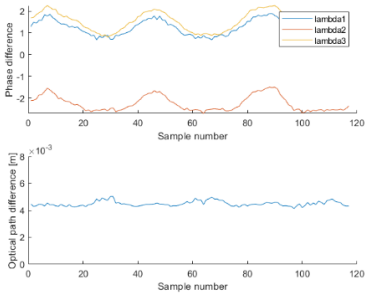


Figure 3. Three-wavelength interferometry result.

Reference

[1] Petter, et al., *OPTO 2009 Proceedings of SENSOR+ TEST Conference*, 2009, pp. 129-132

[2] Falaggis, et al., *Interferometry XIV: Techniques and Analysis*. SPIE, 2008. pp. 299-307.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[9p-N402-1~6] 3.7 Optical measurement, instrumentation, and sensor

[9p-N402-1]

Dynamic Profilometry of Surface Wave Using 2D Single-shot OCT

○Yume Hashimoto[1], Shuto Onodera[1], Tatsutoshi Shioda[1] (1.Saitama Univ.)

[9p-N402-2]

Proposal of Frequency Domain Interferometry and Applied to Distance Measurement

○(M1)Kazuma Yamane[1], Sho Omori[1], Ryosuke Suzuki[1], Tatsutoshi Shioda[1] (1.Saitama Univ)

[9p-N402-3]

Generation of Low-Coherence Dual-Combs Using PM Fiber Etalon and its application to 3D Profilometry

○Satoshi Kanai[1], Yuki Sekiguchi[1], Kenta Arai[1], Ryosuke Kuwayama[1], Tatsutoshi Shioda[1] (1.Saitama Univ.)

[9p-N402-4]

Development of a pupil-segmented polarization microscope

○Keisuke Yoshiki[1], Norimasa Tsutsui[1,2], Hiroshi Ikenoue[1] (1.D-Future, Research Institute, Kochi Univ. of Tech., 2.Denken Co., Ltd)

[9p-N402-5]

Observation of anisotropic surface texture by pupil-segmented polarization imaging

○Norimasa Tsutsui[1,2], Keisuke Yoshiki[1], Hiroshi Ikenoue[1] (1.D-Future, Research Institute, Kochi Univ. of Tech., 2.Denken Co.,Ltd.)

[9p-N402-6]

Simultaneous measurement of Complex Refractive Index and thickness by Tomographic Spectroscopy

○(M1)Shuto Onodera[1], Satoe Murazawa[1], Yume Hashimoto[1], Bilkis Farjana[1], Tatsutosh Shioda[1] (1.Saitama Univ.)

2 次元シングルショット OCT を用いた振動伝搬の測定
Dynamic Profilometry of Surface Wave Using 2D Single-shot OCT

°橋本夕芽，小野寺柊人，塩田達俊*
°Yume Hashimoto, Shuto Onodera, Tatsutoshi Shioda

埼玉大理工
Graduate School of Science and Engineering, Saitama Univ.
* tshioda@mail.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

医療や工業の分野において，安全性を担保するために内部構造を精密に把握することへの需要が高まっている．しかし，現在実用化されている検査方法では分解能不足の問題がある．例えば医療分野では，最初期の口腔がん発見，工業分野では半導体の検品に必要な分解能を満たせていない．そこで，速度は表面張力と深さに依存することに着目し，超音波などでサンプル表面に振動を与え，波の伝搬の様子を観測することによって，内部構造を非破壊非侵襲で把握する新たな手法を提案する．この方法の実現に向けた前段階として，高速かつ高分解能で測定が可能である 2 次元シングルショット OCT を用いてサンプルに接触で振動を与え，その振動の伝搬の様子を観測した．将来的には，振動の速度変化を測定することでサンプル内部の構造を推定することを目的とする．

2. 実験方法

Fig.1 に本稿で用いた 2 次元シングルショット OCT の実験系を示す．スピーカーに針金を取り付け，サンプルとなるウレタンゲルを針金に接触させるように置いた.また，サンプルに用いたウレタンゲルは引張強度が 0.68 N/mm^2 である．（人肌の引張強度は 0.25～2 N/mm^2）スピーカーから 20 Hz の音を流し，針金を通じてスピーカーの振動をサンプルに伝え，イメージセンサのフレームレートを 1000 fps に設定し撮影を行った.また，光源に対して信号を送り，光源の照射タイミングとイメージセンサの露光タイミングの同期を行うことで，振動環境下にある試料の振動ロバストが向上することが実証されており[1]，同様の手法を取ることで精度の向上を図っている．

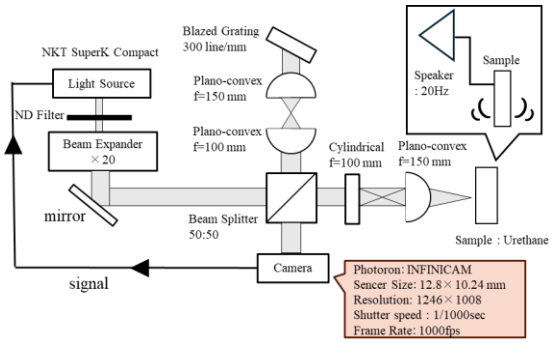


Fig. 1 Experimental setup

3. 実験結果

Fig.2 にイメージセンサで取得した振動測定結果の干渉縞画像から，干渉位置を算出し，散布図に起こしたものを示す．また，散布図に対して正弦波でフィッティングを行ったものを Fig.2 に重ねて示す．フィッティング結果からサンプルの 50 ms 間での変位を表したものを Fig.3 に示す．Fig.3 からスピーカーで与えた振動数と同様に 20 Hz でサンプルが振動している様子が確認できる．この結果からサンプル表面を伝搬する振動の速度を求めると 3.6×10^{-1} m/s となった．速度が深さなどの内部構造を反映していることから，今後は本手法により内部構造の特定を行えるように実験を進める．

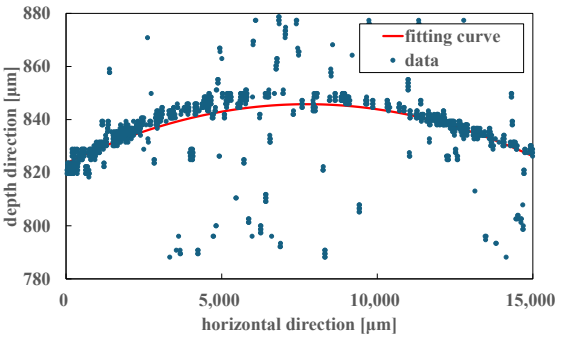


Fig. 2 Scatter plot showing surface vibration and fitting results (red line) with sinusoidal function

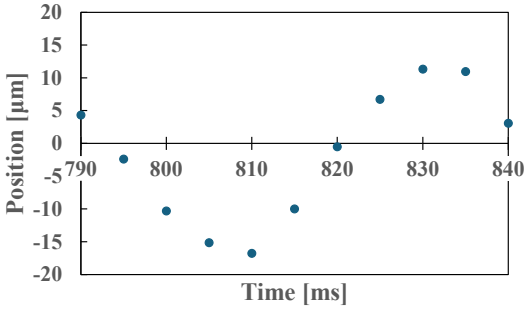


Fig. 3 Displacement of the sample over 50ms

参考文献

1) 福田渓人他，日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan, 15pE9(2022)
2) 橋本夕芽他，日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan, 1aB9 (2024)

© 2025年 応用物理学会

周波数領域干渉法の提案と距離計測応用

Proposal of Frequency Domain Interferometry and Applied to Distance Measurement

埼玉大 °山根和眞，大森翔，鈴木涼介，塩田達俊
Saitama Univ. °Kazuma Yamane, Sho Omori, Ryosuke Suzuki, Tatsutoshi Shioda
E-mail: tshioda@mail.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

現代の産業界における様々な分野において，高速かつ高精度でさらに低コストの計測が需要を増している．本研究では,周波数領域光相関法(FDOC)の研究においてループ回路を用いた光路長の調整による光強度の変化の計測で，距離計測の可能性に気づき，FDOC を基礎とした距離計測応用に関して記す．FDOC とは過渡的に発生する現象を，ワンショット計測で任意波形を計測できる手法である[1][2][3]．このFDOC システムを派生させ, Fig.1 の様にf_0成分の光を両側帯波（DSB）変調により波長変換し，さらにそれぞれの側帯波を再度波長変換して元の波長に戻したところで干渉させる．その干渉強度が 2 度の DSB 変調の間の光路長に依存することを利用して距離計測へ応用する．具体的には Fig.2 の様なループ回路内にディレイライン(DL)を設置し，距離計測を行った．この距離計測の時間分解能はファイバーの周回時間により決まり ns 程度が得られ，Fig.2 のようなループ回路を用いることで DSB 変調器を光回路内に 1 つ設置し共通光路で距離計測することができる．

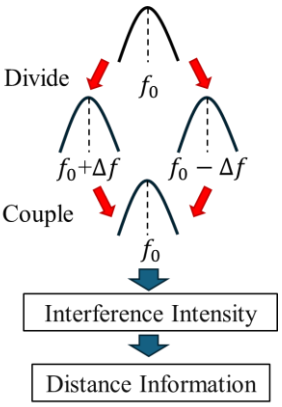


Fig.1 Schematic diagram of output waveform for each cycle.

2. 実験結果

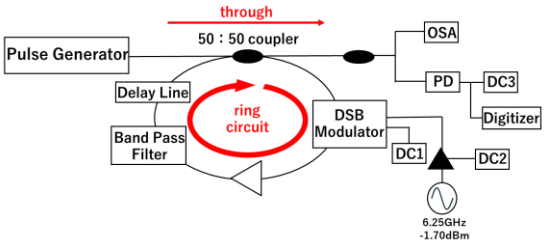


Fig.2 Experimental setup.

提案手法を実現するための実験系を Fig.2 に示す．パルス信号発生器内にあるパルスパターンジェネレータ(PPG)の設定を，幅 5ns 周期 10μs としてパルス信号をループ回路に送り出した．またループ回路内にはノイズを除去するバンドパスフィルタ(BPF)や光路長を調節する DL，光強度変調器等を設置して時間波形を計測した．今回，光強度変調器の周波数シフト量を±6.25GHz に設定した．入力信号に対してループ回路内を周回するごとに周波数シフトを行い, 出力信号をデジタイザで取得した．その際，ループ回路内の DL を調節して光路長を 0~90mm において 1.8mm ごと変えた．取得時間に対する光強度波形において，変調回数が 0 のときの光強度を基準として規格化し変調回数が 1，2 回のピーク値をデジタイザで得た時間波形から読み取り与えた光路長ごとのそれぞれピーク値をプロットしたものを Fig.3 に表した．

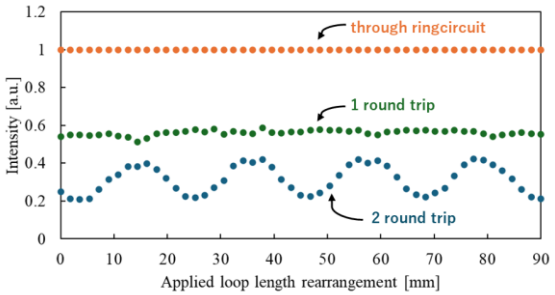


Fig.3 Peak values at each modulation count for the given optical path length.

Fig.3 より変調回数が 1 回の時は光路長を変化させても，ピーク値はおおよそ一定の値であったのに対して，変調回数が 2 回の時は光路長を変化させると周期的に変化した．その光路長の繰り返しはおおよそ 21.7mm 間隔であった．これらより光路長を変化させることにより，ループ回路内で変調回数を重ねるごとに光路長に対しての光強度が周期的に変化しこれを用いて距離計測ができることがわかる．また，変調回数 2 回目の時の周期は，距離計測において計測レンジに対応し，ns 程度の時間で距離計測レンジ 21.7mm, 距離分解能 1.8mm で距離計測ができることを確認した．

参考文献

[1] M. Miki, et al., Optics & Photonics Japan 2020, 16aC2 (2020).
[2] K. Fukushi, et al., Optics & Photonics Japan 2021, 27aC9 (2021).
[3] K. Fukushi, et al., The 15th CLEO Pacific Rim 2022, CFP6I-03 (2022).

© 2025年 応用物理学会

PM ファイバエタロンを利用した低コヒーレンスデュアルコム光の生成法の提案と 3 次元形状計測への応用

Generation of Low-Coherence Dual-Combs Using PM Fiber Etalon and its application to 3D Profilometry

埼玉大理工　○金井 聡志，関口 優紀，新井 健太，桑山 遼介，塩田 達俊

Saitama Univ., ○Satoshi Kanai, Yuki Sekiguchi, Kenta Arai, Ryosuke Kuwayama and Tatsutoshi Shioda

E-mail: tshioda@mail.saitama-u.ac.jp

1. 背景・目的

μm オーダーの高速・高精度な 3 次元表面形状計測技術は、多様な分野で需要が高い。デュアルコム分光法(DCS)は高性能だが、光源が高価で複雑という課題がある。我々は、この課題を解決するため、低コヒーレンス光源を用いた低コヒーレンス DCS (LC-DCS)を提案した[1]。

LC-DCS の実現には、2 つの低コヒーレンス光周波数コム(LC-OFC)間に、精密な光路長差を与える必要がある。我々はこれを可能とするいくつかの新規な低コヒーレンスデュアルコム光の発生法を考案してきた[2-7]。本稿では、このうち極めてシンプルな構成ながら、μm オーダーの光路長差を柔軟に設定できる PM ファイバエタロン[3-5]を作製し、これを用いた LC-DCS による 3 次元形状の高精度計測結果を報告する。

2. 実験方法と結果

提案する PM ファイバエタロンは、2 本の PM ファイバを接続した独自の構造を持つ(Fig. 1(a))。本手法のサンプリングステップとなる微小な光路長差を単一の PM ファイバの 2 偏波軸で得るには、ファイバ長が短くなりすぎ作製が困難である。本構造では、接続点で偏波軸を 90 度回転させて偏波モードを交換させることで、約 7.6 μm という微小な光路長差を比較的長い 2 本のファイバで容易に作製することを可能とした。このエタロンと SC 光源で生成した 2 つの LC-OFC を、偏光分離型マイケルソン干渉計(Fig. 1(b))に導入し、公称値 50 μm の段差マスターの複数点における干渉波形を取得した。

各点の相関波形ピークから座標情報を求め、対象の段差と傾斜角を評価した。その結果、Fig. 2 に示すように段差を 50.7 μm (RMSE 2.4 μm)、傾斜角を 0.63 度と、3 次元形状として高精度に測定できた。

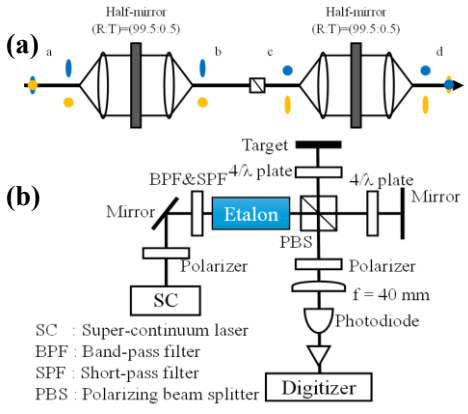


Fig. 1 (a) Proposed 90-degree-spliced PM fiber etalon and (b) Experimental setup

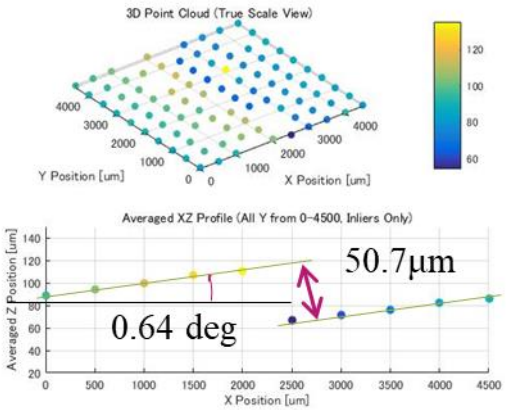


Fig. 2 Measured 3D profile of step gauge

参考文献

1) Y. Sekiguchi, *et al.*, The 69th JSAP Spring Meeting 2022 25a-12B-5 (2022).
2) Y. Sekiguchi, *et al.*, Optics & Photonics Japan 2022, 15aE10 (2022).
3) Y. Sekiguchi, *et al.*, The 71st JSAP Spring Meeting 2024, 25a-12B-5 (2024).
4) S. Kanai, *et al.*, Optics & Photonics Japan 2024, 29aD3 (2024).
5) S. Kanai, *et al.*, OPIC 2025, BISC4-05 (2025).
6) K. Tanabe, *et al.*, The 85th JSAP Autumn Meeting 2024, 20a-P01-3 (2024).
7) D. Taguchi, *et al.*, Optics & Photonics Japan 2024, 29aD7 (2024).

© 2025年 応用物理学会

瞳分割偏光顕微鏡の開発

Development of a pupil-segmented polarization microscope

高知工大総研 D-Future[1]，株式会社デンケン[2] ○吉木 啓介[1]，筒井 宣匡[1,2]，池上 浩[1]

D-Future, Research Institute, Kochi Univ. of Tech.[1], Denken Co., Ltd[2]

○Keisuke Yoshiki[1], Norimasa Tsutsui[1,2], and Hiroshi Ikenoue[1]

E-mail: yoshiki.keisuke@kochi-tech.ac.jp

1. 背景

ナノマシンビジョン（MV）による不良検出は，半導体分野を中心にナノオーダーの奥行き情報を含んだ広域・高速撮像が求められる重要な課題である．従来の電子顕微鏡やプローブ顕微鏡，干渉計測は高解像度を持つが，広域かつ高速なワンショット撮像には対応できないという課題があった．そこで我々は，ナノオーダーの奥行き情報を広域かつ高速にワンショットで捉える「瞳分割偏光計測法」を考案した[1]．前報ではウェハレベルから mm レベルの広域・マクロ計測を実証し，微分干渉計測との比較を行った．本報告ではさらに高解像度化を目指し，対物レンズによる顕微化を用いたマルチスケール計測システムを提案する．

2. 原理

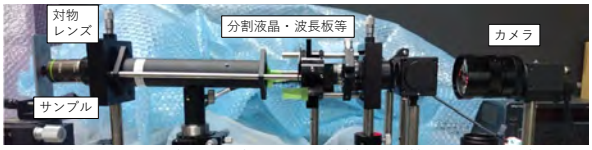


Fig. 1 Experimental setup of the pupil-segmented polarization microscope

Figure 1 に装置を示す，瞳面に配置した透過型液晶空間偏光変調器で偏光状態を空間的に分割し，試料を照明する．試料が理想的に平坦なら，反射光は同じ経路で戻り偏光状態は変化しない．一方，表面に微小な凹凸があれば反射経路がずれ，入射偏光とは異なる直交偏光が発生する．これを選択的に検出することでナノオーダーの表面性状が捉えられる．前報の広域撮像系から，本報告では対物レンズを用いた顕微光学系に変更し，さらに高解像度化を実現した．

3. 結果

Figure 2 に瞳分割偏光顕微鏡による金属加工面の観察画像を示す．(a)は広域撮像により全体構造や大域的欠陥を捉えている．(b)は(a)の円内領域を対物レンズで拡大した顕微画像で，微細な凹凸や表面構造を高コントラストに可視化している．本手法は広視野と顕微観察を繋ぎ，マルチスケールな観察を可能とした．

なお，広域撮像と顕微撮像では表面性状の検出感度や特性に差が生じる．これらの定量的特性評価や具体的な差異については，当日に詳しく議論する．

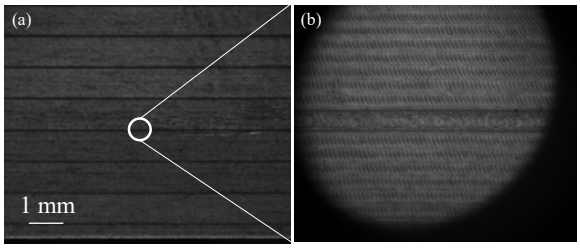


Fig. 2 Experimental results of multi-scale surface observation using pupil-segmented polarization microscopy. (a) Wide-field observation, (b) magnified microscopic observation of the area marked by the circle in (a).

謝辞

本研究は競輪の補助を受けて実施した(整理番号：2025M-495).

参考文献

1) Japan Patent JP 7539651 B2. August 26, 2024.

© 2025年 応用物理学会

瞳分割偏光イメージングによる異方性表面テクスチャの観察

Observation of anisotropic surface texture by pupil-segmented polarization imaging

高知工大総研 D-Future[1]，株式会社デンケン[2] ○筒井 宣匡[1,2]，吉木 啓介[1]，池上 浩[1]

D-Future, Research Institute, Kochi Univ. of Tech.[1], Denken Co., Ltd[2]

○Norimasa Tsutsui[1,2], Keisuke Yoshiki[1] and Hiroshi Ikenoue[1]

E-mail: tsutsui.norimasa@kochi-tech.ac.jp

1. 背景

工場での製品検査等に用いられるマシンビジョンでは，微細パターンの観察ニーズが高まっているが，従来観察手法の微分干渉観察法はコスト面に課題がある．また，感度に異方性があり，その方位を任意には制御しづらい．

本研究では，ECB（Electrically Controlled Birefringence）液晶素子を用いた瞳分割偏光計測装置を用い，試料表面の異方性テクスチャに対する感度特性を柔軟に変化させる複数モード観察を試みた．

2. 原理

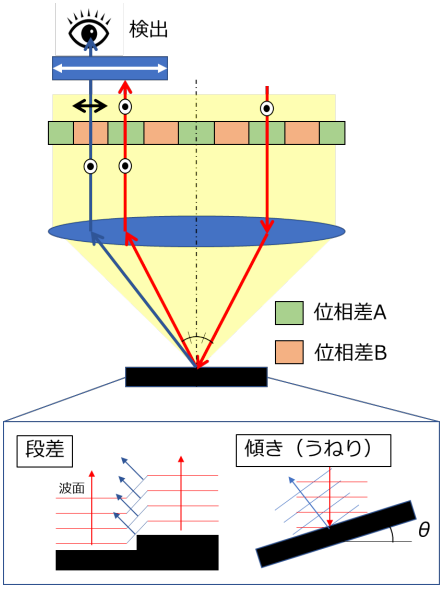


Fig.1. Observation via spatial polarization converter.

カメラ撮像面と試料の間に結像レンズを配置した同軸照明の装置を考え，Fig.1 のように対物レンズ背面に ECB 液晶素子を配置する．当該素子に一様偏光状態の照明光を通過させ偏光分布を生成し，入射光として試料に照射する．試料表面が平坦な場合と段差等のテクスチャがある場合とでは反射光に光路差が生じ，再度当該素子を通過する際に異なる偏光状態に変換され，偏光カメラによる抽出が可能となる．

抽出情報は当該素子の複屈折分布により異なり，目的の試料表面状況でのみ偏光に違いが生じる瞳分割パターンを設定することで，異方性テクスチャの選択的抽出観察が可能となる．

3. 実験方法及び結果

空間偏光変換用に複数のセグメントから成る ECB 液晶素子を用い，これを同軸照明カメラに装着した．各セグメントの複屈折率位相差を電圧印可により個別制御することで瞳分割パターンを切替えながら，金属表面を観察した．

観察した結果を Fig.2 示す．瞳分割パターンを感度に異方性を有する設定とした場合には，加工痕に対する感度を抑制し，設定方位に製作後に形成された傷を抽出できた．

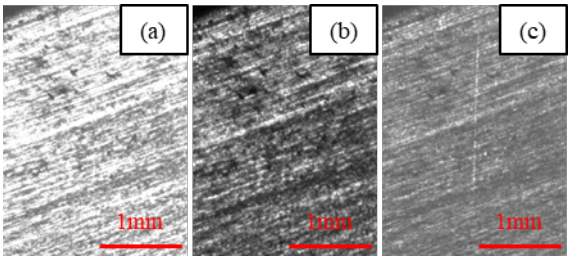


Fig.2. Observation in (a) normal camera, (b) dark field, and (c) anisotropic sensitivity modes.

4. 謝辞

本研究は公益財団法人 JKA 2025 年度機械振興補助事業（課題番号：2025M-495）の助成を受けて実施した．

© 2025年 応用物理学会

トモグラフィック分光法による複素屈折率と厚さの同時計測

Simultaneous measurement of Complex Refractive Index and thickness by Tomographic Spectroscopy

°小野寺 柊人, 村澤 聡笑, 橋本 夕芽, ファルジャナ ビルキス, *塩田達俊
°Shuto Onodera, Satoe Murazawa, Yume Hashimoto, Bilkis Farjana, *Tatsutoshi Shioda
埼玉大学理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Saitama University
*tshioda@mail.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

産業化が進む現代において、製造業における品質管理の高度化と安全性の担保の需要に伴い、工場などでの製品検査において、対象物を高速で非破壊かつ非侵襲で測定できる光学技術への注目が集まっている。また、耐久性や安全性を保障するうえで、形状検査による表面の異常検出だけでなく、物性の違いや密度の違いなどの検出するために内部構造までを高速かつ高精度に測定できるシステムが必要とされている。トモグラフィック分光法 [1]により、得られた干渉光スペクトルからサンプルの各界面からの振幅反射率スペクトルを求めることができる。さらに得られた振幅反射率スペクトルに対して Kramers-Kronig 変換を含めた解析を施すことで、各層での複素屈折率を手前の層の干渉信号だけで漸化式的に算出できる方法を確立した [2]。本稿では、シリコン基板を用いて実験を行い、各界面から得られた干渉データを解析することでシリコン基板の屈折率と厚さ、さらにはシリコンの次の空気の層の屈折率までを同時に算出できることを確認した。

2. 実験とシミュレーション

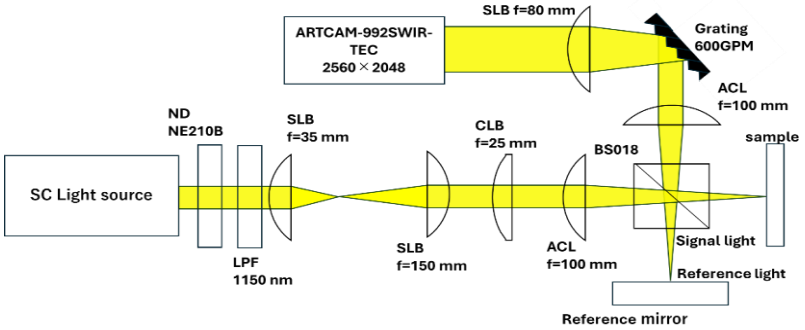


Fig.1 Optical setup

サンプルにシリコン基板を用いて Fig.1 の SD-OCT 系を作成し、参照鏡とシリコン基板による反射光を干渉させ、その干渉光を分光してカメラで測定した。得られたデータをフーリエ変換し界面ごとのスペクトルを得て、Kramers-Kronig 変換を行うことでシリコン基板と空気の層の屈折率を算出し、文献値と比較した。また、干渉光の位相差と得られた屈折率によりシリコン基板の厚さも導出した。その結果、2 層目のシリコンの屈折率 3(公称 3.5)、厚さ 0.6 mm(設計 0.5 mm)が実験的に得られた。

この実験の計算によりシリコン層の屈折率スペクトルを得た結果を Fig.2 に示す。実験同様の値が得られた様子がわかる。今後は実験光学系のセットアップの精度を向上させることで、さらにパラメーターの精度を改善する予定である。

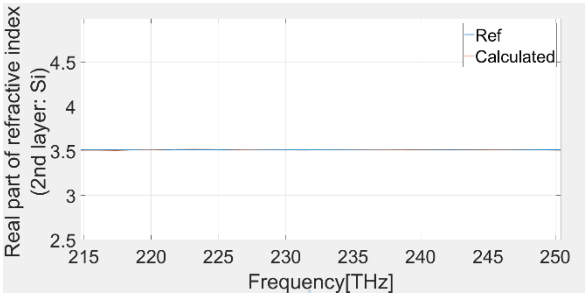


Fig.2 Refractive index spectrum obtained by proposed tomographic spectroscopy

1) M. Sakatsume, B. Q. Tuan, and T. Shioda, Proc. LST 50-27 (2012).
2) 梶山貴弘, 塩田達俊, Optics & Photonics Japan 2021, 29pE7 (2021).
3) M. Sakatsume, B. D. Thai, and T. Shioda, Proc. Optics Communications 574 (2025).
4) 村澤聡笑, 塩田達俊, Optics & Photonics Japan 2024, 30p3P13 (2024).

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.8 Terahertz technologies

[7a-N321-1~8] 3.8 Terahertz technologies

PR
スペクトルデザイン

[7a-N321-1]

Application of Machine Learning to the Time Waveform of a Transmitted THz Wave through a Single-layer Graphene

○Limin Zhao[1], Suguru Yamauchi[2], Shin-ichiro Yanagiya[2,3], Yasuhide Ohno[2], Masao Nagase[2], Yasuo Minami[1] (1.Nihon Univ., 2.Tokushima Univ., 3.pLED Inst., Tokushima Univ.)

[7a-N321-2]

Terahertz single-pixel imaging with enhanced edge by Tsurupica SPP

○(M1)Shusaku Mikami[1], Wataru Senzaki[1], Yusuke Odagiri[1], Adam Valles[2], Ohno Seigo[3], Katsuhiko Miyamoto[1,4] (1.Chiba Univ., 2.UAB, 3.Tohoku Univ., 4.MCRC,Chiba Univ.)

[7a-N321-3]

Analysis of anisotropic surface conduction thin films by terahertz ellipsometry

○Akihiro Okamoto[1], Masaya Nagai[1], Masaaki Ashida[1], Takashi Fujii[2] (1.Grad. Sch. of Eng. Sci., Osaka Univ, 2.Nippo Precision Co., Ltd)

[7a-N321-4]

Highly sensitive evaluation of thin carrier layers using s-wave Brewster effect in ATR THz spectroscopy

○(DC)Minxia Gan[1], Hiroaki Hanafusa[1], Yutaka Kadoya[1] (1.Hiroshima Univ.)

[7a-N321-5]

Effect of Silicon Nanowire Moth-Eye Structures on Millimeter-Wave Reflectance Reduction

○(M1C)Koki Shirakawa[1], Yoshiki Sugimoto[1], Shinya Kato[1] (1.Nagoya Institute of Technology)

[7a-N321-6]

Staggered two-dimensional resonant tunneling diode terahertz oscillator arrays

○Zhenling Tang[1], Safumi Suzuki[1] (1.Science Tokyo)

[7a-N321-7]

Terahertz Spectroscopic Observation of Phase Transition in Calcium Phosphates

○(D)Wangxuan Zhao[1], Haruto Kobashi[1], Hiroto Takahashi[2], Verdad C. Agulto[1], Kosaku Kato[1], Mihoko Maruyama[2], Yutaro Tanaka[2], Yusuke Mori[2], Masashi Yoshimura[1], Makoto Nakajima[1] (1.Univ. of Osaka ILE, 2.Univ. of Osaka GSE)

[7a-N321-8]

Terahertz parametric generator using a pump source

○Sota Mine[1,2], Kodo Kawase[2], Kosuke Murate[2] (1.RIKEN, 2.Nagoya Univ.)

単層グラフェンの透過 THz 波の時間波形に対する機械学習の適用

Application of Machine Learning to the Time Waveform of a Transmitted THz Wave through a Single-layer Graphene

日本大 [1]，徳島大 [2]，徳島大 pLED [3]

○(M2) 趙 立民 [1]，山内 俊 [2]，柳谷 伸一郎 [2,3]，大野 恭秀 [2]，永瀬 雅夫 [2]，南 康夫 [1]

Nihon Univ.[1], Tokushima Univ.[2], Institute of Post-LED Photonics, Tokushima Univ.[3]

○(M2) L. Zhao[1], S. Yamauchi[2], S. Yanagiya[2,3], Y. Ohno[2], M. Nagase[2], Y. Minami[1]

E-mail: ciri24005@g.nihon-u.ac.jp

近年、テラヘルツ時間領域分光法(THz time domain spectroscopy, THz-TDS)を用いた分子、原子、キャリアのテラヘルツ波への応答の研究が注目されている。本研究では、THz-TDS を用いて単層グラフェンのイメージングを行い[1,2]、主成分解析(Principal component analysis, PCA)によってイメージ内の評価を行った結果に基づき機械学習へ適用した。

本研究の測定対象として SiC 熱分解法で作製した単層のグラフェンを用いた[3]。試料のサイズは 10×10 mm^2、シートキャリア密度は 5.1×10^{12} cm^{-2}、キャリアタイプは N である。THz-TDS 装置(TAS7500TS, Advantest)を使用し、グラフェン試料を含む領域(15×15 mm^2)の透過 THz 波の時間領域波形を 1 mm 間隔で測定した。各点での測定結果からパワースペクトルを算出し、SiC 基板上のグラフェンの透過率をイメージングしたものを Fig. 1 に示す。金属製のホルダーを用い、図中の白線で囲まれた領域に試料を設置した。装置で得られた時間波形を図形化し、典型的な時間波形は Fig. 2 に示す。図形のピクセルを 0〜1 に正規化する。正規化された図形に対しニューラルネットワーク(CNN)を使用し、Air, Sample, Holder にラベルを設定し、該当するデータをそれぞれのラベルに分割し、決定木は 1000、深さは 200、バッチサイズは 32 で設定し、学習率を 0.001, 0.0001, 0.00001 をそれぞれ設定し、機械学習を行った。学習率が 0.0001 のときの判定結果が最も妥当なものとなった（Fig. 3）。

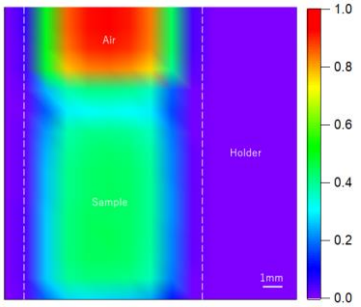


Fig. 1 Transmission THz image of graphene on SiC substrate. The high transmission area is the point where the THz wave has transmitted only through dry air, while the low transmission area is where the metal holder is installed.

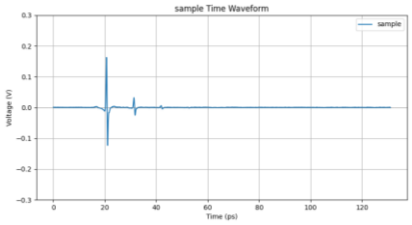


Fig. 2. Typical time waveform obtained with THz-TDS.

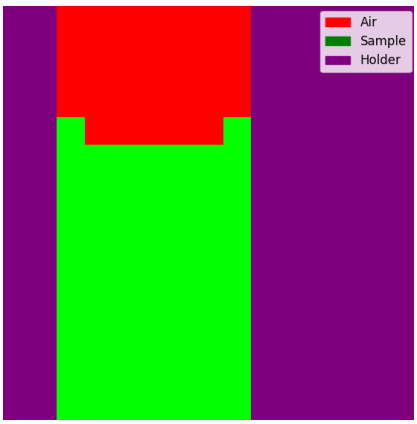


Fig. 3 Visualization of machine learning results versus time waveform. We see that the error is in the middle region between the sample and the air.

[1] K. S. Novoselov *et al*., Science **306**, 666 (2004).

[2] 山内ほか、応用物理学会秋季学術講演会 22p-P02-7, 講演予稿集 p. 03-453 (2022).

[3] K. Kobayashi *et al*., Appl. Phys. Express **8**, 036602 (2015).

© 2025年 応用物理学会

シングルピクセルイメージング装置を用いたテラヘルツ帯でのエッジ強調効果の測定

Terahertz single-pixel imaging with enhanced edge by Tsurupica SPP

千葉大院融合[1]，UAB[2]，東北大院理[3]，千葉大分子キラリティー研[4]

三上修作[1]，先崎航[1]，小田切雄介[1]，Adam Vallés[2]，大野誠吾[3]，宮本克彦[1,4]

M. Mikami[1], W. Senzaki[1], Y. Odagiri, A. Valles[2], S. Ohno[3], K. Miyamoto[1,2]

Chiba Univ.[1], UAB[2], Tohoku Univ.[3], MCRC, Chiba Univ.[4]

*k-miyamoto@faculty.chiba-u.jp

われわれは，高感度な分光イメージングを実現するテラヘルツ（THz）領域向けシングルピクセルイメージング（SPI: Single Pixel Imaging）装置の開発に取り組んでいる。特に，金属の広範な誘電特性を利用したランダムメタルマスクを用いることで，グルコースの広帯域分光イメージングに成功している[1]。本研究では，エッジ強調効果を利用した位相検出を目的に，螺旋位相フィルタリング[2]に着目した。近年この手法を用いたマルチ光渦発生の報告がなされている[3]。これに対し，本研究の特徴は THz 波の振幅強度のみを検出しているにもかかわらず，螺旋位相板に起因する相対的な位相情報の取得が可能な点にある。

螺旋位相フィルタリングは，フーリエフィルターに螺旋型位相板を用いた手法である。Figure 1 に，本実験光学系を示す。1.5μm 帯 2 波長光を有機非線形光学結晶 DAST に入射し，差周波発生により THz 光（最大出力 3mW@4THz）を発生させた。その後，THz 光に 4f 光学系を適用し，集光したフーリエ変換面に Tsurupica 螺旋位相板[4]を配置した。逆フーリエ変換面に設置されたランダムメタルディスクと常温検出器（PHLUXi 社製 PYD-1）によってターゲットのエッジ強調効果を観測する。マスクの回転（0.1° 毎）および動径方向の移動（1 mm）を組み合わせた計 18000 通りの異なるパターンを用いた。周波数 4 THz において再構成された画像を Fig.2 に示す。測定範囲は 32×32mm 四方，解像度 320 × 320 pixel である。本システムにより，円形ターゲットのエッジ強調 SPI 画像の取得に成功した。今後は，螺旋位相板に起因した位相情報の取得を目指す。

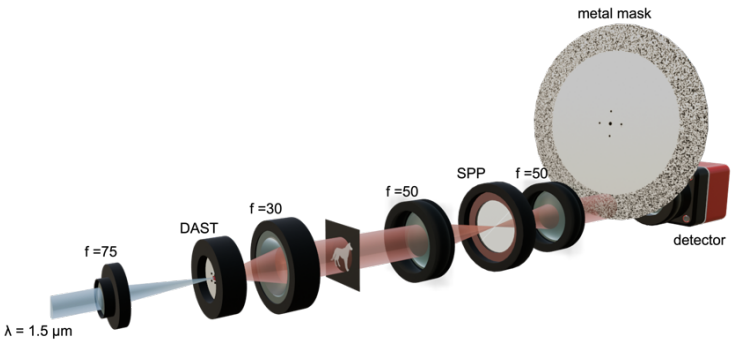


Fig. 1 Experimental setup for THz-SPI with spiral phase plate filter.

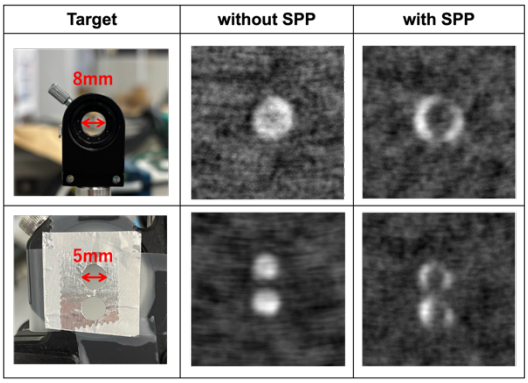


Fig. 2 Experimental SPI reconstruction using 4 THz radiation from DAST-DFG.

参考文献
[1] A. Vallés et al., Optics Express, 28, 28868 (2020).
[2] M. Ritsch-Marte, Philos.Trans. R Soc. A 375, 20150437 (2017).
[3] Y. Tokizane et al., Appl. Phys. Lett., 126, 191106 (2025).
[4] K. Miyamoto et al., Appl. Phys. Lett., 104, 261104 (2014).

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツエリプソメトリによる異方性のある表面伝導薄膜の解析

Analysis of anisotropic surface conduction thin films by terahertz ellipsometry

大阪大学大学院基礎工学研究科[1]，日邦プレシジョン[2]

○(M2)岡本 章宏[1]，永井 正也[1]，芦田 昌明[1]，藤井高志[2]

Grad. Sch. of Eng. Sci., Osaka Univ.[1], Nippo Precision Co., Ltd.[2]

◦Akihiro Okamoto[1], Masaya Nagai[1], Masaaki Ashida[1], Takashi. Fujii[2]

E-mail: a-okamoto@laser.mp.es.osaka-u.ac.jp

THz 磁気光学エリプソメトリは、磁場印加によって変化する複素反射率の偏光依存性を測定することで、半導体などの伝導キャリアの磁場で変調された光学伝導度σ_{xx}, σ_{xy}を評価する手法である [1]。この技術を用いることで伝導キャリアのタイプ・密度・散乱時間・有効質量などの情報を、非接触かつ独立に取得することができる。本手法はバルク材料や誘電体多層膜に対して適用されており、Schubert らによって提案された 4×4 行列法[2]に基づいて解析される。しかし、磁場で誘起された複屈折の寄与の取り扱いが複雑であり、薄膜を考えると解析が極めて煩雑になる[2]。

我々は最近、波長λ（1 THz ではλ ＝300 μm）に比べて十分に薄い（d ＜1 μm）等方的な伝導薄膜に対して適用できる「表面伝導モデル」[3] を提案した。これは薄膜の誘電応答を基板表面に流れる表面電流として扱うモデルで、複素反射率を表面伝導度の関数として簡単に記述できる。このアプローチを異方性がある伝導薄膜に拡張し、ドープ半導体薄膜に対する THz 磁気光学エリプソメトリの測定データを解析した。その結果、得られた光学伝導度スペクトルが DC 伝導度やホール測定と整合することを見出した [4]。一方で高い表面伝導度を持つ薄膜では磁場誘起反射成分r_{ps}, r_{sp}において、4×4 行列法との間に差異が生じることが確認された。

この乖離を解消するためにモデルの再検討を行い、電磁場の境界条件に表面伝導を組み込んだ形で4×4行列法の枠組みに導入した。その結果、$Z_0\sigma_{xy} \ll 1$の場合において、複素反射率$r_{pp}, r_{ss}, r_{ps}(=r_{sp})$を以下のように導出した。

$$r_{pp} = \frac{n_t \cos\theta_i + Z_0\sigma_{xx}\cos\theta_i\cos\theta_t - n_i\cos\theta_t}{n_t \cos\theta_i + Z_0\sigma_{xx}\cos\theta_i\cos\theta_t + n_i\cos\theta_t}, \qquad r_{ss} = \frac{n_t \cos\theta_i + Z_0\sigma_{xx} - n_i\cos\theta_i}{n_t \cos\theta_i + Z_0\sigma_{xx} + n_i\cos\theta_i}$$

$$r_{ps} = r_{sp} = \frac{-2n_i Z_0\sigma_{xy}\cos\theta_i\cos\theta_t}{(n_i\cos\theta_i + n_t\cos\theta_t + Z_0\sigma_{xx})(n_t\cos\theta_i + Z_0\sigma_{xx}\cos\theta_i\cos\theta_t + n_i\cos\theta_t)}$$

講演では、Ref[4]で報告したGaAs薄膜の実験データを用いて、本改良モデルによる解析を行い、その結果が従来の 4×4 行列法による解析結果と一致することを示す。これにより、本モデルの有効性および今後の応用可能性について議論する。

[1] K. Yatsugi, *et al*. Appl. Phys. Lett. 98.21 (2011)

[2] M. Schubert et al. JOSA A 33.8 (2016)

[3] M. Nagai, et al. J Infrared Milli Terahz Waves 45, 949 (2024)

[4] 岡本章宏他、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 15a-K504-3 (2025)

© 2025年 応用物理学会

全反射減衰 THz 分光における s 波 Brewster 現象を用いた薄膜キャリア層の高感度評価

Highly sensitive evaluation of thin carrier layers using s-wave Brewster effect in ATR THz spectroscopy

広島大学大学院 先進理工系科学研究科 ○干 敏霞，花房 宏明，角屋 豊

Grad. School of Adv. Sci. Eng, Hiroshima Univ., ○Minxia Gan, Hiroaki Hanafusa, Yutaka Kadoya

E-mail: d232487@hiroshima-u.ac.jp

1. 背景と目的

ワイドバンドギャップ半導体は高電力・高周波・耐放射線用途において注目されているが，デバイス性能向上には表面近傍への高濃度ドーピングによる高品質オーミックコンタクトの形成が不可欠である．このため，100 nm 程度のキャリア層における輸送特性の非破壊評価が重要な課題となっている．テラヘルツ時間領域分光エリプソメトリー (THz-TDSE) は非接触評価法として有望であるが，従来法では薄膜キャリア輸送に対する感度が低く，特に 1 THz 程度の周波数では DC 導電率 (σ_{DC}) のみ評価可能で，キャリア密度 (N_C) と移動度の分離が容易でない[1]. 本講演では，従来のエリプソメトリーとは逆に s 偏光に注目する全反射減衰 TDSE 法 (sATR-TDSE) を用いた高感度測定法を提案する．

2. シミュレーション

sATR-TDSE はプリズムを用いた全反射配置とし，s 偏光ブルースター効果[2]により低周波領域で表面キャリアとの相互作用を強化する[3]．これにより，σ_{DC} に対する感度が向上するだけでなく，σ_{DC} が同じ場合でも振幅情報のみから N_C と移動度の違いを識別できる可能性がある．図 1 に本研究のモデルを示す．プリズム材料に Si を用い，表面に 200 nm のドープ層を有する SiC を対象とした．同じ σ_{DC} = 64 S/cm で N_C が 10 倍異なる 2 種類の SiC サンプルについてシミュレーションを実施した．図 2 に(a) 従来 TDSE および(b) sATR-TDSE による反射係数の入射角依存性を示す．図 2 (b)において s 偏光反射係数がゼロとなる角度は s 偏光ブルースター角 (θ_{Bs}) に対応する．従来法では両サンプルの差はほとんど見えないが，sATR-TDSE の s 偏光反射係数は N_C に対する感度が高く，特にθ_{Bs}および全反射臨界角付近においてその差が顕著に現れている．

3. 実験

シート導電率が 2.36 mS (従来法で測定) の SiC サンプルに対して，sATR-TDSE による測定を実施した．本測定では，全反射臨界角に相当する入射角 67° で測定を行った．図 3 に実験結果を示す．破線は，シート導電率を 2.36 mS に固定し，N_Cが 2 倍異なるパラメータを用いて計算した結果である．実験結果より，σ_{DC}に対して，sATR-TDSE は従来 TDSE に比べて約 7 倍の感度向上を確認した．さらに，従来 TDSE の結果と組み合わせることで，位相情報を用いず振幅情報のみから，3×10¹⁸ cm⁻³および 6×10¹⁸ cm⁻³の N_Cの識別が可能であることが見て取れる．現時点ではキャリブレーションで生じたと思われる異常なピークがあり，また分解能に限界があるが，今後のシステム改良により，より高濃度領域での分離も期待される．

参考文献

[1] H. Watanabe, et al. Phys. Stat. Solidi (b), 2024: 2400017. [2] M. Gan, et al. Optics Express, 2025, 33: 9306. [3] M. Gan, et al. 49th IRMMW-THz. IEEE, 2024.

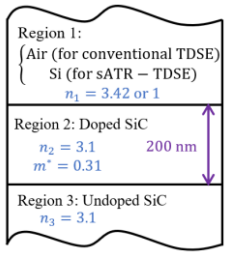


図 1. 計算モデル

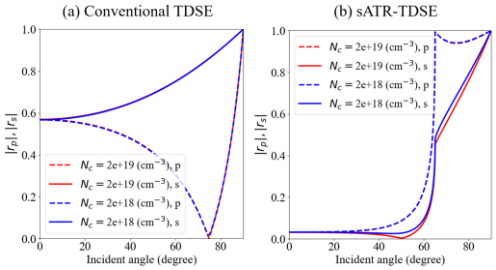


図 2. $|r_p|$ and $|r_s|$ of the samples with same conductivity at 1 THz.

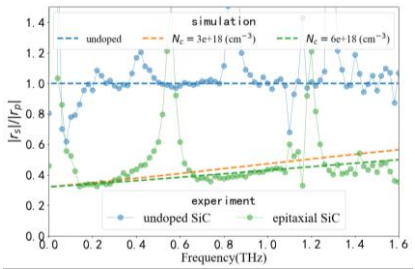


図 3. sATR-TDSE での予想結果と実験結果の対照

シリコンナノワイヤモスアイによるミリ波帯の反射率低減効果

Effect of Silicon Nanowire Moth-Eye Structures on Millimeter-Wave Reflectance Reduction

名工大院工　○(M1C) 白川　滉基 ，杉本　義喜 ，加藤　慎也

Grad. Eng., Nagoya Inst. Tech., ○(M1C) Koki Shirakawa , Yoshiki Sugimoto , Shinya Kato

E-mail: cmt13095@nitech.jp

近年、通信機器の高集積化・小型化の要求に伴い、通信モジュールに組み込まれるアンテナ系部品には、高利得と薄型化の両立が求められている。誘電体レンズアンテナは高い利得を容易に実現できるが、従来のレンズアンテナは誘電率の低い樹脂材料を主成分として用いており、低誘電率のためレンズが厚く、薄型化には限界がある。この課題に対し、本研究では誘電率の高いシリコンに着目し、その表面にシリコンナノワイヤ（SiNW）からなる微細構造を形成することで、反射率を低減する手法を検証した。なお本研究では平面ウエハ上でのシリコンナノワイヤモスアイの形成とミリ波帯の反射率評価を行った。

シリコンは誘電率が高いため、空気との境界面の波動インピーダンス不整合によって強い反射を生じる。これを解決する手法として、本研究では SiNW による表面構造により空気からシリコンへの誘電率遷移層を導入し、境界面での反射を抑制する「疑似モスアイ構造」の効果を利用する。

SiNW の作製には、大面積適用が可能で、かつコスト効率に優れる metal-assisted chemical etching 法を用いた。まず、シリコンウエハ（N 型、＜100＞、160~180 Ω・cm、525 ㎛）を HF と超純水で前処理し、表面酸化膜を除去した。続いて、超純水、HF（5.4M）、および $AgNO_3$（0.0007、0.0014、0.0021、0.0028 mol）からなる溶液の混合溶液にウエハを浸漬することで、銀ナノ粒子を無電解メッキにより析出させた。これが触媒となり、次に水、HF（5.4M）、および H_2O_2の混合液によるエッチング処理を行うことで、銀粒子直下のシリコンが選択的に溶解除去され、垂直方向にナノワイヤが形成された。その後の乾燥工程においては、表面張力によりナノワイヤが局所的に束化・凝集し、自然発生的に凹凸のある疑似モスアイ構造が表面に形成された。最後に硝酸処理により銀を除去し、SiNW 構造が完成した。

得られた構造を走査型電子顕微鏡（SEM）により断面観察した結果を Figure 1 に示す。SiNW の長さは約 100 µm、直径は 0.2〜2 µm の範囲であり、構造全体のピッチ（疑似モスアイの幅）はシリコンウエハの表面からの観察により 5〜50 µm 程度と確認された。また、SiNW 付きのウエハの重さを計測し Si の密度から SiNW の体積割合も算出した。これらの構造を持つウエハに対して、ベクトルネットワークアナライザー（VNA）を用い、250〜310 GHz のミリ波帯域における S パラメータを計測し、反射率を算出した。

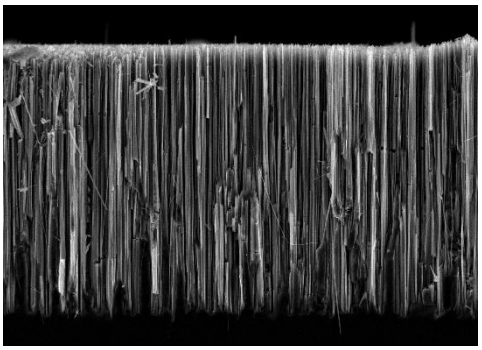


Figure 1 Cross-sectional SEM image of SiNWs

実験結果として、SiNW モスアイ構造を有しない通常のシリコンウエハでは、平均して 33%程度の高い反射率が観測されたのに対し、SiNW 構造を形成したウエハでは、最大で 3%にまで反射率が低減された。このことから、適切に形成された SiNW による微細構造が、ミリ波帯における反射損失の抑制に有効であることが実証された。体積割合は硝酸銀の量が大きくかかわっており、体積割合と反射率の関係を評価することにより SiNW の密度も反射率に大きく影響を及ぼしていることが判明した。

今後は、反射率をさらに低減するためのワイヤ長、密度、配列パターンなどの最適化を進めるとともに、最終的には曲面レンズへの展開可能性についても検討していく予定である。その曲面上での条件を最適することにより高指向性のレンズ作製を目指す。

本研究は総務省 FORWARD の委託(JPMI240610005)を受けたものです.

© 2025年 応用物理学会

Staggered two-dimensional resonant tunneling diode terahertz oscillator arrays

科学大　○唐 振凌，鈴木 左文 [2]

Science Tokyo, ○Zhenling Tang, Safumi Suzuki

E-mail: tang.z.ae@m.titech.ac.jp

Resonant tunneling diodes (RTDs) are considered promising candidates to bridge the terahertz (THz) gap, owing to advantages such as compactness and room-temperature operation [1, 2]. However, a major challenge for RTD THz sources is the limited output power, highlighting the need for large-scale, coherent RTD oscillator arrays. In particular, in large-scale arrays, two-dimensional (2D) array configurations are preferred over one-dimensional (1D) arrangements due to their superior beam quality. Therefore, achieving coherent, large-scale 2D RTD arrays is essential for further enhancing the performance of RTD-based THz sources. This work demonstrates a 2D RTD THz oscillator array to enable efficient power combination.

The design of the arrayed device is illustrated in Fig. 1. Common resistors placed between adjacent slot resonators effectively lock them into the anti-phase mode, while the combined power output is enhanced since the two RTDs involved are oriented in opposite directions. A 2D array is thus formed by arranging the slot resonators in a staggered configuration. Simulation results confirm that the desired anti-phase coupling between adjacent RTDs can be maintained with array scale-up. Two array scales, consisting of four (Fig. 2) and eight elements respectively, have been fabricated. All fabricated devices exhibit coherent, single-peak oscillation, with peak frequencies of 581 GHz for the four-element arrays and 596 GHz for the eight-element ones. In addition, output power exceeding 0.8 mW is achieved at 397 GHz, maintaining around 0.5 mW at frequencies above 500 GHz. Although the output power of the eight-element array is not significantly higher than that of the four-element array due to the inherent amplitude non-uniformity, this limitation is expected to be mitigated through intensive array scaling and boundary condition engineering for the outer RTDs. With further scaling up, the proposed device is anticipated to deliver high-power, high-directivity THz radiation within a compact chip footprint.

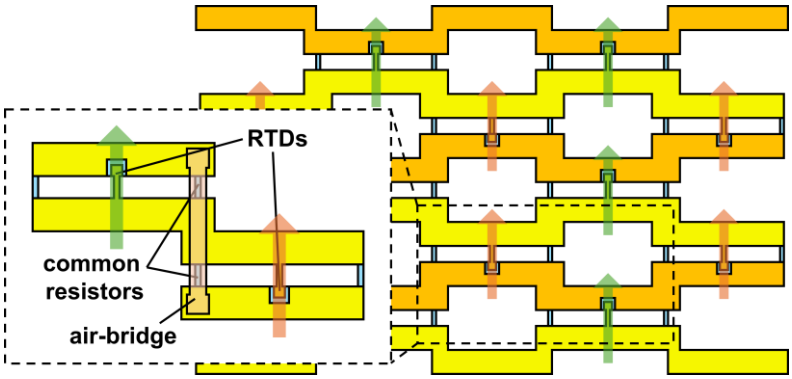


Fig. 1. Design of the array device, electrodes in the same color are connected by air-bridges.

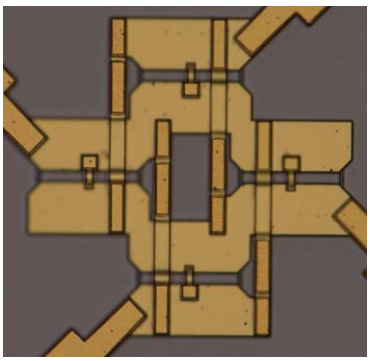


Fig. 2. Micrograph of the fabricated four-element array.

[1] M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* 47, 4375-4384 (2008). [2] S. Suzuki and M. Asada, *Appl. Phys. Express* 17, 070101 (2024).

© 2025年 応用物理学会

Terahertz Spectroscopic Observation of Phase Transition in Calcium Phosphates

Wangxuan Zhao[1], Haruto Kobashi[1], Hiroto Takahashi[2], Verdad C. Agulto[1], Kosaku Kato[1], Mihoko Maruyama[2], Yutaro Tanaka[2], Yusuke Mori[2], Masashi Yoshimura[1], Makoto Nakajima[1]

[1] Institute of Laser Engineering, The University of Osaka, [2] Graduate School of Engineering, The University of Osaka
E-mail: nakajima.makoto.ile@osaka-u.ac.jp

1. Introduction

Hydroxyapatite (HAp, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) is essential for bone formation, and studying its crystal growth and phase transitions helps understand bone remodeling. The phase transition of HAp involves a range of calcium phosphate compounds, which comprise a family of materials and minerals containing calcium ions (Ca^{2+}) and inorganic phosphate anions. It has been observed that the formation process typically begins with the nucleation of dicalcium phosphate dihydrate (DCPD, $CaHPO_4{\cdot}2H_2O$), which primarily governs the nucleation rate. This is followed by a rapid transformation into either octacalcium phosphate (OCP, $Ca_8H_2(PO_4)_6{\cdot}5H_2O$) or HAp, which then control the crystal growth. Furthermore, OCP can subsequently convert into apatite [1].

Conventional techniques such as X-ray diffraction are limited by sample form requirements. In contrast, terahertz/far-infrared spectroscopy enables non-destructive analysis due to its low photon energy and rich spectral information. Moreover, most existing studies on infrared spectroscopy have concentrated on the mid-infrared region. However, the absorption characteristics of crystalline calcium phosphate phases in the far-infrared region remain largely unexplored. Filling this gap in the far-infrared spectrum will contribute significantly to the identification of calcium phosphate crystal phases.

In this study, far-infrared Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy was employed to investigate the growth mechanism of bone-related calcium phosphates by analyzing the terahertz absorption characteristics of synthetic DCPD, OCP, and HAp, as well as DCPD samples subjected to different heating durations.

2. Methodology

To synthesize calcium phosphate phases, DCPD powder was added to a heated mixture of $CaCl_2$, phosphate buffer, and acetic acid buffer and stirred at 70°C. Samples were collected at various time points (60 min, 120 min, 1 day, 2 days, and 3 days), then dried at 37°C for one day. For FTIR measurements, each sample was mixed with a transparent matrix powder to prepare a 3 wt.% blend, homogenized, and pressed into 13 mm pellets at 200 kgf/cm² for 20 s using a hydraulic press. Vacuum was applied for 5 min before and after pressing. 5 wt.% reference pellets of pure DCPD, OCP, and HAp were also prepared. Spectra were measured from 2.0–12.0 THz using the Jasco FT/IR-660 Plus FTIR Spectrometer.

3. Results

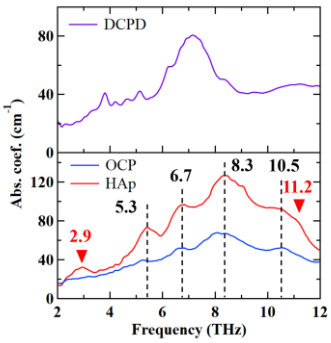


Fig 1. Absorption coefficient spectra of 5 wt.% DCPD, OCP, HAp.

Figure 1 presents the absorption coefficient spectra of 5 wt.% reference samples: DCPD, OCP, and HAp. OCP and HAp exhibit similar spectral profiles with characteristic peaks at 5.3, 6.7, 8.3, and 10.5 THz. However, HAp shows two additional distinct peaks at 2.9 and 11.2 THz, setting it apart from OCP. In contrast, DCPD's absorption spectrum differs significantly from those of both OCP and HAp.

The absorption coefficient spectra of samples collected at different stages of the calcium phosphate phase transition reveal important trends. No characteristic absorption peaks associated with DCPD were observed, indicating that it was nearly fully converted after 60 minutes of heating. The spectra recorded at 60 and 120 minutes closely matched that of OCP, suggesting that the transformation from DCPD to OCP occurred predominantly during this period. Absorption peaks at 2.9 and 11.2 THz, which were attributed to HAp, began to appear after one day of heating, indicating the initial formation of HAp and its gradual increase over time.

4. Conclusions

Terahertz/far-infrared spectroscopy revealed time-dependent phase transitions from DCPD to OCP and HAp, highlighting the potential of this method for analyzing bone-related calcium phosphates

Acknowledgment

This work was supported by JST SPRING, Grant Number JPMJSP2138.

References

[1] A. Carino, et al., Acta Biomater. **74** (2018) 478-488.

© 2025年 応用物理学会

励起光源 1 台のみで構成されるテラヘルツパラメトリック光源

Terahertz parametric generator using a pump source

理研[1], 名大院工[2], ○嶺 颯太[1,2], 川瀬 晃道[2], 村手 宏輔[2]

RIKEN[1] ,Nagoya Univ.[2], ○Sota Mine[1,2], Kodo Kawase[2], Kosuke Murate[2]

E-mail: sota.mine@riken.jp

光注入型テラヘルツ (THz)パラメトリック発生器 (is-TPG) は、高ピークパワー・波長可変な単色 THz 光源として非破壊検査への応用研究が進んでいる [1]。しかし、注入光源に高価かつ大型な波長可変レーザーを必要とする点が普及の障壁となっている。そこで本研究では、励起光源 1 台のみで構成される小型 is-TPG の開発を行った。高強度な励起光を $MgO:LiNbO_3$ 結晶に入射すると、パラメトリック蛍光により広帯域な THz 波およびストークス光が連続的な角度分散を伴って発生する。ここで $MgO:LiNbO_3$ 結晶に 2 本の励起光を角度を持たせて入射することで、両者の中間角度で発生するストークス光が自己注入光として作用し、THz 波が狭線幅化される。このとき、2 本の励起光の角度を変更すれば、中間角度で発生するストークス光の波長が変化するため、THz 波の周波数可変性が得られる。

Fig. 1 に実験概略図を示す。μ-chip Nd:YAG レーザー（1.4 mJ/pulse, 600 ps）から発生した励起光をビームスプリッタで 2 分岐し、シリンドリカルレンズ（f = 75 mm）で集光しつつ MgO: LiNbO3 結晶に角度を持たせて入射した。両励起光の中間位置で発生するストークス光を CMOS カメラで観測し、さらに THz 波出力を焦電検出器で評価した。その結果、励起光 1 本のみではストークス光および THz 波は発生せず、2 本同時入射時にのみストークス光および約 3 nJ/pulse（ピークパワー約 15 W）の THz 波が観測された (Fig. 2)。以上より、高価な注入光源を不要とする簡易型 is-TPG の構築に成功した。

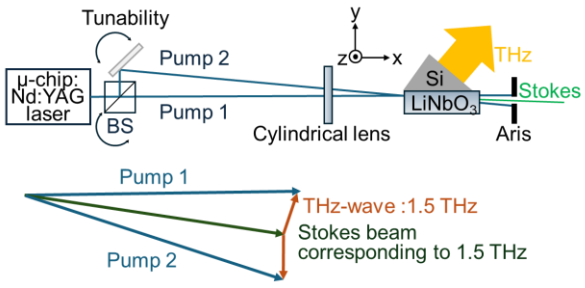


Fig. 1 Experimental setup of injection-seeded terahertz parametric generator using a pump source

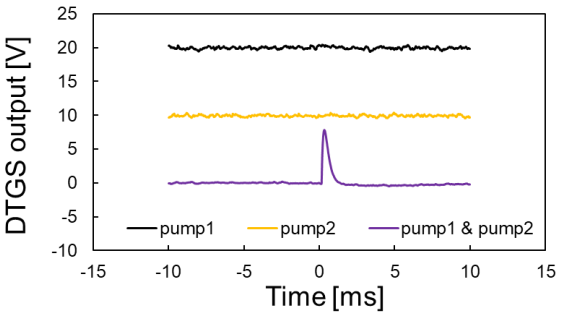


Fig. 2 THz output dependent on the incident condition of thepump beams.

謝辞

本研究は JST 先端国際共同研究推進事業 JPMJAP2340、創発的研究支援事業 JPMJFR212J、科研費 22H00212、22KJ1596、24K00943 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] K. Murate, S. Mine, and K. Kawase, IEEE J. Quantum Electron. 29, 1–13 (2023).

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.8 Terahertz technologies

[7p-N321-1~15] 3.8 Terahertz technologies

PR
スペクトルデザイン

[7p-N321-1]

[The 58th Young Scientist Presentation Award Speech] Broadband sub-terahertz absorber with a good thermal response – application to sub-terahertz power meter in free space –

○Genki Kuwano[1], Hokari Ryohei[1], Kazuma Kurihara[1], Yuya Tojima[1], Moto Kinoshita[1] (1.AIST)

[7p-N321-2]

Phase Measurement of Terahertz-wave using Parametric Wavelength Conversion

○Shinichiro Hayashi[1], Seigo Ohno[2], Katsuhiko Miyamoto[3], Kouji Nawata[4], Yoshiharu Urata[5], Jun-ichi Shikata[6], Norihiko Sekine[1] (1.NICT, 2.Tohoku Univ., 3.Chiba Univ., 4.TOHTECH, 5.PHLUXi, 6.NihonUniv.)

[7p-N321-3]

Evaluation of the Pockels effect and the Stark effect in electro-optic polymers by the transmission ellipsometric method without an aperture

○Toshiki Yamada[1], Takahiro Kaji[1], Chiyumi Yamada[1], Akira Otomo[1] (1.NICT)

[7p-N321-4]

Single-shot Broadband Detection of Terahertz Waves in Bulk LN Crystal

○(D)Gabriel Gandubert[1], Joel Edouard Nkeck[1], Sota Mine[2], Jonathan Lafreniere-Greig[1], Kosuke Murate[2], Francois Blanchard[1] (1.ETS, 2.Nagoya University)

[7p-N321-5]

Tunable terahertz perfect vortex generation based on the DAST-DFG

○(M1)Yuzuru Sakai[1,2], Mizuki Adachi[1,2], Hayato Fujishiro[1,2], Katsuhiko Miyamoto[1,2] (1.Chiba Univ., 2.Chiba Univ. MCRC)

[7p-N321-6]

Terahertz wave up-conversion detection based on a DAST crystal

○HAYATO FUJISHIRO[1], Shinya Sekizawa[1], Mizuki Adachi[1], Yuzuru Sakai[1], Koki Irie[1], Adam Valles[2], Katsuhiko Miyamoto[1,3] (1.Chiba Univ., 2.UAB, 3.Chiba Univ. MCRC)

[7p-N321-7]

Metasurface with Microcantilever-Integrated Complementary Split Ring Resontors for Tunable THz Third-Harmonic Generation

○(D)Mitali Sahu[1], Partha Roy Chaudhuri[1] (1.Indian Institute of Technology Kharagpur)

[7p-N321-8]

Tolerance of Phase Noise in 64QAM THz Wireless Links

○(P)Bowen LIU[1], Takasumi Tanabe[1] (1.Keio University)

[7p-N321-9]

Study of Terahertz-based SS-OCT (Swept Source optical coherence tomography) system

○Toshihiko Ouchi[1], Hidetoshi Minami[2], Takanari Kashiwagi[2] (1.Tokai Univ., 2.Univ. of Tsukuba)

[7p-N321-10]

Homodyne detection with IQ demodulation using circularly polarized terahertz waves

○Shunto Ommura[1], Adrian Dobroiu[1], Safumi Suzuki[1] (1.Inst. Sci. Tokyo)

[7p-N321-11]

Compact imaging system using resonant tunneling diodes

○Eriko Umetsu[1], Norimasa Takahashi[1], Ryoichi Fukasawa[1] (1.Spectra Design Ltd.)

[7p-N321-12]

Study on optical injection locking using microcomb-driven THz for narrowing the linewidth of resonant tunneling diodes

○Tatsunoshin Mori[1], Miezel Talara[2], Yu Tokizane[2], Eiji Hase[2], Takeshi Yasui[2] (1.Tokushima University, 2.Institute of Post-LED Photonics, Tokushima Univ.)

[7p-N321-13]

Measurement of concave or convex sample by 0.3 THz band spiral interferometry

○(M2)Kohei Yamaguchi[1], Yu Tokizane[2], Eiji Hase[2], Takeshi Yasui[2] (1.Tokushima Univ., 2.pLED Tokushima Univ.)

[7p-N321-14]

Circular polarization selectors in the terahertz region consist of moiré metasurfaces

○(M1)Gaku Oritani[1], Uina Chiba[1], Masaki Sakai[1], Takeo Minari[2], Seigo Ohno[3], Katsuhiko Miyamoto[1,4] (1.Chiba Univ., 2.NIMS, 3.Tohoku Univ., 4.Chiba Univ. MCRC)

[7p-N321-15]

Terahertz orbital angular momentum dichroism of moiré metasurfaces

○Uina Chiba[1], Gaku Oritani[1], Masaki Sakai[1], Takeo Minari[2], Seigo Ohno[3], Katsuhiko Miyamoto[1,4] (1.Chiba Univ., 2.NIMS, 3.Tohoku Univ., 4.Chiba Univ. MCRC)

熱応答性に優れたサブテラヘルツ吸収体
― 空間型サブテラヘルツパワーメーターへの適用 ―

Broadband sub-terahertz absorber with a good thermal response
– application to sub-terahertz thermal power meter in free space –

産総研，○桑野 玄気，穂苅 遼平，栗原 一真，東島 侑矢，木下 基

AIST, ○Genki Kuwano, Ryohei Hokari, Kazuma Kurihara, Yuya Tojima, Moto Kinoshita

E-mail: g. kuwano@aist.go.jp

電磁波の出力の絶対値を求める方法として、吸収体で電磁エネルギーを熱に変換する熱式が知られている[1]。正確な出力測定を実現するためには、99%超の吸収体で電磁波を吸収し、光源と受光部間の多重反射を抑制することが重要となる。また、利便性から数秒の測定時間が理想である。しかしながら、例えば電波暗室用のピラミッド吸収体は 99%以上の吸収率を達成できる一方、波長相当の高さ、すなわち数ミリメートルの高さが必要となる。結果として可視・赤外域の吸収体と比べて熱容量が増大し、検出感度と応答時間の低下を引き起こす。そこで本研究では、吸収率と熱応答性を両立する吸収体の開発に着手してきた。

図 1 に提案した吸収体の模式図を示す[2,3]。吸収体は 3D プリンターで造形した樹脂の中空ピラミッド構造を骨組みとし、その外面および裏面が表皮深さより薄い気金属膜で連続的に覆われていることを特徴とする。本吸収体は構造効果と金属膜による導電損失で 99%以上の吸収率を達成できるため、樹脂の誘電損失が不要となり、樹脂部の熱容量を物理的強度が保てる極限まで小さくできる。さらに金属膜の熱伝導率は樹脂よりも 1 桁以上大きいため、金属で発生した熱は樹脂よりも金属部へ多く流れ込み、樹脂単体と比較して吸収体底面が熱平衡に達する時間をさらに短縮できる。これらの効果により従来困難であった高い吸収率と良好な熱応答性を両立した[3]。本講演では開発した吸収体の詳細に加え、パワーメーターへの実装結果について紹介する。

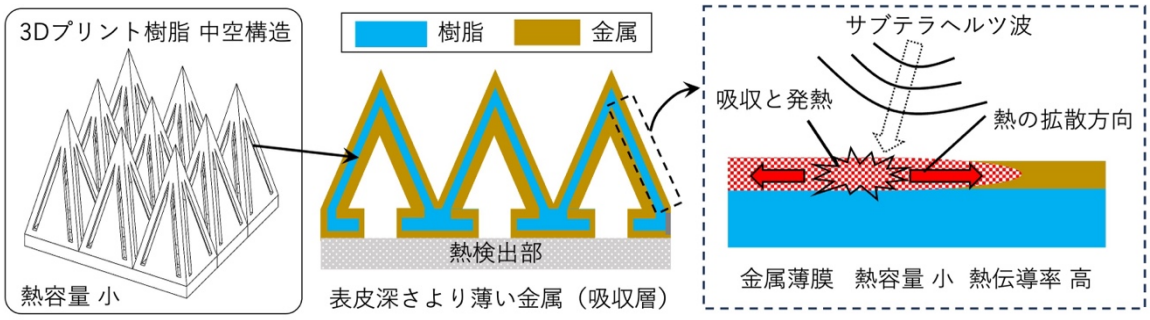


図 1：熱応答性に優れたテラヘルツ吸収体のコンセプト

[1] H. Iida *et al.*, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **39,** 409 (2018).
[2] G. Kuwano *et al.*, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **45,** 592 (2024).
[3] 桑野 玄気 他, 産総研プレスリリース (2023).

© 2025年 応用物理学会

パラメトリック波長変換によるテラヘルツ光位相計測

Phase Measurement of Terahertz-wave using Parametric Wavelength Conversion

情通機構[1]，東北大[2]，千葉大[3]，東北工大[4]，フラクシ[5]，日大[6] ○林 伸一郎[1]，大野 誠吾[2]，
宮本 克彦[3]，縄田 耕二[4]，浦田 佳治[5]，四方 潤一[6]，関根徳彦[1]
NICT[1], Tohoku Univ.[2], Chiba Univ.[3], TOHTECH[4], PHLUXi[5], NihonUniv.[6]
○Shin'ichiro Hayashi[1], Seigo Ohno[2], Katsuhiko Miyamoto[3], Kouji Nawata[4], Yoshiharu Urata[5],
Jun-ichi Shikata[6] and Norihiko Sekine[1]
E-mail: hayashi@nict.go.jp

近年，次世代型高速無線通信キャリアやリモートセンシング等としての利活用が期待されるテラヘルツ帯域において，計測技術は必要不可欠である。本研究では，波長変換によるテラヘルツ光位相計測のため，先進的な周波数制御および計測技術，長距離伝送技術等の確立している近赤外光との波長変換に基づいたテラヘルツ光位相計測手法について報告する。

実験系の概要を図 1（左）に示す。波長固定の高輝度励起光（基準光）により非線形光学結晶を励起し，パラメトリック波長変換によりテラヘルツ光発生を行い，波長可変の注入光によりテラヘルツ光スペクトルを制御する。このとき，テラヘルツ光と同時に発生するアイドラー光を，再び位相整合条件を満たすよう非線形光学結晶に入射し，同過程により近赤外光に変換して検出する（図 1）。同時に発生したアイドラー光の光路に波長板（λ/4，λ/2，λ/4）で構成される位相シフタを導入し，テラヘルツ光との干渉条件を制御した。図 1（右）に検出光強度および励起光強度の半波長板回転角度依存性を示す。テラヘルツ光とアイドラー光との干渉条件の変化を検出信号光の強度変化により観測することによって，テラヘルツ光の位相を計測した。詳細は当日報告する。本研究の一部は，科研費 JP23K0462，東北大-NICT マッチング，NICT TRIAL の支援を受けて行われた。

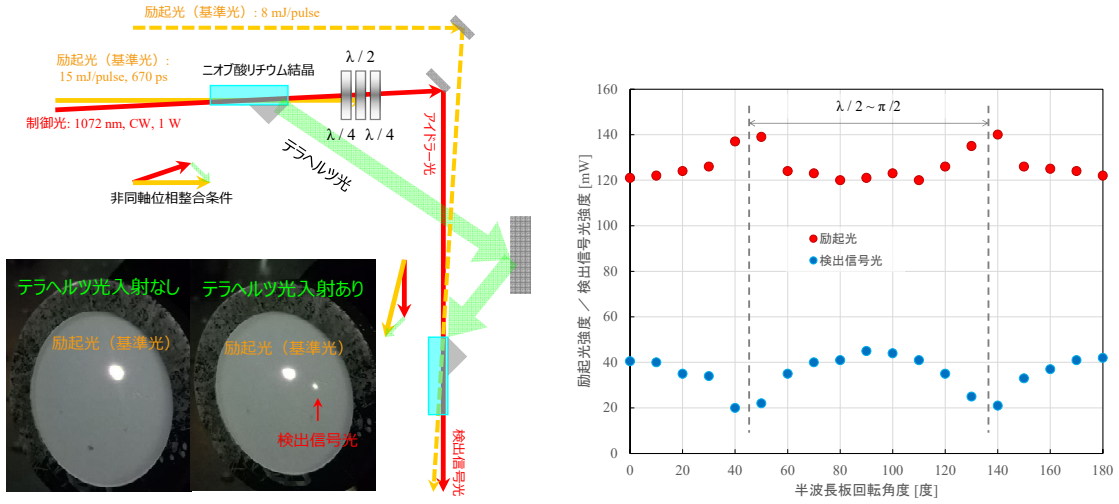


図 1　実験装置概要および検出信号光写真（左），励起光強度および検出信号光強度の半波長板回転角度依存性（右）。

© 2025年 応用物理学会

アパチャー無しの透過エリプソメトリー法による電気光学ポリマーのポッケルス効果とシュタルク効果の評価

Evaluation of the Pockels effect and the Stark effect in electro-optic polymers by the transmission ellipsometric method without an aperture

情報通信研究機構 [1]　○山田 俊樹 [1]，梶 貴博 [1]，山田千由美 [1]，大友 明 [1]

NICT [1], ○Toshiki Yamada[1], Takahiro Kaji[1], Chiyumi Yamada[1], Akira Otomo[1],

E-mail: toshiki@nict.go.jp

我々はこれまで、電気光学(EO)ポリマーのシュタルク効果を利用した広帯域電界検出法や超高速電界検出法を開発し報告してきた[1,2]。また EO ポリマーの自立膜及び積層膜を作製する技術を開発し、EO ポリマー積層膜のポッケルス効果を利用した高効率・超広帯域電界計測について報告してきた[3]。このような状況において、EO ポリマーのポッケルス効果とシュタルク効果の両方を評価する手法が重要になってきている。ポッケルス効果もシュタルク効果も 2 次の非線形光学効果であり、非線形光学感受率 $\chi^{(2)}(-\omega;\omega,0)$ と電界 E を用いて表すことができる。ポッケルス効果は複素屈折率の実部 n の変化(Δn)に対応し、$Re\chi^{(2)}$に関係づけられ、シュタルク効果は複素屈折率の虚部の消衰係数κの変化($\Delta\kappa$)に対応し、$Im\chi^{(2)}$に関係づけられる。

我々はこれまでアパチャー無しの透過エリプソメトリー法を開発し、EO ポリマーのポッケルス効果の評価を行ってきた[4]。本研究ではこの評価方法の解析手法を拡張し[5]、波長 1550 nm、1308 nm、980 nm、640 nm でのポッケルス効果とシュタルク効果の両方の寄与の評価を行った(Fig. 1)。Fig. 1 におけるバビネソレイユ位相補償板で作り出される位相差が π/2 と 3π/2 の時の、変調光信号 I_m のロックイン検出における強度と位相の両方を評価することにより、ポッケルス効果による寄与とシュタルク効果による寄与の両方の評価が可能であることを見出した(Fig. 2)。

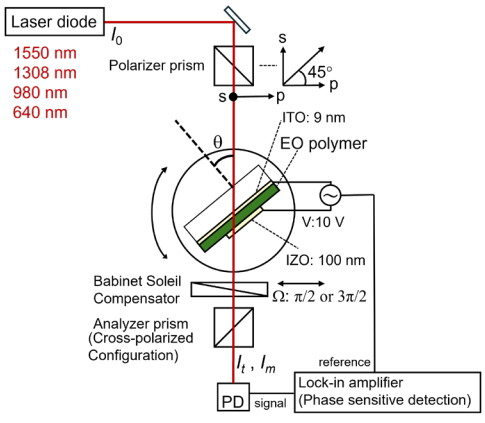


Fig. 1. Optical setup of the transmission measurement system

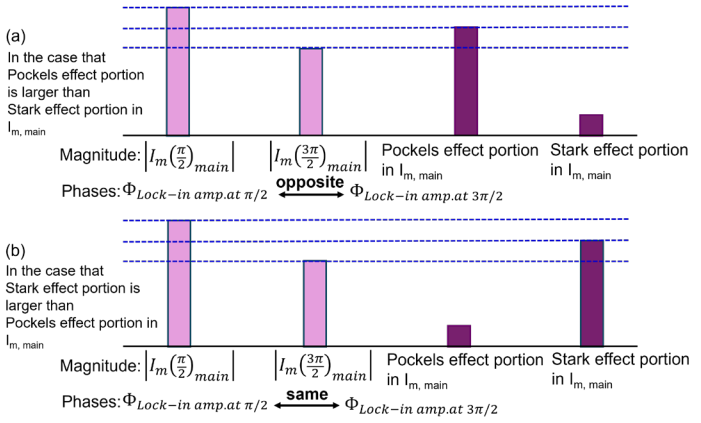


Fig. 2. Schematic illustration of the Pockels effect portion and the Stark effect portion in $I_{m,main}$

参考文献： [1] T. Yamada *et al*., J. J. Appl. Phys., Vol.58, pp.040901-1-7, 2019.; [2] 山田他、2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会、15p-504-9; [3] 山田他、2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会、25a-11E-1.; [4] T. Yamada and A. Otomo, Opt. Express, Vol.21, pp. 29240-29248, 2013.; [5] T. Yamada *et al*., Opt. Continuum, Vol.3, pp.1969-1980, 2024.

© 2025年 応用物理学会

Single-shot Broadband Detection of Terahertz Waves in Bulk LN Crystal

G. Gandubert[1], J. E. Nkeck[1], S. Mine[2], J. Lafrenière-Greig[1], K. Murate[2], and F. Blanchard[1]

[1] École de technologie supérieure (ÉTS), Canada
[2] Nagoya University, Japan

1. Introduction

Terahertz (THz) waves exhibit unique properties in light–matter interactions but remain challenging to detect, even after decades of research [1]. Advancements in this field require faster, more sensitive methods to measure the temporal electric field, which is critical for extracting frequency and phase information.

Recent approaches have achieved near single-photon sensitivity at high speeds [2], but they often lack phase sensitivity. Without phase information, key parameters such as refractive index and absorption, typically extracted via THz time-domain spectroscopy (THz-TDS), are lost [3].

To address this, we recently demonstrated a method that uses a poorly phase-matched nonlinear crystal to achieve geometric frequency encoding via spatial separation of modulated probe photons [4]. In this presentation, we extend this concept to demonstrate single-shot detection of the THz electric field's temporal evolution over a >30 ps time window, using both oscillator and amplified laser systems.

2. Objectives

Our goal is to develop a detection method that improves acquisition speed and sensitivity for time-domain measurements of broadband THz pulses, while simplifying the optical setup.

3. Methods

The method employed is similar to the method presented in [4]. In this paper, the THz field is focused normal to a silicon prism, cut on the other side at an angle of 41° which is in contact with a bulk lithium niobate (LN) crystal. The optical probe is propagating in the LN crystal where it interacts with the THz passing at the Cherenkov phase-matching angle. The interaction modulates the infrared probe, creating sum and difference frequency generation (SFG and DFG respectively) separated geometrically by the non collinear interaction. The addition from the previous study is the addition of an objective lens to image the interaction point between the THz and the probe, which allows to reconstruct the original interaction intensity of the SFG or DFG photons, allowing to reconstruct the time domain shape of the THz electric field. Figure 1(a) shows the optical setup for this system.

4. Results

The results shown on Fig. 1(b) show the THz electric field recovered form a single image and by scanning the delay line with a single pixel of the camera. In both configurations with an oscillator and an amplified laser, the time domain evolution of the electric field can be recovered. This technique gives a single shot detection with low THz intensity giving the phase and frequency information from the THz pulse.

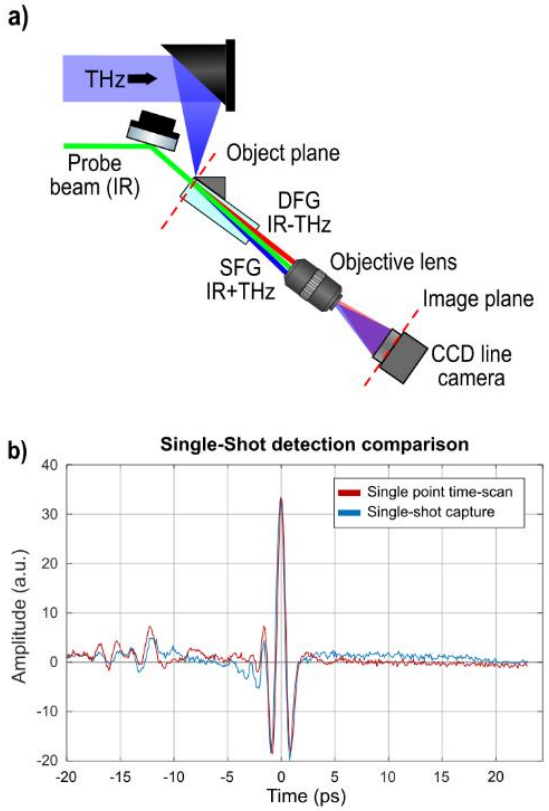


Figure 1 (a) Optical setup for single-shot detection. (b) Time-domain graph for delay line (red) and single-shot (blue) acquisition.

5. Conclusions

We present a new detection method for broadband THz pulses that enhances sensitivity and acquisition speed while preserving phase information. This simplified optical approach offers a practical and efficient alternative for single-shot THz field measurements.

References

[1] Alfred Leitenstorfer, *et al.*, Ger. J. Appl. Phys. **56** (2023) 223001.
[2] Defi J. Jubgang Fandio, *et al.*, Can. Opt. Letters, **46** (2024) 1556-1559
[3] Peter U. Jepsen, *et al.,* Den. Laser & Photonics Reviews **5** (2011) 124-166
[4] Sota Mine, *et al.*, Jpn. Optica, **12**(2) (2025) 239-245

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツ周波数可変パーフェクト光渦の生成

Tunable terahertz perfect vortex generation based on the DAST-DFG

千葉大工[1]，千葉大分子キラリティー研[2]

○(M1)酒井悠連[1]，(M2)足立瑞季[1]，(M1)藤代隼人[1]，宮本克彦[1,2]

Chiba Univ.[1], Chiba Univ. MCRC[2]

○Yuzuru Sakai[1], Mizuki Adachi[1], Hayato Fujishiro[1], Katsuhiko Miyamoto[1,2]

E-mail: k-miyamoto@faculty.chiba-u.jp

軌道角運動量は光渦が持つ螺旋状の波面に由来する物理量であり，物質に転写することで通常のガウスビームには見られない特異な現象が観測される。したがって，われわれは軌道角運動量と物質の相互作用の解明を目的に，テラヘルツ帯において周波数可変な光渦の発生に成功している[1]。しかしながら，光渦は軌道角運動量の次数（ℓ=1,2,3,…）に応じてビーム中心の位相特異点部分が大きくなり，ビームプロファイルを一定に保つことができない。そこで，ビームプロファイルが軌道角運動量に依存しないパーフェクト光渦[2]を発生させ，次数 ℓ のみの純粋な比較を目指している。これまでに，Tsurupica 位相板(SPP)[3]を用いて周波数 4THz のパーフェクト光渦（ℓ=1,2）を発生させ，そのリング半径と厚みが次数に依存しないことを確認した。本研究では，周波数可変性を実現するために，周波数可変テラヘルツ光渦光源[1]と Tsurupica アキシコンレンズ[4]を用いてパーフェクト光渦（ℓ=1）の発生を行った。

実験光学系の概略図を Fig. 1 に示す。有機非線形光学結晶 4-N, N-dimethylamino-4'-N'-methylstilbazolium tosylate (DAST)による差周波発生法をベースとしており，周波数可変でテラヘルツ光渦の発生が可能である。DAST 結晶から発生したテラヘルツ光渦を，Tsurupica アキシコンレンズを介して軌道角運動量を有したまま高次ベッセルビームに変換する。その後，4f 光学系を介したフーリエ変換面においてパーフェクト光渦が生成される。観測したパーフェクト光渦（ℓ=1）の強度プロファイルを Fig. 2 に示す。DAST に入射するガウスビームの波長を 1.58～1.61μm の範囲で掃引し，周波数 3～6THz での発生に成功した。今後はさらに高次の周波数可変パーフェクト光渦を発生させ，軌道角運動量分光に取り組む予定である。

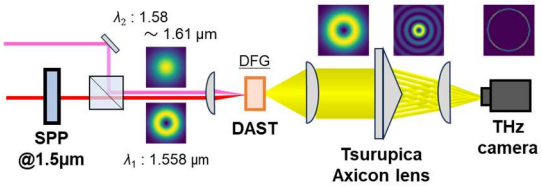


Fig. 1. Experimental setup for the generation of tunable perfect vortex at the THz region.

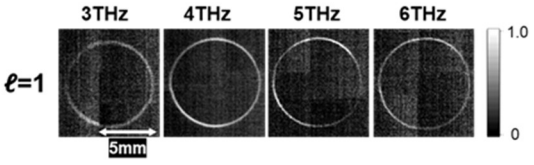


Fig. 2. Experimental intensity distribution of perfect vortices at ℓ=1 at 3～6 THz respectively.

[1] K. Miyamoto, K. Sano, T. Miyakawa, H. Niinomi, K. Toyoda, A. Vallés, T. Omatsu, Opt. Express, 27, 31840 (2019).
[2] M. Chen, M. Mazilu, Y. Arita, E. M. Wright, K. Dholakia, Opt. Lett., 38, 4919 (2013).
[3] K. Miyamoto, K. Suizu, T. Akiba, T. Omatsu, Appl. Phys. Lett., 104, 261104 (2014).
[4] K. Miyamoto, R. Nomura, S. Tsuji, T. Omatsu, Opt. Contin., 1, 633 (2022).

© 2025年 応用物理学会

非線形アップコンバージョンによる広帯域テラヘルツ光検出

Terahertz wave up-conversion detection based on a DAST crystal

千葉大院工[1]，バルセロナ自治大学[2]，千葉大学分子キラリティー研[3]

○(M1)藤代 隼人[1]、関澤 真哉[1]、足立 瑞季[1]、酒井 悠連[1]、入江 弘起[1]

Adam Vallés[2]、宮本 克彦[1,3]

Chiba Univ.[1], UAB[2], Chiba Univ. MCRC[3]

○H. Fujishiro[1], S. Sekizawa[1], A. Vallés[2,3], K. Miyamoto[1,3]

E-mail: k-miyamoto@fuculty.chiba-u.jp

われわれは，テラヘルツ領域におけるトポロジカル量子光の検出を最終目標に，非線形光学過程を用いたテラヘルツ光アップコンバージョンによる高感度検出法の開発を進めている。これまでに，近赤外域の光渦の位相情報を，波長が 2 桁以上異なるテラヘルツ領域へと転写可能であることを実証し，周波数可変なテラヘルツ光渦の発生に成功している[1]。この逆課程である非線形アップコンバージョンを介してテラヘルツ光がもつ位相情報を検出できれば，軌道角運動量（OAM）分光などへの応用が期待される。これまでに，有機非線形光学結晶 DAST（4-N,N-dimethylamino-4’-N’-methylstilbazolium tosylate）を用いた非線形アップコンバージョン過程を介してテラヘルツ光を近赤外光に変換することで，極低温検出器を用いずに高感度なテラヘルツ光の検出に成功している。本研究では，将来的なテラヘルツ領域における軌道角運動量分解測定を見据え，1.5 μm 帯における軌道角運動量分解測定の構築について報告する。

Figure 1(a) に実験光学系を示す。波長 1.496 μm の CW レーザー（HP 8168F）を用いて空間光変調器（SLM）を 2 回反射させる構成の 4f 光学系を用いることで，OAM モードごとの空間分離を実現している。これは，モードソータとして機能し SLM の 2 つのチャンネルに異なる OAM を印加し，両者の合成モードが OAM ゼロ（ガウシアンモード）となる場合にのみ，シングルモードファイバへ効率的に結合される。Figure 1(b), (c) は，それぞれ実験により取得されたビームプロファイルと OAM 分解の結果を示している。今後は，アップコンバージョンによって検出されたテラヘルツ光の OAM モードの分解測定を目指す。

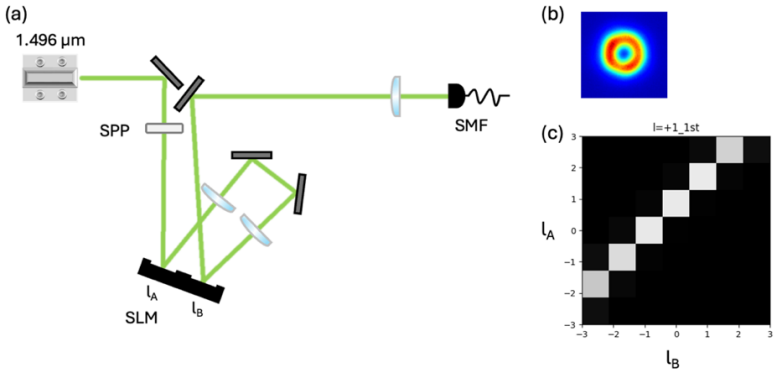


Fig.1 (a) Experimental setup for measuring the orbital angular momentum spectrum.
(b) Beam intensity profile at 1.496 μm. (c) Orbital angular momentum decomposition results of 1.496 μm.

謝辞 JSPS 科研費(24KK0108)

1. K. Miyamoto, K. Sano, T. Miyakawa, H. Niinomi, K. Toyoda, A. Vallés, T. Omatsu, Opt. Express 27(22), 31840–31849 (2019).

© 2025年 応用物理学会

Metasurface with Microcantilever-Integrated Complementary Split Ring Resontors for Tunable THz Third-Harmonic Generation

Mitali Sahu[1], Partha Roy Chaudhuri [1*]

[1] Department of Physics, Indian Institute of Technology Kharagpur-721 302, INDIA
E-mail : roycp@phy.iitkgp.ac.in

Abstract:

We report our results of investigation of a tunable THz metamaterial absorber for third-harmonic generation using a micro-electro-mechanical cantilever and complementary split ring resonators enabling voltage-controlled spectral tuning for enhanced performance.

1. Summary

This work presents a tunable terahertz (THz) metamaterial absorber based on a nano-electromechanical system (NEMS)-integrated complementary split ring resonator (c-SRR) array designed for efficient third harmonic generation (THG). The proposed structure enables dynamic control over the THG response by exploiting electrostatic actuation of microcantilevers embedded in each unit cell.

Unit Cell Design:

The unit cell consists of a gold-based c-SRR patterned on a Kerr-type nonlinear dielectric spacer (e.g., amorphous chalcogenide glass), supported by a metallic substrate, as shown in Fig. 1. A U-shaped air gap (200 nm wide) in the c-SRR houses a 20 nm-thick gold cantilever (800 nm × 500 nm), one end of which is fixed while the other is free to deflect electrostatically. This geometry allows modulation of the field-confining air gap and hence the resonant properties of the metasurface.

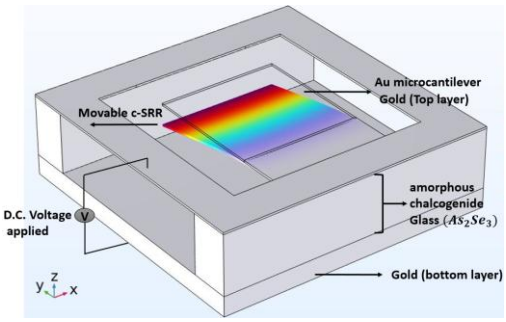


Fig. 1. Schematic illustration of the unit cell design of the proposed nonlinear metasurface.

Resonant Response at FF and TH:

Optical simulations (COMSOL Multiphysics) show strong resonance at both the fundamental (FF) and third harmonic (TH) frequencies, as seen in Fig. 2. Efficient THG occurs when TM-polarized light, with the magnetic field along the y-axis, excites c-SRR resonant modes, enhancing field localization and nonlinear polarization. High conversion efficiency is achieved even at low input intensity (100 kW/cm²) due to strong FF field confinement and overlap with TH resonances.

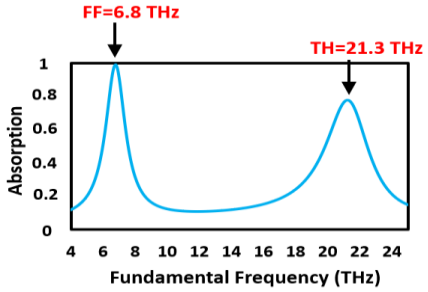


Fig. 2. Resonant response at the FF and TH of the metasurface.

Tunable Absorption Peak Frequency:

Mechanical simulation in Fig. 3 shows that applying a DC bias bends the cantilever, altering the c-SRR geometry and tuning the metasurface's effective capacitance. As the voltage increases from 0 to 55 V, the fundamental mode's resonance frequency shifts gradually from 6.5 THz to 7.0 THz, followed by a sudden jump to 7.2 THz due to electrostatic pull-in. This yields a maximum tunable range of 0.50 THz, enabling precise spectral control of THG.

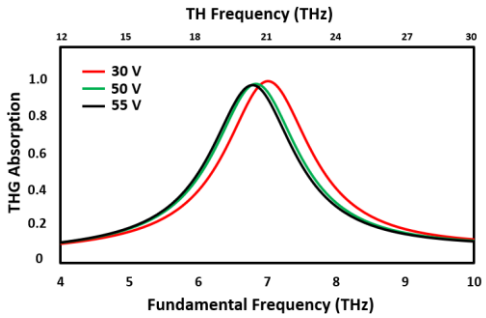


Fig. 3. The tunable absorption peak frequency from 6.5-7.2 THz with maximum tunable frequency is 0.50 THz.

3. Conclusions

By integrating electrostatically controlled cantilevers into a nonlinear metasurface enables low-power, tunable THG at THz frequencies. This design overcomes fixed unit cell limitations and offers a compact, reconfigurable solution for THz frequency conversion in imaging and sensing.

References

[1] B. Jin, T. Guo, and C. Argyropoulos. J. Opt. **19** (2017) 094005.

[2] M. Sahu and P. Roy Chaudhuri. J. Mod. Opt. **71** (2024) 255-265.

[3] J. Lee, and M. Belkin. Nature. **511** (2014) 65.

© 2025年 応用物理学会

Tolerance of Phase Noise in 64QAM THz Wireless Links

Keio Univ.[1], ◦Bowen Liu[1], Takasumi Tanabe[1]
E-mail: b.liu@phot.elec.keio.ac.jp

The rapid growth of the mobile digital economy has triggered an explosive demand for wireless data traffic. Fast, stable, affordable, and accessible connectivity is increasingly essential for inclusive societal and individual development [1]. Alone in the Asia-Pacific region, mobile data users surged by 3.1 billion in 2022, with monthly average usage rising by 11 GB. However, average network speed remained at 28.5 Mbps, and nearly 47% of the region experienced peak speeds below 100 Mbps [2]. Terahertz (THz) wireless communication is a promising solution for next-generation high-speed, near-filed links due to its largely untapped ultra-wide bandwidth. Compared to 5G NR and 60-GHz millimeter-wave systems, THz technologies offer better compatibility with photonic integrated circuits and support more compact components, such as antennas [3,4]. Notably, 100-Gbps fiber–wireless links have been demonstrated in the W-band [5], and 160-Gbps QPSK transmission has been reported above 300 GHz [6]. Most THz systems rely on photonic heterodyning of laser diodes, but their free-running nature introduces significant phase noise, necessitating stabilization via PLLs or external cavities. Microcombs, generated in high-Q microresonators, offer superior coherence and integrability [7], and have demonstrated 10-Tbps transmission in comb-driven links [8]. Yet a systematic analysis of phase noise tolerance remains lacking, creating obstacles for the development of robust physical-layer protocols.

Here, we quantitatively investigate the impact of phase noise on THz wireless communication systems and determine its tolerance thresholds. We characterize the phase noise of three representative local oscillators (LOs) including a CMOS, a fiber laser, and a SiN microcomb, demonstrating the great advantage of microcombs in high-speed, low-error tasks using advanced modulation formats beyond 64QAM. The simulation setup, shown in Fig. 1(a), is based on a classical single-carrier M-QAM transmission model. The time-domain instantaneous phase noise and frequency-domain PSD of each LO, following a Gaussian distribution, are depicted in Fig. 1(b). Thereby, their impacts on BER are illustrated in Fig. 1(c), where phase noise significantly reduces the error margin. However, the instantaneous phase noise is typically small in absolute magnitude, which limits the observable gap between microcomb and conventional CMOS—even though the former exhibits a 10-fold improvement in noise characteristics. To better capture this impact, EVM is adopted as a more sensitive metric. Fig. 1(d) shows the 64QAM constellation distortion under phase noise from different Los, from which the degradation is clearly observable in the case of CMOS. Considering the 3σ-coverage (99.7% distribution)—the EVM must remain below 5.12% to achieve error-free transmission for 64QAM. As summarized in Fig. 1(e), EVM exhibits an approximately linear correlation with phase noise standard deviation, yielding a tolerance threshold of $\sigma = 0.042$ for error-free 64QAM transmission.

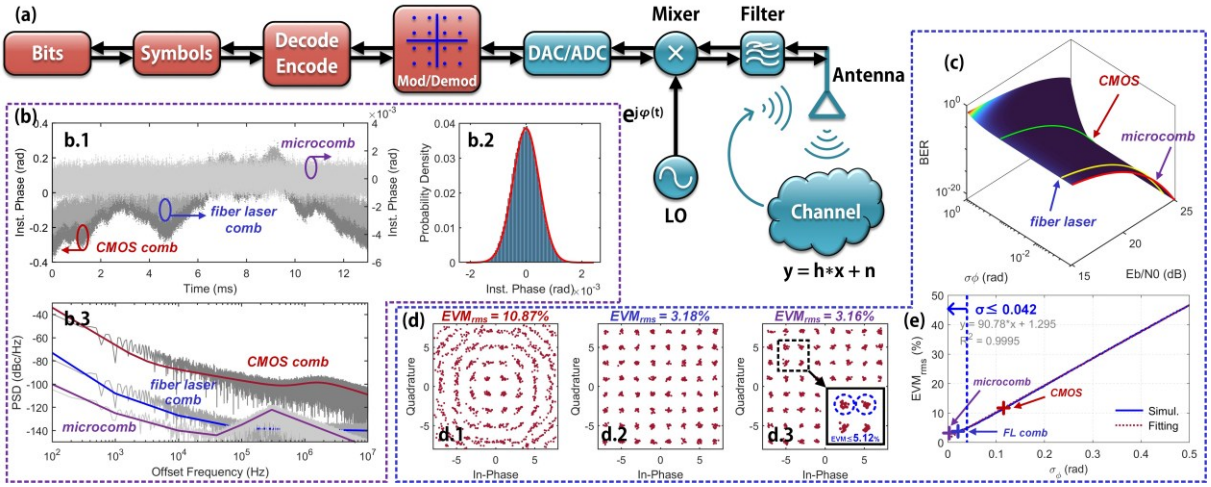


Figure 1. (a) Simulation configuration; (b) Modeling of phase noise, where (b.1) is the instantaneous phase in the time-domain, (b.2) is the PDF, and (b.3) is the corresponding PSD in the frequency-domain; (c) Relationship between BER, SNR and phase noise; (d) 64QAM constellation diagram from receivers respectively driven by (d.1) CMOS comb, (d.2) fiber laser comb, and (d.3) microcomb (insert: enlarged view); (e) Linear correlation between EVM and phase noise.

Acknowledgement: This work was supported by JST, CRONOS, Japan, Grant Number JPMJCS24N7.

Reference:

[1] H. Shams and A. Seeds, OPN **28**, 24-31 (2017).
[2] Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. *Cisco: San Jose, CA, USA*, **10**, 1-35 (2020).
[3] T. Nagatsuma, ELEX **8**, 1127-1142 (2011).
[4] M. Fujishima, ELEX **18**, 20212002 (2021).
[5] X. Pang, A. Caballero, and A. Dogadaev *et al.*, Opt. Express **19**, 24944-24949 (2011).
[6] X. Yu, S. Jia, H. Hu *et al*., APL Photon. **1**, 081301 (2016).
[7] X. Xu, M. Tan, and B. Corcoran *et al*., Nature **589**, 44-51 (2021).
[8] P. Marin-Palomo, J. N. Kemal, and P. Trocha *et al*., Opt. Express **27**, 31110-31129 (2019).

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツ波周波数掃引型コヒーレンストモグラフィ装置の検討

Study of Terahertz-based SS-OCT (Swept Source optical coherence tomography) system

東海大学 総合科学技術研究所 [1]，筑波大学 数理物質 [2]

○尾内 敏彦 [1]，南 英俊 [2]，柏木 隆成 [2]

Tokai Univ. [1], Univ. of Tsukuba [2], ○T. Ouchi [1], H. Minami [2] and T. Kashiwagi [2]

E-mail: ouchi.toshihiko.s@tokai.ac.jp

テラヘルツ波による 3 次元断層像取得は、時間領域分光装置（THz-TDS）等を用いてその有効性が示されているが[1]、生産現場の非破壊検査等に導入するには多くのボトルネックが存在している。光領域で実用化されているマイケルソン干渉計を用いた OCT（optical coherence tomography）方式のテラヘルツ領域への適用は候補の 1 つであり、時間領域（TD-OCT）および周波数領域（FD-OCT）で検討が進められ、FD-OCT とくに周波数（波長）掃引型（SS-OCT）の高速性が注目されている[2]。

今回、テラヘルツ領域 SS-OCT を構築するにあたって、高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi2212) の固有ジョセフソン接合系をメサ状構造として 10 個程度アレイ化し[3]、素子の印可電圧により周波数を変調できる発振器を光源として用いることとした。発振器の環境温度を 61.5 K に調整し、パルス幅 50 μs、繰り返し周波数 1 kHz、パルス立下がり時間 60 μs の条件で駆動したときに、電圧が 2.10 V→1.54 V と変化することに対応して、発振周波数を 450 GHz→340 GHz と連続的にほぼ単一モードを保ちながら 10 μs の時間で掃引することができた。その印可電圧と発振周波数の関係を Fig. 1 に示す。

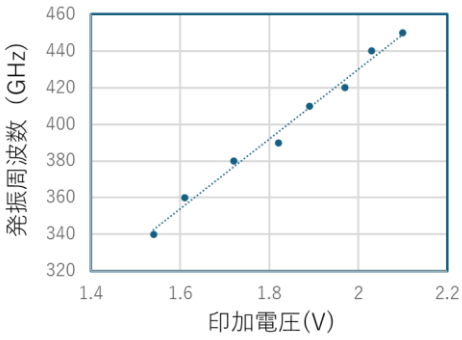


Fig. 1 Voltage dependence of frequency.

干渉計を構成し、Si ビームスプリッタからの固定参照ミラーと測定対象物との距離の差 Δd を約 3 mm、5 mm と変化させ InSb ホットエレクトロンボロメータ（HEB）でテラヘルツ波を検出した。上記条件で周波数掃引したときの干渉波形は Fig. 2 のようになり、この波形から Δd すなわち測定対象物の反射界面の位置を FFT 解析により推定することができた。この結果、Bi2212 ジョセフソン発振器の電圧変調によりテラヘルツ発振周波数を掃引させ、テラヘルツ領域の SS-OCT として機能する可能性を示すことができた。

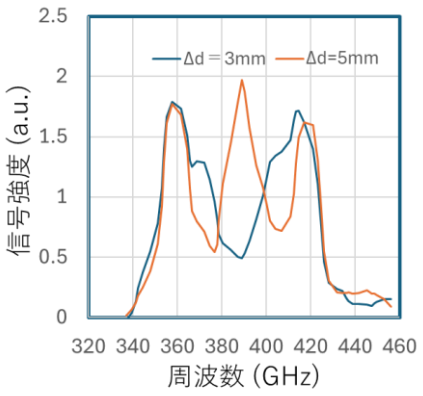


Fig. 2 Interference signals measured at different object locations.

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 JP24K07528 の助成を受けて行われたものである。

[1] J. Takayanagi *et al.*: Opt. Express **17**, 7533 (2009).

[2] D.-H. Choi *et al.*: Opt. Express **27**, 14695 (2019).

[3] 南他：応用物理学会 2024 年春季大会 23a–12P-2.

© 2025年 応用物理学会

円偏波テラヘルツ波を用いた IQ 復調によるホモダイン検出

Homodyne detection with IQ demodulation using circularly polarized terahertz waves

東京科学大　○恩村 峻人，ドブロユ アドリアン，鈴木左文

Inst. Sci. Tokyo, ○Shunto Onmura, Adrian Dobroiu, and Safumi Suzuki

E-mail: safumi@ee.e.titech.ac.jp

【背景】テラヘルツ帯におけるアクティブイメージングやセンシングにおいて、照射したテラヘルツ信号が対象物から正反射ではなく散乱された場合[1]、戻ってきた受信信号は非常に微弱となる。そのため、直接検波ではなく、ホモダインのような感度の高いコヒーレント検波が必要となる。このホモダイン検波では、受信信号にローカル（LO）信号をミキシングするが、両信号の位相がずれている場合、強度情報を正しく取得することが出来ない。90° 位相のずれた LO 信号も併せて用いた IQ 復調回路であれば、強度と位相を両方取得できるが、300 GHz よりも高い周波数ではこのような集積回路の実現はまだまだ難しい。そのため、本研究では、ディスクリート部品で構成可能な円偏波を用いた IQ 復調システムを提案、実証したので報告する。

【実験】Fig. 1 に本研究で提案する IQ 復調システムを示す。450 GHz 共鳴トンネルダイオード（RTD）発振器からの 45 度偏波の放射出力をビームスプリッタで分割し、RF および LO 信号に分離する。RF 信号は 1/4 波長板により円偏波に変換された後、ターゲットにより散乱され、ガルバノミラーにより受信系に導入される。受信系には水平と垂直偏波を別々に受信する 2 台のフェルミレベル制御バリアダイオード（FMBD）受信器を用意し、ハーフミラーにより円偏波 RF 信号と 45 度偏波 LO 信号を重ね合わせて入力する。ここで、45 度偏波 LO 信号は同位相でそれぞれの受信器に入力されるのに対し、円偏波 RF 信号は直交軸で 90 度位相が異なって受信器に入力され、それぞれでミキシングが起きるため、I 信号と Q 信号を別々に得ることができる。Fig. 2 にターゲットまでの距離（位相）を変えながら得た IQ プロットを示す。完全な円とはなっておらず、また、中心からオフセットがあるが、IQ 復調が出来ていることが示された。

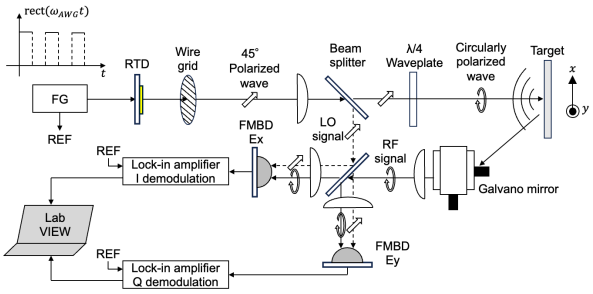


Fig. 1. Optical system for IQ demodulation with circularly-polarized terahertz wave.

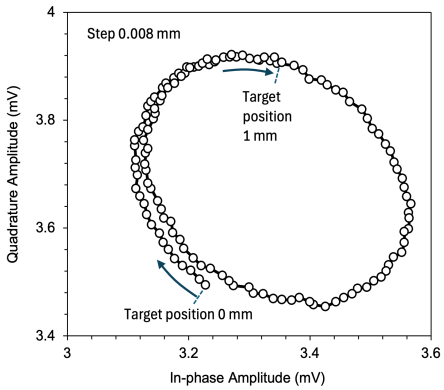


Fig. 2. IQ plot using target position as a mediating variable.

【謝辞】本研究の一部は科研費（24H00031）、JST-CREST（JPMJCR21C4）、文科省 X-NICS（JPJ011438）、文科省 ARIM （JPMXP1225IT0018, JPMXP1225IT0019）、および、ローム株式会社の支援を受けた。

【参考文献】[1] S. Ju et al., Proc. IEEE ICC 2019, pp. 1-7, Shanghai, China, May 2019.

© 2025年 応用物理学会

共鳴トンネルダイオードを使用した小型イメージングシステム

Compact imaging system using resonant tunneling diodes

スペクトルデザイン[1]　○梅津枝里子[1]，　高橋功将[1]，深澤亮一[1]

Spectra Design Ltd.[1], ○Eriko Umetsu[1], Norimasa Takahashi[1], Ryoichi Fukasawa[1]

E-mail: umetsu@spectra-dsn.co.jp

光と電波の境界領域にあるテラヘルツ波を用いたイメージングは，光の高分解能性と電波の高透過性を併せ持つ。その特性から，不透明材料内の検査に用いられている。

我々は，産業利用に適したテラヘルツイメージングシステムの開発を行っており，テラヘルツ時間領域分光法 (Terahertz Time-Domain Spectroscopy: THz-TDS)に基づくイメージングにより，可視・近赤外光をプローブとしたイメージングでは難しかった粉体内の樹脂やゴムなどの軟質性異物の検出への有効性を示してきた。このシステムでは，分解能の高い異物検査が可能である一方，光サンプリング方式の計測のため計測時間を要し，大掛かりなシステムも必要であった。計測時間の短縮とシステムの小型化のため，VCO 内蔵の周波数逓倍方式の小型テラヘルツ光源とショットキーバリアダイオード(SBD)を組み合わせたイメージングシステムを検討しその有効性を示したが[1]，更なるシステム小型化とシステム価格の面で課題があった。

そこで，よりシステムの小型･軽量化が可能で，比較的安価なシステムの構築が可能な共鳴トンネルダイオード(RTD)の評価サンプルキットを入手する機会を得たため，RTD を光源と検出器としたイメージングシステムを構築し，様々なサンプルのイメージングを行っている。 ローム株式会社が提供する RTD の評価サンプルキットにおいて，光源･検出器の RTD は共に 4.0 mm ×4.3mm×高さ 3.3mm サイズに PLCC パッケージされ，システムへの組み込みに適している。Fig.1 に測定光学系と Fig.2 に樹脂内に異なるサイズのボイド(空隙)と金属片を配置したサンプルの測定結果を示す。 当日，今回検証したシステムと従来のシステムでのイメージング結果を比較する。

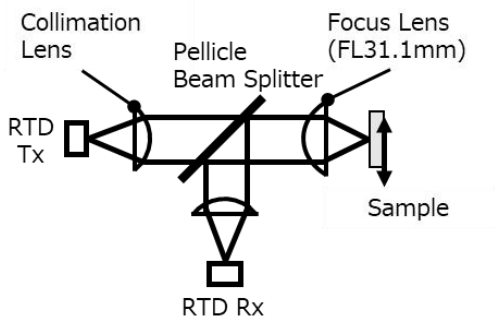


Fig.1 Schematic diagram of the optical setup.

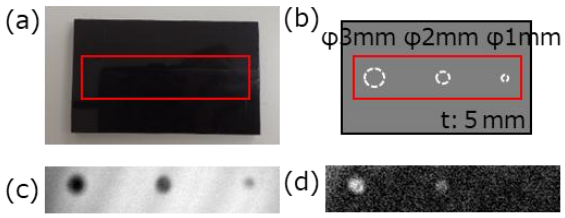


Fig.2 THz imaging results: (a) Photograph of the polypropylene material sample (□ indicates the imaging area), (b) Sample structure, (c) Void image, and (d) Metal piece image.

[1] 梅津枝里子 他，高出力テラヘルツ小型光源を用いたイメージング，S-FTS 2024, (2024)

© 2025年 応用物理学会

共鳴トンネルダイオードの線幅を狭小化するための マイクロコム駆動 THz を用いた光注入同期に関する検討

Study on optical injection locking using microcomb-driven THz for narrowing the linewidth of resonant tunneling diodes

徳島大院創成[1], 徳島大 pLED[2] ○(M2)森 辰乃心[1], Talara Miezel[2], 時実 悠[2], 長谷 栄治[2], 安井, 武史[2]

Grad. Sch. Sci. Tech. Innov, Tokushima Univ.[1], Institute of Post-LED Photonics, Tokushima Univ.[2]

○Tatsunoshin Mori[1], Miezel Talara[2], Yu Tokizane[2], Eiji Hase[2], Takeshi Yasui[2]

E-mail: c612432063@tokushima-u.ac.jp, yasui.takeshi@tokushima-u.ac.jp

テラヘルツ（THz）波は、次世代移動通信（6G）をはじめとする先端技術分野において、重要な役割を担うと期待されている。その実用化に向けては、狭線幅かつ高安定な THz 信号の生成が不可欠である。従来のアプローチでは、マイクロ波信号を周波数逓倍することで THz 波を得ていたが、この方法では逓倍に伴う位相雑音の増大が大きな課題となっている。一方、共鳴トンネルダイオード（RTD）は、小型で室温動作が可能でありながら、高出力かつ高周波での自己発振が可能なことから、有望な THz 発振素子として注目されている。しかしながら、RTD から得られる THz 信号は線幅が広く、スペクトル純度に乏しいため、高精度が求められるセンシングや通信といった応用には適さないという課題が残されている。

この課題の解決手段として、**光注入同期（Optical Injection Locking：OIL）**が注目されている。OIL は、外部から狭線幅のマスター光源を高出力なスレーブ光源に注入し、スレーブを受動的に位相同期させることで、スペクトル純度と位相安定性を向上させる手法である。レーザー分野では広く実用化されており、近年ではテラヘルツ（THz）領域においても、共鳴トンネルダイオード（RTD）を用いた THz 帯 OIL が報告されている。本報告では、マイクロ光コムのフォトミキシングによって生成した狭線幅かつ高安定な THz 波（マイクロ光コム駆動 THz 波）をマスター信号とし、これを RTD に注入して実現した THz 帯 OIL の動作と特性について報告する。

図 1 に示すように、283.56 GHz 間隔のマイクロ光コムから隣接する 2 モードを抽出し、EDFA で増幅後、UTC-PD に入射することで 283.56 GHz の THz 波を生成した。この THz 波をマスター信号として、同周波数で発振する RTD（スレーブ THz 光源）に照射した。RTD 出力は、サブハーモニックミキサーを用いたヘテロダイン検波により測定し、光注入同期状態と非同期状態（独立動作）におけるビート信号スペクトルを RF 領域で比較した。

図 2 に示すビート信号のスペクトルから OIL の有無による RTD 出力の線幅変化を比較した。まず、RTD をマスター信号なしで動作させた独立動作（非 OIL）状態では、ビート信号のスペクトル幅が 100MHz であり、出力信号の周波数揺らぎが比較的大きいことが確認された（青線）。一方、OIL 状態では、RTD に対してマイクロ光コム駆動 THz 波をマスター信号として注入することで、スペクトル幅が 50kHz にまで狭まり、出力信号の周波数安定性が大きく向上した（赤線）。この結果は、光注入同期によって RTD の発振位相が外部マスター信号に強く引き込まれ、スレーブ光源として安定動作していることを示している。

本研究は、MIC/FORWARD#JPMI240910001 の支援を受けて実施された。また、本研究に使用した RTD をご提供いただいたローム株式会社に深く謝意を示す。

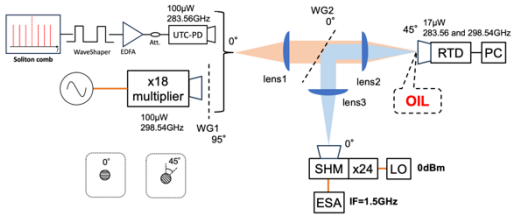


Fig.1. Experimental setup

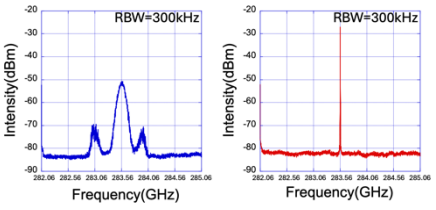


Fig.2. Free-running spectrum of RTD (blue) and OIL-RTD spectrum (red)

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツ渦干渉計による凹凸形状サンプルの測定

Measurement of concave or convex sample by 0.3 THz band spiral interferometry

○(M2)山口航平[1], 時実悠[2],長谷栄治[2],安井武史[2]
[1]徳島大院創成, [2]徳島大 pLED
Kohei Yamaguchi[1], Yu Tokizane[2], Eiji Hase[2] and Takeshi Yasui[2]
[1]Grad. Sch. Sci. Tech. Innov., Tokushima Univ.,[2]pLED, Tokushima Univ.,
Email: c612436025@tokushima-u.ac.jp http://femto.me.tokushima-u.ac.jp

光渦干渉計[1~3]とは、光渦の位相を用いた干渉計であり、物体による回折光と非回折光の干渉縞から、定量的に三次元情報を取得する技術である[1, 2]。従来の干渉計では、物体の凹凸を区別するために、複数回の測定が必要であった。一方で光渦位相計測では光渦によって物体光に螺旋状の位相変調を行い、らせん状の干渉縞を形成し、らせんの巻く方向から、ワンショットで物体の凹凸情報が判別可能である。

光渦位相計測は光を用いるため、計測の対象が光に透明な材料に限られていた。テラヘルツ(THz)波は非金属材料への透過性を有しているため、不透明材料の内部構造の計測に適する。光渦干渉計を THz 帯で実現すれば、不透明材料の三次元構造や、遮蔽物の裏側の構造の凹凸を定量的に可視化できる。そこで本研究では、THz 渦干渉計の提案を行う。

Fig. 1 に THz 渦干渉計の実験系を示す。共軸の干渉計で構成され、周波数 0.288 THz の Impatt diode 光源で凹凸試料を照射する。試料のフーリエ面で参照光(橙色)と物体光(緑色)の分離を行う。フーリエ面で物体光のみに光渦位相変調を施す。このため中空螺旋位相板[3]を THz 帯で設計し、導入した。物体光とカメラ面は試料と共役な面で干渉し螺旋状の干渉縞を形成する。3D プリンタ(キーエンス社製 AGILISTA-3200)を用いて、凹凸試料をそれぞれ製作した(Fig. 2(a), (b))。材料に透明樹脂を用いた。作成した凹凸サンプルを THz 干渉計で測定した結果を Fig. 2 に示す。凹凸に起因した異なる向きのらせん干渉縞が形成され、THz 渦干渉計測が実現した。発表では THz らせん干渉縞の形成に必要となる光学系の条件について議論する。

徳島大学岸川博紀准教授、千葉大学宮本克彦教授に本研究の有益なご議論を頂いたことを感謝いたします。

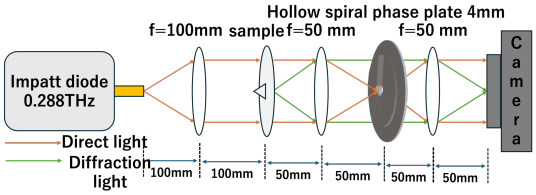


Fig 1 THz vortex interferometer

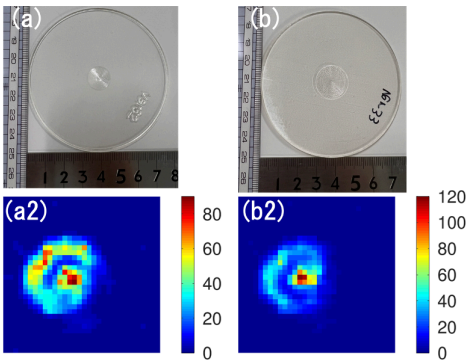


Fig 2 Sample (a) Convex structure (b) Concave structure Corresponding (a2) (b2)

[1] S. Fürhapter, et al., Opt. Lett. **30**,1953(2005).
[2] Y. Tokizane, et. al., Opt. Lett. **49**, 3516(2024). [3] X. Yuan, et al., Appl. Phys. Lett. **91**,171116(2007).

© 2025年 応用物理学会

非等方歪モアレ型メタ表面によるテラヘルツ円偏光分離素子の開発

Circular polarization selectors in the terahertz region consist of moiré metasurfaces

千葉大学[1]，物材機構[2]，東北大院理[3]，千葉大学分子キラリティー研[4]

○(M1)折谷 岳[1]，(M2)千葉 初奈[1]，（B）酒井 冴稀[1]，三成 剛生[2]，大野 誠吾[3]，宮本克彦[1,4]

Chiba Univ.[1], NIMS[2], Tohoku Univ.[3], Chiba Univ. MCRC[4]

°Gaku Oritani[1], Uina Chiba[1], Masaki Sakai[1], Takeo Minari[2], Seigo Ohno[3], Katsuhiko Miyamoto[1,4]

E-mail: k-miyamoto@faculty.chiba-u.jp

われわれは，非等方歪モアレ型メタ表面を用いた円偏光分離素子の開発を行っている。周期的な金属構造とその一方向に歪みを加えた構造を重ね，モアレの干渉パターンを作ることによって，モアレによる回折と金属による偏光の変調を起こすメタ表面を形成することが可能である。

本研究では，Figure 1 に示したような異なる格子定数をもつ 2 種類の金属 2 次元周期構造を用いた。図中，x 方向に対して歪みを加えると，y 方向のズレである Δy の値に応じて局所的な異方性分布の制御が可能である。ここで $\Delta y/a = 0.2$ の際に円偏光異常屈折を示すことが計算により分かっているため[3]，この値になる様に格子定数をデザイン設計した。実際のサンプルは，銀ディスク半径約 11.25 μm を三角格子状にプリンテッドエレクトロニクス技術[1]により，厚み 50 μm のゼオノアフィルムシート上に印刷した。これら 2 枚を金属面が内側になるように重ね，非等方歪モアレ型メタ表面[2]による円偏光分離素子とした。

周波数 4.35THz の円偏光テラヘルツ光を円偏光分離素子に入射し，±1 次光の回折光強度の分布をテラヘルツカメラ（型番）および極低温シリコンボロメータにて測定した。Figure 2 には，横軸に入射テラヘルツ光の偏光を調整する 1/4 波長板（QWP）の角度，縦軸に±1 次回折光の強度を示した。入射偏光状態に伴って±1 次回折光の強度分布が反転する振る舞いが観測され，われわれが作製した非等方歪モアレ型メタ表面がテラヘルツ領域の円偏光分離素子として機能することを実証した。さらに，±1 次光の偏光成分をクロスニコル検出系により確認した。その結果，-1 次光は右円偏光，+1 次光は左円偏光が支配的であることが分かった。

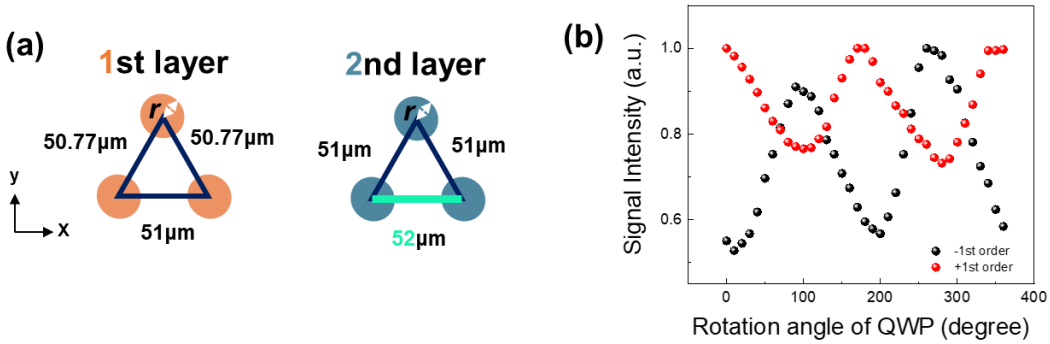


Fig.(a)Anisotropic distortion, (b) Signal intensity of ±1st-order diffracted beam from moiré metasurface at 4.35THz depending on the incident polarization

謝辞 JSPS 科研費(JP23K17885)，JST 創発的研究支援事業(JPMJFR2036)の支援を受けた。

[1] L. Li, et al., Small, 17 2101754 (2021).
[2] S.Ohno, Appl. Phys. Lett., 108 251104 (2016).
[3]第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 19a P3 8, 2018.3.

© 2025年 応用物理学会

モアレ型メタ表面におけるテラヘルツ軌道角運動量二色性の発現

Terahertz orbital angular momentum dichroism of moiré metasurfaces

千葉大学[1]，物材機構[2]，東北大院理[3]，千葉大学分子キラリティー研[4]

○(M2)千葉 初奈[1]，(M1) 折谷 岳[1]，(B)酒井 冴稀[1]，三成 剛生[2]，大野 誠吾[3]，宮本 克彦[1,4]

Chiba Univ.[1], NIMS[2], Tohoku Univ.[3], Chiba Univ. MCRC[4]

○U. Chiba[1], G. Oritani[1], M. Sakai[1], T. Minari[2], S. Ohno[3], K. Miyamoto[1,4]

E-mail: k-miyamoto@fuculty.chiba-u.jp

われわれは，スピン角運動量と軌道角運動量を用いて評価する光の全角運動量分光法の確立を目指している。テラヘルツ（THz）帯円偏光二色性分光イメージング装置の開発を進め，回転モアレ型メタ表面(TLMMS)[1] に存在する3次元的な立体構造キラリティーの可視化に成功した[2]。本研究では新たに，THz 光渦透過イメージング装置を構築し TLMMS に応用した。THz 光渦の透過イメージングと円二色性イメージングを比較し，軌道角運動量の寄与について検証を行った。

THz 光渦透過イメージング装置は，差周波光源をベースとし，Tsurupica 位相板[3]を用いて周波数 4.3 THz の±1 次光渦を生成した。試料に用いた TLMMS の写真を Fig.1(a)に示す。プリンテッドエレクトロニクス[4]法により金属の三角格子配列（銀ディスク半径：11.25 μm，格子定数：50 μm）を 2 枚重ね右回転して作製した。超格子の間隔は約 25 mm となるよう回転角度を調整した。TLMMS には図中に示したように局所的に 2 種類の異なる立体構造キラリティーが存在する。この試料に対し周波数 4.3 THz における，円二色性イメージングおよび円偏光光渦透過イメージングの測定を行った。Fig. 1(b)は，左右円偏光イメージングを行いg値（$g = \frac{I_R - I_L}{I_R + I_L}$, I_L, I_R: 左右円偏光透過強度）を用いて再プロットした円二色性画像である。特異点 A は負，特異点 B は正の値を示し，これまでと同様，立体構造キラリティーを反映した結果となった。同じ試料に対し、偏光は同一の右円偏光で光渦の次数のみ±1 次とした。その結果を元に，$g = \frac{I_{\ell=1} - I_{\ell=-1}}{I_{\ell=1} + I_{\ell=-1}}$（$I_{\ell=1}, I_{\ell=-1}$: ±1 次光渦透過強度）を用いた画像が Fig.1(c)である。得られた分布は円二色性画像とは異なる像となり，特に特異点 A および B においては正負が反転した。これは，軌道角運動量の正負に起因した二色性が実験的に観測されたことを示唆するものである。今後は，軌道角運動量分光に伴う多色性への展開も期待される。

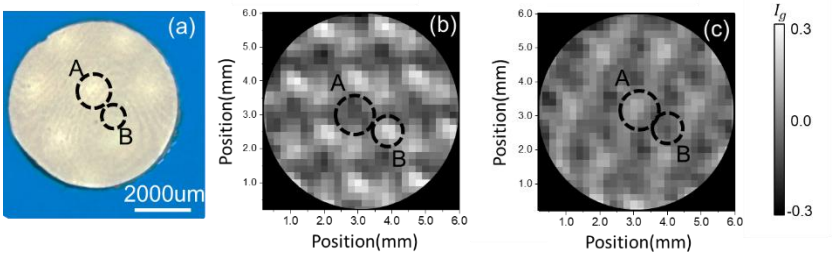


Fig. 1. (a) Optical image of twisted-layered moiré metasurfaces. Experimental results of (b) circular dichroism imaging and (c) orbital angular momentum dichroism imaging for TLMMS at 4.3 THz.

謝辞：本研究の一部は,科研費 23K23248 の支援を受けた。

参考文献

[1] S. Tsuji et al., 48th IRMMW-THz (2023) https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz57677.2023.10299186
[2] S. Ohno, Appl. Phys. Lett., 108, 251104 (2016).
[3] K. Miyamoto et al., Appl. Phys. Lett., 104, 261104 (2014).
[4] L. Li et al., Small, 17, 2101754 (2021).

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation：3.8 Terahertz technologies

[8a-P02-1~16] 3.8 Terahertz technologies

PR
スペクトルデザイン

[8a-P02-1]

Fabrication and Optical Characterization of a Terahertz Quantum Cascade Laser with a 23 μm-Thick Active Region and a Single-Metal Plasmonic Waveguide

○Takayuki Ishida[1], Tsung-Tse Lin[1,2], Koki Yabe[1,3], Yuki Tsuda[5], Yosuke Suzuki[5], Keita Miyagawa[5], Koichi Akiyama[5], Li Wang[1,4], Sachie Fujikawa[1,3], Hiroyuki Yaguchi[3], Hirayama Hideki[1] (1.RIKEN, 2.Tohoku Univ., 3.Saitama Univ., 4.EIT Ningbo, 5.MELCO)

[8a-P02-2]

Influence of Langevin noise in terahertz time-domain spectroscopy using a gain-switched laser diode with delayed optical feedback

○Kaiyu Kusunoki[1], Keishi Takayama[1], Kenji Wada[2], Tetsuya Matsuyama[1], Shunsuke Murai[1], Koichi Okamoto[1], Fumiyoshi Kuwashima[3] (1.Osaka Metropolitan Univ., 2.OMU-ESCARI, 3.Otemon Gakuen Univ.)

[8a-P02-3]

Investigation of a Dual-Comb Spectroscopy SystemEmploying a Resonant-Tunneling-Diode-Based Terahertz Oscillator

○Junta Nagayoshi[1], Keishiro Tabuchi[1], Hiroshi Ito[2], Safumi Suzuki[3], Takashi Arikawa[1] (1.Univ. of Hyogo, 2.Univ. of Tokyo, 3.Science Tokyo)

[8a-P02-4]

Er,Yb:glass Master Oscillator Power Amplifier for Terahertz-wave Parametric Down-conversion

Nao Kannno[1], Ryoya Ogura[1], Shin'ichiro Hayashi[2], Seigo Ohno[3], Katsuhiko Miyamoto[4], Yoshiharu Urata[5], Jun'ichi Shikata[6], Norihiko Sekine[2], ○Kouji Nawata[1] (1.TOHTECH, 2.NICT, 3.Tohoku Univ., 4.Chiba Univ., 5.PHLUXi, Inc., 6.Nihon Univ.)

[8a-P02-5]

Characterization of Terahertz parametric detection using $LiNbO_3$ at Z-plane incidence

○Shiki Tanaka[1], Sota Mine[1,2], Kodo Kawase[1], Kosuke Murate[1] (1.Nagoya Univ., 2.RIKEN)

[8a-P02-6]

Electric field imaging of continuous terahertz waves using phase offset method

○Daito Murakami[1], Takashi Arikawa[1] (1.Univ. of Hyogo)

[8a-P02-7]

Generating terahertz vortex beams by using chiral metasurfaces

○Hiroaki Shirasaka[1], Victor Isao Iwanaga[1], Seigo Ohno[1] (1.Tohoku Univ.)

[8a-P02-8]

A study on refractive index formulation for an extreme refractive index metasurface

○Mahiro Ochiai[1], Yuta Tanaka[1], Riku Torii[1], Taiyo Shiobara[1], Takehito Suzuki[1] (1.TUAT)

[8a-P02-9]

Characterization of dielectric antennas for enhancing oscillating terahertz magnetic fields

○Yuma Igo[1], Hiroki Kudo[2], Eiji Ohmichi[1] (1.Grad. Sch. of Sci., Kobe Univ., 2.Dept. Sch. of Sci., Kobe Univ.)

[8a-P02-10]

Evaluation method for industrial silicon wafers using terahertz waves

○Norimasa Takahashi[1], Eriko Umetsu[1], Ryoichi Fukasawa[1] (1.Spectra Design Ltd.)

[8a-P02-11]

Evaluation of Ranging Measurement in All-Photonic THz Radar System Using Optical Combs

○Isao Morohashi[1], Norihiko Sekine[1] (1.NICT)

[8a-P02-12]

Study on improving the ranging accuracy of THz-FMCW radar using phase information

○Tomofumi Ikari[1,2], Soumi Yasuda[1], Chiko Otani[2,3] (1.Nihon Univ., 2.RIKEN, 3.Tohoku Univ.)

[8a-P02-13]

Decay Time of Coherent Longitudinal Optical Phonons in (001)-Oriented Semi-insulating GaAs: Difference between Terahertz Time-Domain Spectroscopy and Pump-Probe Spectroscopy Employing Laser Pulses Transparent to GaAs

○Hideo Takeuchi[1,2,3], Takuya Nishimura[2] (1.Osaka Metropolitan Univ., 2.Osaka City Univ., 3.Sophia Univ.)

[8a-P02-14]

Correction of thermally induced phase shift in terahertz time-domain spectroscopy

○Makoto Okano[1], Kota Suyama[1], Atsushi Wada[1], Satoshi Tanaka[1] (1.NDA)

[8a-P02-15]

Refractive Index Mapping of Optically Anisotropic Materials Using Terahertz Waves

○Ryota Kimura[1], Kei Takeya[2], Tripathi Saroj[1] (1.Shizuoka Univ., 2.Inst. Molecular Science)

[8a-P02-16]

Influence of electrolyte ions on hydrogen bond networks investigated with terahertz time-domain coherent Raman spectroscopy

○Ryosuke Awata[1], Aoshi Kimura[1], Takahiro Namazuta[2], Shinya Hasegawa[2], Hideaki Kitahara[2], Takashi Furuya[2], Masahiko Tani[2] (1.Univ. Fukui, 2.FIR UF)

厚さ約 23 μm の活性領域を有する片面金属プラズモン導波路型テラヘルツ量子カスケードレーザーの作製と光学評価

Fabrication and Optical Characterization of a Terahertz Quantum Cascade Laser with a 23 μm- Thick Active Region and a Single-Metal Plasmonic Waveguide

理研 [1]，東北大 [2]，埼玉大 [3], 東方理工大 [4] 三菱電機 [5],
○ 石田峻之 [1]，林宗澤 [1,2]，矢部航輝 [3], 津田祐樹 [5], 鈴木洋介 [5], 宮川敬太 [5], 秋山浩一 [5],
王利 [1,4], 藤川紗千恵 [1,3], 矢口裕之 [3], 平山秀樹 [1]

RIKEN [1], Tohoku Univ. [2], Saitama Univ. [3], EIT Ningbo [4], MELCO [5]

○T. Ishida [1], T.T. Lin [1,2], K. Yabe [3], Y. Tsuda [5], Y. Suzuki [5], K. Miyagawa [5], K. Akiyama [5], L. Wang [1,4], S. Fujikawa [1,3], H. Yaguchi [3], H. Hirayama [1]

E-mail: takayuki.ishida.hc@riken.jp

【はじめに】テラヘルツ量子カスケードレーザー (THz-QCL) は，小型，高効率・高出力，狭線幅，連続発振，安価，高耐久性などの特徴を持ち得る優れた THz 領域の半導体レーザー光源である．特に，キャリアリサイクリングによって 1 つの電子が複数回レーザー増幅に寄与することから，高出力動作に優れている．我々の研究グループでは，これまでに活性層へ比較的高いドーピング濃度 ($1\text{-}2 \times 10^{17}$ cm^{-3}) を導入することによってキャリア密度を高め，出力パワーの大幅な向上を実現した [1, 2]．このときの活性領域の厚さは THz-QCL で一般的な約 10 μm である．一方で，24 μm の厚さの活性領域とドライエッチングによるメサ形成によって，活性層の周期数とともに光学利得を増加させ，~ 2.4 W の出力が実現されている [3]．そこでさらなる高出力化に向け，今回は約 23 μm の厚さの活性領域を採用し，ウェットエッチングによって作製した片面金属プラズモン導波路型 (SMW-)THz-QCL の光学評価を行ったので報告する．

【実験方法と結果】使用した活性層の構造は GaAs/$Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ による 4 量子井戸型であり，ドーピング濃度が 7.2×10^{16} cm^{-3}，1 周期の厚さが 60.65 nm である．エピタキシャル構造は，活性領域が 23.047 μm の厚さ（380 周期）を有し，この活性領域を挟んで 50 nm の n^+ コンタクト層がある．メサ形成はリン酸系エッチング液を用いて行い，23 μm の深さにわたって ~ 15×10 mm^2 の面内で均一なエッチングが得られるように液を十分に撹拌した．ボトムコンタクトは Ni/AuGeNi の蒸着後 450 °C アニール，トップコンタクトは Ti/Au の蒸着により形成した．光学測定は QCL サンプルを 10 K に冷却して行い，出力光を液体ヘリウム溜め込型ボロメーターによって検出した．Fig. 1 は，キャビティ長 1.261 mm の SMW-THz-QCL アレイに対する光学測定の結果である．平均 72 %以上の QCL バーでレーザー発振が得られ，最大出力パワーは 2.041 mm のキャビティ長によって約 220 mW 以上が得られた．

[1] T. T. Lin, *et al.*, J. Appl. Phys. **132**, 173101 (2022)
[2] T. T. Lin, *et al.*, Phys. Status Solidi RRL **16**, 2200033 (2022)
[3] L. Li, *et al.*, Electron Lett. **53**, 799 (2017)

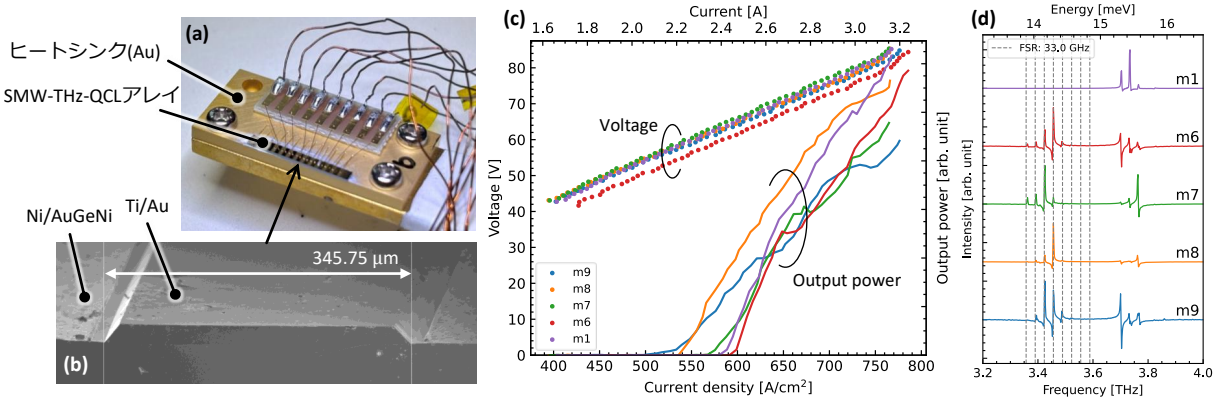


Fig 1: (a) THz-QCL デバイス概観．(b) メサ断面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像．(c) 10 K による光出力-電流-電圧 (LIV) 測定結果．(d) フーリエ変換赤外分光 (FTIR) 法による発振スペクトル．

© 2025年 応用物理学会

戻り光を持つ利得変調半導体レーザーを光源とする THz 時間領域分光法におけるランジュバンノイズの影響

Influence of Langevin noise in terahertz time-domain spectroscopy using a gain-switched laser diode with delayed optical feedback

阪公大工 [1]，阪公大研究推進 [2]，追大理工 [3]

○楠 海侑 [1]，高山慧士 [1]，和田健司 [2]，松山哲也 [1]，村井俊介 [1]，岡本晃一 [1]，桒島史欣 [3]

Osaka Metropolitan Univ.[1], OMU-ESCARI[2], Otemon Gakuin Univ.[3]

○K. Kusunoki[1], K. Takayama[1], K. Wada[2], T. Matsuyama[1], S. Murai[1], K. Okamoto[1], F. Kuwashima[3]

E-mail:sk24243y@st.omu.ac.jp

1. はじめに　我々は，多モード半導体レーザー（MMLD）を光源とする THz 時間領域分光法（THz-TDS）について研究を進めてきた．これまでに，MMLD に戻り光を帰還させた場合，時間的に安定した THz-TDS 出力を効率良く得られることを報告した[1]. これは, 戻り光を持つ MMLD から生じるピコ秒パルスを伴う間欠的カオス発振に基づく現象であることを, レート方程式を用いた解析により明らかにした[2]. 前回は, MMLD に利得変調を加え, さらに戻り光を帰還させた場合の THz-TDS 出力について，レート方程式を用いて数値的に調べた．その結果，ピコ秒パルスの時間幅が短縮され，ピーク値が増大し，THz-TDS 出力の広帯域化および高感度化が可能であることを報告した[3]．今回は，MMLD 内で発生するランジュバンノイズが THz-TDS 出力に及ぼす影響について，数値的に調べたので報告する．

2. 数値計算　中心波長 800 nm，共振器長 300 μm の MMLD を想定し，61 モードの複素光電界の時間発展を多モードレート方程式を用いて計算した．この出力光は 2 分され，エミッタ側およびレシーバ側の光伝導アンテナ（PCA）に入射して光キャリアを発生させる．エミッタ側の PCA に電圧印加すると瞬時電流が流れ, その時間微分に比例した THz 波が発生する．この THz 波電界がレシーバ側の PCA 内の光キャリアを駆動し，外部電流を発生させる. レシーバ側アーム内の遅延機構を用いて, THz 波電界と光キャリアの時間配置を掃引することにより，相互相関出力（THz-TDS 出力）を得る．これをフーリエ変換することにより，THz-TDS 出力スペクトルを求めた．計算では PCA における帯域制限は考慮しなかった．注入電流の直流バイアスは閾値電流に, 変調電流振幅は閾値電流の 2 倍に設定し，変調周波数は 1 GHz とした．また，戻り光は戻り光係数 f_c によって複素光電界の微分方程式中に考慮した．

3. 結果と考察　Fig. 1 に，f_c の値を 0 から 1 まで変化させたときの THz-TDS 出力エネルギーの計算結果を示す. 赤丸はランジュバンノイズ（LN）を考慮した場合，青丸は LN を考慮しなかった場合に対応する．戻り光量の増加に伴い，LN 考慮ありの方が LN 考慮なしの場合に比べて，THz-TDS 出力エネルギーの増加割合が大きくなっている．Fig. 2 には，異なる f_c に対する MMLD の平均出力時間波形を示した. LN 考慮なしの場合，LN 考慮ありの場合に比べて平均パルス波形の時間幅が広がり，ピーク値も低くなった．この影響により，Fig. 1 に示した THz-TDS 出力エネルギーの低下が生じたと考えられる. 戻り光は強度変動を拡大し，短パルス化をもたらす一方で，時間ジッターを拡大させる．Fig. 2 から，LN は時間ジッターを抑制することにより，THz-TDS 出力エネルギーの増大に寄与することがわかった．

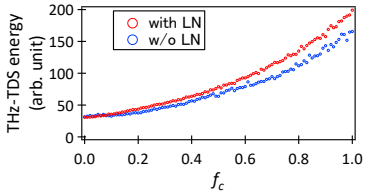


Fig. 1. Variations of THz-TDS output energy with respect to f_c when LN was included (red) and not included (blue).

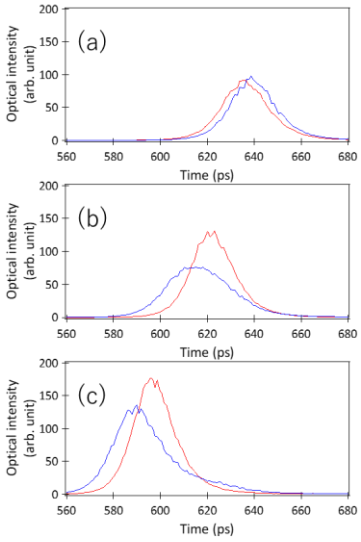


Fig. 2. Average output waveforms from a gain-switched MMLD with delayed optical feedback when f_c was set to (a) 0, (b) 0.3, and (c) 0.6, respectively, with LN included (red) and not included (blue).

[1] F.Kuwashima, et al. Opt. Express 28, 24833 (2020)
[2] K.Wada, et al. Spectroscopy J., 1, 137 (2023)
[3] K.Kusunoki, et al. 応物秋季, 19a-P05-3 (2024)

© 2025年 応用物理学会

共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器を用いた デュアルコム分光システムの検討

Investigation of a Dual-Comb Spectroscopy System Employing a Resonant-Tunneling-Diode-Based Terahertz Oscillator

兵庫県立大[1]，東大[2]，東京科学大[3]
○(M1C)永吉 純大[1]，田淵 啓士郎[1]，伊藤 弘[2]，鈴木 左文[3]，有川 敬[1]
Univ. of Hyogo[1], Univ. of Tokyo[2], Science Tokyo[3]
Junta Nagayoshi[1], Keishiro Tabuchi[1], Hiroshi Ito[2], Safumi Suzuki[3], Takashi Arikawa[1]
E-mail:ei25k015@guh.u-hyogo.ac.jp

テラヘルツ波の分光技術で最も一般的な手法としてテラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)が知られている。しかし、そのシステムには大型かつ高価なフェムト秒パルスレーザーや複雑な光学系が必要であるため、普及を妨げる一因となっている。そこで、本研究では小型半導体デバイスである共鳴トンネルダイオード(RTD)テラヘルツ発振器[1]を用い、THz-TDS と同等のコヒーレント計測が可能なデュアルコム分光法技術の開拓を行った。

デュアルコム分光法とは、2 台の繰り返し周波数が僅かに異なる周波数コム光源を干渉させ、その干渉信号から試料の吸収スペクトルや屈折率が得られる手法である[2]。我々は図 1(a)に示す光学系を構築し、偏光子 1 の角度 θ を偏光子 2 に対して 0 から 90° まで変化させた時の干渉信号の強度減衰を測定した(図 1(b))。S-com は試料の情報を転写するコムで、L-com は各スペクトルを検出するために用いた。また、FMBD は二つのコムのビートを検出するミキサとして動作している。実験結果は理論曲線($\cos^2\theta$)とほぼ等しくなっていることから、本システムで試料によるテラヘルツ波の減衰を計測可能であることがわかった。

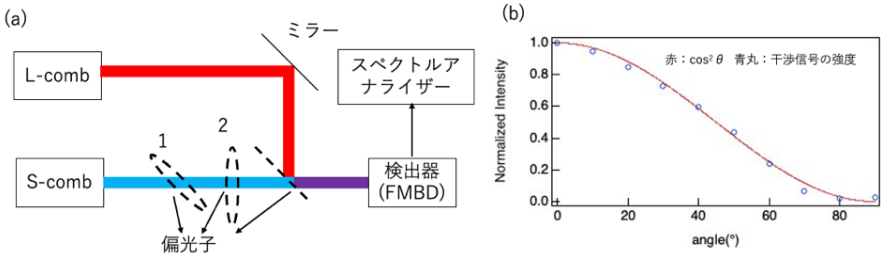


図 1(a)テラヘルツデュアルコム分光法の模式図、(b)干渉信号強度の角度依存性

本研究に使用した RTD 発振器の提供に関して、ローム株式会社に深く感謝申し上げます。

[1] K. Tsuruda et al. 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), 193 (2020).
[2] 田淵、伊藤、鈴木、有川　第 72 回応用物理学会春季学術講演会、14p-K504-2
[3] I. Coddington, N. Newbury and W. Swann, Optica **3**, 414 (2016).

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツ波パラメトリック波長変換に向けたEr,Yb:glass MOPA

Er,Yb:glass Master Oscillator Power Amplifier for Terahertz-wave Parametric Down-conversion

東北工大[1]，情報通信研究機構[2]，東北大[3]，千葉大[4]，フラクシ(株)[5]，日大[6]，菅野那雄[1]，小倉涼也[1]，林伸一郎[2]，大野誠吾[3]，宮本克彦[4]，浦田佳治[5]，四方潤一[6]，関根徳彦[2]，縄田耕二[1]，

TOTECH[1], NICT[2], Tohoku Univ.[3], Chiba Univ.[4], PHLUXi, Inc.[5], Nihon Univ.[6], N. Kanno[1], R. Ogura[1], S. Hayashi[2], S. Ohno[3], K. Miyamoto[4], Y. Urata[5], J. Shikata[6], N. Sekine[2], K. Nawata[1],

E-mail: k-nawata@tohtech.ac.jp

ニオブ酸リチウム($LiNbO_3$)を用いたテラヘルツ波パラメトリック波長変換は、強い近赤外励起光によるフォノンポラリトンを介した誘導ラマン散乱であるため、励起光強度を得やすい 1 μm レーザーを用いて高出力化、広帯域化、センシング応用などの研究が進められてきた。我々は、光通信帯の波長を用いて周波数標準に紐付けされた波長変換技術を開発するため Er,Yb:glass を用いた 1.5 μm レーザーを開発している。本研究では、テラヘルツ波パラメトリック波長変換に向けた高出力化に有効な固体光増幅器を構築し、増幅特性の検証を行った。

実験光学系を図 1(左)に示す。Er,Yb:glass を用いた受動 Q スイッチレーザーの出力光を増幅器用の Er,Yb:glass に入射させ、半導体レーザー励起による光増幅を行った。増幅器はモードマッチング効率を高めるため端面励起方式とし、利得を高めるためダブルパス光学系とした。構築した増幅器の入出力特性を図 1(右)に示す。横軸を励起半導体レーザーパワー、縦軸をフォトディレクターで測定したパルス尖頭出力とした。励起光パワーを高めると尖頭出力が増大する様子が確認でき、励起パワー1.0 W で約 1.25 倍の増幅を得られた。励起光パワーをさらに高め 1.5 W にしたところ端面コーティングが損傷し、出力の低下が確認された。光損傷を回避し、更なる出力増幅に向けた光増幅器の設計など詳細は当日報告する。

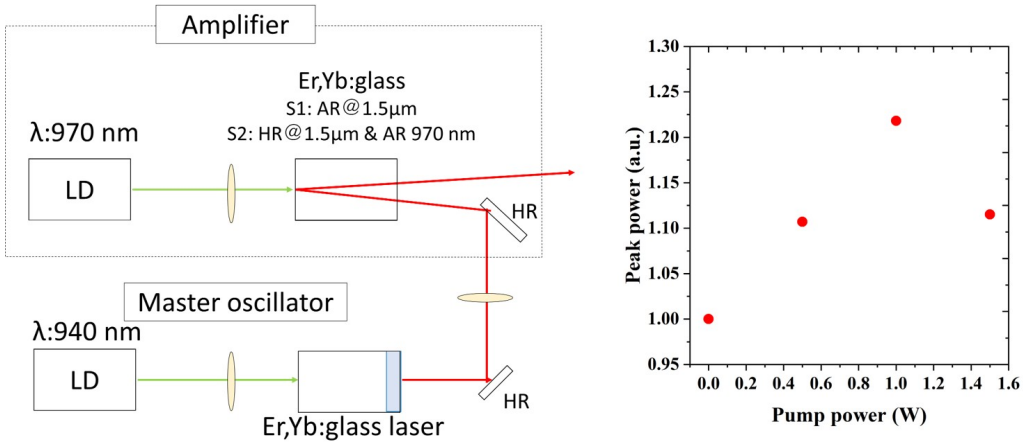


図 1. Experimental setup (left). Input output property of the amplifier (right).

謝辞：本研究の一部は、東北大学-NICT マッチング研究支援事業の支援を受けて実施した。

© 2025年 応用物理学会

$LiNbO_3$ を用いたテラヘルツパラメトリック検出における Z 面入射時の特性評価

Characterization of Terahertz parametric detection using $LiNbO_3$ at Z-plane incidence

名大院工[1],理化学研究所[2] ○田中 志貴[1], 嶺 颯太[1,2], 川瀬 晃道[1], 村手 宏輔[1]

Nagoya Univ.[1], RIKEN[2] ○Shiki Tanaka[1], Sota Mine[1,2], Kodo Kawase[1], Kosuke Murate[1]

E-mail: tanaka.shiki.u0@s.mail.nagoya-u.ac.jp

テラヘルツ (THz) 波の産業応用を目指し、我々は光注入型 THz 波パラメトリック発生器（is-TPG）の原理を応用した THz パラメトリック検出の研究開発を進めてきた [1]。
THz パラメトリック検出では、THz 波を近赤外光にアップコンバートすることにより、室温下にもかかわらず高感度な検出が可能となる。

近年、本手法において THz 波が位相整合条件から大きく外れた角度で $LiNbO_3$(LN)結晶に入射した場合でも検出が可能であることを確認した [2]。通常は LN 結晶の Y 面から入射するが、X 面から THz 波を入射しても検出できた。Z 面から THz 波を入射した場合でも検出できれば、THz 波の入射方向に関する制約がさらに緩和され、応用上の利便性につながると期待される。そこで本研究では、LN 結晶の Z 面から THz 波を入射した際の THz パラメトリック検出の特性評価を行った。

Fig. 1 に実験系を示す。THz 光源には is-TPG を用い、出力は焦電検出器によって校正した。THz 波を検出用 LN 結晶の Z 面方向から入射し、アップコンバートされた検出ストークス光を分光器またはカメラにより観測した。通常の Y 面からの THz 波入射時と同じ向きに、位相整合条件を満たす角度で検出ストークス光が生成されることを確認した。THz 波をアッテネーターで減衰し検出感度を測定したところ、Fig.2 に示すように最小検出感度は 1.1 pJ であった。以上の通り、LN 結晶の X, Y, Z 面いずれから THz 波を入射しても検出が可能であることがわかった。

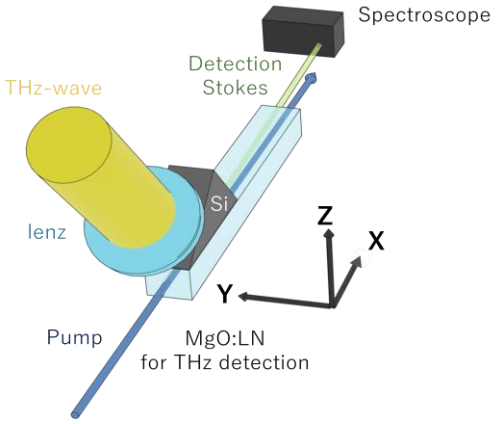


Fig.1 Experimental setup for measuring the sensitivity of THz parametric detection

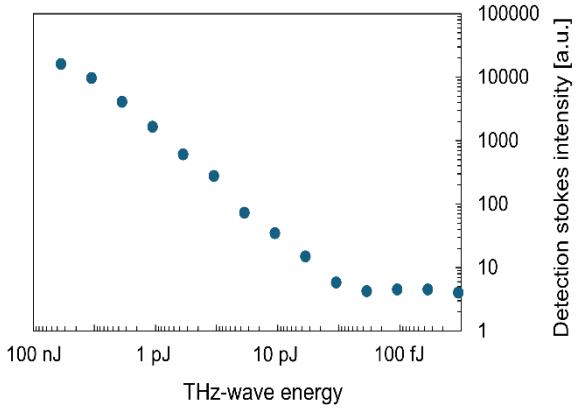


Fig.2 Dynamic range of THz parametric detection at Z-plane incidence

謝辞

本研究は JST 先端国際共同研究推進事業 JPMJAP2340、創発的研究支援事業 JPMJFR212J、科研費 22H00212、22KJ1596、24K00943 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] K. Murate, S. Mine, and K. Kawase, IEEE J. Quantum Electron. 29, 1–13 (2023).

[2] H. Inoue, S. Mine, K. Kawase, and K. Murate, Sci. rep., To be published (2025)

© 2025年 応用物理学会

位相オフセット法を用いた連続テラヘルツ波の電場イメージング

Electric field imaging of continuous terahertz waves using phase offset method

兵庫県立大工

(M1) ○村上 大斗，有川 敬

Univ. of Hyogo

○Daito Murakami, Takashi Arikawa

E-mail: ei25b025@guh.u-hyogo.ac.jp

軌道角運動量を有する光、いわゆる光渦をテラヘルツ波帯に応用し、多重無線通信の実現に向けた研究が進展している[1]。実用化には、光渦の特異な位相構造を効率的かつ高精度に可視化する電場イメージング技術が不可欠である。先行研究では連続テラヘルツ波の電場の空間分布を可視化することに成功しているものの、十分な画質を得るには５万枚以上の画像を４０分かけて取得し平均化処理を行う必要があり、効率性や感度の面で課題が残されている[2]。

そこで本研究ではこれらの課題を解決し、連続テラヘルツ波の電場を効率的かつ高感度にイメージングする手法の確立を目指した。連続テラヘルツ波の発生源には単一走行キャリアフォトダイオードを用い、検出には電気光学サンプリング法を用い、CMOS カメラで画像を取得した。また、検出感度を向上させるために本研究では位相オフセット法[3]を用いた。

Fig.1 の青線は画像の背景ノイズを、また赤線はテラヘルツイメージの各ピクセル値をヒストグラム化したものである。背景ノイズはゼロを中心に分布しているが、テラヘルツイメージはマイナス側にシフトしており、テラヘルツ電場を検出できていると考えられる。

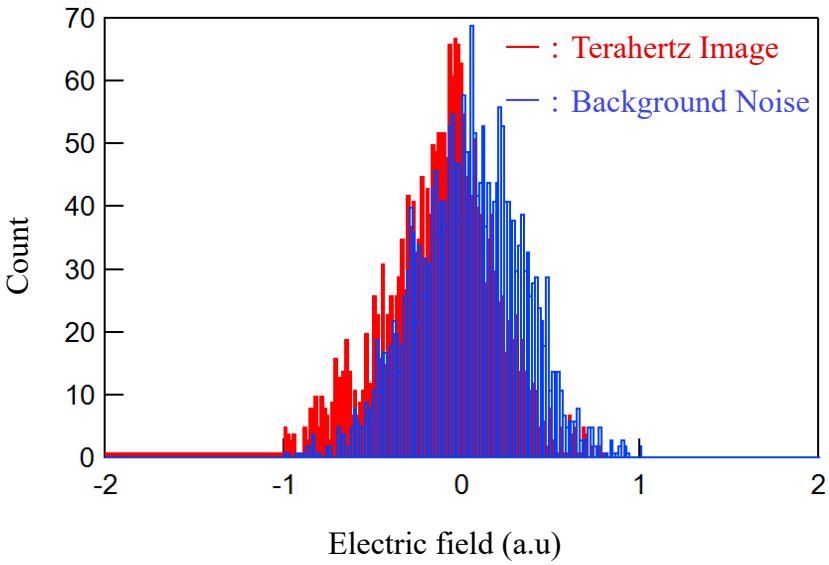


Fig.1　Histogram of terahertz wave image and background noise

[1] H. Sasaki et al., IEEE Journal on Selected Areas in Communications, **42**, 1613 (2024).

[2] A. Nahata et al., Appl. Phys. Lett. **81**, 963 (2002).

[3] G. Asai et al., Opt. Express **29**, 3517 (2021)

© 2025年 応用物理学会

キラルメタ表面を用いた光渦発生

Generating terahertz vortex beams by using chiral metasurfaces

東北大理[1] ○(M1)白坂啓陽[1], 岩永ヴィクトル勲[1], 大野誠吾[1]

Dept. Physics, Tohoku Univ.[1]

○(M1)Hiroaki Shirasaka[1], Iwanaga Victor Isao[1], Seigo Ohno[1]

E-mail: shirasaka.hiroaki.t5@dc.tohoku.ac.jp

光渦は、波面内で位相が螺旋状に分布し、イメージングをはじめとする様々な応用提案がされている。これまでに、テラヘルツ帯における光渦の発生には螺旋型位相板を利用した手法[1]や異方性の回転により円偏光に対する Pancharatnam・Berry(PB)位相を利用した手法が提案されており、われわれも後者のアプローチを行ってきた[2]。しかし、いずれの手法においても光学素子により与えられる位相差により動作帯域が制限されている。そこで、本研究ではキラリティの連続変化を利用したメタ表面による周波数制限を受けない光渦の発生手法を目指した。

Figure 1 に示す立体金属十字構造にテラヘルツ直線偏光を集光照射することで入射方向によって生じる PB 位相の差を光渦発生に利用する。この構造は入射方向によって見かけのキラリティが変化する。垂直入射では Fig.1(a)のようにアキラル構造に見えるが、斜入射の場合(斜め下から見た場合)は Fig.1(b)のようなキラル構造に見える。ここに集光した直線偏光を入射すると、斜入射成分の方向によって見かけのキラリティが連続的に変化することから、クロスニコル測定において付与される PB 位相の違いによる光渦の発生が期待される。クロスニコル配置の場合従来のように円偏光を用意する必要がない。

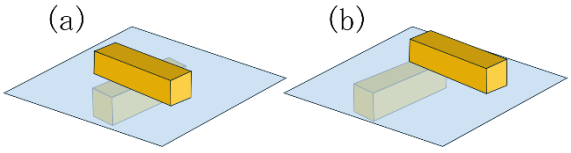


Fig.1 (a) Achiral-shape. (b) Chiral-shape.

金属ロッド配列を基板両面に作製することで立体十字構造を周期的に持つ試料を作った。カプトンフィルム (厚さ 12.5 μm)に密着させたメタルマスク上から Cr(5 nm)を接着層として、Au(100 nm)を成膜したのちマスクを取り除くリフトオフプロセスを施した。試料面に対して、直線偏光を焦点距離 40 mm のレンズで集光入射し透過した THz 波の位相強度分布測定をクロスニコル配置で行った。0.77 THz における実験結果を Fig.2 に示す。円環状の強度分布とそこに沿って連続的に変化する位相分布が確認できた。他の周波数における解析について詳細は当日報告する。

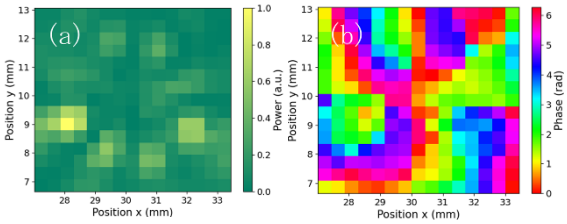


Fig.2 (a) Intensity distribution. (b) Phase distribution.

[1] K. Miyamoto et al., Appl. Phys. Lett. **104** 261104 (2014).

[2] S. Ohno, Appl. Phys. Lett. **108**, 251104 (2016).

謝辞 本研究は JST 創発的研究支援事業(JPMJFR2036)、JSPS 科研費(JP23K04567, JP23K17885, JP22K04940, JP22H01980, JP22H01253)の支援を受けた。

© 2025年 応用物理学会

極限屈折率材料の屈折率の定式化の一検討

A study on refractive index formulation for an extreme refractive index metasurface

○落合 真海[1], 田中 悠太[1], 鳥居 璃公[2], 塩原 太陽[2], 鈴木 健仁[3]
○Mahiro Ochiai[1], Yuta Tanaka[1], Riku Torii[2], Taiyo Shiobara[2], Takehito Suzuki[3]
東京農工大学 工学府 知能情報システム工学専攻[1], 工学部 知能情報システム工学科[2], 工学研究院 先端電気電子部門[3]
Department of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate School of Engineering[1], Department of Electrical Engineering and Computer Science, Faculty of Engineering[2] Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering[3], Tokyo University of Agriculture and Technology
Email: takehito@go.tuat.ac.jp

1. まえがき

物理現象の法則を発見することは、科学の究極の目標の 1 つである。新たな物理法則の発見は、物理現象の理解というサイエンスと、その物理法則によるテクノロジーに、極めて大きな貢献を果たす。著者らは、独自に発見した極限屈折率材料[1]により、高屈折率・低反射な特性[2-5]、ゼロ屈折率・低反射な特性[6]、負の屈折率・低反射な特性[7]を有するメタサーフェスを実現してきている。本稿では屈折率とメタアトムのパラメータとを結びつける式を初めて記載する。

2. 極限屈折率材料の屈折率の定式化

図 1(a)、(b)に極限屈折率材料の全体構造とメタアトム単体を示す。ここでは誘電体基板の表面と裏面の両面に y 軸の長さ l と x 軸方向の長さ w の金属カットワイヤーを y 軸方向の間隔 g と x 軸方向の間隔 s で配置している。動作は等価回路による説明がなされてきている[2-7]。テラヘルツ波の電界成分により表面と裏面のカットワイヤーが直列共振回路として動作し、誘電性の共振が起き、比誘電率を制御できる。テラヘルツ波の磁界成分により表面と裏面のカットワイヤーが並列共振回路として動作し、磁性の共振が起き、比透磁率を制御できる。例えば、比誘電率と比透磁率の両方を高く制御すると、高い屈折率、低い反射率、高い透過率を実現できる。

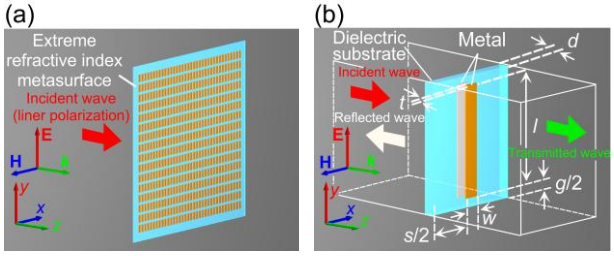


Fig. 1 (a) Extreme refractive index metasurface (b) Single meta-atom.

図 1(a)の屈折率 n は式(1)の法則–初期の Suzuki's law 鈴木の法則–でおおよそ表せる。屈折率 n とメタアトムのパラメータを結びつける式である。本稿で初めて記載した。

$$n(l,g,w,s,f,d) = (\text{定数}) \times \left(l\text{に関するファノ共鳴の関数}\right) \times \left(g\text{に関するフェルミ・ディラックの分布関数}\right) \times (w \cong 1) \times \left(s\text{に関するフェルミ・ディラックの分布関数}\right) \times \left(f\text{に関するファノ共鳴の関数}\right) \times (\cong 1/d) \quad \cdots (1)$$

3. 結果の比較

図 2(a)と(b)に l と g による屈折率 n について、式(1)の試行による等高線図と有限要素法電磁界シミュレータ Ansys 社 HFSS の解析による等高線図を示す。図 2(a)の式(1)の試行と(b)の解析結果はおおよそ傾向が近い。図 2(a)と(b)の誤差は、式(1)内の複数の定数の影響などが考えられる。

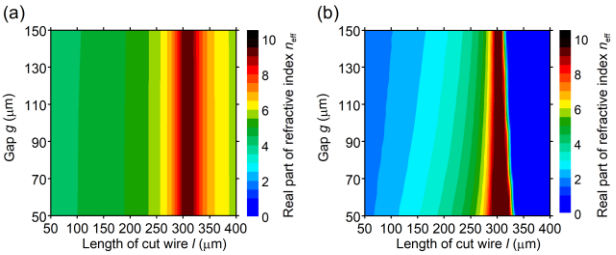


Fig. 2 Contour maps of the real part of refractive indices n obtained from (a) Eq. (1) and (b) Ansys HFSS.

4. まとめ

本稿で極限屈折率材料の屈折率 n とメタアトムのパラメータを結び付ける式がおおよそ式(1)で表せることを初めて記載した。現在引き続き、定数の探索を進めている。現在の人工知能 AI でも 0 から 1 の形で未知の物理法則を新たに発見することはまだ容易なことではないと思われるが、未知の物理法則に近づいた後の定数の探索などには人工知能 AI が非常に大きな役割を果たしていくと思われる。

謝辞

本研究の一部は、JST 創発的研究(JPMJFR222I)、JSPS 科研費基盤研究(B)(24K01376)、JSPS 科研費挑戦的研究(萌芽)(24K21617)の助成を受けたものである。

参考文献

[1] 日本特許 6596748 号, 日本特許 6676238 号, 日本特許 7315983 号
[2] K. Ishihara and T. Suzuki, J. Infrared Millim. Terahertz Waves **38**(9), 1130–1139 (2017).
[3] K. Sato and T. Suzuki, Nanophotonics **12**(13), 2537–2544 (2023).
[4] H. Asada and T. Suzuki, Optics Letters, **49**(6), 1409–1412, (2024).
[5] K. Sato, K. Watai, K. Ishihara, R. Ohuchi, S. Kondoh, T. Sato, and T. Suzuki, Applied Physics A, **130**(428), 1–14 (2024).
[6] T. Suzuki and H. Asada, Optics Express, **28**(15), 21509–21521 (2020).
[7] T. Suzuki, M. Sekiya, T. Sato, and Y. Takebayashi, Optics Express, **26**(7), 8314–8324 (2018).

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツ振動磁場増強誘電体アンテナの特性評価

Characterization of dielectric antennas for enhancing oscillating terahertz magnetic fields

神戸大院理[1]，神戸大理[2]　○(D1)伊郷 祐馬[1]，工藤 洋規[2]，大道 英二[1]

Grad. Sch. of Sci., Kobe Univ.[1], Fac. of Sci., Kobe Univ.[2] ○Yuma Igo[1], Hiroki Kudo[2], Eiji Ohmichi[1]

E-mail: 231s105s@stu.kobe-u.ac.jp

テラヘルツ波を用いた電子スピン共鳴（ESR）測定には高いスペクトル分解能やギャップ系の信号観測といった利点がある一方、光源出力が低いため測定感度が低いという課題がある。このような課題を解決する方法として、本研究では誘電体アンテナを用いた振動磁場増強効果に着目する。誘電体アンテナを用いることで ESR 吸収遷移にかかわる振動磁場成分の局所的な増強を可能にし、テラヘルツ帯 ESR 測定の感度向上を目指す。

誘電体アンテナ[1]では、誘電体のサイズと同程度の波長をもつ電磁波が誘電体に入射すると、誘電体内に電磁波の閉じ込めが生じる。本研究では、局所的に誘電体内部の振動磁場が増強される磁気双極子モード（MD）（図 1 内挿図）や磁気四重極子（MQ）モードなどの磁気的な共振モードに着目する。

以下では、実際の ESR 測定のセットアップを念頭に置いて、円筒型の誘電体アンテナ（図 1 内挿図）における振動磁場増強効果について電磁波シミュレーションによる解析結果を示す。直径 R=200 μm、高さ h=150 μm の円筒型誘電体アンテナのアンテナ中心部における振動磁場成分の周波数依存性を図 1 に示す。10-1000 GHz の周波数範囲内では合計 2 つの増強ピークが確認された。振動磁場分布の解析から 419.8 GHz と 777.2 GHz のピークは双極子モードに由来すると考えられる。講演では、より詳細な形状依存性について報告する。

[1] Jiahui Xu *et al.*, Adv. Optical Mater. **9**, 2100112 (2021).

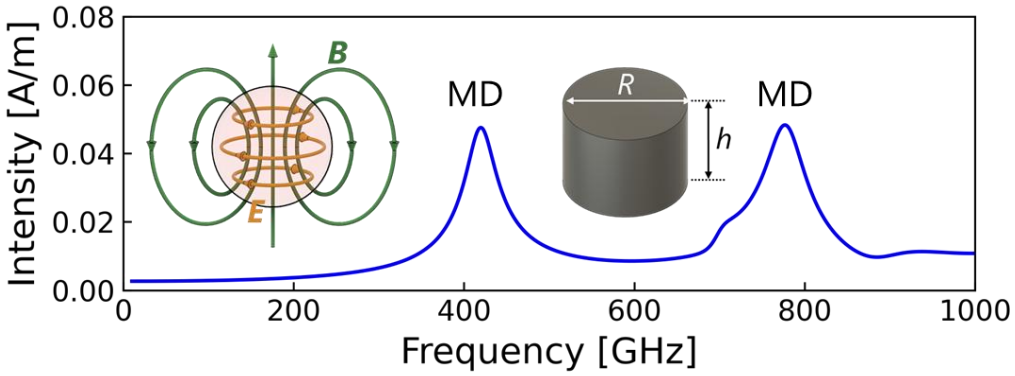


Fig.1. Frequency response of the cylindrical dielectric antenna with R=200 μm and h=150 μm. The insets show a magnetic dipole mode in a dielectric sphere (left) and the simulation model of a cylindrical dielectric antenna with radius R and height h (right), respectively.

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツ波による産業用シリコンウエハの評価法の検討

Evaluation method for industrial silicon wafers using terahertz waves

スペクトルデザイン[1]　○高橋功将[1]，梅津枝里子[1]，深澤亮一[1]

Spectra Design Ltd.[1], ◦Norimasa Takahashi[1], Eriko Umetsu[1], Ryoichi Fukasawa[1]

E-mail: takahashi@spectra-dsn.co.jp

テラヘルツ帯における分光計測を用いた半導体材料や半導体薄膜の光学的評価やそれに基づいた電気的評価については、これまで多くの研究なされている[1]。産業用シリコンウエハは比較的透過性が高く、平板なので多重反射による干渉縞が現れる。多重反射による干渉は透過率スペクトルを激しく振動させるので複素屈折率などの算出を困難にする。通常、光学計算による実測値へのフィッティングによって光学的・電気的特性パラメータが決定されるが非線形最適化のため、ノイズなどの影響で解析が困難になる場合がある。一方、テラヘルツ時間領域分光法 (Terahertz Time-Domain Spectroscopy: THz-TDS)は優れた計測技術であるが、計測時間を要し、高価で複雑なシステム構成が必要となる。実際の半導体製造工程で応用する際には簡便なシステムと解析的方法が望まれる。

本研究では、0.2～1.0THz 帯の産業用シリコンウエハの光学的評価に対して解析的方法を検討したので報告する。透過率測定には、THz-TDS を用いた。Fig.1 に透過率スペクトルを示す。多重反射の影響を受けて透過率スペクトルが激しく振動している。干渉縞の極大値（山）と極小値（谷）を利用して複素屈折率を求める Manifacier モデル[2]を用いて透過率スペクトルの解析を試みた。また、我々は簡便な計測システムとして小型・軽量の 300GHz 周波数逓倍光源とショットキーバリアダイオードを用いた反射型イメージングシステムを構築した。さらに Fig.2 に示すように産業用シリコンウエハの光学的特性をイメージング計測し、電気的評価への可能性を検討した。

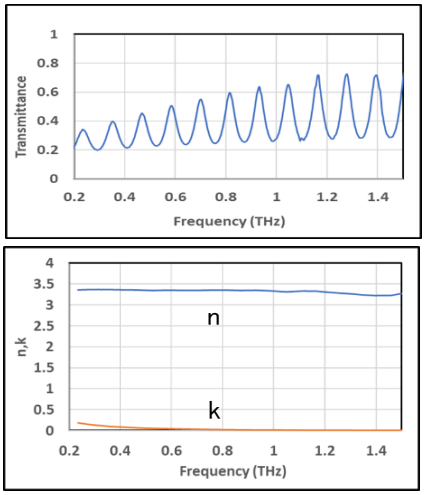


Fig.1 Transmittance and refractive index

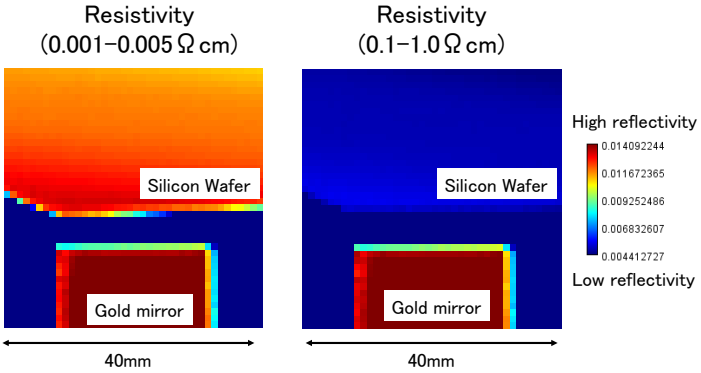


Fig.2 THz images of two p-type Si samples

[1] S. Perkowitz, Optical Characterization of Semiconductors, Academic press, (1993).

[2] J. C. Manifacier, J. Gasiot, and J. P. Fillard, J. Phys. E, 9, 1002 (1976).

© 2025年 応用物理学会

変調器型光コムおよび EO 検出を用いたオールフォトニック THz レーダシステムにおける測距特性の評価

Evaluation of Ranging Measurement in All-Photonic THz Radar System Using Optical Combs

情通機構　○諸橋 功，関根 徳彦

NICT [1], ○Isao Morohashi, Norihiko Sekine

E-mail: morohashi@nict.go.jp

テラヘルツ(THz)波は、その特異な透過特性や広大なスペクトル帯域から、様々な応用が期待されている。その一つとして高分解能レーダがあり、様々な提案が行われている[1,2]。我々はこれまでに、変調器型光コム発生器および電気光学(EO)検出を用いたオールフォトニック THz レーダシステムを提案し、周波数変調連続波(FM-CW)信号の検出を実証してきた[3]。本レーダシステムは、レーダ信号を光信号として光ファイバ中を伝送させるため、長距離の伝送が可能であることが特徴である。本稿では、オールフォトニック THz レーダシステムの測距特性について報告する。

図 1 に実験系の概略を示す。本 THz レーダシステムは、光信号源に変調器型光コム発生器(MZ-FCG)を用いた FM-CW 方式のシステムとなっている。光コム発生器を周波数変調したマイクロ波信号で駆動してチャープ光コムを発生させる。そのチャープ光コムから 2 モードを抽出し、単一走行キャリア走行フォトダイオード(UTC-PD)で差周波発生を行うことにより、中心周波数 110 GHz、チャープ幅 330MHz のチャープ THz 信号が生成した。一方で THz 検出では、チャープ光コムとチャープ THz 信号を EO 結晶に同軸に入射し、光路差によって生じた周波数差を光ヘテロダイン法により検出した[4]。

本 THz レーダシステムの測距特性を測定するため、THz 信号生成側にシングルモードファイバ(SMF)を挿入した。SMF 長を 20m から 220m まで変化させたときのビート信号の周波数変化を図 2 に示す。ビート信号の周波数は SMF 長に比例して増加しており、その傾きは 1.15 kHz/m であった。これは、THz 波のチャープ率から予測される値にほぼ一致した。この結果は、本システムにより測距が可能であることを示している。

参考文献

[1] L. Yi, *et al.*, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. **29**, 8500714 (2023).　[2] T. Ikari, *et al.*, Photonics **10**, 343 (2023).
[3] 諸橋他, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-P05-9 (2025).　[4] I. Morohashi, *et al.*, Opt. Lett **44**, 487 (2019).

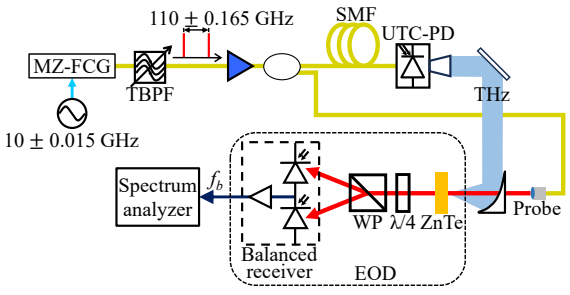


図 1 オールフォトニック THz レーダシステムの概略

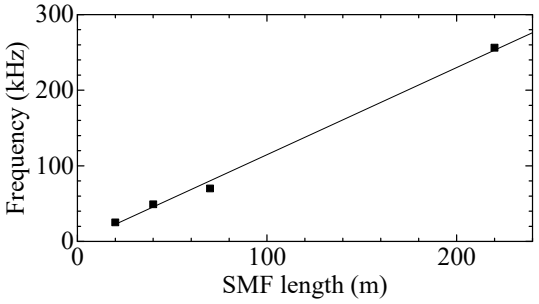


図 2 SMF 長に対するビート信号の周波数変化

© 2025年 応用物理学会

位相情報を利用した THz-FMCW レーダーの測距精度向上に関する検討

Study on improving the ranging accuracy of THz-FMCW radar using phase information

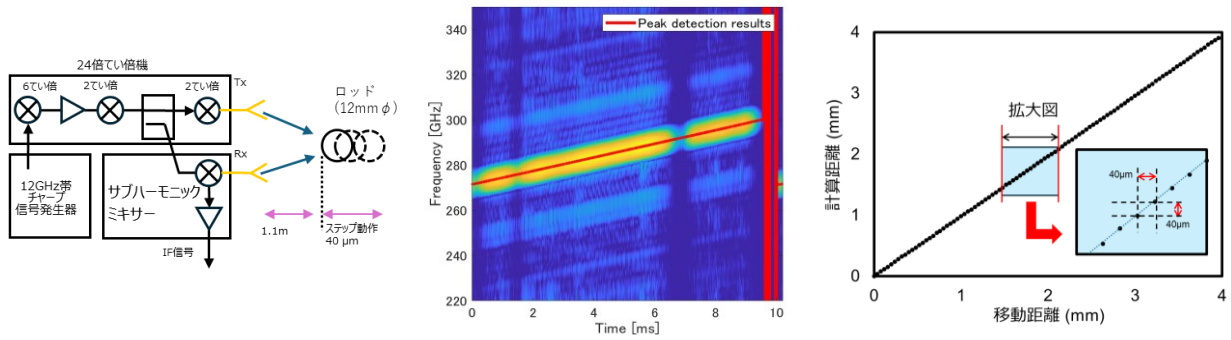
日大工[1]，理研[2] ○碇智文[1, 2]，安田 蒼海[1]，大谷知行[2, 3]

Nihon Univ.[1],RIKEN[2], Tohoku Univ.[3] ○Tomofumi Ikari[1,2], Soumi Yasuda[1], Chiko Otani[2,3]

E-mail: ikaritomofumi@nihon-u.ac.jp

FMCW レーダーを用いたテラヘルツ波 3 次元イメージング技術は、光学的に不透明な媒質を通して内部の構造を非接触で観測が可能であることから、セキュリティ応用や生体信号の計測、工業製品の非破壊検査技術への応用が期待されている。我々は、このような THz 波の特徴を利用し、THz - FMCW レーダー3 次元イメージングの応用研究を行ってきた[1]。本報告では、ターゲットから反射する THz 波の位相情報を活用し、測距精度の向上についての検討を行ったので報告する。また、位相情報を用いた距離測定において重要となる、高速周波数掃引中の周波数の時間変化を高精度に計測する方法についても併せて報告する。

図 1 に、位相計測を用いた FMCW レーダーの評価実験系を示す。本システムは、12 GHz 帯のチャープ信号源、24 逓倍機、サブハーモニックミキサーから構成されており、272-302GHz の範囲を 10ms で掃引する。ターゲットは 1.1 m 先の自動ステージに固定し、後退させることが可能である。ターゲットを 40 μm ピッチで移動しながら IF 信号を取得し、これに DFT(離散フーリエ変換)を施し、周波数から絶対距離を計測する。さらに、IF 信号の初期位相を用いて離散的な距離間を補完することで高精度な計測を行う。位相情報を利用するためには、掃引中の周波数を把握することが必要である。そこで、新たな周波数測定方法を導入し、高速掃引中の周波数変化を高精度に測定した。その結果を図 2 に示す。良好な線形特性が確認できるとともに、周波数の時間変化を計測することができた。図 3 に、これらの情報を利用して測定したターゲットまでの距離を示す。40 μm のターゲットの移動に対応して距離が正確に計測されていることが確認でき、測定精度は標準偏差で±6.1 μm であった。



(a) (b) (c)

Figure1 Schematic diagram of phase sensitive THz-FMCW radar (a). Measurement result of spectrogram of emitting THz chirp signal (b). Result of high accuracy distance measurement (c).

1) 碇 智文、佐々木芳彰、大谷知行、第 71 回応用物理学会春季学術講演会、25p-11E-5

© 2025年 応用物理学会

(001)面方位半絶縁性 GaAs におけるコヒーレント縦光学フォノンの減衰時間：テラヘルツ時間領域分光と GaAs に対して透明なパルス光を用いたポンプ・プローブ分光法での違い

Decay Time of Coherent Longitudinal Optical Phonons in (001)-Oriented Semi-insulating GaAs: Difference between Terahertz Time-Domain Spectroscopy and Pump-Probe Spectroscopy Employing Laser Pulses Transparent to GaAs

大阪公立大学・工[1]，大阪市立大学・工[2]，上智大学・理工[3]　○竹内日出雄[1,2,3]，西村拓也[2]

Osaka Metropolitan Univ.[1], Osaka City Univ.[2], Sophia Univ.[2], ○Hideo Takeuchi[1], Takuya Nishimura[2]

E-mails: Hideo.Takeuchi_PhD@omu.ac.jp; h-takeuchi-0s3@sophia.ac.jp

フェムト秒レーザーパルス光源の発展に伴い，コヒーレント縦光学(LO)フォノンの時間領域分光が盛んに行われている。LO フォノンの時間領域分光の長所として，フォノン減衰時間を直接観測できることがあげられる。テラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)では，原理的に試料に吸収されるレーザーパルス光を用いて観測を行う。一方ポンプ・プローブ分光では，試料に対して透明なレーザーパルス光を用いて計測を行うことが可能である。この点に着目して，本研究では(001)面方位半絶縁性 GaAs 単結晶を試料として，上記二種類の超高速分光法を用いて得られるフォノン減衰時間を系統的に調査した。THz 波測定には，パルス幅 60 fs のレーザー光(中心フォトンエネルギー: 1.55 eV，繰り返し周波数: 90 MHz)を用いた。ポンプ光を試料に照射することによって発生した THz 波は，光伝導ダイポールアンテナを用いた光ゲート法で検出された(窒素ガスパージ下湿度: 5%以下)。反射型ポンプ・プローブ測定ではパルス幅 70 fs のレーザー光(中心フォトンエネルギー: 1.35 eV; 繰り返し周波数: 80 mW)を用いた。コヒーレント LO フォノンの観測には，時間遅延変調法を用い，反射光強度の時間微分に相当する信号を計測した[1]。上記すべての測定は，室温下で行われた。なお GaAs のバンドギャップエネルギーは，室温で 1.425 eV である。

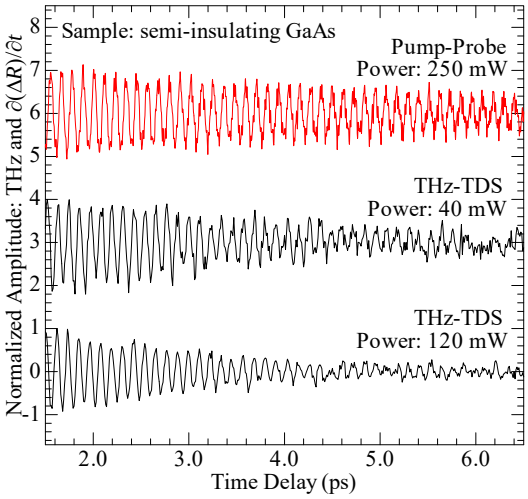


Figure 1: Coherent LO phonon signals measured with the use of THz time-domain (THz-TDS) signals and pump-probe signal in the present (001)-oriented semi-insulating GaAs single crystal.

図 1 は，THz-TDS とポンプ・プローブ分光によって得られたコヒーレント LO フォノン信号成分である。THz-TDS 信号は，ポンプ光強度減少に伴い，減衰時間が長くなる。さらに試料に透明な光パルスで得られたポンプ-プローブ信号は，THz-TDS 信号より顕著に長い減衰時間を有する。本結果は，光生成キャリアによる散乱効果がコヒーレント LO フォノンの減衰過程に顕著に影響することを示している。

[1] H. Takeuchi, Appl. Opt. **64**, no.18 (2025) accepted. DOI: 10.1364/AO.561770 w/open access options.

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツ時間領域分光における温度変化にともなう位相シフト補正法

Correction of thermally induced phase shift in terahertz time-domain spectroscopy

防大理工，○岡野 真人，須山 弘太，和田 篤，田中 哲

Dept. of Comm. Eng., Faculty of Sci. and Tech., National Defense Acad.

○Makoto Okano, Kota Suyama, Atsushi Wada, and Satoshi Tanaka,

E-mail: makokano@nda.ac.jp

テラヘルツ時間領域分光（THz-TDS）はテラヘルツ電場の時間波形を直接観測する測定法である。電場時間波形をフーリエ変換すると各周波数での位相と振幅が同時に取得可能であり、これらを利用することで測定試料の複素屈折率を直接的に求められる。より正確に複素屈折率を導出するためには試料の厚さも併せて正確に決定する必要があるが、Dorney らが提案した複素屈折率スペクトルの滑らかさ（TV: total variation）を指標とする手法により厚さと複素屈折率を同時に決定することが可能になり[1]、この解析法は材料科学の分野で幅広く利用されてきた。

ここ 10 年程で、ファイバーレーザーを光源とした THz-TDS 装置の開発が盛んに行われている。このような THz-TDS 装置では、テラヘルツ光を空気中で伝搬させる必要があるため、一般的に検出側の光路のファイバー長の方が発生側の光路のものよりも長くなる。空気とファイバーでは熱光学係数が 1 桁異なることに加え、ファイバーは熱膨張をするため、環境温度が変化した時には光路長差が変化し、結果として時間波形のシフトが起こる。時間軸のずれ（$\Delta\tau$）は位相スペクトルの傾きを変化させるため、精度よく複素屈折率を求めるうえでは、この位相のシフトを補正する必要がある。今回、我々は Dorney らの方法を拡張することで、THz-TDS における温度変化にともなう位相シフトを補正する方法を開発したので報告する[2]。

本手法では、試料の厚さ（d）と位相スペクトルの傾きの変化量（$\Delta\tau$）を変化させながら複素屈折率を逐次計算し、TV が最小となる d と $\Delta\tau$ を最尤値として決定した。本手法の妥当性を検証するため、d = 0.5 mm、n = 1.5、$\Delta\tau$ = 0.1 ps に設定して数値シミュレーションを行った。図 1 に各 $\Delta\tau$ の値に対して TV が最小となった d を用いて計算した屈折率スペクトルを示す。正しい値である $\Delta\tau$ = 0.1 ps では、屈折率スペクトルに振動成分が全く現れておらず、絶対値も設定値と一致していることがわかる。一方、$\Delta\tau$ がずれるにしたがって低周波側の振動成分が徐々に大きくなるとともに、屈折率の絶対値も変化していく様子が見られた。これは、温度変化による位相シフトが物性評価に大きな影響を与えることを示している。さらなる検証のため、本手法を低屈折率の高分子薄膜に適用したところ、精度よく複素屈折率スペクトルを導出することに成功した。

本研究は、JSPS 科研費（JP22K03557）の支援を受けて行われたものである。

[1] T. D. Dorney *et al.*, J. Opt. Soc. Am. A **18**, 1562 (2001).
[2] M. Okano *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B (2025) in press

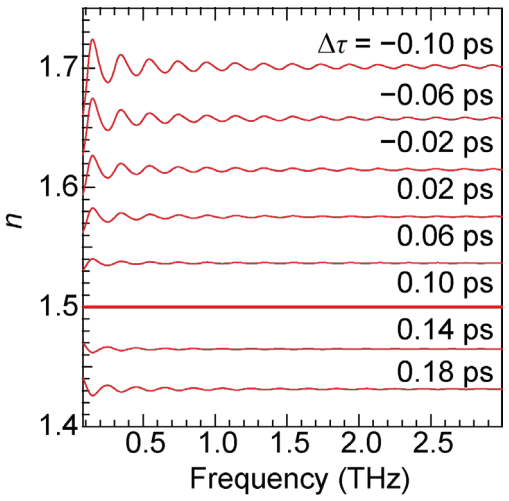


Fig. 1 Refractive index spectra calculated for various thermally induced phase shifts

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツ波を用いた光学的異方性材料の屈折率マッピング法の開発

Refractive Index Mapping of Optically Anisotropic Materials Using Terahertz Waves

静岡大院工[1]，分子科学研究所[2] ○(M2)木村 亮太[1]，竹家 啓[2]，トリパティ サロジ[1]

Shizuoka Univ.[1], Institute for Molecular Science[2], ○Ryota Kimura[1], Kei Takeya[2], Saroj R. Tripathi[1]

E-mail: tripathi.saroj@shizuoka.ac.jp

【緒言】テラヘルツ波とは, 0.1~10THz の周波数領域に属する電磁波であり, 様々な物質を透過する性質を持つことから, 物性評価において広く利用されている. これまで光学的異方性材料の屈折率分布をマッピングするには, サンプルの回転角を細かく変化させながら測定を行う必要があり, 多くの時間を要していた[1]. またこの方法では人為的な誤差が生じやすいという課題もあった. そこで本研究では, 光学的異方性材料の屈折率分布が楕円形を描くことに着目し, 最小二乗法による楕円近似に基づいて, 3 点の回転角での測定から屈折率分布をマッピングする新たな手法を考案し, その有効性を検証する.

【実験】光学軸が既知の Z カット水晶板(厚さ 1 mm, 村田製作所製)をサンプルとして用いた[2]. 測定には透過型テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)を用い, まずサンプルの光学軸を時計回りに 20 度回転させた状態を基準とし, そこから, 反時計回りに 0 度, 120 度, 240 度の位置で測定を行い, それぞれの位置で屈折率を導出する. 得られたデータに最小二乗法による楕円近似を適用することによって, 全体の屈折率分布をマッピングした.

【結果】THz-TDS により得られた 3 点($\theta = 0, 120, 240^\circ$)の屈折率($n$)を Fig.1 に示す. これらを基に全体の屈折率分布をマッピングしたものを Fig.2 に示す. 本手法によって得られた結果は, 分光測定により得られた常光・異常光屈折率(n_o, n_e)とほぼ一致していることを確認した. さらに屈折率分布の光学軸の傾きは–20.51 度であり, 1 度未満の精度での測定が可能であることが示された.

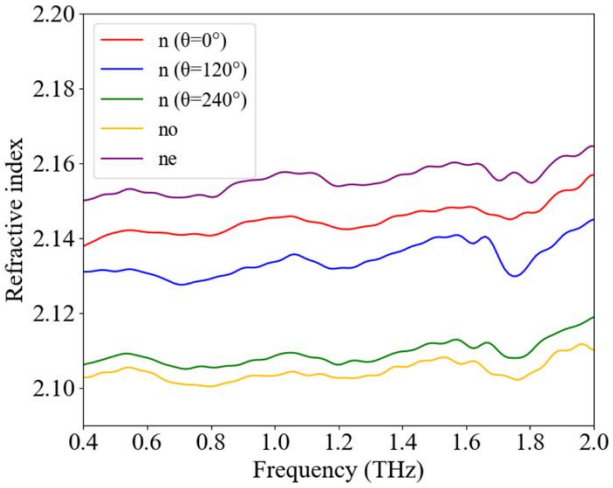


Fig.1 Refractive indices of the quartz plate

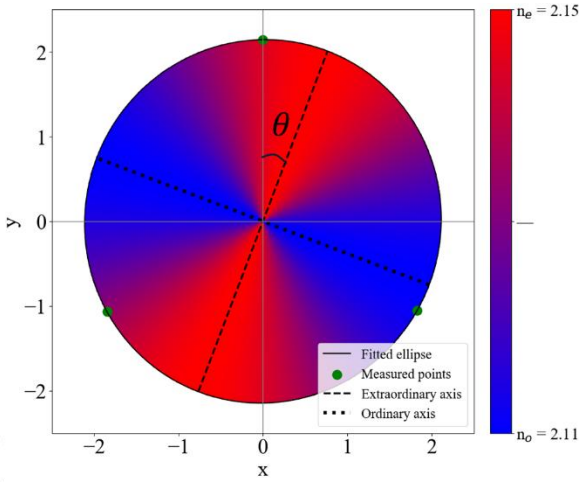


Fig.2 Refractive index distribution

参考文献：

[1] K. Wieser et al. JIMT, vol. 34, pp. 663-681 (2013)

[2] D. Grischokowsky et al. JOSA B, vol. 7, pp. 2006-2015 (1990)

© 2025年 応用物理学会

テラヘルツ時間領域コヒーレントラマン分光法による電解質イオンの水素結合ネットワークへの影響評価

Influence of electrolyte ions on hydrogen bond networks investigated with terahertz time-domain coherent Raman spectroscopy

福井大工[1]，福井大遠赤セ[2] ○(M2)粟田 涼介[1]，(B)木村 碧志[1]，鯰田 嵩大[2]，長谷川 真也[2]，北原 英明[2]，古屋 岳[2]，谷 正彦[2]

Univ. Fukui[1], FIR UF[2], ○Ryosuke Awata[1], Aoshi Kimura[1], Takahiro Namazuta[2], Shinya Hasegawa[2], Hideaki Kitahara[2], Takashi Furuya[2], Masahiko Tani[2]

E-mail: tani@fir.u-fukui.ac.jp

我々の研究室では、テラヘルツ(THz)時間領域コヒーレントラマン分光(THz-TDCRS) ([1], 図 1 参照)を用いて、分子の水和状態や水の水素結合ネットワーク構造、そしてそのダイナミクスを明らかにする研究を行っている。これまでの研究から、電解質水溶液の THz 帯ラマンスペクトルは溶質の種類によって異なる挙動を示すことが示されている[2]。本研究では、電解質イオン種に依存した水の分子間振動モードに与える影響を明らかにすることを目的とし、種々の電解質水溶液の低波数ラマンスペクトルの濃度依存を THz-TDCRS を用いて測定した。図 2 は NaI 水溶液の動的感受率 χ'' [2]の濃度依存性を示しており、水の分子間伸縮振動モードピーク周波数が 5 THz 付近で NaI 濃度に比例して、青方偏移していることが確認できる。図 3 は NaCl、NaBr、NaI, KCl、$CaCl_2$ 水溶液の 5 THz 付近の振動モード周波数の濃度依存をプロットしたものである。NaBr、NaI 水溶液においては 5 THz の振動モードは濃度に比例してほぼ単調に赤偏移しているのに対して、KCl、NaCl、$CaCl_2$ 水溶液においては 2 mol/L 付近に変曲点があり、KCl と NaCl は 2 mol/L 以上でほぼ横ばい、$CaCl_2$ は青方偏移していることが確認できる。講演では、測定の原理、装置の説明、および電解質イオンに依存した種々の電解質水溶液の THz 帯ラマンスペクトルの振る舞いについて議論する。

[1] 谷正彦，山本晃司，日比雅和，山口真理子：“フェムト秒レーザーを励起光源に用いたテラヘルツ帯コヒーレント・ラマン分光手法の開発”，光学，**40**，No. 8, pp.16-22(2011).

[2] 冨永靖徳，天羽優子：“水の動的構造：ラマン散乱分光”，低温科学，**64**，pp.121-134, (2005).

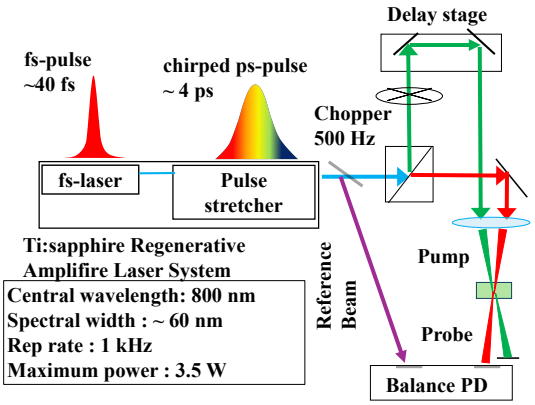


図 1. THz-TDCRS 装置の概念図

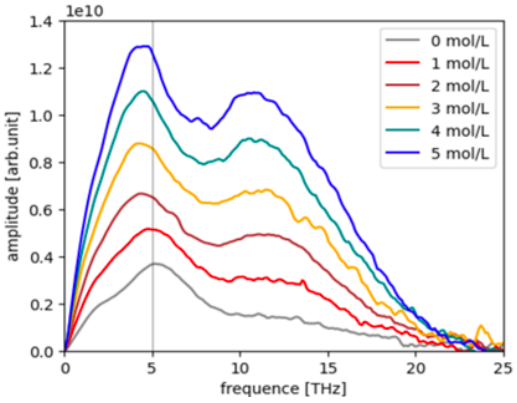


図 2. NaI 水溶液の THz 帯動的感受率 χ'' の濃度依存性

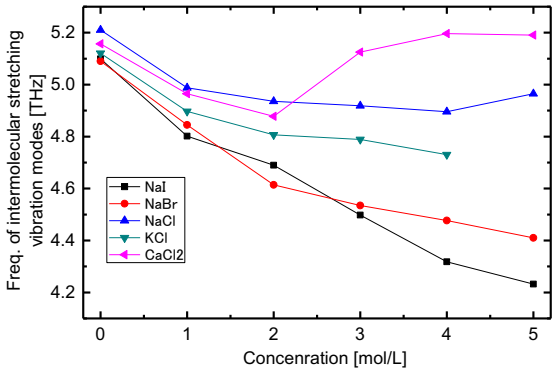


図 3. 各種電解質水溶液の水の分子間伸縮振動モード周波数の濃度依存

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation : 3.9 Optical quantum physics and technologies

[9p-P04-1~7] 3.9 Optical quantum physics and technologies

[9p-P04-1]

Improving HOM interference visibility between independent photons

○Hsin-Pin Lo[1], Kai Asaoka[1], Hiroki Takesue[1] (1.NTTBRL)

[9p-P04-2]

Broadband photon-number squeezing in optical fiber using a 10-fs Ti:Sapphire laser

○(P)Zicong Xu[1,2], Kazuki Hashimoto[1], Yasuyuki Ozeki[2,3], Takuro Ideguchi[1] (1.UTokyo (Science), 2.UTokyo (RCAST), 3.UTokyo (Engineering))

[9p-P04-3]

Generation of single-mode squeezed vacuum using a collinear source of dual-wavelength optical pulses

○Mashu Hifumi[1,2], Shogo Kimura[2], Makoto Okano[3], Mitsuru Takenaka[4], Nobuyuki Matsuda[1,2] (1.RIEC, Tohoku Univ., 2.Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ., 3.AIST, 4.Univ. Tokyo)

[9p-P04-4]

Comparative Study of Many-Body Interaction Models Using Two-dimensional Coherent Spectroscopy

○(DC)Pradeep Kumar[1], Bhaskar De[1], Rishabh Tripathi[1], Rohan Singh[1] (1.Indian Institute of Science Education and Research, Bhopal 462066, India)

[9p-P04-5]

Simplifying the experiment to generate and verify the quantum entanglement

○Shun Mizunoya[1] (1.Mita International School of Science)

[9p-P04-6]

Generation of photon pairs from a thin-film lithium tantalate waveguide

○Masashi Kato[1,2], Hidetaka Nishi[3], Mashu Hifumi[1,2], Tomonari Sato[3], Shinji Matsuo[3], Nobuyuki Matsuda[1] (1.RIEC, Tohoku Univ., 2.Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ., 3.NTT Device Technology Labs.)

[9p-P04-7]

Evaluation of Detection Efficiency of The Frequency-Up-Conversion Single-Photon Detector in The Telecommunication Band Using Quantum Pulse Gate

○Naoto Namekata[1], Shuichiro Inoue[1] (1.IQS, Nihon Univ.)

Improving HOM interference visibility between independent photons

°Hsin-Pin Lo (羅信斌)[1], Kai Asaoka (淺岡海)[1], and Hiroki Takesue (武居弘樹)[1]

[1]NTT Basic Research Laboratories, NTT Corporation

E-mail: hsinpin.lo@ntt.com

Quantum interference is an important quantum technique that generates interactions between different photons, such as quantum teleportation, quantum swapping, and multi-photon entangled states. Recently, we demonstrated a three-photon time-bin entangled state using a 2x2 optical switch [1, 2], which is an important resource for various quantum communication tasks such as quantum conference key agreement (QCKA) and quantum secret sharing. However, the state fidelity for the pure entangled state is limited to 70%, which is not sufficient to implement QCKA [3]. A possible reason for this degradation is the limited purity of the spontaneous parametric down-conversion (SPDC) photon pairs, which reduces the quantum interference visibility between independent photons. In this study, we proposed two methods for improving HOM interference visibility between independent photons using different pump pulse widths or different interference filters.

We first prepared the fundamental lights with different pump pulse widths, using a wide bandwidth mode-locked (ML) laser (~100 fs) and different pump bandwidths (1 nm and 4 nm) filters, as shown in Fig.1 (a). The center wavelength is set at 1551.1 nm. The fundamental light was amplified by EDFA and inserted into a PPLN waveguide to generate 775.55 nm SHG light through the second harmonic generation process. The SHG was inserted into another type-0 PPLN waveguide to generate SPDC photon pairs. The signal and idler photons were separated by a 20 GHz bandwidth wavelength division multiplexing (WDM) at 1547.1 nm and 1555.1 nm. A weak coherent pulse (WCP) was prepared using a 1% ML laser and a 20 GHz filter. Throughout this experiment, the average number photon per pulse was set to ~0.01. Idler photon and WCP photon were sent to a 50:50 beam splitter for HOM interferometry. The photons were sent to SSPDs, and the output electrical signals were sent to a time-interval analyzer (TIA), which was used to analyze the 3-fold coincidence signal.

First, we use the 1 nm bandwidth pump filter and 20 GHz WDM filter to perform the HOM interference [4], and the result is shown in Fig. 1 (b), which shows visibility of 65%, and the 3-fold coincidence outside the dip is 30 cps. Next, we inserted the 4 GHz fiber Bragg grating (FBG) filter and experimented. The visibility increased to 78%, but the 3-fold coincidence count reduced to 0.025 cps, as shown in Fig. 1 (c), which means using a narrower filter can improve the visibility of quantum interference, as we expect. Finally, we performed the HOM interference using a 4 nm bandwidth pump filter and 20 GHz filters, the visibility is 79% and the 3-fold coincidence count is 20 cps, as shown in Fig. 1 (d). We found that visibilities were improved for both methods, but the 3-fold coincidence was higher when using a shorter pump pulse width.

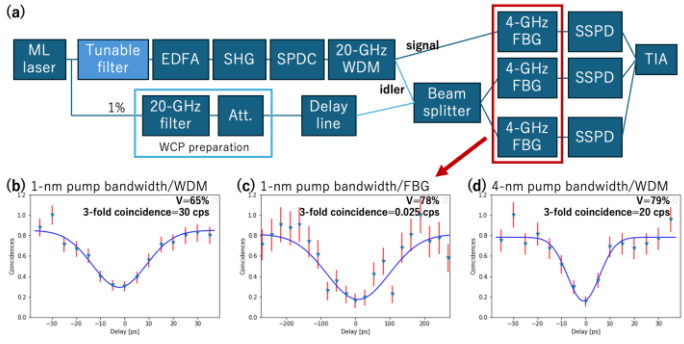


Figure 1. (a) Experimental setup for quantum interference measurement between independent light sources. (b), (c) and (d) are the HOM dip interference measurement results with different pump and different interference filter bandwidths.

Acknowledgement: This work was partially supported by MIC R&D of ICT Priority Technology (JPMI00316).

[1] H. P. Lo, et al., Quantum Sci. Technol. 8 035003 (2023). [2] H. Takesue, Phys. Rev. A 89 062328 (2014).
[3] K. Chen and H. K. Lo, arXiv preprint quant-ph/0404133 (2004). [4] C. K. Hong, et al., Phys. Rev. Lett. 59 2044 (1987).

© 2025年 応用物理学会

10 フェムト秒チタンサファイアレーザーを用いた光ファイバー中の広帯域光子数スクイージング

Broadband photon-number squeezing in optical fiber using a 10-fs Ti:Sapphire laser

東大院理 [1]，東大先端研 [2]，東大院工 [3] ○(P) 徐 自聡 [1,2]，橋本和樹 [1]，小関泰之 [2,3]，井手口拓郎 [1]

UTokyo (Science)[1], UTokyo (RCAST)[2], UTokyo (Engineering)[3] ○Zicong Xu[1,2], Kazuki Hashimoto[1], Yasuyuki Ozeki[2,3], Takuro Ideguchi[1]

E-mail: xuzicong19@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Squeezed light has attracted growing attention due to its quantum properties that differ fundamentally from laser light. A key objective in squeezed light generation is achieving broad bandwidth, which benefits high-speed quantum communication via wavelength-division [1] and time-division multiplexing [2], as well as for enhancing sensitivity in nonlinear microscopy [3] and time-domain spectroscopy [4,5]. While approaches such as four-wave mixing and optical parametric oscillation are limited to GHz bandwidths, single-pass optical parametric amplification reaches THz scales but requires a tradeoff between gain and phase-matching bandwidth [6]. In contrast, Kerr squeezing in optical fibers supports broadband operation [7], with the bandwidth limited only by the input source. Here, we demonstrate photon-number squeezing via the optical Kerr effect in a standard, low-cost polarization-maintaining fiber, driven by an ultrashort 10-fs Ti:Sapphire (TiS) laser. To our knowledge, this is the first report of squeezing generated by such a broadband source (FWHM: 68 THz).

Figure 1(a) shows our experimental setup. A shot-noise-limited mode-locked TiS laser (Spectra-Physics) was used. Chirped mirrors pre-compensated dispersion, enabling a 20-fs pulse (limited by third-order dispersion) to form near the input end of a 40-cm PM780-HP fiber. An interferometer pre-compensated the pulse delay due to fiber birefringence. Inside the fiber, two power-balanced Kerr-squeezed pulses with orthogonal polarization were generated [8]. At the output, PBS2 symmetrically split the beams. One was sent to a photodetector for phase locking via classical interference monitoring. The other was connected to a balanced photodetector for shot noise calibration. Squeezing was measured by removing PBS3 for direct detection. As shown in Fig. 1(b), we observed −0.86 dB of squeezing (−1.12 dB after subtracting circuit noise). Although the detected pulse was temporally broadened, a low-loss compressor can restore the femtosecond squeezed pulse. Further details and updates will be presented at the conference.

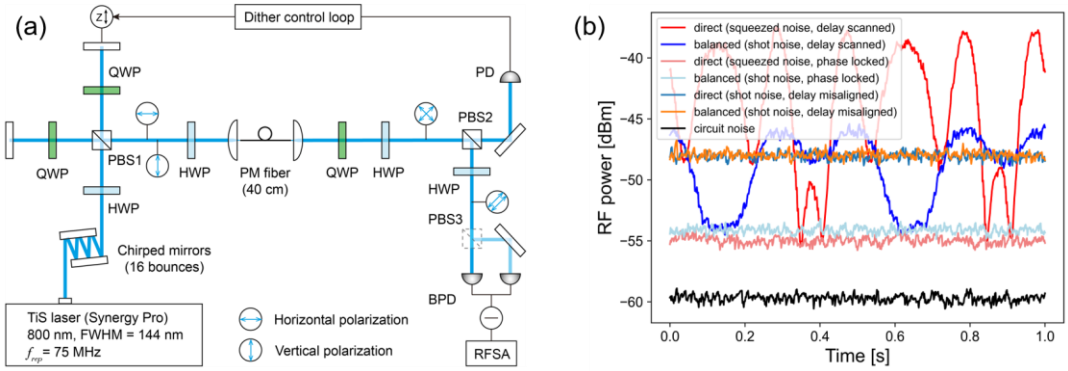


Fig. 1. (a) Schematic of the experimental setup. PBS: polarizing beamsplitter, HWP: half-wave plate, QWP: quarter-wave plate, PM: polarization-maintaining, PD: photodetector, BPD: balanced photodetector, RFSA: radio-frequency spectrum analyzer. (b) Squeezing detection at a single frequency (38 MHz). Resolution bandwidth: 1 MHz, video bandwidth: 100 Hz.

References

[1] J. Roslund *et al.*, Nat. Photonics **8**(2), 109 (2014).
[2] T. Kashiwazaki *et al.*, APL Photonics **5**(3), 036104 (2020).
[3] C. A. Casacio *et al.*, Nature **594**(7862), 201 (2021).
[4] D. I. Herman *et al.*, Science **387**(6734), 653 (2025).
[5] D. Adamou *et al.*, Sci. Adv. **11**(4), eadt2187 (2025).
[6] R. Nehra *et al.*, Science **377**(6612), 1333 (2022).
[7] K. Hirosawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**(20), 203601 (2005).
[8] A. Hosaka *et al.*, Opt. Express **23**(15), 18850 (2015).

© 2025年 応用物理学会

同軸 2 波長パルス光源を用いた 1 モードスクイーズド真空場の発生

Generation of single-mode squeezed vacuum using a collinear source of dual-wavelength optical pulses

東北大通研 [1]，東北大院工 [2]，産総研 [3]，東大院工 [4]

○一二三 真周 [1,2]，木村 彰吾 [2]，岡野 誠 [3]，竹中 充 [4]，松田 信幸 [1,2]

RIEC, Tohoku Univ. [1], Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ. [2], AIST [3], Univ. Tokyo [4]

○Mashu Hifumi[1,2], Shogo Kimura[2], Makoto Okano[3], Mitsuru Takenaka[4], Nobuyuki Matsuda[1,2]

E-mail: hifumi.mashu.t5@dc.tohoku.ac.jp

ガウシアンボゾンサンプリング（GBS）[1]は，量子超越性の実証に加え，創薬計算など実問題への応用があり，近年注目を集めている．1 モードスクイーズド真空場（SMSV）は GBS に必須の光波であり，シリコン細線導波路などの 3 次非線形光学媒質中で 2 波長のポンプ光パルスを用いた自発四光波混合(SFWM)によって効率的に生成される．従来，2 波長パルス生成においては，広帯域光パルスから 2 波長成分を波長分離フィルタで別々の経路に分離したのち，もう一つの波長分離フィルタで単一の経路に再合波する方法が採られており，パルス間のタイミング同期を行わなければならないことや，経路長揺らぎによる相対位相不安定性の問題があった．我々は，プログラマブル光フィルタを用い，相対位相安定な同軸経路中で 2 波長抽出と遅延調整を行う手法を提案し実証した[2]. 今回，この系に光増幅器を加え，ASE 光由来の雑音を大幅に削減しながら，高ポンプ光強度下でのスクイーズド真空場発生に成功した．

モード同期ファイバレーザーから中心波長 1548.91nm のフェムト秒光パルスを発生し，光パルス圧縮器でそのスペクトルを拡大した．その後，プログラマブル光フィルタ（Waveshaper, II-VI, Inc.）で 1544.53nm と 1553.33nm を中心波長とする 2 波長成分を切り出し，光増幅器で増幅を行った．さらに Waveshaper を用いて光増幅器による ASE ノイズを取り除き，接続に用いる光ファイバ中の 2 波長パルス間の群遅延差を打ち消すように位相プロファイルを設定した．2 波長パルスは TE 偏波でシリコン細線導波路に入射し，出力光のうち SFWM のエネルギー保存則を満たす周波数成分をバンドパスフィルタで切り出した．得られた光波の自己強度相関関数を計算し，SMSV の理論式$g^{(2)}(0) = 3 + \frac{1}{\sinh^2 r}$を用いてスクイージングパラメータ$r$を求めたところ（Fig. 1），前回報告値[2]の約 2 倍の$r = 1.1$を得ることに成功した．この値はシリコン細線導波路の非線形吸収によって制限されており，今後は非線形吸収の少ない非線形導波路を用いた実験を検討する．

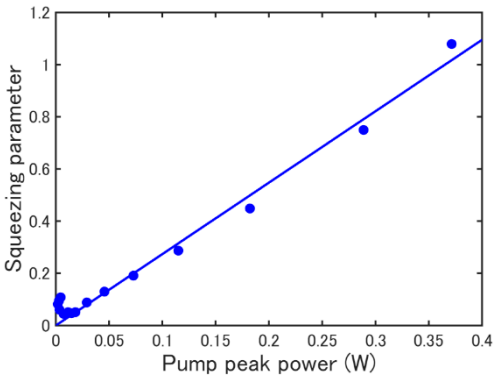


Fig. 1: Squeezing parameter of SMSV as a function of the pump peak power.

[1] C. S. Hamilton *et.al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 170501 (2017).

[2] 木村 彰吾他，第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-PB02-2 (2023).

© 2025年 応用物理学会

Comparative Study of Many-Body Interaction Models Using Two-dimensional Coherent Spectroscopy

Pradeep Kumar [1], Bhaskar De [1], Rishabh Tripathi [1], Rohan Singh [1]
[1]Department of Physics, Indian Institute of Science Education and Research, Bhopal 462066, India
E-mail: rohan@iiserb.ac.in

The nonlinear optical response of semiconductor nanostructures is significantly influenced by many-body interactions (MBIs), such as exciton-exciton interactions. These MBIs play a key role in explaining the origin of coherent coupling phenomena in nanomaterials, which is critical for scalable quantum information processing. The effects of the MBIs can be seen in the coherence-decay dynamics of the excitonic transition. Nonlinear techniques such as four-wave mixing (FWM) and two-dimensional coherent spectroscopy (2DCS) [1, 2] are usually used to investigate the coherence dynamics of nanomaterials' optical response.

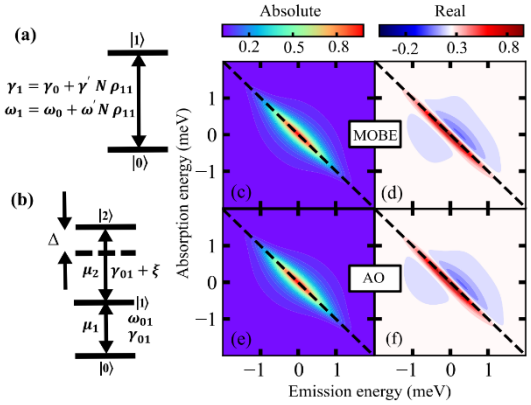


Fig. 1: (a) Energy level scheme for the MOBE model as a two-level system with phenomenological interactions parameters are shown. (b) Truncated anharmonic ladder states are shown where $|0\rangle$: ground state, $|1\rangle$: single exciton state, and $|2\rangle$: two exciton state. ξ and Δ are anharmonic corrections of MBI parameters. Absolute (c) and real (d) are simulated 2D spectra using MOBEs. Absolute (e) and real (f) are AO model 2D spectra using best-fit parameters.

Theoretical models have been developed to explain the microscopic origins of MBIs, but their computational complexity and limited physical insight make them challenging. To address this, phenomenological models like the modified optical Bloch equations (MOBEs) [3] and the anharmonic oscillator (AO) model [4] offer simpler alternatives. MOBEs treat excitons as two-level fermionic systems, incorporating MBIs through phenomenological modifications to dephasing rates and resonance frequencies. In contrast, the AO model treats excitons as interacting bosons, where MBIs induce anharmonicity that leads to a nonlinear optical response. This response is analytically derived using a perturbative solution of the optical Bloch equations for a three-level anharmonic ladder system.

The aforementioned phenomenological models have been used separately to explain and interpret the MBI effect in experimental results. In this work, we show the empirical equivalence and direct correspondence between these two complimentary MBI models through 2DCS simulations [5]. Interestingly, we find that 2D spectral line shapes obtained from both the complimentary framework are consistent with each other. We also perform a quantitative comparison of these MBI models with experiments, highlighting the usefulness of these phenomenological models in interpreting experimental results. These new findings might be crucial in directing the substantial work being done to construct flexible semiconductor quantum dot lasers and TMDCs-based valleytronics devices [6], which are affected by MBIs.

References

[1] J. Shah, *Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures* (Springer-Verlag, Berlin, 1999).
[2] X. Li, T. Zhang, C. N. Borca, and S. T. Cundiff, Phys. Rev. Lett. **96**, 057406 (2006)
[3] J. Shacklette and S. T. Cundiff, J. Opt. Soc. Am. B **20**, 764 (2003).
[4] Y. P. Svirko, M. Shirane, H. Suzuura, and M. Kuwata-Gonokami J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 674 (1999).
[5] P. Kumar. et al., Phys. Rev. B **109**, 155423 (2024)
[6] P. D. Cunningham, A. T. Hanbicki, T. L. Reinecke, K. M. McCreary, and B. T. Jonker Nat. Commun. **10**, 5539 (2019)

© 2025年 応用物理学会

量子もつれ生成・検証実験の簡略化の考察

Simplifying the experiment to generate and verify the quantum entanglement

三田国際科学学園　○水野谷 駿

Mita International School of Science, ◦Shun Mizunoya

E-mail: 20211176@mita-is.ed.jp

近年、量子もつれの存在が証明され、それを用いて量子コンピュータや量子ネットワークといった先端的な情報通信技術の研究が進められている。しかしながら、量子もつれの生成・検証には、現在およそ 15,000 米ドルと非常に高額な研究費が必要とされており[1]、そのため、金銭的に余裕のある限られた機関のみが当該実験を実施できるのが現状である。このような高コストの主因は「計測器」にある。量子もつれ状態では、ある変数 x と、それを変数に持つ関数 f(x)を x で偏微分したものの組である”共役物理量”の、それぞれの合計や差が一定の値になるという特性が知られており[2]、この性質を活用した量子もつれの検証方法が現在では用いられている。本研究の目的は、従来の実験に広く使われていた共役物理量以外にも着目し、新たな指標を考察・検証することである。特に、安価かつ簡便に測定可能な指標を検討し、量子もつれを解析できる実験系の構築を目指す。現在では、「光子のエネルギーとスペクトル線強度」を候補としている。光子のエネルギーE は、周波数が一定のレーザー光を使うことで安定かつ容易に測定することができる上、エネルギーの関数であるスペクトル線強度は分光板などの比較的入手が簡単な器具を用いて実際に観測することが可能であり、エネルギーの関数の中でも特に計測が簡易であるからだ。この物理量を計測することで量子もつれ状態を確認することで実験にかかる費用は約半分にまで削減できると推定しており、より多くの期間が量子もつれを利用した技術開発に関わることが可能になることが期待される。

参考文献:

[1]Dietrich Dehlinger et al. 2002.『Entangled photon apparatus for the undergraduate laboratory』.https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0205172

[2]古澤明. 2011.『量子もつれとは何か』.講談社.

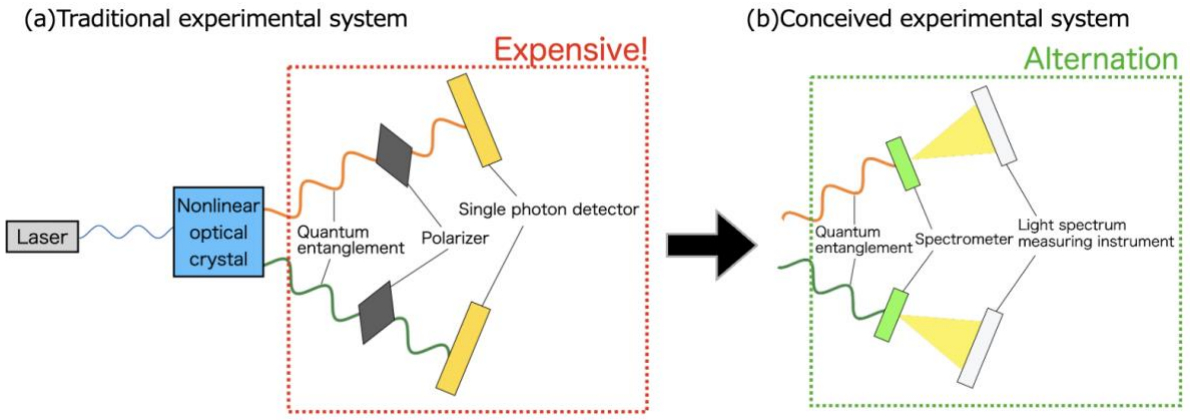


Fig. Comparative overview of traditional and proposed quantum entanglement verification methods

© 2025年 応用物理学会

薄膜タンタル酸リチウム導波路を用いた相関光子対発生

Generation of photon pairs from a thin-film lithium tantalate waveguide

東北大通研[1]，東北大院工[2]，NTT 先端集積デバイス研[3]

○加藤 柾司[1,2]，西 英隆[3]，一二三 真周[1,2]，佐藤 具就[3]，松尾 慎治[3]，松田 信幸[1]

RIEC, Tohoku Univ.[1], Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ.[2], NTT Device Technology Labs.[3]

○M. Kato[1,2], H. Nishi[3], M. Hifumi[1,2], T. Sato[3], S. Matsuo[3], N. Matsuda[1]

E-mail: kato.masashi.q5@dc.tohoku.ac.jp

タンタル酸リチウム（LT）は，第二高調波発生及び自発パラメトリック下方変換（SPDC）用の疑似位相整合素子の材料として用いられる．量子情報応用においては，可視域から中赤外に渡る極めて広帯域な周波数相関を有する光子対の発生に用いられ，量子計測等へ応用されている[1].

近年，on-insulator 基板製造技術の発展により，LN や AlGaAs といった様々な非線形材料に基づく薄膜を用いた細線光導波路が登場し，非線形光学効果を用いた光通信及び量子光学デバイスへの応用が拡大している．LT についても低損失な薄膜 LT（TFLT）細線光導波路の製造が可能となり，非線形光学デバイスへの応用が検討されている[2]．TFLT 導波路の微小なコア断面積により非線形光学効果の増強が可能であり，前述の光子対源に用いることができれば，光子対発生効率を大幅に向上できる可能性がある．しかし TFLT 導波路を用いた光子対発生の報告例はない．今回我々は，周期分極反転構造の不要な自発四光波混合（SFWM）過程を用いて TFLT 導波路からの光子対発生を行い，その量子光源としての応用可能性を検討した．

モード同期ファイバーレーザーからの出力光を中心波長 1548.9 nm，透過帯域幅 70 GHz のバンドパスフィルタで濾波し，時間幅約 7 ps，繰り返し周波数 40 MHz のポンプ光パルスを長さ 2.4 cm の TFLT 導波路に TE 偏波で入力した．TFLT 導波路は SiO_2 をクラッドとするリブ型の光導波路で，コア幅，コア高さ，スラブ高さはそれぞれ 1.0 μm，0.2 μm，0.1 μm である．出力光から透過帯域幅 70 GHz のバンドパスフィルタを用いて抽出したシグナル波長 1538.2 nm およびアイドラ波長 1559.8 nm の光波間の時間相関を，2 台の超電導ナノワイヤ単一光子検出器及びタイムタガーを用いて計測した．実験結果から見積もられた単位パルス当たり光子対発生レートはポンプ光ピーク強度の 2 乗に比例し（Fig. 1），SFWM 過程によるものと思われる光子対発生が確認された．今後，光子対発生レートの妥当性の検証を行うとともに，TFLT 導波路の SPDC 光源への応用可能性を検討する．

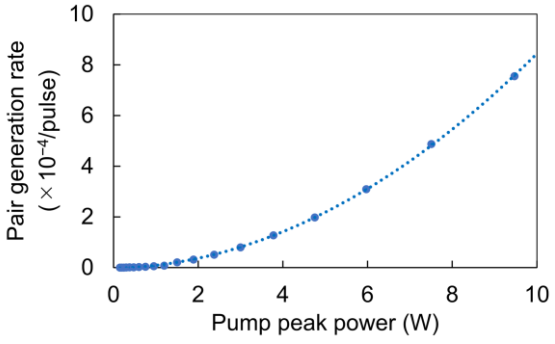


Fig.1 Photon pair generation rate from a TFLT waveguide.

[1] T. Tashima *et al.*, Optica **11**, 81 (2024).
[2] H. Nishi *et al.*, OECC/PSC, ME3-2 (2022).

© 2025年 応用物理学会

量子パルスゲート法を用いた通信波長帯周波数上方変換単一光子検出器の検出効率評価

Evaluation of Detection Efficiency of The Frequency-Up-Conversion Single-Photon Detector in The Telecommunication Band Using Quantum Pulse Gate

日大量科研，　○行方 直人，井上 修一郎

IQS, Nihon Univ. [1], ○Naoto Namekata and Shuichiro Inoue

E-mail: namekata.naoto@nihon-u.ac.jp

通信波長帯（～1550 nm）で感度を有する単一光子検出器（SPD）は，量子鍵配送や量子光計測など，量子光技術の重要な基盤技術である．室温動作が可能でかつ実用的な通信波長帯 SPD として周波数上方変換単一光子検出器（UCSPD）が挙げられる[1]．単一光子の波長を通信波長から単一光子検出が可能な可視波長へ高効率に変換するため，理想的には高い性能指数（効率／雑音計数率）が実現できる．

光パルスの時間軸波形は任意の直交基底を用いて分解することが可能であり，この直交モード 1 つのみを選択的に周波数上方変換する方法，「量子パルスゲート法（QPG）」が提案された[2]．我々は QPG に基づく UCSPD の開発を行い，広い変換帯域幅やフェムト秒時間分解が可能であること明らかにしている[3]．本研究では，UCSPD の高効率化・低雑音化を目指している．

QPG 条件下では，和周波発生帯域よりも広いスペクトル幅を有する光パルスの周波数上方変換を可能とする．そのためには信号光子とポンプパルスの波長変換素子中における群遅延がそれらパルス時間幅よりも十分に短くなるようにする必要がある．図 1 は試験している 10 mm 長周期分極反転ニオブ酸リチウム（PPLN）導波路のチューニング曲線であり，信号光子の波長を 1550 nm を中心に±50nm と大きく変化させても，波長変換された光子の波長がわずかしか変化しない (変換波長帯域は～1.5 nm)．これは，信号光子とポンプ光の群遅延が小さい (<< 100 fs) ことを意味し，本素子が 100 fs 程度の時間波形モードを選択的かつ高効率に波長変換可能であることを示唆している．今回，時間幅 190 fs のローレンツ型光パルスを２つ(信号光子波長 1532 nm，ポンプパルス波長 1565 nm)を準備し，QPG に基づく波長変換効率評価を実施している．発表では，その結果の詳細を報告する．

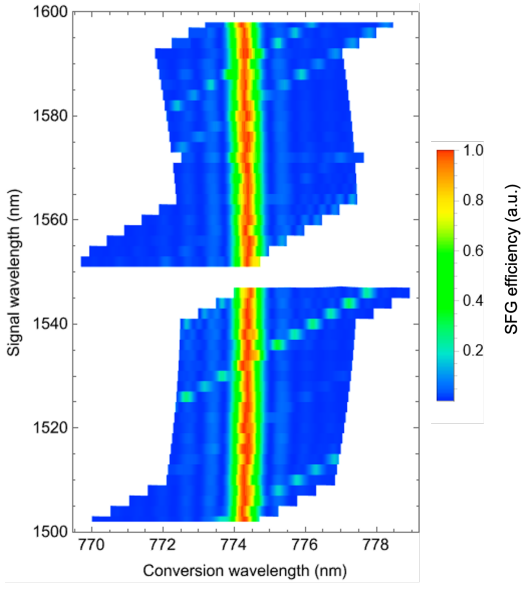


図 1. 実験で得られた 10-mm 長 PPLN 導波路のチューニング曲線

[1] C. Langrock, et al., Opt. Lett. **30**, 1725 (2005).

[2] A. Eckstein, et al., Opt. Express **19,** 13770 (2011).

[3] N. Namekata, et al., Sci. Rep. **13**, 21080 (2023).

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.9 Optical quantum physics and technologies

[10a-N202-1~8] 3.9 Optical quantum physics and technologies

[10a-N202-1]

Nonlinear signal amplification using Hopf oscillators

○(M1)Koya Yakushi[1], Tomoaki Niiyama[1], Satoshi Sunada[1] (1.Kanazawa Univ.)

[10a-N202-2]

High-Speed Signal Detection Using Photonic Reservoir Computing

○(M1)Yuito Ito[1], Satoshi Sunada[1], Tomoaki Niiyama[1], Tetsuya Asai[2], Gouhei Tanaka[3], Atsushi Uchida[4] (1.Kanazawa Univ., 2.Hokkaido Univ., 3.NITech, 4.Saitama Univ)

[10a-N202-3]

Evaluation of propagation characteristics of two-mode squeezed light in foggy space for quantum LiDAR applications

○(D)Yuta Suzuki[1], Kenji Yoshida[2], Genta Masada[1] (1.Tamagawa Univ., 2.Toyota motor corporation)

[10a-N202-4]

Continuous-wave homodyne measurement of an superposition of vacume and single photon state generated by pulsed light

○Kan Oizumi[1], Katsuki Nakashima[1], Lucas Aoyagi[2], Tatsuki Sonoyama[1,3,4], Kazuma Takahashi[1], Takumi Suzuki[1], Takahiro Kashiwazaki4[5], Taichi Yamashima[5], Asuka Inoue[5], Takeshi Umeki[5], Shigehito Miki[6], Hirotaka Terai[6], Masahiro Yabuno[6], Mamoru Endo[1,4], Akira Furusawa[1,3,4] (1.Univ. of Tokyo, 2.Laboratoire Kastler Brossel, 3.OptQC, 4.Riken RQC, 5.NTT Device Technology Labs, 6.NICT)

[10a-N202-5]

Wavelength-division multiplexing of polarization-entangled photon source via Fourier optical synthesis

○Tomoya Okita[1], Masahiro Yabuno[2], Hirotaka Terai[2], Shigehito Miki[2], Shimizu Ryousuke[1] (1.UEC, 2.NICT)

[10a-N202-6]

Bright photon pair generation using Si microring resonators

○(D)Shouichirou Yasui[1,2], Tomohiro Inaba[1], Hidetaka Nishi[3,4], Reina Kaji[2], Satoru Adachi[2], Xuejun Xu[1], Haruki Sanada[1] (1.NTT Basic Research Labs., 2.Grad. Sch. Eng., Hokkaido Univ., 3.NTT Device Technology Labs., 4.NTT Nanophotonics Center)

[10a-N202-7]

Generation and measurement of a highly squeezed vacuum state with a waveguide optical parametric amplifier

○Kazuki Hirota[1], Geyongmin Ha[1], Takahiro Kashiwazaki[2], Taichi Yamasima[2], Pawphat Jaturaphagorn[3,1], Takumi Suzuki[1], Kazuma Takahashi[1], Akito Kawasaki[1,4,5], Takeshi Umeki[2], Mamoru Endo[1,4], Warit Assavanant[4,5], Akira Furusawa[1,4,5] (1.Tokyo Univ., 2.NTT Device Technology Labs, 3.Kasesart Univ., 4.OptQc, 5.RIKEN RQC)

[10a-N202-8]

Proposal and Demonstration of a Spectral Phase Estimation Method Using Optical Parametric Amplification

○(D)Kazuma Takahashi[1], Takumi Suzuki[1], Yoshitsugu Hoshino[1], Takahiro Kashiwazaki[2], Asuka Inoue[2], Takeshi Umeki[2], Mamoru Endo[1,3], Akira Furusawa[1,3,4] (1.Univ. of Tokyo, 2.NTT Device Technology Labs, 3.Riken RQC, 4.OptQC)

ホップ振動子を用いた信号の非線形増幅

Nonlinear signal amplification using Hopf oscillators

金沢大[1] ○(M1)薬師 功哉[1], 新山 友暁[1], 砂田 哲[1]

Kanazawa Univ.[1] ○Koya Yakushi[1], Tomoaki Niiyama[1], Satoshi Sunada[1]

E-mail: kyakushi0429@stu.kanazawa-u.ac.jp, sunada@se.kanazawa-u.ac.jp

1. 研究の概要

人間の聴覚は単一の機構で小さな音から大きな音まで幅広く捉えることができる. この優れた機能は内耳に存在する外有毛細胞による小さな音の振動を選択的に増幅するはたらきに由来すると考えられている[1]. この外有毛細胞の非線形な増幅特性を模倣することができれば幅広い強度の信号を捉えられるセンサーへの応用などが期待できる.

本研究では, この外有毛細胞のはたらきを外部入力をもつホップ振動子として数理的にモデル化し, 様々な条件におけるホップ振動子の応答を数値的に解析した. また, 結合ホップ振動子系では, 単一のホップ振動子では得られない増幅特性が得られることも示す.

2. 理論

ホップ振動子は次の複素常微分方程式で表される[2].

$$\frac{dz}{dt} = \omega_{\mathrm{ch}}[\ \mu + i\ z - |z|^2 z + f_{\mathrm{in}}\ t\ ]. \qquad 1$$

ここで, ω_{ch}はホップ振動子の固有角振動数, μは制御パラメーター, $f_{\mathrm{in}}(t)$は外部入力である.

ホップ振動子は入力を与えない状態において, $\mu > 0$のとき自励振動をし, $\mu < 0$のとき減衰振動を示す. $\mu = 0$において自励振動と減衰振動が切り替わる現象をホップ分岐と言い, このときホップ振動子は安定性が低減し, 収束に時間がかかるようになる.

$\mu < 0$において, ホップ振動子に入力$f_{\mathrm{in}}\ t\ = Fe^{i\omega t}$を与えると, 応答は$z = Ae^{i(\omega t - \phi)}$の形に収束し, FとAの間には次の関係式が成り立つ.

$$F = A\sqrt{A^2 - \mu^{\ 2} + \left(\frac{\omega}{\omega_{\mathrm{ch}}} - 1\right)^2}. \qquad 2$$

様々なAの値を(2)式に代入し, 得られたFの値との組み合わせをA-F平面にプロットしてできたグラフが Fig.1 である. これを見ると, ホップ分岐付近（$\mu \approx 0$）では小さい信号に対して高い増幅率が表れることがわかる.

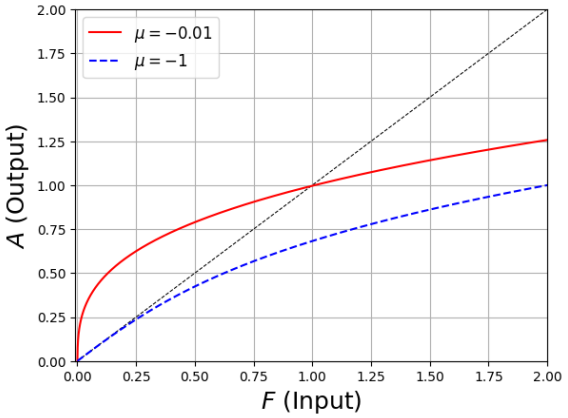


Fig.1 Amplification characteristics of the Hopf oscillator.

3. 結果

様々な条件で増幅特性がどのように変化するかを調べたところ, ホップ振動子の出力をさらにホップ振動子に入力させたり（直列結合）, ホップ振動子の出力の線形和をとったり（並列結合）することで単一のホップ振動子では得られないような様々な増幅特性を得ることができた. （Fig.2 は(2)式を繰り返し用いて得た.）

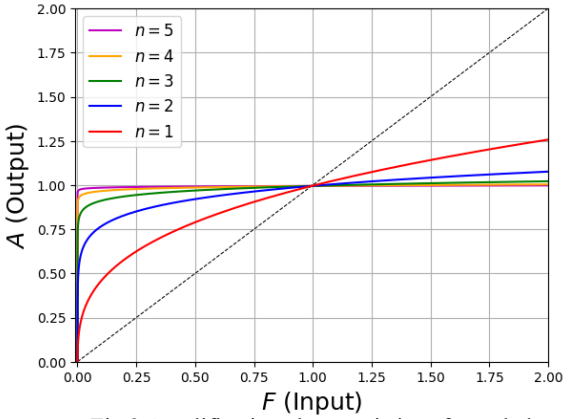


Fig.2 Amplification characteristics of coupled Hopf oscillators in series.
(n is the number of the Hopf oscillators)

4. まとめ

結合ホップ振動子系における増幅特性について解析した. 当日の発表では, 光電システムへの実装についても議論する.

参考文献

[1] M. A. Muñoz, Reviews of Modern Physics. **90**, 031001 (2018).
[2] F. Gomez, T. Lorimer, and R. Stoop, arXiv:1510.03241 (2015).

© 2025年 応用物理学会

光リザバーコンピューティングを用いた超高速信号の検出

High-Speed Signal Detection Using Photonic Reservoir Computing.

金沢大[1]，北海道大[2]，名古屋工業大[3]，埼玉大[4] ○(M1)伊藤 結人[1]，新山 友暁[1]，浅井 哲也[2]，田中 剛平[3]，内田 淳史[4]，砂田 哲[1]

Kanazawa Univ.[1], Hokkaido Univ.[2], NITech[3], Saitama Univ.[4], ○Yuito Ito[1], Tomoaki Niiyama[1], Tetsuya Asai[2], Gouhei Tanaka[3], Atsushi Uchida[4], Satoshi Sunada[1]

E-mail: kindaiyuito@stu.kanazawa-u.ac.jp, sunada@se.kanazawa-u.ac.jp

超高速の信号検出および処理に対応する革新的技術の開発は，B5G, 6G の到来を見据えると喫緊かつ重要な課題である[1]。通常，信号の検出にはその信号の帯域を超える広帯域の検出器が必要となる。もし低帯域の検出器を用いれば，帯域以上の成分は減衰されてしまい信号の多くの情報を失うことになる(図 1(a))。一方，検出器は広帯域になるほど汎用性は低下し高コストになるという大きな課題がある。そこで，本研究では高周波信号を低帯域の検出器のみを用いて検出する手法を提案・検証する。本研究の重要なアイデアは，ランダムネットワーク（リザバー）を用いて広帯域信号を空間的に分散し，複数の低帯域の検出器で検出することである(図 1(b))。すなわち，広帯域な時間情報を，低帯域検出器で検出可能な空間的情報に変換・分散することである。分散された情報と元信号との関係を学習することにより，元信号の復元が可能となる。

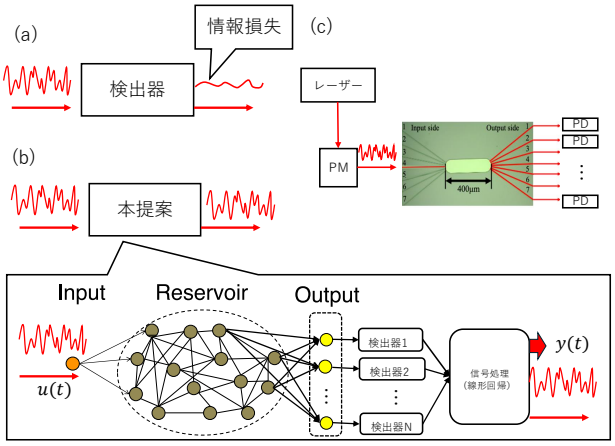


図 1 本提案手法の概要 (a) 従来型検出器 (b) 本研究での検出器 (c) 実験系の模式図

原理検証実験として，1GHz 帯域の光検出器(PD)とシリコン基板上に作製された光リザバー計算回路[2]を用いて 10GHz に渡る広帯域光信号の検出を試みた(図 1(c))。波長多重化手法も組み合わせ復元された結果（赤色）と従来の計測手法（緑色）の比較を図 2 に示す。図 2(b)より，単一の低帯域 PD のみを用いた従来手法では捉えられない帯域、すなわち単一 PD 帯域の 10 倍以上の高周波数成分も復元されていることがわかる。また，数値計算においては，本手法は PD 数の増加によって 1000 倍以上の帯域拡大及び高ノイズ耐性を示唆する結果を得ている。当日の発表にて，これらの詳細を報告するとともにサンプリング限界を超える信号検出の可能性についても議論する。

謝辞：本研究は JST CREST (No. JPMJCR24R2)と科研費(No. JP22H05198)の支援を受けて実施した。

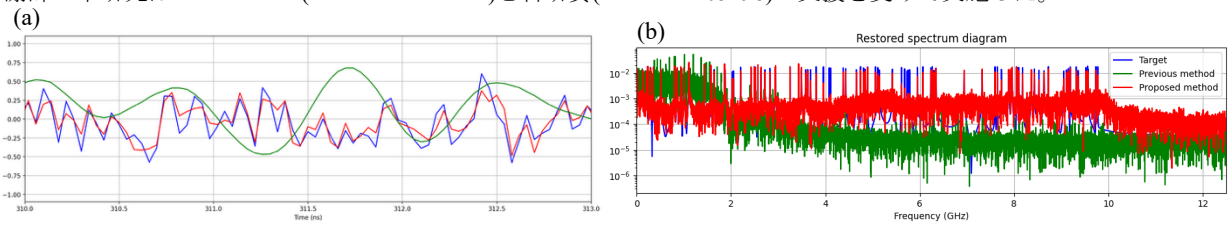


図 2 従来の計測手法（緑色）と提案手法（赤色）による復元結果。(a) 時系列信号 (b) 周波数スペクトル。青色は元の信号。

[1] M. Horibe *et al.* エレクトロニクス実装学会誌, **22**, 514 (2019). [2] T. Yamaguchi *et al.*, Commun. Phys. **6**, 250 (2023).

© 2025年 応用物理学会

量子 LiDAR の応用に向けた 2 モードスクイーズド光の霧空間における伝搬特性の評価

Evaluation of propagation characteristics of two-mode squeezed light in foggy space for quantum LiDAR applications

玉大工 [1]，トヨタ自動車 [2] ○(D1) 鈴木 裕太 [1], 吉田 健治 [2], 政田 元太 [1]

Tamagawa Univ.[1], Toyota Motor Corporation.[2],○Yuta Suzuki[1], Kenji Yoshida[2], Genta Masada[1]

E-mail: tzbh23232@stu.tamagawa.ac.jp

レーザー光を利用した物体検出技術である LiDAR を屋外で利用した場合、散乱によって光波を減衰させる霧や雨、大気擾乱や熱雑音などがその性能を制限する要因となる．2 モードスクイーズド光がもつ量子力学的相関を LiDAR に応用することによって、大気外乱の影響下における検出感度を改善できる可能性が期待されている [1]．本研究では量子 LiDAR を屋外で使用することを想定し、霧空間における 2 モードスクイーズド光の伝搬特性について評価を行った．Fig.1 の実概要図に示すように、本研究では非線形光学結晶を内蔵する 2 つの光パラメトリック発振器 (OPO_1,OPO_2) によって、2 つのシングルモードのスクイーズド光 (SQ_1,SQ_2) を生成した (波長 1064nm)。続いて SQ_1 と SQ_2 の位相を直交させながらビームスプリッタ (BS) で合波することにより、2 モードスクイズド光 (signal,reference) を生成し、両出力光の間の量子相関をホモダイン検出器 (HD_1,HD_2) 及びスペクトラムアナライザ (SA) によって検証した．

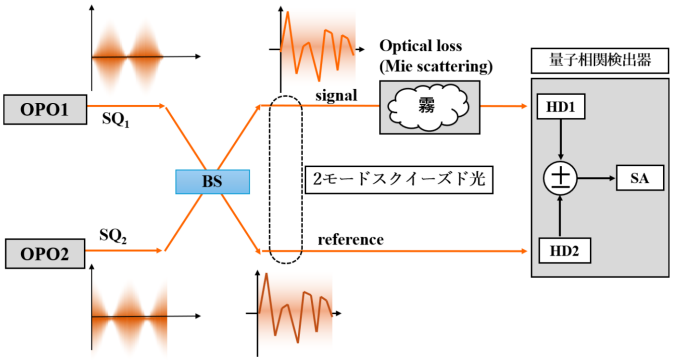


Fig. 1. 実験概要図

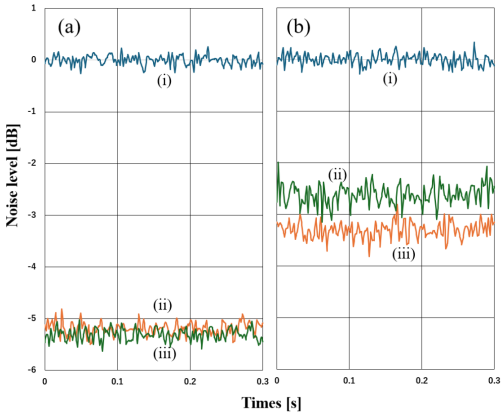


Fig. 2. 量子相関の測定結果.
(a): 霧がない場合 (b): 霧がある場合.
それぞれ (i): ショットノイズレベル, (ii):$\langle[\Delta(\hat{x}_s-\hat{x}_r)^2]\rangle$,
(iii):$\langle[\Delta(\hat{p}_s+\hat{p}_r)^2]\rangle$, を表す

Fig.2(a) は signal 光と referance 光の直交位相振幅 $\hat{x},\hat{p}$ の相関分散の測定結果を示す．量子相関がないときのショットノイズレベルと比較して $\langle[\hat{x}_s-\hat{x}_r]^2\rangle$ が −5.19dB、$\langle[\hat{p}_s+\hat{p}_r]^2\rangle$ が −5.30dB であることから、相関分散 $\Delta=\langle[\Delta\,(\hat{x}_s-\hat{x}_r)^2]\rangle+\langle[\Delta\,(\hat{p}_s+\hat{p}_r)^2]\rangle=0.3$ であった．この結果は量子相関が存在するための十分条件である $\Delta<1$[2, 3] を満たしており、両出力光が量子もつれ状態であることを示している．続いて Fig.2(b) は signal 光のみを透過率が 50% の霧空間 (全長 60cm) を伝搬させたときの相関分散の測定結果を示す．結果は $\langle[\hat{x}_s-\hat{x}_r]^2\rangle$ が −3.3dB、$\langle[\hat{p}_s+\hat{p}_r]^2\rangle$ が −2.6dB、相関分散 Δ は 0.5 であった．この結果は霧による影響を受けた 2 モードスクイーズド光においても量子相関が残存することを示しており、量子 LiDAR を霧空間で使用できる可能性を示唆している．

[1] S. H. Tan, *et.al.*, Phys. Rev. Lett. **101** 253601 (2008).
[2] L. M. Duan, *et.al.*, Phys. Rev. Lett. **84** 2722, (2000).
[3] R. Simon, Phys. Rev. Lett. **84** 2726, (2000).

© 2025年 応用物理学会

パルス光で生成された$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$状態の連続光ホモダイン測定

Continuous-wave homodyne measurement of a superposition of vacuum and single photon state generated by pulsed light

東大工[1], LKB[2], OptQC[3], 理研 RQC[4], NTT 先デ研[5], 情報機構[6], ○(M)大泉 幹[1], 中島 将貴[1], 青柳 龍夏[2], 園山 樹[1,3,4], 高橋 一真[1], 鈴木 拓海[1], 柏﨑 貴大[5], 山嶋 大一[5], 井上 飛鳥[5], 梅木 毅[5], 三木 茂人[6], 寺井 弘高[6], 藪野 正裕[6], 遠藤 護[1,4], 古澤 明[1,3,4]

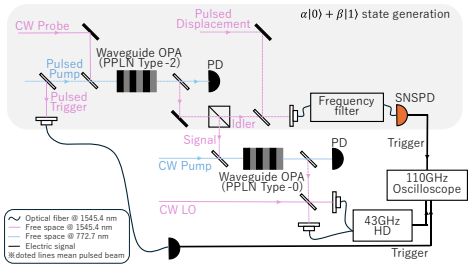
Univ. of Tokyo[1], Laboratoire Kastler Brossel[2], OptQC[3], Riken RQC[4], NTT Device Technology Labs[5], NICT[6], ○Kan Oizumi[1], Katsuki Nakashima[1], Lucas Aoyagi[2], Tatsuki Sonoyama[1,3,4], Kazuma Takahashi[1], Takumi Suzuki[1], Takahiro Kashiwazaki[5], Taichi Yamashima[5], Asuka Inoue[5], Takeshi Umeki[5], Shigehito Miki[6], Hirotaka Terai[6], Masahiro Yabuno[6], Mamoru Endo[1,4], Akira Furusawa[1,3,4]

E-mail: ooizumi@alice.t.u-tokyo.ac.jp

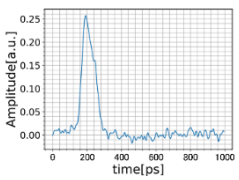
汎用光量子計算には非ガウス型ゲートが不可欠である[1]。光量子分野では、光子検出器による伝令付き手法によって、非ガウス型ゲートの実装に必要な非ガウス型状態を生成する。しかし、光子検出器からのクリックの時間揺らぎが、連続光ホモダイン測定できる量子状態の波束の時間幅を律速している[2]。我々はこの問題を解決するために、量子状態をパルス光で生成し、連続光で測定するハイブリッドな手法を開発してきた[3]。本研究では非ガウス型ゲートの実装に向けて、位相敏感な光子数重ね合わせ状態である$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$(VOPS)状態の生成及び測定を行った。

強度変調器を用いてパルス化した光から、2 モードスクイーズド真空状態を生成し、アイドラー側で変位操作を行った(図 1)。変位操作されたアイドラー光に対して SNSPD (Superconducting Nanowire Single-Photon Detector)を用いて光子検出することで、先行研究[3]とは異なり位相敏感な状態を確率的に生成した。本実験の特徴として、位相敏感な量子状態の生成と位相敏感なホモダイン測定の両方を行うために、パルス光と連続光のハイブリッドな位相制御をしている。その結果、連続光ホモダイン測定によって、量子状態を 80 ps の時間波束に生成したことを実証し(図 2, 3)、我々の開発したハイブリッドな手法を位相敏感で複雑な量子状態に適用できることを示した。

(1)



(2)



(3)

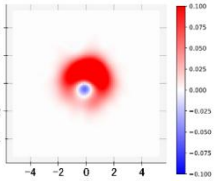


図 (1)実験の概要 (2)VOPS が生成された波束の時間モード表示 (3)測定した VOPS の Wigner 関数

[1] S. Lloyd and S. L. Braunstein, Phys. Rev. Lett. 82, 1784 (1999).

[2] T. Sonoyama, W. Asavanant, K. Fukui, M. Endo, J. Yoshikawa, and A. Furusawa, Phys. Rev. A 105, 043714 (2022).

[3] T. Sonoyama, in *APS March Meeting 2025*, proceedings of the American Physical Society Meeting, Anaheim, 2025, edited by APS (American Physical Society, College Park, MD, 2025).

© 2025年 応用物理学会

量子光シンセシスによる波長多重偏光量子もつれ光源の開発

Wavelength-division multiplexing of polarization-entangled photon source via Fourier optical synthesis

○(M2)大北智也[1]，藪野正裕[2]，寺井弘高[2]，三木茂人[2]，清水亮介[1]

The University of Electro-Communications.[1]

Advanced ICT Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology.[2]

E-mail: r-simizu@uec.ac.jp

離散化されたスペクトル分布を持つ量子もつれ光子は、既存の光ファイバネットワークとの互換性の高さから、量子通信ネットワークの高度化に向けた応用が期待されている。また、このような離散スペクトル構造を周波数ビン状態として利用した量子情報処理技術の報告も行われている[1]。周波数ビン状態の生成方法には、擬似位相整合素子の分極反転を非周期的にする方法[2]や共振器構造を利用した報告が行われている[3]。これらの手法による周波数ビン生成では、変調周期は分極反転周期の設計や共振器長によって決まる。一方で、我々は非線形干渉計を利用して２光子重ね合わせ状態 $|\psi\rangle = \left(|2,0\rangle \pm e^{-i\varphi}|0,2\rangle\right)/\sqrt{2}$ を制御することにより、時間－周波数量子もつれ光の任意波束制御を行う手法（量子光シンセシス）を開発してきた[4]。本講演では、量子光シンセシスによる時間領域での２光子操作を行うことにより、そのフーリエ共役であるスペクトル分布を、任意の変調周期で制御した結果について報告する。

図 1(a)は、量子光シンセシスによって制御された時間―周波数量子もつれ光の 2 光子スペクトル強度分布(Joint Spectral Intensity)である。この結果から、波長多重化技術へ適した、変調周期 100 GHz の周波数ビン状態の生成に成功したことがわかる。続けて、アレイ導波路回折格子(Arrayed Waveguide Grating : AWG)によって図 1(a)の状態の２光子を波長毎に分波した。AWG より出力された２光子は偏光量子もつれ状態を形成していることが期待されるため、エネルギー保存則を満たす任意のチャンネルから出力される２光子に対して偏光量子状態トモグラフィ測定を行った。図 1(b)に再構成された密度行列を示す。今回の測定では、推定した tangle は 0.47 であり、高い偏光量子もつれ状態を確認できなかった。この原因はシングルモードファイバによる偏光の擾乱や擬似位相整合素子内で発生する２光子間の時間遅延を十分に補償することができていないことが考えられる。講演では複数チャンネルに渡る波長多重偏光量子もつれ光源を実証した結果についても報告を行う。

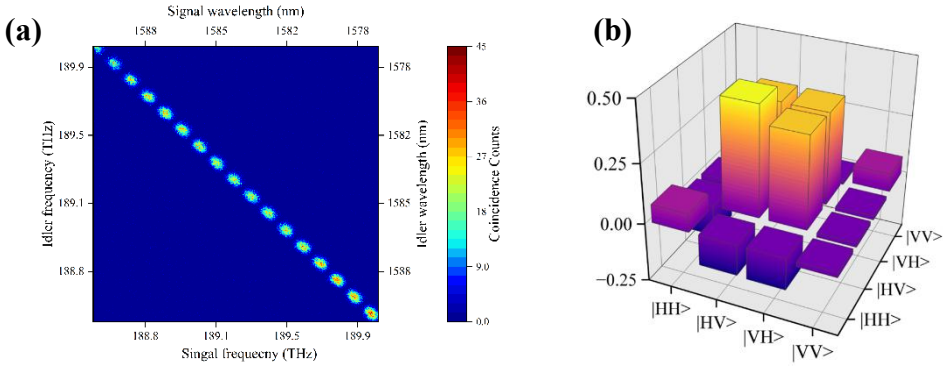


Fig.1 (a) Measured Joint Spectral Intensity. (b) Real part of density matrix.

[1] Hsuan-Hao Lu, et al, Optica **5**, 1455 (2018). [2] Christopher L. Morrison, et al, APL Photonics **7**, 066102(2022).
[3] R. Fujimoto, et al., Opt. Express. **30,** 36711 (2022). [4] Rui-Bo Jin, et al, Appl. Phys. Lett. **121**, 244002 (2022).

© 2025年 応用物理学会

Si マイクロリング共振器を用いた高輝度相関光子対の生成

Bright photon pair generation using Si microring resonators

NTT 物性基礎研[1]，北大院工[2]，NTT 先デ研[3]，NTT NPC[4]
○(D3) 安井 翔一郎[1,2]，稲葉 智宏[1]，西 英隆[3,4]，鍛治 怜奈[2]，足立 智[2]，Xuejun Xu[1]，眞田 治樹[1]
NTT Basic Research Labs.[1], Grad. Sch. Eng., Hokkaido Univ.[2],
NTT Device Technology Labs.[3], NTT Nanophotonics Center[4]
○S. Yasui[1,2], T. Inaba[1], H. Nishi[3,4], R. Kaji[2], S. Adachi[2], X. Xu[1], H. Sanada[1]
E-mail: syou157next@eis.hokudai.ac.jp

量子インターネットの実現に向けて，フォトニック集積回路を用いた量子情報処理技術の研究が活発に進められている． 我々は，SOI 基板上に集積した量子中継デバイスの実現に向けて，通信波長帯光子を保存できる希土類イオン光量子メモリや，マイクロリング共振器を用いた自発四光波混合(SFWM)過程によるもつれ光子対源の研究を行なっている[1]．量子中継デバイスへの応用には，高速でかつ狭帯域のもつれ光子対源が必要であり，そのためには高い光子対生成レート(PGR)と高い輝度(Brightness)を有する相関光子対源の開発が重要となる．シリコン(Si)は Si_3N_4 や $LiNbO_3$ などに比べて大きな非線形屈折率を持つため，高い PGR が多く報告されている[2]．一方，PGR のスペクトル密度に対応する Brightness は，Si 導波路特有の大きな伝搬損失により制限されている．我々は，リング構造の最適化により 10^6 オーダーの高い無負荷 Q 値を有する Si マイクロリング共振器を実現している[3]．これらのリング共振器は従来よりも狭い光スペクトル幅を有しており，高い Brightness が期待できる．今回は，この共振器を用いて生成した相関光子対の同時計数測定を行い，PGR および Brightness の評価を行なった．

SFWM 過程により生成した Signal 光と Idler 光の同時計数測定では，リング半径 40 μm，幅 1.5 μmのリング共振器を用いた[図(a)]．このように大きなリング半径と幅をもつリング構造を採用することで，リング側壁での電磁場浸み出しを抑制し，側壁ラフネスに起因する光散乱損失の低減が可能となる．相関光子対が生成される共振モードは，約6×10^5の負荷 Q 値を有する[図(b)]．同時計数測定における検出器および光学系の光損失を補正することで PGR を評価した[図(c)]．さらに，PGR と時間相関ヒストグラムから得られた光スペクトル幅を用いて Brightness を算出した[図(d)]．その結果，得られた PGR と Brightness は Si の二光子吸収と自由キャリア吸収を考慮した数値計算結果と良い一致を示し，従来の Si マイクロリング共振器を用いた報告例 [2,4]と比較して，いずれも数倍高い値を示すことが明らかになった．これらの結果は，高レートかつ光量子メモリと帯域整合する相関光子対の生成に成功したことを示している．PGR や Brightness のさらなる向上に向けたリング構造の最適化に関する議論は講演に譲る．

本研究は JSAP 科研費(23H01887, 23K17883, 23KJ0051)の助成を受けたものです．

[1] S. Yasui et al., Opt. Continuum **3**, 833 (2024). [2] C. Ma et al., Opt. Express **25**, 32995 (2017).
[3]安井他，第72回応用物理学会春季学術講演会, 15p-K309-2 (Mar., 2025).
[4] W. C. Jiang et al., Opt. Express **23**, 20884 (2015).

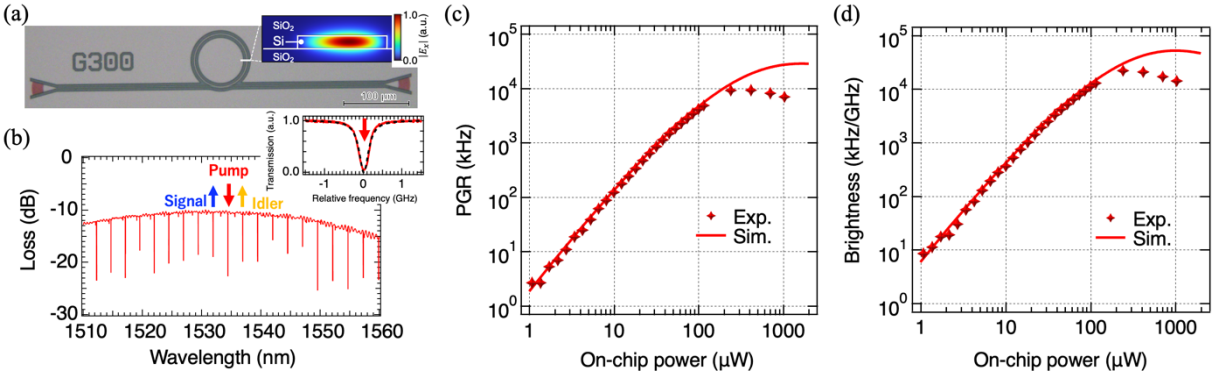


Fig.1 (a) Structure of the Si microring resonator observed by an optical microscope. The inset shows spatial distribution of the fundamental transverse electric mode in the ring cross-section simulated by the finite element method. (b) Transmission spectrum of the Si microring resonator. Each colored arrow indicates resonant modes of input pump beam and generated signal (idler) photons by SFWM process. The inset is enlarged view of the resonant modes of the input pump beam. Pump-power dependence of (c) PGR and (b) brightness. Star plots represent experimental results evaluated from coincidence-count rate. Solid lines represent numerical calculation results.

© 2025年 応用物理学会

導波路光パラメトリック増幅器を用いた 高レベルスクイーズド真空状態生成及び測定

Generation and measurement of a highly squeezed vacuum state with a waveguide optical parametric amplifier

東大工[1], NTT 先デ研[2], カセサート大理[3], OptQC[4], 理研 RQC[5]

○(M2)廣田 和希[1],ハ ギョンミン[1],柏﨑 貴大[2],山嶋 大地[2],ジャトラパゴーン パワパット[1,3],
鈴木 拓海[1],高橋 一真[1],川﨑 彬斗[1,4,5],梅木 毅伺[2],遠藤 護[1,4],アサバナント ワリット[4,5],
古澤 明[1,4,5]

Univ. of Tokyo[1], NTT Device Technology Labs[2], Kasesart Univ[3], OptQC[4], RIKEN[5]

°(M2) Kazuki Hirota[1], Gyeongmin Ha[1], Takahiro Kashiwazaki[2], Taichi Yamasima[2], Pawphat Jaturaphagorn[3], Takumi Suzuki[1], Kazuma Takahashi[1], Akito Kawasaki[4], Takeshi Umeki[2], Mamoru Endo[1,4], Warit Asavanant[4,5], Akira Furusawa[1,4,5]

E-mail: kazuki@alice.t.u-tokyo.ac.jp

光量子コンピュータは数ある量子情報処理のプラットフォームの中でも有力候補の一つである。本研究室では特に測定誘起型の連続量量子情報処理の研究を行っている。スクイーズド真空状態はこの手法における主要なリソースの一つであり、使用されたスクイーズド真空状態のスクイージングレベルに依存したノイズが計算の各ステップで発生する。そのため、より正確な量子情報処理には高いスクイージングレベルのスクイーズド真空状態が不可欠である。

我々の研究グループでは近年作製された PPLN 導波路型光パラメトリック増幅器(OPA)[1]でスクイーズド真空状態の生成を行っており、先行研究では,モジュール化されたこの導波路 OPA を用いて,8.3 dB のスクイージングレベルのスクイーズド真空状態が測定されている[2]。しかしながら、更なる高スクイージングレベル化には、モジュール内のロスや測定時の位相ノイズが大きな問題となっていた。そこで本研究では、導波路からスクイーズを取り出す方式や使用する光学素子の改善に取り組みロスの削減に成功した。さらに、新しい位相ロック手法(Fig.1(a))を用いることで、RMS 位相ノイズの削減につとめた。以上の改善により、観測されたスクイージングレベルは、ロス補正なし,アンチスクイージングレベル 20dB で 9.7±0.5dB であり、これは導波路 OPA で観測された通信波長帯のスクイージングレベルとしては世界最高記録である(Fig.1(b))。

(a) (b)



Fig 1. (a)Experimental setup. OPA: Optical Parametric Amplifier; ESA: Electrical Spectrum Analyzer
(b)Measured squeezed vacuum with ESA(20dB antisqueeze,5.5MHz sideband, RBW=1.8MHz, VBW=3.3kHz)

[1] T. Kashiwazaki et al., Appl. Phys. Lett. 25, 251104 (2021).
[2] T. Kashiwazaki et al., Appl. Phys. Lett. 23, 234003 (2023).

© 2025年 応用物理学会

光パラメトリック増幅を用いた 光スペクトル位相推定手法の提案及び実証

Proposal and Demonstration of a Spectral Phase Estimation Method Using Optical Parametric Amplification

東大工[1], NTT 先デ研[2], 理研 RQC[3], OptQC[4] ○(D)高橋 一真[1], 鈴木 拓海[1], 星野 佳嗣[1], 柏﨑 貴大[2], 井上 飛鳥[2], 梅木 毅伺[2], 遠藤 護[1,3], 古澤 明[1,3,4]

Univ. of Tokyo[1], NTT Device Technology Labs[2], Riken RQC[3], OptQC[4], ○Kazuma Takahashi[1], Takumi Suzuki[1], Yoshitsugu Hoshino[1], Takahiro Kashiwazaki[2], Asuka Inoue[2], Takeshi Umeki[2], Mamoru Endo[1,3], Akira Furusawa[1,3,4]

E-mail: takahashi@alice.t.u-tokyo.ac.jp

パルス光のスペクトル位相を推定する方法として FROG (Frequency-resolved optical gating) [1]などがある。さらに量子光のような弱パワーのパルス光についても、非線形光学結晶をポンプし測定対象光パルスを光パラメトリック増幅することで FROG を行う手法が提案されている(OPA XFROG) [2]。本発表では光パラメトリック増幅を利用した新しい量子光パルスの光スペクトル位相推定手法を提案し、その実証を報告する。本手法は光学遅延系を用いる必要がなく、そのために安定的でコンパクトな測定系により光スペクトル位相を推定できる。

本推定手法は光パラメトリック増幅および光スペクトラムアナライザを用いて測定対象光パルスのスペクトル位相を推定する手法である (Fig.(a))。光パラメトリック増幅を受ける位相を位相変調器によりスキャンし、各増幅方向において増幅された測定対象光パルスの光パワースペクトルを測定する。これにより得られる光パラメトリック増幅方向と光パワースペクトルの 2 次元マップ (Fig.(b))から測定対象光パルスのスペクトル位相を推定する。FROG ではパルスディレイと光パワースペクトルの 2 次元マップから信号パルスのスペクトル位相が復元されるのに対し、本手法ではパルスディレイの代わりに光パラメトリック増幅の位相が用いられる。

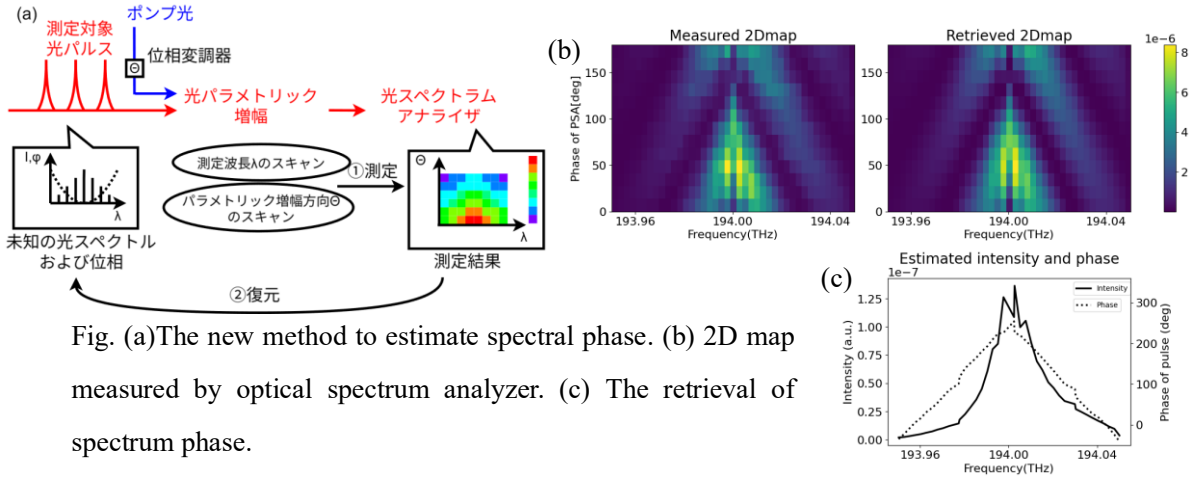


Fig. (a)The new method to estimate spectral phase. (b) 2D map measured by optical spectrum analyzer. (c) The retrieval of spectrum phase.

[1] D. J. Kane and R. Trebino, IEEE J. Quantum Electron., 29, 571–579 (1993)

[2] J. Y. Zhang *et al.*, Opt. Express 11, 601-609 (2003)

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.9 Optical quantum physics and technologies

[10p-N202-1~9] 3.9 Optical quantum physics and technologies

[10p-N202-1]

Hybrid Biphoton Spectrometer for Time and Frequency-Resolved Spectroscopy

○(M2C)Koya Onoda[1], Ozora Iso[1], Masahiro Yabuno[2], Hirotaka Terai[2], Shigehito Miki[2], Ryosuke Shimizu[1] (1.Univ. of Electro-Comm, 2.NICT)

[10p-N202-2]

Fast Acquisition in Ultra-Broadband Quantum Infrared Spectroscopy

○Toshiyuki Tashima[1], Tetsuya Nishimura[1], Yu Mukai[1], Mamoru Hisamitsu[2], Katsuhiko Tokuda[2], Ryo Okamoto[1], Shigeki Takeuchi[1] (1.Kyoto Univ., 2.Shimadzu Corp.)

[10p-N202-3]

Coherent Storage of Ultrashort Weak Signals in InAs Quantum Dots and High Efficiency/Time Resolved Detection via Frequency Up-conversion

○(DC)Yuta Kochi[1,2], Yushiro Takahashi[1,2], Maximilian Hornauer[1,2], Sunao Kurimura[3], Kouichi Akahane[4], Junko Ishi-Hayase[1,2] (1.Keio Univ., 2.Keio CSRN, 3.NIMS, 4.NICT)

[10p-N202-4]

Extension of the storage time in a Pr^{3+}:Y_2SiO_5-based quantum memory

○Kota Sasaki[1], Yudai Nodaguchi[2], Daisuke Yoshida[3,4], Feng-Lei Hong[2,3], Akira Ozawa[2,3], Tomoyuki Horikiri[2,3,4] (1.IFGS, Yokohama Natl. Univ., 2.Grad. Sch. Eng., Yokohama Natl. Univ., 3.IMS, Yokohama Natl. Univ., 4.LQUOM Inc.)

[10p-N202-5]

Experimental Continuous-Time Quantum Walk in a Singly Bounded One-Dimensional Lattice Structure Using a Mirror-Image Method.

○(M1)Naoto Suzuki[1], Naoto Namekata[1,2], Satoshi Ohya[1,2], Shuichiro Inoue[1,2] (1.CST, Nihon Univ., 2.IQS, Nihon Univ.)

[10p-N202-6]

Policy for Spatial Best-Arm Identification Problem via Quantum Walks

○Tomoki Yamagami[1,2], Etsuo Segawa[3], Takatomo Mihana[2], Andre Roehm[2], Atsushi Uchida[1], Ryoichi Horisaki[2] (1.Saitama Univ., 2.Univ. Tokyo, 3.Yokohama Nat. Univ.)

[10p-N202-7]

Realization of THz-bandwidth all-optical quantum teleportation

○(D)Takumi Suzuki[1], Takaya Hoshi[1], Shotaro Oki[1], Konhi Ichii[1], Hironari Nagayoshi[1], Kazuma Takahashi[1], Takahiro Kashiwazaki[2], Taichi Yamashima[2], Asuka Inoue[2], Takeshi Umeki[2], Akito Kawasaki[1,3,4], Tatsuki Sonoyama[1,3,4], Kan Takase[1,3,4], Warit Asavanant[1,3,4], Mamoru Endo[1,4], Akira Furusawa[1,3,4] (1.The Univ. of Tokyo, 2.NTT Device Technology labs,, 3.OptQC, 4.Riken RQC)

[10p-N202-8]

Research on Low-Loss High-Repetition-Rate Optical Switching with Quantum Teleportation IV

○(D)Ryuhoh Ide[1], Akito Kawasaki[1,2,3], Takumi Suzuki[1], Katsuki Nakashima[1], Tatsuki Sonoyama[1,2,3], Takaya Hoshi[1], Hector Brunel[1,4], Benjamin Lundgren Larsen[5], Takahiro Kashiwazaki[6], Taichi Yamashima[6], Asuka Inoue[6], Takeshi Umeki[6], Atsushi Sakaguchi[2], Kan

Takase[1,2,3], Mamoru Endo[1,2], Warit Asavanant[1,2,3], Akira Furusawa[1,2,3] (1.Univ. of Tokyo, 2.Riken RQC, 3.OptQC, 4.ENS, 5.DTU, 6.NTT Device Technology Labs)

[10p-N202-9]

Toward a 25 GHz Clock Optical Quantum Processor:Generation of One-Dimensional Cluster States

○(M2)Takaya Hoshi[1], Konhi Ichii[1], Dohoon Lim[1], Takumi Suzuki[1], Akito Kawasaki[1,2,3], Ryuhoh Ide[1], Atsushi Sakaguchi[2], Shota Yokoyama[2], Takahiro Kashiwazaki[4], Taichi Yamashima[4], Asuka Inoue[4], Takeshi Umeki[4], Warit Asavanant[1,2,3], Mamoru Endo[1,2], Akira Furusawa[1,2,3] (1.The Univ. of Tokyo, 2.Riken RQC, 3.OptQC Corp., 4.NTT Device Technology Labs)

時間–周波数分解量子分光に向けた複合型分光測定装置の開発

Hybrid Biphoton Spectrometer for Time and Frequency-Resolved Spectroscopy

電通大基盤理工 [1]，NICT[2]

○(M2)小野田 航也 [1]，磯 大空 [1]，藪野 正裕 [2]，寺井 弘高 [2]，三木 茂人 [2]，清水 亮介 [1]

Univ. of Electro-Comm. [1], NICT. [2],

○Koya Onoda[1], Ozora Iso[1], Masahiro Yabuno[2], Hirotaka Terai[2], Shigehito Miki[2], Ryosuke Shimizu[1]

E-mail: o2433028@gl.cc.uec.ac.jp

近年、単一光子カメラの性能向上が目覚ましく、その応用に対する研究開発も活発である[1]。これまでに我々は、単一光子カメラの分光計測分野へ展開を図るために時間分解能と周波数分解能を同時に必要とする新たな量子分光計法を理論的に提案してきた[2]。この手法を可視光域に光吸収帯を有する生体試料へ適用することを想定し、可視-近赤外帯域の非縮退量子もつれ光源の開発を進めている。量子もつれ光に対する従来の２光子スペクトル測定では、２つ光子を同一原理の分光手法で計測する方式が数多く報告されているが、可視光帯と近赤外帯では、それぞれの帯域で最適な光子分光手法が異なるため、２光子スペクトルの計測は容易ではない。本講演では、我々が新たに開発したハイブリット２光子分光計（HBS）を用いた Joint Spectral intensity (JSI) 測定について報告する。

図 1 に測定系の概要を示す。773.2 nm の第二高調波を用いて LBO 結晶を励起し、Type-I 位相整合条件下での自発的パラメトリック下方変換(SPDC) により、可視帯(515 nm)と近赤外帯の光子（1550 nm）を発生させた。この２光子の JSI を HBS を用いて測定した。HBS では、可視光子のスペクトルは回折格子を通して遅延線型単一光子カメラに入射した位置情報から取得され、近赤外光子のスペクトルはファイバの波長に依存する群速度によって分散した光子の到着時間から取得される。両検出器から出力される光子到達時間信号の時間相関を解析することで、可視-近赤外域にわたる光子対の JSI を取得した。図 2 に得られた JSI を示す。この結果から、負の周波数相関を有する２光子スペクトルを高いコントラストで確認されることが出来た。この手法は、機械的な走査を必要としないため、効率的な JSI 測定が可能である。さらに、我々の単一光子カメラの時間分解測定性能を利用すると JSI の時間測定も可能になる。

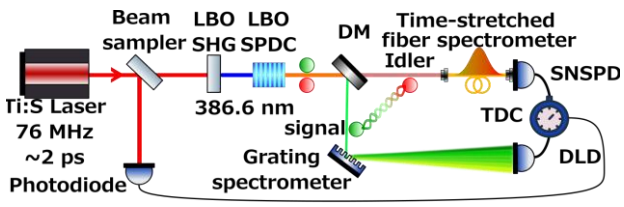


図１．ハイブリッド２光子分光測定系

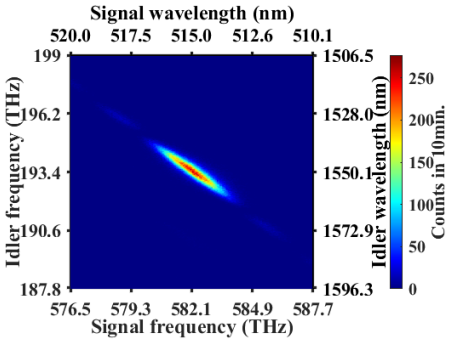


図２． ２光子スペクトル

本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)JPMXS0118069242 の助成を受けたものです。

[1] O. Iso. *et al., Opt. Express* **33**, 19504–19513(2025). [2] Y. Fujihashi. *et al*., *arXiv* 2502.02073 (2025).

© 2025年 応用物理学会

超広帯域量子赤外分光計測の高速化
Fast Acquisition in Ultra-Broadband Quantum Infrared Spectroscopy

京大院工[1], 島津製作所[2]
○田嶌 俊之[1], 西村 哲也[1], 向井 佑[1], 久光 守[2], 徳田 勝彦[2], 岡本 亮[1], 竹内 繁樹[1]
Kyoto Univ.[1], Shimadzu Corp.[2],
○ Toshiyuki Tashima[1], Tetsuya Nishimura[1], Yu Mukai[1], Mamoru Hisamitsu[2],
Katsuhiko Tokuda[2], Ryo Okamoto[1], Shigeki Takeuchi[1],
E-mail: takeuchi@kuee.kyoto-u.ac.jp

赤外分光法は、分子構造などを同定する手法であり、化学、材料分野など広く利用されている。近年、量子赤外分光法が提案、実証され[1,2]、次世代分光技術として注目されている。これは、可視光励起による二つの可視-中赤外量子もつれ発生過程間の非線形量子干渉と干渉後の可視光子を可視光検出器で測定する手法で、可視領域の操作のみで赤外分光が可能となる革新的な技術である。我々はこれまでに、チャープ型擬似位相整合素子を用いた超広帯域可視-中赤外量子もつれ光源を開発し、2〜5 μm 帯域における高分解能な量子赤外吸収分光を実現した[2]。しかし、広帯域量子赤外分光の測定時間は、1 測定あたり 8.5 時間(リファレンス込みの場合 17 時間)を要しており、測定時間の短縮という大きな課題があった。

本研究では、ファイバ分岐による 2 チャンネル同時計測システムや高強度可視励起光源(1.5W)の導入により、分解能の劣化を伴わずに 1 測定あたり 30 分(1 時間)にまで短縮することに成功した(図 1(a))。本発表では、このシステムの詳細及び高速化された広帯域量子赤外分光の透過率評価(図 1(b))を報告する。

本研究の一部は、MEXT Q-LEAP (JPMXS0118067634)、JST ERATO (JPMJER2402)、JST-CREST (JPMJCR1674)、官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)、科研費・科学技術振興調整費 (No.10435951)の支援で行われた。

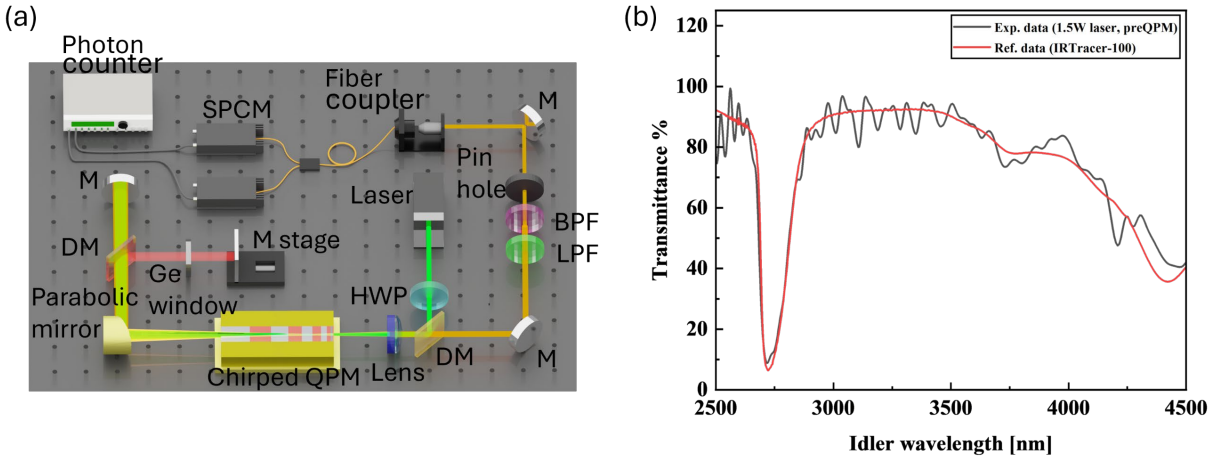


図 1. (a)実験装置図、(b)測定時間が 30 分の透過率(UV 溶融石英)

[1] D. A. Kalashnikov, Anna V. Paterova, Sergei P. Kulik and Leonid A. Krivitsky, Nat. Photon. 10, 98–101 (2016).
[2] T. Tashima, Y. Mukai, M. Arahata, N. Oda, M. Hisamitsu, K. Tokuda, R. Okamoto, and S. Takeuchi., Optica 11, 81-87(2024).

© 2025年 応用物理学会

InAs 量子ドット集合体への超短微弱信号コヒーレント保存及び周波数上方変換による高効率・高時間分解測定

Coherent Storage of Ultrashort Weak Signals in InAs Quantum Dots and High Efficiency/Time Resolved Detection via Frequency Up-conversion

[1] 慶大理工, [2] 慶大 CSRN, [3] 物材機構, [4] 情通機構
○(D)河内 優太 [1,2], 高橋 雄士朗 [1,2], Maximilian Hornauer[1,2], 栗村 直 [3], 赤羽 浩一 [4], 早瀬 潤子 [1,2]
[1]Keio Univ., [2]Keio CSRN, [3]NIMS, [4]NICT
○(D)Y. Kochi[1,2], M. Hornauer[1,2], S. Kurimura[3], K. Akahane[4] and J. Ishi-Hayase[1,2]
E-mail: yuta.kouchi@keio.jp

【背景・目的】近年単一光子を用いた量子通信技術開発において，光子の重ね合わせ状態を壊さずに保存できる量子メモリの開発が必要不可欠である．情報量増加に向け量子メモリのマルチモード化・広帯域化が要求されるが，従来のシステムでは量子メモリ及び単一光子検出器がこれらの帯域に対応していなかった．この課題に対し，我々のグループはフォトンエコー(PE)法に量子ドット集合体(QDs)を用いることで保存帯域を THz 域へ拡張することに成功した．しかし，QDs は光との相互作用が小さく，またその不均一幅の広さから均一量子制御が困難であり，PE 生成効率が極めて低い問題があった[1, 2]．そこで我々のグループでは，QDs 量子メモリと光の結合効率向上のため共振器付 50 層 QDs を作成し，PE の過程において ARP[3]による量子制御均一化を導入した．再生された PE 信号はパルスポンプ周波数上方変換単一光子検出器(UCSPD)によってフェムト秒領域の時間分解測定を可能にした [4]．本検出器はこれまで結晶長及びビーム径の最適化により約 25%の変換効率と約 300 fs の高時間分解能を達成している．今回これらの技術及び最適化を統合し，これまで困難であった微弱コヒーレントパルス保存及び時間分解測定を行う．

【方法】Figure 1(a)に本実験で用いた光学系概略図を示す．量子メモリサンプルは歪補償法により 50 層積層した共振器付自己形成 InAs QDs を用いた．PE 生成には周波数の離調や電場密度の不均一性に対して均一な量子制御(rephasing)を可能とする ARP という技術を用いた．ARP で用いるパルス幅 1.2 ps のチャープパルス(Read1, 2)は，パルス幅 200 fs のパルスを 60 cm ガラスロッド(S-NH3, OHARA)に透過させることで生成した．再生された PE 信号は PPMgSLT 結晶によって和周波に変換され，最終的に Si APD によって単一光子測定を行い時間波形を取得した．結晶内の最適スポット径は群速度を組み込んだ結合波方程式シミュレーションから予測し実験系に適用した．

【結果】Figure 1(b)に UCSPD を用いた PE 波形測定結果を示す．パルス間隔が世界最短である 1.4 ps の time-bin PE 信号が我々の UCSPD で十分評価可能であることが明らかとなった．また，検出器での和周波変換効率 25%を踏まえると検出可能最小光子数は 2×10^{-5}/pulse と見積もられ，従来の信号強度を下回る 100 nW 域の信号保存が可能になると考えられる．また，サンプルの共振器長最適化を平行して行っており，本講演では実際に最適化を行ったサンプルからの PE 信号強度の比較及び time-bin 相対位相評価による量子メモリのコヒーレンス評価を示す予定である．

【謝辞】本研究の一部は，日本学術振興会特別研究員奨励費(No. JP23KJ1916), JST CREST (No. JPMJCR24A5), 慶大次世代研究プロジェクト推進プログラム，慶大スピントロニクス研究開発センターの支援を受けて行なわれた．量子ドットサンプルは，NICT 先端 ICT デバイスラボの支援の下作製された．

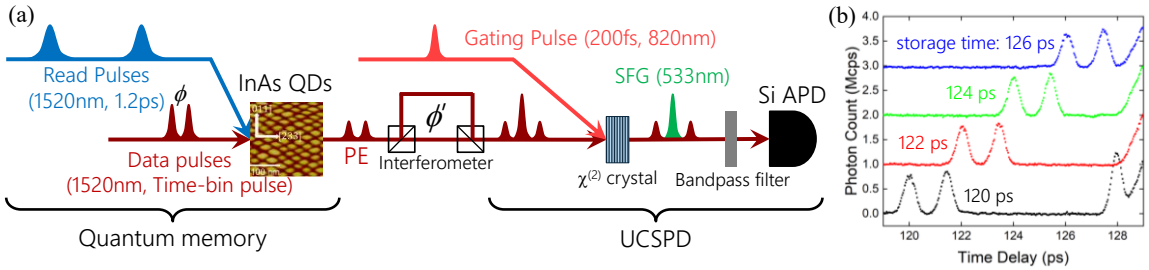


Fig. 1 (a) 光学系概略図. PE 法を用いた量子メモリ部と周波数上方変換を用いた検出部(UCSPD)から構成される．(b) UCSPD による PE 信号測定結果(保存時間: 黒 120 ps, 赤 122 ps, 緑 124 ps, 青 126 ps).

[1] 高橋他，第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 25p-12K-1 (Mar. 2024).
[2] 河内他，第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-C43-1 (Sep. 2024).
[3] M. F. Pascual-Winter *et al.*, *New J. Phys.* **15**, 055024 (2013).
[4] Y. Kochi *et al.*, *Opt. Express* **32**, 47549-47560 (2024).

© 2025年 応用物理学会

$Pr^{3+}:Y_2SiO_5$結晶量子メモリにおける保存時間の延長

Extension of the storage time in a $Pr^{3+}:Y_2SiO_5$-based quantum memory

横浜国大院先進[1]，横浜国大院理工[2]，横浜国大 IMS[3]，LQUOM[4]

○(M1)佐々木 康多[1]，野田口 祐大[2]，吉田 大輔[3,4]，洪 鋒雷[2,3]，小澤 陽[2,3]，堀切 智之[2,3,4]

IFGS, Yokohama Natl. Univ.[1], Grad. Sch. Eng., Yokohama Natl. Univ.[2],

IMS, Yokohama Natl. Univ.[3], LQUOM Inc.[4]

○K. Sasaki[1], Y. Nodaguchi[2], D. Yoshida[3,4], F. -L Hong[2,3], A. Ozawa[2,3], T. Horikiri[2,3,4]

E-mail: sasaki-kota-yb@ynu.jp

近年、従来の通信技術に代わる次世代の通信手法として量子通信が注目されている。量子通信は、光子などの量子状態を用いて情報を伝達する手法であり、盗聴耐性の高さなどに優れた特徴を有する。一方で、従来の通信方式と異なり信号の増幅が不可能であるため、長距離通信を実現するには量子中継技術 [1]の導入が不可欠である。量子中継では、測定に用いられる光子の量子状態を保持するために量子メモリが必要とされる。量子メモリの保存時間および記録・読み出し効率の向上は、通信距離やレートの向上に繋がる。

我々は、高効率かつ長時間保存可能な量子メモリの実現を目指し研究を行っている。本研究では、量子メモリとして希土類イオン添加結晶 $Pr^{3+}:Y_2SiO_5$ に着目し、その不均一広がり中に櫛状のスペクトルを作成しメモリとして使用する atomic frequency comb (AFC) [2]を採用した。さらに、保存時間延長とオンデマンド読み出しを可能にするため、spin-wave storage (SW) [2]との組み合わせを用いた。しかし Fig. 1. に示すように、SW では基底準位間の不均一広がりにより保存時間が～100 μs 程度に制限される。そこで、dynamical decoupling (DD) [3] を併用することで、コヒーレンスの劣化を抑制し、保存時間の大幅な延長を図った。DD においては、RF パルスの印加間隔や時間幅といったパルスシーケンスの設計が保存時間に影響を及ぼすことが知られている [3]。本発表では、パルスシーケンスを最適化することによって得られた保存時間の変化について報告する。

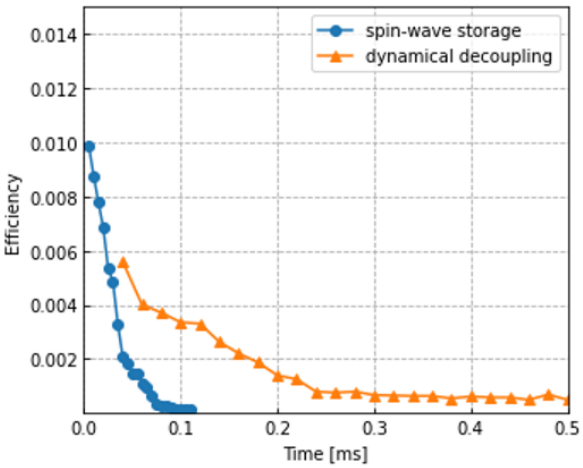


Fig. 1. AFC storage efficiency at different storage time

本研究は、総務省 ICT 重点技術の研究開発プロジェクト「量子インターネットに向けた要素技術の研究開発」(JPMI00316)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS226C)、NEDO ディープテック・スタートアップ支援事業、JSPS 科研費(24K01382)のご支援をいただき行われました。

[1] H-J. Briegel *et al*., Phys. Rev. Lett., **81**, 5932 (1998).

[2] M. Afzelius *et al*., Phys. Rev. A **79**, 052329 (2009).

[3] A. Holzäpfel *et al*., New J. Phys. **22** 063009 (2020).

© 2025年 応用物理学会

鏡像を用いた有境界一次元連続時間量子ウォークの観測

Experimental Continuous-Time Quantum Walk in a Singly Bounded One-Dimensional Lattice Structure Using a Mirror-Image Method.

日大院理工[1]，日大量科研[2] ◦(M1)鈴木 直人[1]，行方 直人[1,2]，大谷 聡[1,2]，井上 修一郎[1,2]

CST, Nihon Univ.[1], IQS, Nihon Unv.[2], ◦Naoto Suzuki[1*], Naoto Namekata[1,2**], Satoshi Ohya[1,2], and Shuichiro Inoue[1,2]

E-mail: * csna25003@g.nihon-u.ac.jp, ** namekata.naoto@nihon-u.ac.jp

量子ウォークはランダムウォークを量子力学的に拡張したもので、量子物性シミュレーションや散乱問題解析、量子探査などへの展開が期待されている。我々は、周波数安定化レーザーと $LiNbO_3$ 位相変調器（PM）を用いた簡便な系によって連続時間量子ウォーク(CTQW)を実装し、多次元化や長距離相互作用導入が可能であることを実験的に示してきた[1]。本手法では、光周波数自由度を利用して人工格子構造を実現するが、境界を有する、あるいは有限な格子の実装は容易ではない。これまでに、共振構造を取り入れることによって有限格子系の実現が報告されている[2]。今回、より勘弁に境界を実現する方法として、鏡像ウォーカーを用いることを提案し、その原理検証実験について報告する。

図 1（a）に実験系概念を示す。初期状態にある量子ウォーカー（QW）とその鏡像（MI）として音響光学素子（AOM）からの 0 次光と 1 次光をそれぞれ用いた。1 次光は 80MHz の周波数デチューニングが施される。これらをビームスプリッター（BS）で合波し、同一の単一モードファイバへ結合した。ここで、QW と MI の相対的な位相は BS の位置をピエゾ素子（PZT）で微動することで調節した。合波された光波は PM へ送られ、光周波数空間上で 1 次元最近接結合の時間発展を受ける。ここで、最近接する光周波数モード間隔は 16 MHz であり、QW と MI のそれぞれの初期状態（図 1(b)の格子位置 2, -3 がそれぞれ対応）の間には、4 つの格子点が存在する。そして、QW と MI 両方の重ね合わせの結果として現れる量子ウォーク挙動は、図 1（b）の格子位置-1 と 0 の間に境界がある場合（格子位置は＞0 に限定）と同じになる。

図 2 に発展時間t（PM の変調指数）に対する量子ウォーカーの存在確率分布の実験結果を示す。実験結果は理論(本稿では示さない)とよく一致し、鏡像の効果によって格子位置が 0 以上となる場合の有境界1次元最近接 CTQW を模倣することができた。

本研究は松尾学術研究助成、科研費(24K08285)を受けて行われた。

[1] S. Namekata, et al., CLEO/PR 2024 (2024) P2_031. [2] A. Dutt, et al., Nat. Commn. 13, 3377 (2022).

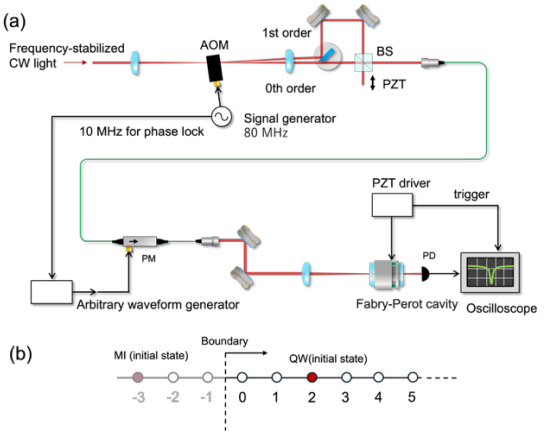


図 1.（a）実験系の概念 (b)格子モデル

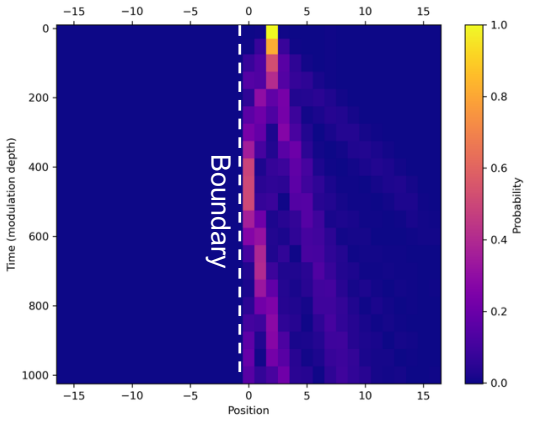


図 2.実験結果

© 2025年 応用物理学会

量子ウォークによる空間上の最適腕識別問題の方策

Policy for Spatial Best-Arm Identification Problem via Quantum Walks

埼玉大 [1]，東大情理 [2]，横浜国大 [3]
○ 山上 智輝 [1,2,†]，瀬川 悦生 [3]，巳鼻 孝朋 [2]，レーム アンドレ [2]，内田 淳史 [1,‡]，堀崎 遼一 [2]
Saitama Univ.[1], Univ. Tokyo[2], Yokohama Nat. Univ.[3]
○Tomoki Yamagami[1,2,†], Etsuo Segawa[3], Takatomo Mihana[2], André Röhm[2],
Atsushi Uchida[1,‡], Ryoichi Horisaki[2]
E-mail: tyamagami@mail.saitama-u.ac.jp[†], auchida@mail.saitama-u.ac.jp[‡]

はじめに：近年，意思決定者と外部環境の相互作用の中で行動の最適化を図る機械学習手法である強化学習に対して，量子計算を応用する「量子強化学習」の研究が盛んになりつつあり [1]，強化学習の基礎問題である多腕バンディット（MAB）問題に対する量子的方策もいくつか報告されている [2–4]．MAB 問題 [5] では，行動は環境に複数個設置された腕（スロットマシン）の選択に喩えられ，報酬は選択した腕に応じてパラメータが定められる Bernoulli 分布に従って生成されるものとする．MAB 問題はその単純さゆえ様々な発展問題が検討されており，その一種に腕がグラフ上に設置された環境を考えるグラフバンディット問題が挙げられる．グラフバンディット問題 [6] は選択に空間的な制約を考慮する状況下の意思決定を記述し，無線通信などの応用において重要であるが，量子的方策に関する報告は未だ存在しない．

本研究では，MAB 問題のうち迅速に最も報酬の期待できる腕（最適腕）を特定する最適腕識別をグラフバンディット問題の状況下で実現するアルゴリズムを，Markov 連鎖に基づいて構築される量子ウォークである Szegedy ウォーク [7] を用いて提案する．

提案手法：環境のグラフを $G = (V, A)$ とする．ここで，V は頂点集合，$A \subset V \times V$ は有向辺の集合であるとする．今，環境の腕は G の各頂点 $v \in V$ 上に設置されている．本設定では，エージェントが選択した腕とその腕によって内部的に与えられる確率分布に従って決まる「環境状態」という概念 [3] の組によって報酬の有無が決まるものとする．以下，取り得る環境状態の集合を Σ とする．

本問題を対処する上で，選択腕 $v \in V$ と環境状態 $\sigma \in \Sigma$ の組 (v, σ) に関する状態遷移を考えることが重要である．そこで，この状態遷移を記述するための実行グラフ $\widetilde{G}$ を，元のグラフ G と環境状態に添字づけられた自己閉路付完全グラフ K_Σ° の直積グラフとして生成する（Fig. 1）．この実行グラフ $\widetilde{G}$ 上で古典的な状態推移を考えた上で，その量子版に対応する Szegedy ウォーク [7] を導入することにより，提案アルゴリズムを構築する．

結果：環境のグラフ G を自己閉路付完全グラフ K_n とした場合と完全 2 部グラフ K_{n_1,n_2} とした場合について最適腕の推薦確率 $\mathbb{P}_t(v^*)$ の数値計算を行った．その結果をそれぞれ Fig. 2**(a)**, **(b)** に示す．前者は実質的

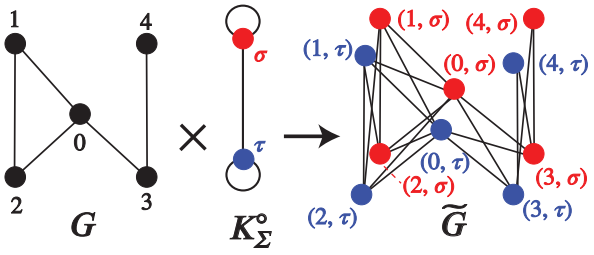


Fig. 1 Example of how to construct the executive graph $\widetilde{G}$ in our proposed algorithm.

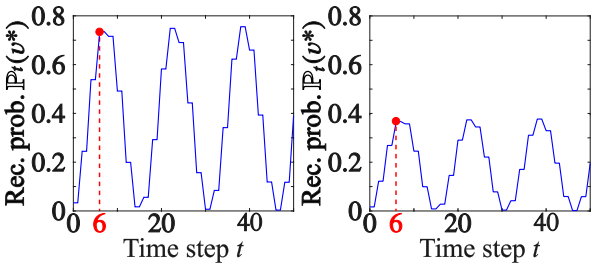


Fig. 2 Variation of recommendation probability $\mathbb{P}_t(v^*)$ of the best arm v^* over measurement time t for our algorithm on **(a)** the complete graph K_{30} and **(b)** the complete bipartite graph $K_{30,10}$.

に空間的な構造を持たない設定であり，先行研究 [3] で示された結果と同等の性能が示されている．後者は空間的制約を有する最も簡単な設定の一つであり，その下で推薦確率を数学的に得ることができた．

まとめ：空間的な制約を持った環境における最適腕識別のアルゴリズムを量子ウォークを用いて構築し，簡単な例に対して最適腕の推薦確率に関する数学的な結果を得た．今後は，古典アルゴリズムとの比較などを通してより実用性を高めていくことが望まれる．

参考文献

[1] D. Dong et al., *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, **38**(5), pp. 1207–1220 (2008).
[2] M. Naruse et al., *Scientific Reports*, **5**(1), 13253 (2015).
[3] B. Casalé et al., *Quantum Machine Intelligence*, **2**, 11 (2020).
[4] T. Yamagami et al., *Entropy*, **25**(6), 843 (2023).
[5] H. Robbins, *Bulletin of the American Mathematical Society*, **58**, pp. 527–535 (1952).
[6] T. Zhang et al., In *Proceedings of 57th Annual IEEE Conference on Information Sciences and Systems (CISS 2023)*, pp. 1–6 (2023).
[7] M. Szegedy, In *Proceedings of the 45th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS 2004)*, pp. 32–41 (2004).

© 2025年 応用物理学会

THz 帯域全光学式量子テレポーテーションの実現

Realization of THz-bandwidth all-optical quantum teleportation

東大工[1], NTT 先デ研[2], OptQC[3], 理研 RQC[4] ○(D)鈴木 拓海[1], 星 尊也[1], 大木 祥太朗[1], 一李 建嬉[1], 長吉 博成[1], 高橋 一真[1], 柏﨑 貴大[2], 山嶋 大地[2], 井上 飛鳥[2], 梅木 毅伺[2], 川﨑 彬斗[1,3,4], 園山 樹[1,3,4], 高瀬 寛[1,3,4], アサバナント ワリット[1,3,4], 遠藤 護[1,4], 古澤 明[1,3,4]

The Univ. of Tokyo[1], NTT Device Technology Labs[2], OptQC[3], Riken RQC[4]

°Takumi Suzuki[1], Takaya Hoshi[1], Shotaro Oki[1], Konhi Ichii[1], Hironari Nagayoshi[1], Kazuma Takahashi[1], Takahiro Kashiwazaki[2], Taichi Yamashima[2], Asuka Inoue[2], Takeshi Umeki[2], Akito Kawasaki[1,3,4], Tatsuki Sonoyama[1,3,4], Kan Takase[1,3,4], Warit Asavanant[1,3,4], Mamoru Endo[1,4], Akira Furusawa[1,3,4]

E-mail: suzuki@alice.t.u-tokyo.ac.jp

光量子コンピュータは、光の周波数(~200 THz)を活用した超高速量子計算機として期待される[1]が、その計算基盤である量子テレポーテーションには、光電変換により高々 100 MHz 帯域に制限される課題があった。本研究ではこのボトルネックを解消するため、THz 帯域の導波路光パラメトリック増幅器(OPA)を導入した。OPA による光→光の直接増幅を用いて全光学的なフィードフォワード[2]及び量子測定を実現し、従来比 1 万倍の THz 帯域での量子テレポーテーションを実証した。

本研究で構築した全光学式量子テレポーテーションの実験系を図 1 に示す。入力状態として真空状態を用い、その出力状態の直交位相振幅 $(\hat{x}, \hat{p})$ を光スペクトルアナライザ(OSA)で測定することで、テレポーテーション性能を評価した。

まず、量子もつれを用いない古典プロトコルでは、出力信号強度は+4.74 dB(x), +4.58 dB(p)となった(194 ± 0.2~1.0 THz 平均)。次に、EPR 量子もつれをリソースとして用いた量子テレポーテーションを実証した。EPR 状態の不完全性や光学素子へのカップリング損失によりノイズは生じるものの、出力信号を+1.77 dB(x), +1.73 dB(p)に抑制し、忠実度 F=0.80 を達成した。

この結果は古典的手法では到達不可能な領域にあり、古典限界を超える量子情報転送が実現できたことを明確に示している。さらに、この性能はキャリア周波数周りの 2 THz(片側 1 THz)もの広帯域で達成されており、従来比約 1 万倍の広帯域化に相当する。本成果は THz 帯域全光学式量子テレポーテーションの成功を実証するもので、THz クロック光量子コンピュータの実現に向けた大きな一歩となる。

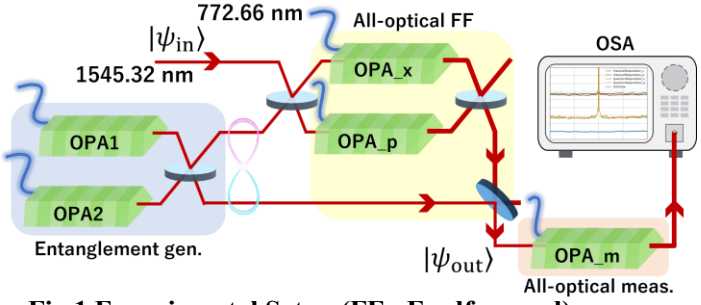


Fig.1 Experimental Setup (FF : Feedforward)

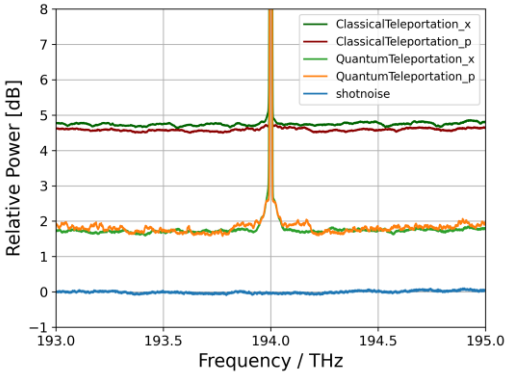


Fig.2 Optical Spectra of output signals.

[1] S. Takeda et al., APL Photonics, 4 (6): 060902(2019).
[2] T. C. Ralph, Optics letters 24, 348-350 (1999).

© 2025年 応用物理学会

量子テレポーテーションを用いた 低ロス高繰り返し光スイッチングの実現Ⅳ

Research on Low-Loss High-Repetition-Rate Optical Switching with Quantum Teleportation IV

東大工[1]，理研 RQC[2]，OptQC[3]，パリ高等師範学校[4]，デンマーク工科大[5]，NTT 先デ研[6]

○(D)井出 竜鳳[1]，川﨑 彬斗[1,2,3]，鈴木 拓海[1]，中島 将貴[1]，園山 樹[1,2,3]，星 尊也[1]，ブルネル エクター[1,4]，ラースン ベンヤミーン ロングレーン[5]，柏﨑 貴大[6]，山嶋 大地[6]，井上 飛鳥[6]，梅木 毅伺[6]，阪口 淳史[2]，高瀬 寛[1,2,3]，遠藤 護[1,2]，アサバナント ワリット[1,2,3]，古澤 明[1,2,3]

Univ. of Tokyo[1], Riken RQC[2], OptQC[3], ENS[4], DTU[5], NTT Device Technology Labs[6],

°Ryuhoh Ide[1], Akito Kawasaki[1,2,3], Takumi Suzuki[1], Katsuki Nakashima[1], Tatsuki Sonoyama[1,2,3], Takaya Hoshi[1], Hector Brunel[1,4], Benjamin Lundgren Larsen[5], Takahiro Kashiwazaki[6], Taichi Yamashima[6], Asuka Inoue[6], Takeshi Umeki[6], Atsushi Sakaguchi[2], Kan Takase[1,2,3], Mamoru Endo[1,2], Warit Asavanant[1,2,3], Akira Furusawa[1,2,3]

E-mail: ide@alice.t.u-tokyo.ac.jp

実用的な光量子計算に向けたボトルネックの一つが、量子光路を高い繰り返し周波数で切り替える（スイッチングする）低損失なデバイスである。我々は、従来の測定誘起型量子計算のスキームを拡張し、量子テレポーテーションベースの新しいスイッチング技術を理論提案した[1]。

この実証実験として、出力を入力状態と補助状態とで時間的に切り替える量子テレポーテーション実験を行った。実験系を Fig.1 に示す[2]。入力状態には、量子計算のリソースであるスクイーズド状態を用いた。外部信号をトリガーとして測定方法（基底）とフィードフォワード（FF）ゲインを動的に変更することで、選択的な量子テレポーテーションを行った。

実験結果を Fig.2 に示す。基底と FF ゲインの切り替え間隔は 5.3 μs とした。これは繰り返し周波数が約 190 kHz のスイッチング操作に相当する。本実験では、入力状態と補助状態の分散の圧搾方向が位相平面上で直交するように設定し、それらが選択的にテレポートされていることが確認された。特に、テレポートされた入力状態の分散は、真空場ノイズに対して -0.4 dB と 5.5 dB で、古典限界を下回ることができた。今後、実用量子計算への応用を踏まえ、入力状態を非ガウス型状態（Schrödinger の猫状態）として同様の実験を行う[3]。

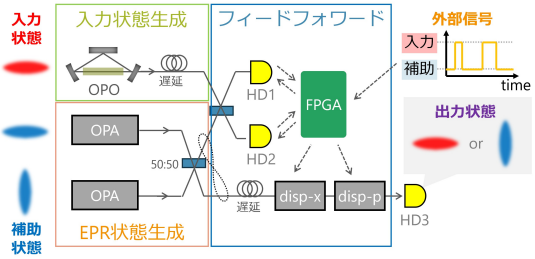


Fig. 1: The experimental setup.

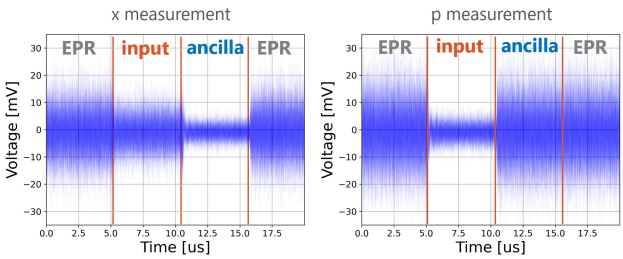


Fig. 2: The measurement results.

[1] W. Asavanant et al., Phys. Rev. A 107, 032412 (2023). [2] 井出他，第 83 回応用物理学会秋季学術講演会，20p-A404-10. [3] 中島他，第 85 回応用物理学会秋季学術講演会，19p-A32-6.

© 2025年 応用物理学会

25 GHz クロック光量子プロセッサへ向けた 1 次元クラスタ状態の生成

Toward a 25 GHz Clock Optical Quantum Processor: Generation of One-Dimensional Cluster States

東大工 [1]，理研 RQC[2]，OptQC 株式会社 [3]，NTT 先デ研 [4]，○(M2)星尊也 [1]，一李建嬉 [1]，
林度勲 [1]，鈴木拓海 [1]，川崎彬斗 [1,2,3]，井出竜鳳 [1]，阪口淳史 [2]，横山翔竜 [2]，柏崎貴大 [4]，山嶋大地 [4]，井上飛鳥 [4]，
梅木毅伺 [4]，アサバナントワリット [1,2,3]，遠藤護 [1,2]，古澤明 [1,2,3]

The Univ. of Tokyo [1], Riken RQC [2], OptQC Corp. [3], NTT Device Technology Labs [4], ○(M2)Takaya Hoshi[1], Konhi Ichii[1], Dohoon Lim[1], Takumi Suzuki[1], Akito Kawasaki[1,2,3], Ryuhoh Ide[1], Atsushi Sakaguchi[2], Shota Yokoyama[2], Takahiro Kashiwazaki[4], Taichi Yamashima[4], Asuka Inoue[4], Takeshi Umeki[4], Warit Asavanant[1,2,3], Mamoru Endo[1,2,3], Akira Furusawa[1,2,3]

E-mail: hoshi@alice.t.u-tokyo.ac.jp

連続量光量子計算を実装する手法として、クラスタ状態をリソースとした複数ステップの量子テレポーテーションプロトコルが知られている[1,2]。特に、時間領域多重方式を用いたクラスタ状態をプロセッサとする光量子計算は、大規模性の点で優位である。加えて、数百 THz にも及ぶ光の高いキャリア周波数により数 THz クロックの量子情報処理も期待できるため、大規模性と高速性の両立に向けて有望なアーキテクチャであるといえる。しかしながら、大規模なクラスタ状態の生成は実証されている一方で、先行研究ではスクイーズド状態の生成やホモダイン測定の帯域により、クラスタ状態中の計算を担う量子モードの波束の時間幅が数十 ns に制限されている[2,3,4,5]。この影響で、既存の実機のクロックも 100 MHz であり[6]、さらなる高速化に向けた課題が残されている。

本実験では、計算に用いる量子モードの波束時間幅が約 40 ps のクラスタ状態の生成・実時間検証を行った(Fig1.(b))。今回実証したクラスタ状態(Fig1.(a))の生成条件はナリファイヤのスクイージングレベルが-3 dB を下回ることであり[7]、2.5 万以上の量子モードにわたって生成に成功したことが言える(Fig1.(c))。本実験では、先行研究比で 1000 倍近く光量子プロセッサの高速化に成功した。この成果は、高速かつ大規模な光量子計算の実現に向けた基盤技術の確立に貢献する。

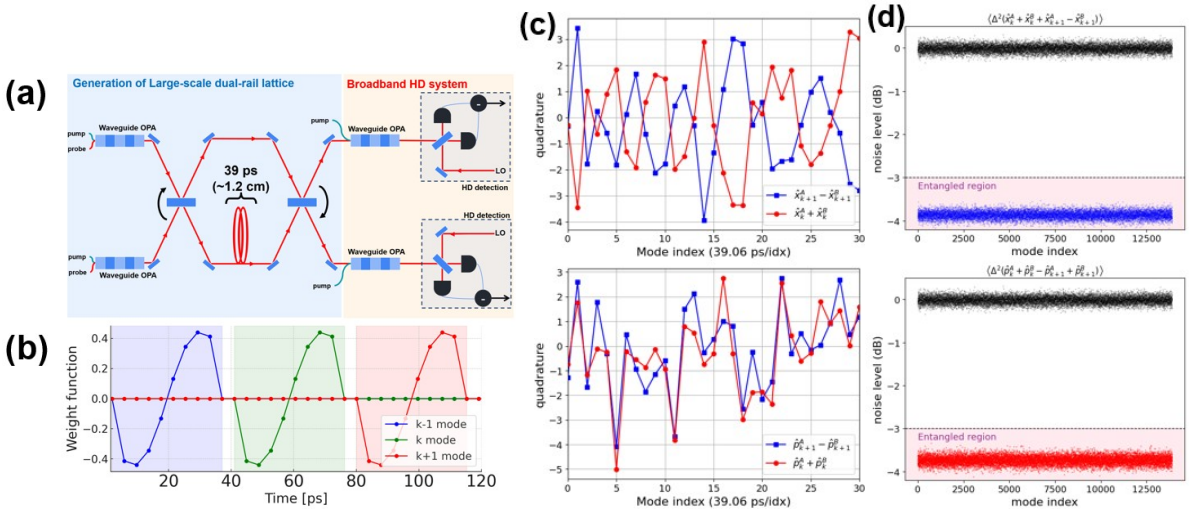


Fig 1. (a) Schematic diagram; (b) Mode functions for three adjacent qumodes;

(c) Specific quadrature values of the qumodes; (d) Nullifier levels (x: –3.86(9) dB, p: –3.73(9) dB)

[1] R. Ukai et al., Phys. Rev. A 81, 032315 (2010). [2] S. Yokoyama et al., Nat. Photonics 7, 982–986 (2013). [3] J. Yoshikawa et al., APL Photonics 1, 060801 (2016). [4] W. Asavanant et al., Science 366, 373–376 (2019). [5] W. Asavanant et al., Phys. Rev. Appl. 16, 034005 (2021). [6] S. Yokoyama et al., in preparation [7] P. van Loock and A. Furusawa, Phys. Rev. A 67, 052315 (2003).

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation：3.10 Photonic structures and phenomena

[8a-P03-1~2] 3.10 Photonic structures and phenomena

[8a-P03-1]

Polarization Properties of a Hinge State in Semiconductor Woodpile Photonic Crystals

○Shintaro Kawabata[1], Hikaru Murata[1], Kenichi Yamashita[1], Huyen Phan[2], Katsunori Wakabayashi[2], Yasuhiko Arakawa[3], Satoshi Iwamoto[4,5], Shun Takahashi[1] (1.Kyoto Inst. Tech., 2.Kwansei Gakuin Univ., 3.INQIE, 4.RCAST, 5.IIS)

[8a-P03-2]

Electromagnetic Interaction in Split-Ring Resonator Bilayer Structures

○Ken Terazawa[1], Kazuyuki Kuzumoto[1], Sota Miyasaka[1], Yuichi Hasegawa[1], Rinka Nakao[1], Ken-ichi Matsuda[1] (1.Nihon Univ.)

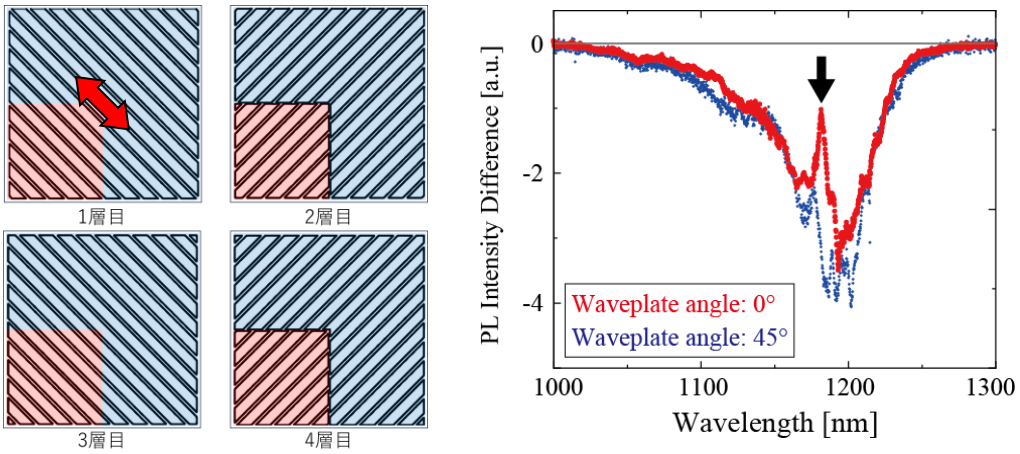
半導体 Woodpile フォトニック結晶におけるヒンジ状態の偏光特性

Polarization Properties of a Hinge State in Semiconductor Woodpile Photonic Crystals

京工繊大電子 [1]，関学大理工 [2]，東大ナノ量子機構 [3]，東大先端研 [4]，東大生研 [5]
○川端 晋太郎 [1]，村田 光 [1]，山下 兼一 [1]，Huyen Thanh Phan[2]，
若林 克法 [2]，荒川 泰彦 [3]，岩本 敏 [4, 5]，高橋 駿 [1]
Kyoto Inst. Tech.[1], Kwansei Gakuin Univ.[2], INQIE[3], RCAST[4], IIS[5], The Univ. of Tokyo
○Shintaro Kawabata[1], Hikaru Murata[1], Kenichi Yamashita[1], Huyen Thanh Phan[2],
Katsunori Wakabayashi[2], Yasuhiko Arakawa[3], Satoshi Iwamoto[4, 5], and Shun Takahashi[1]
E-mail: m4621010@edu.kit.ac.jp

三次元集積フォトニクスの実現に向けて、完全フォトニックバンドギャップを有する三次元フォトニック結晶を用いた導波路[1]や導波路・ナノ共振器レーザの複合光回路[2]が報告されてきた。しかし、これらの導波路では急峻な曲げや作製誤差による後方散乱が生じ得るため、トポロジカルフォトニクス[3]による散乱の抑制が検討されてきた。そこで我々は、三次元系における一次元的なトポロジカル境界状態として、高次トポロジカル状態であるヒンジ状態を近赤外領域で観測してきた[4]。本研究では、量子ドット活性層の位置が異なる複数の三次元フォトニック結晶を作製し、そのヒンジ状態の再現性や偏光特性、局所性を観測することを目的とした。

試料は、図 1 に示す 4 種類のパターンを有する GaAs 薄膜を、マイクロマニピュレーション法によって高精度に積層した Woodpile 型フォトニック結晶である。Woodpile 構造の一部を面内方向に半周期シフトすることで、面内方向のトポロジカル不変量（Winding Number）が変化し、境界の交点（試料中央部）においてヒンジ状態が形成される[5]。構造内部に埋め込んだ高密度 InAs 量子ドットに対して低温顕微フォトルミネッセンス測定を行ったところ、波長 1180 nm においてヒンジ状態に起因する強度ピークを得た。このピークは、半波長板の 45° の回転に対して消失し、図 1 に示した直線偏光に偏極していることが判明した。これは、数値計算における偏光状態と一致した。その他、ヒンジ状態の局所性や活性層の位置依存性などは当日報告する。



Figs. (a) Schematic diagrams of the 4 layers constructing the woodpile photonic crystal. The linear polarization of the hinge state is indicated by a red arrow. (b) Subtracted photoluminescence spectra for different angles of a half waveplate.

謝辞: 本研究は JST-CREST, JPMJCR19T1 および JST-FOREST, JPMJFR223Q により遂行された。
参考文献: [1] K. Ishizaki, *et al.*, Nat. Photon. **7**, 133 (2013), [2] T. Tajiri, *et al.*, Optica **6**, 296 (2019), [3] T. Ozawa, *et al.*, Rev. Mod. Phys. **91**, 015006 (2019), [4] 川端晋太郎ほか，日本物理学会 第 79 回年次大会, 18aE312-10 (2024), [5] H. T. Phan, *et al.*, Phys. Rev. B **110**, 235429 (2024).

© 2025年 応用物理学会

分割リング共振器二層構造における電磁相互作用の評価と層間距離依存性

Electromagnetic Interaction in Split-Ring Resonator Bilayer Structures

日大理工[1]，○(M2) 寺澤 謙[1]，葛本 和之[1]，宮坂 壮太[1]，長谷川 雄一[1]，中尾 琳花[1]，松田 健一[1]
Nihon Univ.[1], ○(M2)K. Terazawa[1], K. Kuzumoto[1], S. Miyasaka[1], Y. Hasegawa[1], R. Nakao[1], K. -i. Matsuda[1]
E-mail: matsuda.kenichi@nihon-u.ac.jp

【研究背景と目的】分割リング共振器（Split-ring resonator: SRR）はよく知られた電磁波共振器であり，従前より電磁メタマテリアルの構成要素のひとつとして用いられてきた．近年，この SRR を高密度に多数配列したものは，メタサーフェスや各種センサーへの応用が期待されている．SRR は固有の共振周波数を持つが，それらが空間的に近接して配置された場合，SRR 間の電磁相互作用を起源とした共振周波数の分裂現象が観測されている [1,2]．近年，この電磁相互作用の解明が進められているが，これまでのところその詳細はまだ明らかになっていない．そこで，本研究では，SRR の二層構造を作製し，その層間距離 d を変化させながら電磁波反射 (S_{11}）スペクトルを測定し，電磁相互作用の大きさとその距離依存性を明らかにすることを試みた．

【実験方法】本研究では，一辺の長さが 7.0 mm，線幅 0.5 mm の正方形環状構造を採用し，その二か所にギャップを設けてバラクタダイオード (Skyworks, SMV-1234-079LF) を挿入した．これは共振周波数変調型の SRR としてよく知られている [3]．本研究ではさらに SRR に対するバイアス回路を接続し，バイアス電流 I_b によって共振周波数を制御できるようにした．共振周波数とバイアス電流の関係がほぼ同等の SRR を二つ（それぞれ #1，#2 と称す）用意し，それらを二層構造にして電磁波反射スペクトル (S_{11}) を測定した．

【結果と考察】Fig. 1 に，二層 SRR の S_{11} スペクトルから得られた共振周波数とそのバイアス電流依存性を示す．ここで，○は層間距離 d = 2.0 mm，△は d = 3.5 mm のデータである．図中の点線は，電磁相互作用が無いと仮定した場合の#1 と#2 の共振周波数位置だが，二層構造においては，実験の範囲ですべて共振周波数の分裂現象を観測した．分裂幅の程度は，d = 2.0 mm のほうが大きく，3.5 mm にすると，電磁相互作用が弱まるため，個々の共振周波数に漸近することがわかった．このデータを，電磁相互作用する調和振動子モデル [2] によって解析すると，図中の破線，一点鎖線のように実験結果とよく一致するパラメータを得ることができた．発表では，解析から得られた電磁相互作用パラメータの層間距離に対する依存性についても議論する．

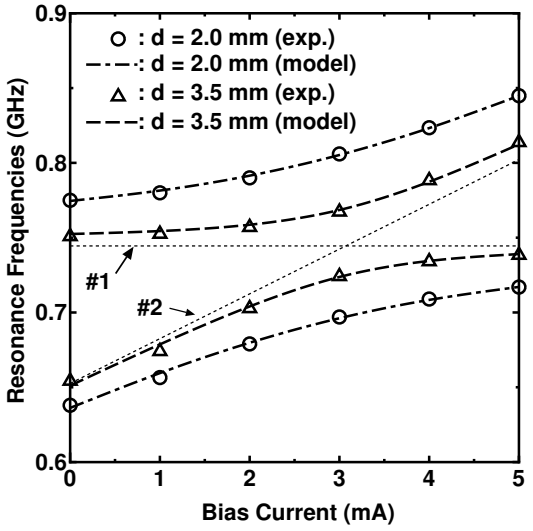


Fig. 1: Resonance frequencies at d = 2.0 mm (○), and that of 3.5 mm (△). The dashed and dash-dotted lines represent the theoretical curves for each case, respectively.

[1] M. Baraclough, et al., Phys. Rev. **B 98**, 085146 (2018)
[2] D. A. Powell, et al., Phys. Rev. **B 82**, 155128 (2010)
[3] I. V. Shadrivov, et al., Opt. Express, **14**, 9344 (2006)

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.10 Photonic structures and phenomena

[8p-N221-1~13] 3.10 Photonic structures and phenomena

[8p-N221-1]

Investigation of a quantum-dot single photon source based on a two-dimensional photonic crystal nanocavity and coupled crossover waveguides

○Akinari Fujita[1], Hironobu Yoshimi[1], Takahiro Ito[1], Shuma Ito[1], Pholsen Natthajuks[2,3], Satoshi Iwamoto[2,3], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Uiv., 2.RCAST, 3.IIS)

[8p-N221-2]

Design of a SiN Bull's-Eye Structure on Diamond for Light Extraction from NV Center

○(M1)ZIYI CHEN[1], Sangmin Ji[2], Natthajuks Pholsen[2], Satoshi Iwamoto[1,2] (1.RCAST Univ. Tokyo, 2.IIS Univ. Tokyo)

[8p-N221-3]

Development of PCSEL array modules for metal 3D printing applications (III)

○Yutaka Fukada[1,2], Masahiro Yoshida[1], Shumpei Katsuno[3], Kenji Ishizaki[1], Menaka De Zoysa[1], Takuya Inoue[1], Ryotaro Hattori[2], Yoko Hirono[2], Susumu Noda[1,3] (1.Kyoto Univ., 2.DMG MORI, 3.KUIAS)

[8p-N221-4]

CW operation of PCSELs with multijunction active layers

○Shumpei Katsuno[1], Masahiro Yoshida[2], Tomoyuki Kawase[2], Takuya Inoue[2], Menaka De Zoysa[2], Kotaro Okuda[2], Kenji Ishizaki[2], Susumu Noda[1,2] (1.KUIAS, 2.Kyoto Univ.)

[8p-N221-5]

Design and Fabrication of a Tunable Diamond Photonic-Crystal Nanobeam Cavity with ITO Electrodes Integrated by Transfer Printing

○(P)Natthajuks Pholsen[1], Ziyi Chen[2], Hidetsugu Matsukiyo[1], Satomi Ishida[2], Hideo Otsuki[1], Masao Nishioka[1], Sangmin Ji[1], Teruya Ishihara[1], Akinari Fujita[3], Kenji Ikeda[4], Nobukiyo Kobayashi[4], Yasutomo Ota[3], Satoshi Iwamoto[1,2] (1.IIS, UTokyo, 2.RCAST, UTokyo, 3.Keio Univ., 4.DENJIKEN)

[8p-N221-6]

Optimization of Diamond Optomechanical Cavity for Quantum Information Interface

○Masaki Kunii[1], Keisuke Hirotani[1], Toshihiko Baba[1] (1.Yokohama Nat Univ)

[8p-N221-7]

Initial characterization of continuous-wave operation of a 10-mm-diameter PCSEL

○Masahiro Yoshida[1], Kotaro Okuda[1], Shumpei Katsuno[2], Takuya Inoue[1], Menaka De Zoysa[1], Kenji Ishizaki[1], Susumu Noda[1,2] (1.Kyoto Univ., 2.KUIAS)

[8p-N221-8]

Mid-infrared perfect absorbers using crystalline Si metasurface with SiO_2 by degenerate critical coupling

○Masato Kashiwabara[1], Junichi Takahara[1,2] (1.Osaka univ., 2.Photonics Ctr.)

[8p-N221-9]

Study on vibrational strong coupling between two-dimensional photonic crystal broad area resonance and water molecular

○(M1)Ryogo Okayama[1], Ryohei Morita[1], Kyoko Kitamura[1] (1.Tohoku Univ.)

[8p-N221-10]

Proposal of ultra-compact high-power short-pulse laser integrating photonic-crystal laser and solid-state gain media

○(M2)Shota Koga[1], Takuya Inoue[1], Menaka De Zoysa[1], Masahiro Yoshida[1], Kenji Ishizaki[1], Akifumi Yogo[2], Noriaki Miyanaga[2], Takunori Taira[3], Yoshihito Hirano[4], Susumu Noda[1,5] (1.Kyoto Univ., 2.Osaka Univ., 3.IMS, 4.HyTILA Co., 5.KUIAS)

[8p-N221-11]

Visualization of Optical Pathways in Distroted Photonic Crystals

Ayano Onishi[1,2], Yushin Karasawa[2], Kenichi Yamashita[2], ○Kyoko Kitamura[1,2] (1.TOHOKU Univ., 2.Kyoto Inst. Tech.)

[8p-N221-12]

Slow-light modes in photonic graphene ribbon structures

○(D)Chengkun Zhang[1,2], Natsuko Ishida[1], Satoshi Iwamoto[1,2] (1.RCAST, 2.IIS)

[8p-N221-13]

Investigation of Current Injection Distribution Control of GaN-Based PCSELs

○Masahiro Jutori[1], Atsushi Kitamura[1], Tomoaki Koizumi[2,1], Kei Emoto[2,1], Menaka De zoysa[1], Tomoki Masuyama[2,1], Takuya Inoue[1], Kenji Ishizaki[1], Masahiro Yoshida[1], Shumpei Katsuno[3], Susumu Noda[1,3] (1.Kyoto Univ., 2.Stanley Electric, 3.KUIAS)

結合交差導波路と二次元フォトニック結晶ナノ共振器に基づく量子ドット単一光子源の検討

Investigation of a quantum-dot single photon source based on a two-dimensional photonic crystal nanocavity and coupled crossover waveguides

[1] 慶應大，[2] 東大先端研，[3] 東大生研

○藤田 晃成[1]，吉見 拓展[1]，伊藤 貴裕[1]，伊藤 秀真[1]，N. Pholsen[2,3]，岩本 敏[2,3]，太田 泰友[1]

[1]Keio Univ., [2]RCAST, [3]IIS, The Univ. of Tokyo

○A. Fujita[1], H. Yoshimi[1], T. Ito[1], S. Ito[1], N. Pholsen[2,3], S. Iwamoto[2,3], and Y. Ota[1]

E-mail: fujitaakinari@keio.jp

スケーラブルな光量子情報処理の実現に向けて、低損失な Si 光集積回路上へ決定論動作可能な量子光源を集積するアプローチが注目されている。これまでに我々は、量子ドット(QD)を内包した二次元フォトニック結晶(PhC)ナノ共振器を Si 導波路直上に転写プリント集積し、導波路結合型 QD 単一光子源を実証してきた[1]。しかし、同構造では集積時に PhC ナノ共振器と Si 導波路間の精密な位置合わせが求められる。一方近年、面内位置ずれに対しロバストな光学結合手法として結合交差導波路が注目を集めている[2-4]。今回、二次元 GaAs-PhC ナノ共振器に基づく QD 単一光子源を結合交差導波路を介して Si 導波路へ接続したハイブリッド集積構造について検討を行ったので報告する。

検討した構造を図 1(a)に示す。GaAs-PhC スラブ中のマルチステップヘテロ共振器中央に InAs QD (波長 940 nm)が配置されており、その発光は共振器を介して W1 導波路に結合し、その後 GaAs 細線導波路へと接続される。最後に、GaAs 細線導波路中の QD 発光は立体交差部分を通じて Si 導波路へと結合する。設計ではまず、ガラス上で高 Q ナノ共振器を設計し適切な距離をとって W1 導波路と結合させた。結果、99.6%の効率で導波路結合することが分かった（図 1(b)、結合後 Q は 1,200）。W1－GaAs 細線導波路間の結合においては、接続部の穴を調整することで約 90%の透過効率を得た。また、GaAs 細線導波路と Si 導波路の結合交差導波路については、交差角度 11 度で最大の結合効率 96.4%が見積もられた(図 1(c))。結果、QD 発光と Si 導波路間の結合効率は約 83%と見積もられた。今後各部を最適化することで、結合効率の向上が見込まれる。詳細は当日報告する。

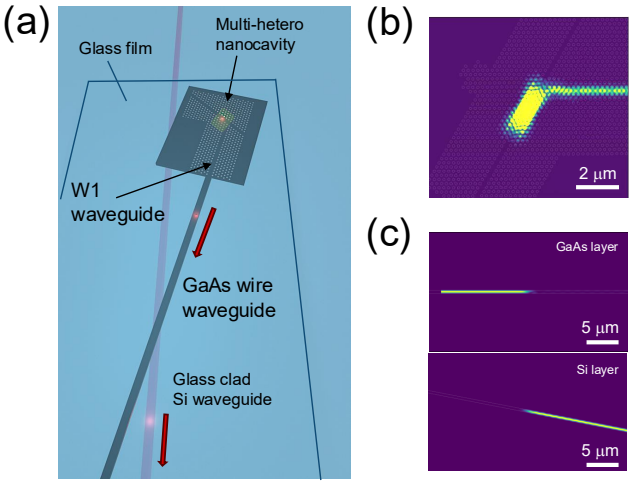


Fig. 1 (a) Schematics of the investigated structure. (b) Electric field intensity distribution showing the coupling between the nanocavity and the W1 waveguide. (c) Field distributions showing light transfer from (top) the GaAs to (bottom) the Si wire waveguide via the coupled crossover structure.

参考文献 [1] 藤田他，第 85 回応物秋季講演会，19p-P01-2 (2024). [2] S. Bandyopadhyay and D. Englund, arXiv:2110.12851 (2021). [3] K. Takada *et al.*, Opt. Express **33**, 22769 (2025). [4] 宇井他，第 85 回応物秋季講演会，17p-A34-5 (2024).**謝辞** 本研究は科研費(22H01994, 22H00298, 22H04962)、JST 創発(JPMJFR213F)および次世代研究者挑戦的研究プログラム（JPMJSP2123）によって遂行された。

© 2025年 応用物理学会

Design of a SiN Bull's-Eye Structure on Diamond for Light Extraction from NV Center

RCAST Univ. Tokyo[1], IIS Univ. Tokyo[2],
°Ziyi Chen[1], Sangmin Ji[2], Natthajuks Pholsen[2], and Satoshi Iwamoto[1, 2]
E-mail: czy@iis.u-tokyo.ac.jp

Nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond are promising candidates for quantum optical technologies [1–2]. For applications such as quantum communication and networked quantum systems, achieving high photon extraction efficiency from individual NV centers is crucial. However, when embedded in bulk diamond, the efficiency is limited by total internal reflection at the diamond–air interface. To address this limitation, photonic nanostructures such as solid immersion lenses [3] and nanowires [4], fabricated on the diamond surface, have been investigated. However, nanostructuring diamond remains a significant challenge. Alternatively, heterogenous integration techniques allow the use of more advanced photonic nanostructures for this purpose. For instance, a SiN circular grating placed on bulk diamond can be applicable [5]. In this work, we designed a SiN bull's-eye structure that enhances photon extraction efficiency by a factor of 2.64 compared to bulk diamond, and by 1.6 compared to a simple circular grating.

Figure 1(a) shows the schematic of our structure. The structure consists of a center disk with diameter d, surrounding by a circular grating. The grating period, SiN width, and SiN thickness are A = 800 nm, w = 480 nm, and h = 200 nm, respectively. An NV center is modeled as a x-direction dipole with center wavelength of 637 nm at 900 nm below the diamond surface. Using the three-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) method, we calculated the photon extraction efficiency, defined as the fraction of the total radiation power emitted by a dipole that propagates through the upper plane (indicated by the yellow line in Fig. 1(b)), both with and without the SiN structure. The enhancement factor, calculated as the ratio of the extraction efficiency with the structure to that without it, is shown in Fig. 1(c) as a function of the normalized disk diameter d/A. At d/A=1.625, the largest enhancement of 2.64 is obtained, which is also 1.6 times as large as a simple circular grating's case (red point in Fig. 1 (c)).

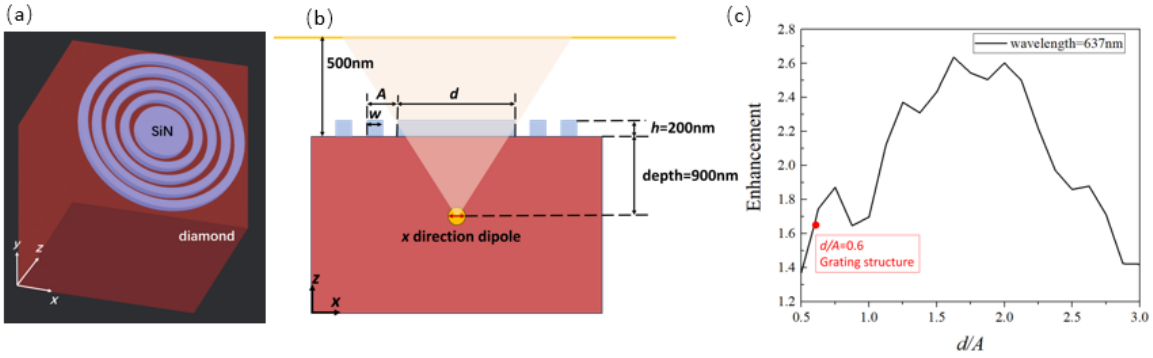


Fig. 1 (a) Schematic of the structure. (b) Cross-section schematic of the structure. The red region represents diamond and the blue region represents SiN. (c) Enhancement at different normalized diameters of the center disk (d/A). The structure becomes a simple circular grating when d/A = 0.6. The red point shows the corresponding result.

Acknowledgement This work is supported by KAKENHI (22H04962) and JST Moonshot R&D (JPMJMS2062).

References [1] S. Pezzagna *et al.,* Appl. Phys. Rev. **8**, 011308 (2021). [2] Á. Gali *et al.,* Nanophotonics, **8**, 1907-1943 (2019). [3] J. P. Hadden *et al.,* Appl. Phys. Lett. **97**, 241901 (2010) [4] T. Babinec *et al.,* Nature Nanotech **5**, 195–199 (2010). [5] R. Katsumi *et al.,* Appl. Phys. Lett. **121**, 161103 (2022).

© 2025年 応用物理学会

金属 3D プリンタ応用に向けた フォトニック結晶レーザーアレイモジュールの開発 (III)

Development of PCSEL array modules for metal 3D printing applications (III)

京大院工[1]，DMG 森精機[2]，京大高等研究院[3]，○深田 豊[1,2]，吉田 昌宏[1]，勝野 峻平[3]，石崎賢司[1]，De Zoysa Menaka[1]，井上 卓也[1]，服部 綾太郎[2]，廣野 陽子[2]，野田 進[1,3]
Kyoto Univ.[1], DMG MORI[2], KUIAS[3], °Y. Fukada[1,2], M. Yoshida[1], S. Katsuno[3], K. Ishizaki[1], M. De Zoysa[1], T. Inoue[1], R. Hattori[2], Y. Hirono[2], and S. Noda[1,3]
E-mail: fukada.yutaka.52a@st.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー（PCSEL）は，2 次元フォトニック結晶の特異点（Γ 点等）における共振効果を利用した面発光型半導体レーザーである [1]．これまで，直径 3mmΦPCSEL により，連続（CW）駆動において，50W 級動作に成功している [2]．我々は，このような高出力 PCSEL の応用の1つとして，産業用金属 3D プリンタに向けた検討を進めている．小型かつ高出力・高ビーム品質な PCSEL を用いることで，加工ヘッドへの光源直接搭載や光学部品点数の削減が可能となり，システムの小型化やファイバケーブルの損傷リスクの回避等が期待出来る．さらに，PCSEL の特長を活かした高機能化も期待出来る．産業用金属 3D プリンタでは，数 100W~数 kW 級の光出力レベルの実現が望まれるため，現在，3mmΦPCSEL のアレイモジュール開発を進めており，これまで 3mmΦPCSEL を，4 素子，さらに 9 素子アレイ化したモジュールユニットを開発し， CW 光出力 200~400W の実現に成功している [3]．今回，上述のようなユニットを，さらにアレイ化することによる光出力増大を目指した検討を行ったので報告する．

[実験] 今回，複数のアレイモジュールを作製するにあたり，3 インチ GaAs ウエハを用いたプロセス開発に取り組み，多数の 3mmΦPCSEL を一括して作製（＞104 素子/ウエハ）を可能とした．またこの際，ウエハ内でフォトニック結晶の結合係数を系統的に変化させた素子を作製し，これらの中から初期評価のうえ，アレイ実装する素子を選定した．このようにして作製・実装した 9 素子アレイモジュール×4 ユニット（合計 36 素子）の外観を図 1 に示す．続いて，本アレイモジュール群の CW 駆動における電流-光出力特性を図 2 に示す．上述の通り，本試作では予め設計の異なる素子を用いてモジュールを構成しているため，ユニットごとに光出力や最大出力が得られる電流値が異なる．そのため，モジュール群として最大の光出力が得られるように，アレイユニット毎に，注入する電流値を変化させて駆動する．（ただし，今回は，アレイユニット 1~3 は共通の電流値で駆動した．）同図より，モジュール群合計で~1kW の高い CW 光出力を得ることに成功した．今後，本試作結果をもとにした設計の絞り込みや，1 素子当たりの光出力・効率の向上などによって，より少数のアレイや低い駆動電流で，さらに高い光出力（＞数 kW）の実現も期待出来る．詳細は当日報告する．**[謝辞]** 本研究の一部は，科研費特別推進研究（22H04915）の支援を受けた．

[文献] 1) S. Noda, *et al.*, AOP. **15,** 977-1032 (2023). 2) M. Yoshida, *et al.*, Nature **618,** 727-732 (2023). 3) M. Yoshida, *et al.*, ISLC2024, ME5 (2024).

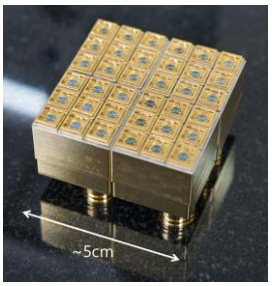


図 1. 9 アレイモジュール ×4 ユニットの外観．

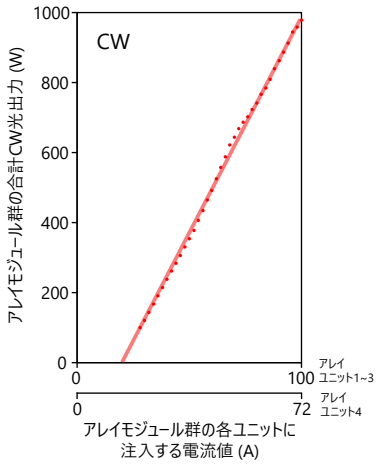


図 2. アレイモジュール群の CW 駆動における電流-光出力特性．

複数接合活性層を有するフォトニック結晶レーザーの CW 動作

CW operation of PCSELs with multijunction active layers

京大高等研究院[1]，京大院工[2]，○勝野 峻平[1]，吉田 昌宏[2]，川瀬 智之[2]，井上 卓也[2]，
De Zoysa Menaka[2]，奥田 功太郎[2]，石﨑 賢司[2]，野田 進[1,2]
KUIAS[1], Kyoto Univ.[2], °S. Katsuno[1], M. Yoshida[2], T. Kawase[2], T. Inoue[2],
M. De Zoysa[2], K. Okuda[2], K. Ishizaki[2], and S. Noda[1,2]
E-mail: s.katsuno@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー（PCSEL）は，活性層近傍に設けた 2 次元フォトニック結晶の特異点（Γ 点等）における共振効果を利用した面発光型半導体レーザーである [1]．PCSEL は大面積コヒーレント発振による高輝度動作が可能であり [2]，さらに，2 次元ビーム走査や任意のビーム形状の生成，短パルス高ピーク出力動作などの高機能性 [3]をも有することから，LiDAR センシングやレーザー加工をはじめとした幅広い応用展開が期待されている．これらの様々な応用において，PCSEL のスロープ効率の向上は，光出力の増大や駆動電流の低減に繋がるため極めて重要である．そのための手法として，我々はこれまでに，PCSEL への複数接合活性層（＝トンネル層を介して接合した複数の活性層）の導入の検討を進めており，2 接合活性層を導入したデバイスにより，パルス駆動において単一活性層デバイスの約 2 倍のスロープ効率を実証することに成功している [4]．今回，CW 駆動において，2 接合活性層導入効果を検討したので報告する．

[設計・作製] 図 1(a)に 2 接合活性層を導入した PCSEL の模式図を示す．トンネル層（p^{++}/n^{++}）を介して 2 つの活性層が積層されており，電極から注入される 1 組の電子正孔対に対して複数の光子が放出されるため，スロープ効率の増大が可能である．また，層構造を適切に設計することにより（図 1(b)左），デバイス垂直方向のモードのうち 1 次垂直横モードにおいて，トンネル層に節が位置し，活性層及びフォトニック結晶層に腹が位置する電界強度分布を形成可能である（図 1(b)右）．これにより，高ドープのトンネル層における吸収損失を避けつつ，レーザー発振が可能となる．以上の設計に基づき，2 接合活性層を導入した共振領域直径 3 mm の PCSEL を作製した．図 2 に CW 動作のためにサブマウントを介して，冷却パッケージへ実装したデバイスの顕微鏡写真を示す．また，本デバイス内部のフォトニック結晶層には，CW 動作において生じる面内温度分布を補償するための温度補償構造を導入している．

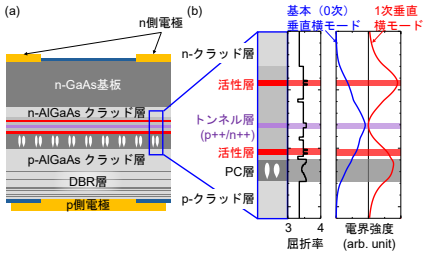


図 1. (a) 2 接合活性層を導入した PCSEL の層構造の模式図と，(b) デバイス垂直方向の屈折率分布及び電界強度分布．

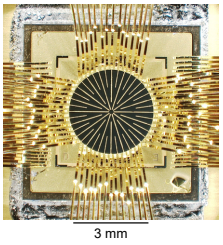


図 2. 冷却パッケージへ実装した直径 3mm PCSEL の顕微鏡写真．

[特性評価] 図 3 に，2 接合活性層デバイスの CW 駆動における電流–光出力特性を，単一活性層デバイスの特性と併せて示す．同図より，2 接合活性層デバイスの CW 発振に成功し，単一活性層デバイスを上回るスロープ効率が得られていることが分かる．また，2 接合活性層デバイスの閾値電流は 20 A 以下と低く抑えられていることが分かる．これらの結果として，単一活性層デバイスでは，CW 光出力 40 W を得るために 80 A を超える電流の注入が必要であったが，2 接合活性層デバイスでは，50 A 程度の注入電流で同等の出力を得ることが可能となった．今後，活性層の積層数やドーピングプロファイルに加え，フォトニック結晶構造の最適化を進めることによって，さらなる高スロープ効率化が期待出来る．詳細は当日報告する．**[謝辞]** 本研究は科研費特別推進(22H04915)，NEDO 委託事業(JPNP22007)の支援を受けた．

[文献] [1] S. Noda, *et al.*, Adv. Opt. Photon. **15**, 977 (2023). [2] M. Yoshida, *et al.*, Nature **618**, 727 (2023). [3] S. Noda, *et al.*, Nat. Rev. Electr. Eng. **1**, 802 (2024). [4] S. Katsuno, *et al.*, Appl. Phys. Express **17**, 122004 (2024).

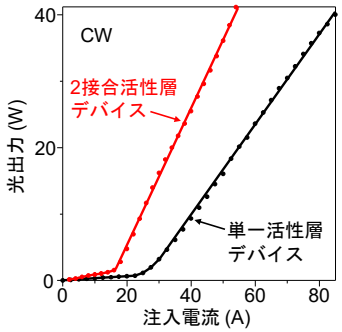


図 3. 2 接合活性層 PCSEL（直径 3mm）の電流–光出力特性（CW 動作）．比較のために単一活性層デバイスの特性も示している．

© 2025年 応用物理学会

Design and Fabrication of a Tunable Diamond Photonic-Crystal Nanobeam Cavity with ITO Electrodes Integrated by Transfer Printing

N. Pholsen[1], Z. Chen[2], H. Matsukiyo[1], S. Ishida[2], H. Otsuki[1], M. Nishioka[1], S. Ji[1], T. Ishihara[1], A. Fujita[3], K. Ikeda[4], N. Kobayashi[4], Y. Ota[3], and S. Iwamoto[1,2]

IIS [1], RCAST [2], The University of Tokyo, Department of Applied Physics and Physico-Informatics, Keio University[3], Research Institute for Electromagnetic Materials[4]

E-mail: besto@iis.u-tokyo.ac.jp

Color centers in diamond have attracted significant interest for their potential in quantum optical technologies as sensors, single-photon sources, and quantum memories[1]. The performance of the color centers can be substantially improved by employing an optical cavity with a small mode-volume, of which the resonance is generally tuned to the emission wavelength of the color center by gas condensation[2]. However, the resonance wavelengths of the cavities often differ even within a single chip due to fabrication imperfections. Local tuning is therefore necessary to deploy several devices but remains challenging[3].

Here, we propose the design and fabrication method of a tunable photonic-crystal (PhC) diamond nanobeam cavity. Considering a period-modulated PhC diamond cavity between a bottom electrode and a top movable electrode made of transparent indium tin oxide (ITO) in the inset of Fig. 1(a), the top electrode will move downwards with an applied bias and cause a change in the refractive index environment that will red-shift the cavity mode. Figure 1(a) shows the resonant wavelengths at different distances between the diamond cavity and the top electrode. For practical fabrication, we consider a structure shown in Fig. 1(b). A diamond nanobeam can be transfer-printed into a slot on SiO_2 with a bottom ITO electrode, and a top ITO/SiO_2 electrode will be transfer-printed on top afterwards[4]. With a sufficiently large slot, the top plate will be bent downwards with an applied bias. Figure 1(c) shows an SEM image of an air-suspended PhC diamond nanobeam ready for transfer printing. More details will be reported at the conference.

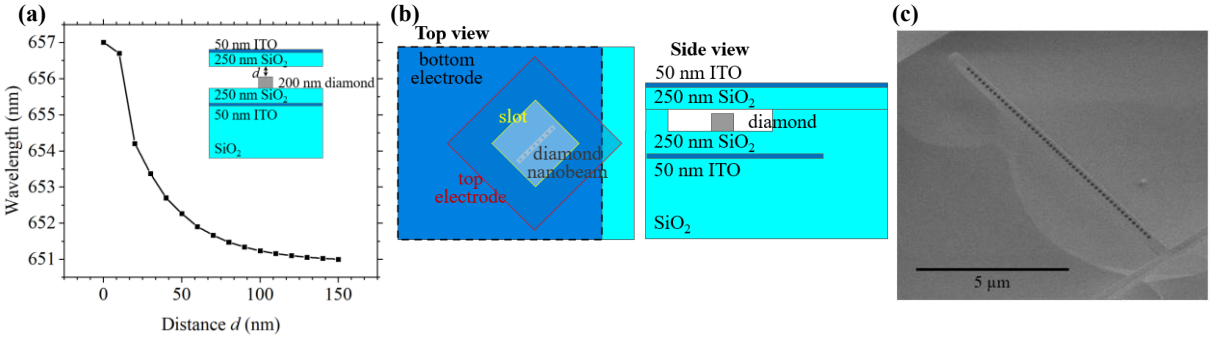


Figure 1 (a) Resonant wavelengths of a diamond nanobeam cavity at different distances between the nanobeam and the top electrode. (b) Schematic of the top and side views of the proposed structure. (c) SEM image of an air-suspended diamond nanobeam.

Acknowledgement This work was supported by KAKENHI (22H00298, 22H04962, 24H00388) and JST Moonshot R&D (JPMJMS2062). The authors thank R. Katsumi and N. Harada for fruitful discussions.

References [1] Shandilya, P. K. *et al. J. Light. Technol.* **40**, 7538–7571 (2022). [2] Sipahigil, A. *et al. Science* **354**, 847–850 (2016). [3] Mouradian, S. L. & Englund, D. *APL Photonics* **2**, 46103 (2017). [4] Pholsen, N. *et al. Opt. Mater. Express* **15**, 290–298 (2025).

© 2025年 応用物理学会

量子情報インターフェースのためのダイヤモンドオプトメカニカル共振器の最適化

Optimization of Diamond Optomechanical Cavity for Quantum Information Interface

横国大院工　○国井昌樹，廣谷圭祐，馬場俊彦
Yokohama Nat'l Univ., ○M. Kunii, K. Hirotani, T. Baba
E-mail: kunii-masaki-br@ynu.jp

誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けて，JST ムーンショットプロジェクト目標 6 において光量子インターフェースを介した量子ノードの並列接続による大規模化が研究されている．本研究では，NV センター量子メモリを含むダイヤモンドオプトメカニカル結晶において、光学的および機械的な高 Q 値と微小モード体積 V を実現することで，パーセル効果によって高効率な光学光子とマイクロ波光子の変換を実現されると期待されている [1,2]．これまで我々は図 1 のような光インターフェースを想定し[3]，搭載されるダイヤモンドオプトメカニカル結晶について，主に光共振モードの設計を行ってきた[4]，今回は機械共振モードも同時に考慮した．また，よく見られるナノビーム 1 次元フォトニック結晶共振器の側壁にも図 2(a)のような半円孔の配列を付加し，パラメータの自由度を高めることで，両方の性能を向上させた．

光共振モードの最適化では Lumerical FDTD と CMA-ES アルゴリズム最適化[5]を用いて高 Q/V の構造を導出し，機械共振モードは COMSOL によって固有値解析を行った．製作条件[6]のギリギリを狙って，ダイヤモンドの厚さは 180 nm，円孔間の最小ギャップは 65 nm とした．図 2(b), (c)はそれぞれ光共振モードと機械共振モードの面内分布である．よく閉じ込められ，両者が重なるモードが得られた．両者の Q 値はそれぞれ 7400 と 108 万，前者の共振波長は 713 nm，後者の共振周波数は 14.2 GHz であり，実際に利用する際は微調整が必要である．

本研究はムーンショットプロジェクトの中で実施されている．

参考文献

[1] M. Diego et al., arXiv:2406.10187v1 (2024).
[2] G. Joe et al., arXiv:2503.0994.6v1 (2025).
[3] 李 ら, 応物春季, 15a-A501-1 (2023).
[4] 廣谷ら, 応物春季 24a-11E-7 (2024).
[5] K. Takahashi, et al., IEEE Photon. J., **14**, 8624505 (2022).
[6] 石田ら, 応物秋季, 17p-A34-1 (2024).

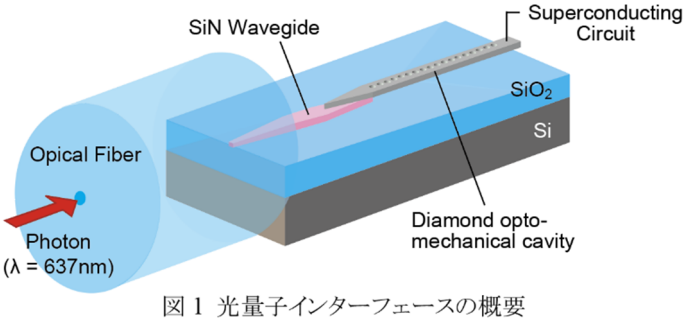


図 1 光量子インターフェースの概要

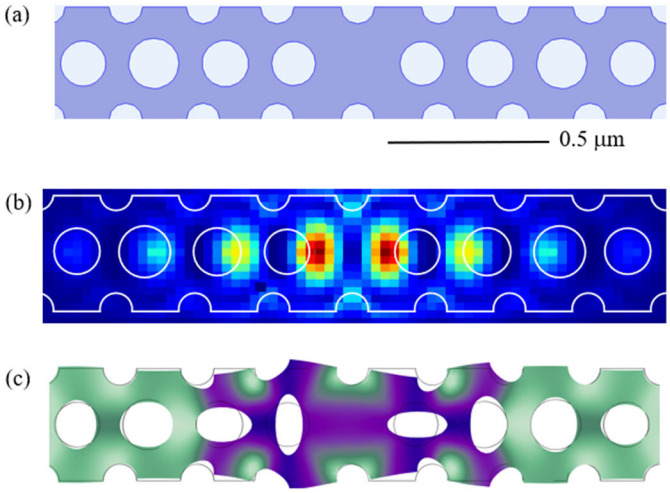


図 2 ダイヤモンドオプトメカニカル共振器 (a) 構造. (b) 光学モード. (c) メカニカルモード.

© 2025年 応用物理学会

直径 10mm フォトニック結晶レーザーの CW 動作の初期評価

Initial characterization of continuous-wave operation of a 10-mm-diameter PCSEL

京大院工[1]，京大高等研究院[2]，○吉田 昌宏[1]，奥田 功太郎[1]，勝野 峻平[2]，井上 卓也[1]，
De Zoysa Menaka[1]，石﨑 賢司[1]，野田 進[1,2]
Kyoto Univ.[1], KUIAS[2], ○M. Yoshida[1], K. Okuda[1], S. Katsuno[2], T. Inoue[1],
M. De Zoysa[1], K. Ishizaki[1], and S. Noda[1,2]
E-mail: yoshida@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

フォトニック結晶レーザー（PCSEL）は，2 次元フォトニック結晶の特異点（Γ 点等）における共振効果を利用した面発光型半導体レーザーである [1]．我々は，これまで直径 3mm PCSEL において 50W 級高輝度連続（CW）動作を実現している [2]．最近では，光出力，輝度の更なる増大に向けて，直径 10mm という超大面積デバイスの研究開発を進めている．直径 10mm 全面への電流注入を可能とする表面電極構造や，大面積化に応じてエルミート・非エルミート結合係数を適切に低減するための二重格子構造の検討を行い，これらに基づき，直径 10mm PCSEL を開発し，パルス動作に成功している [3]．そして，前回，このような直径 10mm PCSEL の CW 動作の実現に向けた実装・放熱技術の開発について報告した [4]．今回，直径 10mm PCSEL の CW 動作に関する初期的な評価を行ったので報告する．

前回開発した実装手法を深化させつつ，直径 10mm PCSEL を CW 動作のためにサブマウント及び冷却パッケージへと実装した．図 1(a)に実装後のデバイスの写真を示す．なお，本デバイスにおいては，直径 10mm PCSEL の CW 動作の初期評価のため，PCSEL の CW 動作において重要となる温度補償構造は導入せず，また，フォトニック結晶の結合係数（R, I, μ）についても，最適化されていないものを用いた．図 1(b)に実装後のデバイス表面の高さ分布の測定結果を示す．同図より，出射面に僅かな反りがあるものの，全体として対称性良く実装出来ている様子が見て取れる．次に，本デバイスにワイヤボンドを行い，CW 電流注入による初期特性評価を行った．まず，発振前の電流値において，デバイス表面温度を赤外線カメラにより観察した結果を図 2(a)に示す．同図より，電流注入領域が均一に冷却出来ていることが確認出来る．続いて，レーザー発振後（発振閾値の 2 倍程度の電流値）における近視野像を図 2(b)に示す．同図より，直径 10mm PCSEL の CW 発振が得られ，ほぼ全面での発振が得られている様子が見て取れる．近視野像に見られる僅かな不均一性については，残存する実装歪の影響等が考えられるが，今後，結合係数や実装条件の最適化等によって改善が期待される．さらに，同電流値における遠視野像を図 2(c)に示すが，直径 10mm という極めて大きなデバイスでありながら，Γ 点バンド端での発振に起因する単峰状の狭いビームパターンを得ることに成功した．詳細は当日報告する．**[謝辞]** 本研究の一部は，科研費特別推進研究（22H04915），NEDO 委託事業（JPNP22007）の支援を受けた．**[文献]** 1) S. Noda, *et al.*, Adv. Opt. Photon. **15,** 977 (2023). 2) M. Yoshida, *et al.*, Nature **618,** 727 (2023). 3) 吉田 他, 2024 年秋季応物, 18p-A34-5. 4) 吉田 他, 2025 年春季応物, 14p-K505-9.

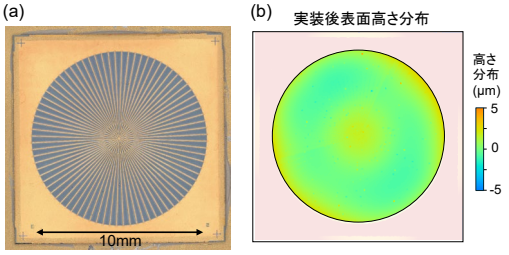


図 1. (a) 実装後の直径 10mmPCSEL の光学顕微鏡写真．**(b)** 実装後のデバイス表面の高さ分布．

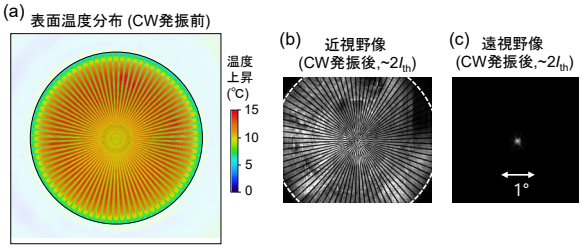


図 2. (a) 赤外線カメラで観察したデバイス表面温度（CW 発振前）． CW 発振後の**(b)**近視野像，及び，**(c)**遠視野像．なお，近視野像は測定系の視野に収まりきらないため，直径 10mm の領域を示す白色の破線を補助線として表示している．

© 2025年 応用物理学会

SiO_2 を用いた単結晶 Si メタサーフェスの縮退臨界結合による中赤外完全吸収体

Mid-infrared perfect absorbers using crystalline Si metasurface with SiO_2 by degenerate critical coupling

阪大院工[1]，阪大フォトニクスセ[2]　○(M2)柏原 昌渡[1]，高原 淳一[1,2]

Grad. School of Eng., Osaka Univ.[1], Photonics Ctr., Osaka Univ.[2]

○Masato Kashiwabara[1] and Junichi Takahara[1,2]

E-mail: kashiwa@ap.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

近年、縮退臨界結合(DCC)を用いた完全吸収体の研究が盛んであり、THz 域[1]、可視域[2]などの実現例が存在する。近赤外～中赤外域での単結晶 Si(c-Si)の材料損失は少ないため、ミー共振器に c-Si のみを使った DCC ではその帯域が可視域の一部に限定される。しかし、可視全域に損失を持つアモルファス Si(a-Si)をマスクとして付加することで帯域の拡張が可能になった[2]。本研究では、先行例のない中赤外域への拡張を目標に、中赤外域では透明な誘電体であるフッ化カルシウム(CaF_2)基板上に c-Si ミー共振器を形成し、中赤外域で材料損失を持つ二酸化ケイ素(SiO_2)を付加することで DCC による完全吸収体を設計した。

2. シミュレーション結果と考察

CaF_2 基板と c-Si、SiO_2 円柱ナノ構造からなるメタアトム(Fig. 1)を配列したメタサーフェスに、波長λ_0=8.0~15.0μm の光を垂直入射した場合の光学応答を FDTD シミュレーションにて解析した。Fig2 に半径 r=2.5μm, SiO_2 膜厚 h_2=1μm, 周期 p=8μm のときの Si 膜厚 h_1のスイープ(h_1＝1.5～2.5μm)による吸収率の変化を示す。電気双極子(ED)と磁気双極子(MD)の共振による吸収ピークが近づき、h_1=1.8μm のとき 2 つのモードが縮退し、吸収率 89.8%を得た。また、Fig3 に CaF_2 基板上に SiO_2 層を 1μm 積んだ場合の吸収率との比較を示す。SiO_2 薄膜ではフォノンに起因する SiO_2 自体の材料損失による 2 つの吸収ピーク(矢印)が見られるが、メタサーフェス構造では 12μm 付近の吸収率が大幅に向上している。このことから、DCC によって吸収率が増加したと考えられる。本研究は、中赤外のイメージング分野の発展に貢献できる。

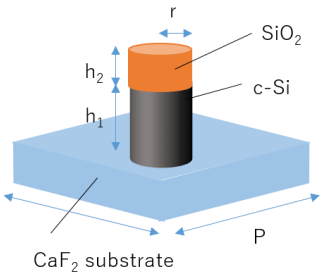


Fig. 1 Schematic of the meta-atom.

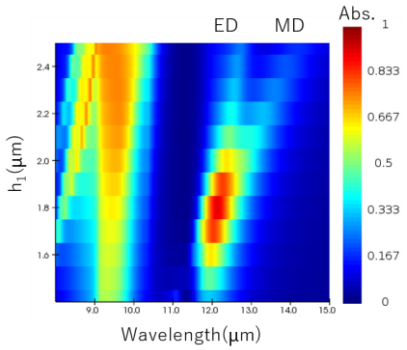


Fig. 2 Absorptivity spectral map of Fig. 1 with varying h_1 (p=8 μm, r=2.5μm, h_2=1μm, h_1=1.5～2.5μm).

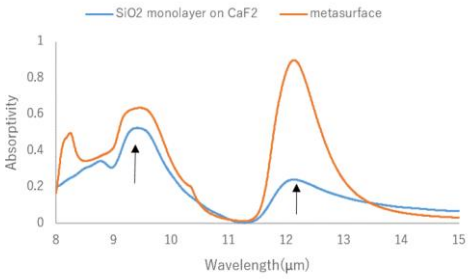


Fig. 3 Absorptivity spectra of the metasurface and SiO_2 monolayer on CaF_2.

参考文献

[1] X. Ming, *et al.*, Opt. Express **25**(20), 24658 (2017).

[2] R. Xu, *et al.*, Opt. Lett. **46**(4), 805 (2021).

© 2025年 応用物理学会

２次元フォトニック結晶大面積共振と水分子の振動強結合の研究

Study on vibrational strong coupling between two-dimensional photonic crystal broad area resonance and water molecular

東北大工，○(M1)岡山 諒吾，森田 遼平，北村 恭子

Tohoku Univ.，○Ryogo Okayama, Ryohei Morita, Kyoko Kitamura

E-mail: okayama.ryogo.p1@dc.tohoku.ac.jp, kyoko.kitamura.c2@tohoku.ac.jp

【序】分子は原子間の結合に固有の振動を有し、振動によって量子化されたエネルギー状態を形成する。この分子の振動モードと同じ周波数の固有モードを有する光共振器とが相互作用すると、原子と共振器における共振器量子電磁力学において議論されてきたのと同様に、強結合状態を形成することができる。振動強結合と呼ばれるこの状態では、分子の物性や化学反応速度が変化する。特に、近年、水分子の O-H 伸縮振動と共振器の振動強結合下において、水のイオン伝導度や誘電率が大幅に向上することが明らかとなり、高効率で環境負荷が少ない電気化学反応系への応用が期待されている [1]。さて、従来の報告例では、共振器は最も基本的な Fabry–Pérot 型が主流である。そのため共振器と結合する分子数は限定的であり、共振器の構造安定性の面でも課題があった。そこで、本研究では大面積共振により共振器と結合する分子数を大幅に増加させることが期待できる、２次元フォトニック結晶(PC)を用いて、水分子との振動強結合状態の形成を電磁界シミュレーションにより検討したので報告する。【方法と結果】図 1 にシミュレーションモデルの模式図を示す。真円格子点の Si ロッドからなる正方格子 PC を用い、そのフォトニックバンド構造中のΓ_2 点のバンド端を共振器モードとして利用する。有限差分時間領域(FDTD)法を用いて、まず水の O-H 伸縮振動周波数 (3400 cm^{-1} = 波長:2.94 μm) に共振モードを有する PC 構造を設計した。次に、水の吸収を考慮しつつ、その PC 構造を出発点として、構造パラメータを変化させながら、水中スペクトルの変化を見た。解析結果の一例として、格子点の半径を 0.30 μm に固定し、格子定数 *a* を変化させ、共振モード周波数を 3400 cm^{-1} とその前後に変化させた場合の結晶内部の水中スペクトルの変化を図 2 に示す。これより、共振器の共振モード変化を表す線と O-H 伸縮振動周波数を表す直線の交点付近で、スペクトルが反交差状に変化、すなわち Rabi 分裂しており、PC 共振器と水分子の強結合状態の形成が示唆された。なお、PC 共振器の Q 値、フィリングファクタによる影響等、詳細は当日報告する。

【参考文献】1) Fukushima T, *et. al*, *JACS* **144** (27), 12177-12183 (2022).

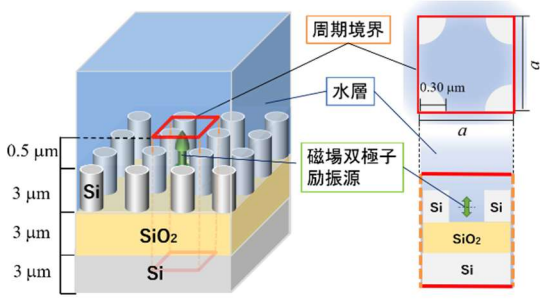


図１：シミュレーションモデルの模式図

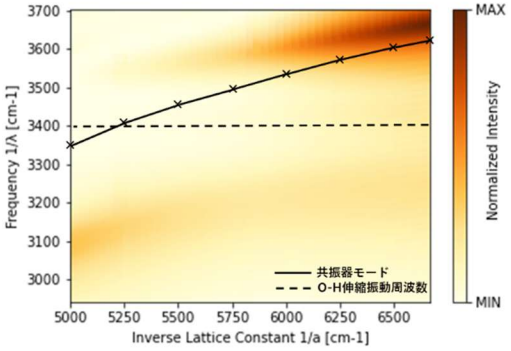


図２：水中スペクトル変化 振動強結合状態に特徴的な反交差が見られる

© 2025年 応用物理学会

フォトニック結晶レーザーと固体結晶融合による超小型高出力短パルスレーザーの提案

Proposal of ultra-compact high-power short-pulse laser integrating photonic-crystal laser and solid-state gain media

京大院工[1], 阪大レーザー研[2], 分子研[3], ハイティラ(株)[4], 京大高等研究院[5], ○古賀翔大[1], 井上卓也[1], De Zoysa Menaka[1], 吉田昌宏[1], 石崎賢司[1], 余語覚文[2], 宮永憲明[2], 平等拓範[3], 平野嘉仁[4], 野田進[1,5]

Kyoto Univ.[1], Osaka Univ.[2], IMS[3], HyTILA Co.[4], KUIAS[5], ○S. Koga[1], T. Inoue[1], M. De Zoysa[1], M. Yoshida[1], K. Ishizaki[1], A. Yogo[2], N. Miyanaga[2], T. Taira[3], Y. Hirano[4], S. Noda[1,5]

E-mail: koga@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, noda.susumu.6a@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー(PCSEL)は、フォトニック結晶の特異点(Γ 点)における大面積共振作用を活用した面発光型半導体レーザーであり、高輝度 CW 動作が実現可能である [1]。これらの特長をもつ PCSEL と、蛍光寿命が長く大きなエネルギーを蓄積可能な固体結晶を融合することで、超小型高出力短パルスレーザーが実現可能となり、衛星搭載 LiDAR 等の各種高出力レーザー応用の革新につながることが期待される。以上を踏まえ、今回、高輝度 PCSEL と固体結晶を融合した光源の過渡応答解析を行い、衛星搭載 LiDAR 用光源に要求される、ピーク出力 MW 以上・パルス幅 ns 以下の短パルス発振が実現可能であることを見出したので報告する。

[解析結果] 提案するレーザー構造の模式図を Fig. 1 に示す。940 nm 帯 PCSEL の上部に、1030 nm 帯で利得を示す Yb:YAG と可飽和吸収体として働く Cr:YAG を集積した構造である。Yb:YAG は、蛍光寿命が約 1 ms と長いため、PCSEL による励起により大きな反転分布が形成可能であり、Cr:YAG の可飽和吸収効果による Q スイッチングにより、高出力・短パルス光の出射が期待される。ただし、Yb:YAG は準 3 準位レーザーであることから、Yb イオンのドープ量を増加させると、下準位吸収損失によって発振閾値の上昇と発光効率の低下が生じる。そこで、励起光を多重反射させることで、Yb ドープ量を低減しつつ励起効率の向上を図る構造を採用した。Fig. 2 に、Yb:YAG の Yb ドープ量を変化させた際の、Yb:YAG の励起光吸収効率の計算結果を示す。多重反射効果により、10 at.%程度の比較的低いドープ量でも 90%近い吸収効率が得られることがわかる。以上を考慮して、初期検討として、空間モードを考慮しないレート方程式による光源の過渡応答解析を行った。設計においては、PCSEL の励起パワー、Yb:YAG 及び Cr:YAG の厚さを固定し、上述の下準位吸収損失と励起吸収効率のトレードオフを考慮して Yb ドープ量を最適化した。その後、可飽和吸収体の初期透過率と出力結合鏡反射率の調整を行った。その解析結果を Fig. 3 に示す。ピーク出力 1.1 MW、パルス半値幅 0.97 ns、繰り返し周波数 3.2 kHz の高出力短パルスが得られた。発振特性のパラメータ依存性等の詳細は当日報告する。

[謝辞] 本研究の一部は、JAXA 宇宙戦略基金の支援を受けた。[文献] 1) Yoshida *et al.*, Nature **618**, 727 (2023).

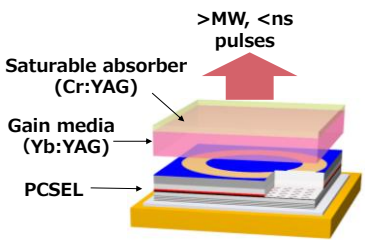


Fig.1. Proposed laser structure integrating PCSEL and solid-state gain media.

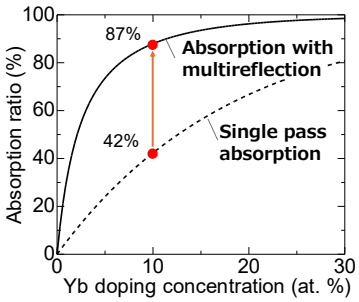


Fig.2. Calculated absorption efficiency with and without multiple reflections as a function of Yb doping concentration.

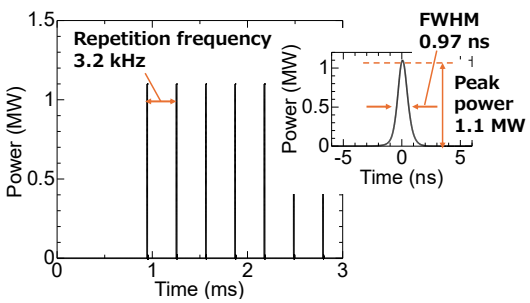


Fig.3. Calculated temporal waveform for the designed structure. Inset shows the enlarged pulse waveform.

© 2025年 応用物理学会

歪フォトニック結晶中の光軌道の可視化

Visualization of Optical Pathways in Distorted Photonic Crystals

東北大工 [1], 京都工繊 [2]　大西綾乃 [2,1], 唐沢之辰 [2], 山下兼一 [2], ○北村恭子 [1,2]

TOHOKU Univ. [1], Kyoto Inst. Tech. [2]　A. Onishi [2,1], Y. Karasawa [2],

K. Yamashita [2], ○K. Kitamura [1,2]

E-mail: kyoko.kitamura.c2@tohoku.ac.jp

【序】歪フォトニック結晶(DPC)は、フォトニック結晶(PC)を構成する周期的な格子点に対して、緩やかな構造変化(格子歪)を与えた構造である。我々はこれまでに、2 次元有限差分時間領域(2D-FDTD)法を用いた電磁界シミュレーションにより、有効媒質近似が可能な低周波数領域において、DPC 内を伝搬する光が、湾曲 [1]、蛇行 [2]することを示してきた。しかし、実験においては、低周波数領域においてフォトニックバンドは空気ライトラインの下に位置するため、光軌道は PC 面内に閉じこもり、直接的にその湾曲・蛇行軌道を観測することは難しく、間接的な手法での湾曲軌道の証明に留まっていた [1]。今回、近赤外領域に吸収・発光波長を有する量子ドットを用いて、DPC 内部を蛇行する光軌道を観測することに成功したので報告する。【方法と結果】図 1 (a)に y 軸方向に楕円格子点が反時計回りに回転するような DPC 構造における蛇行する光軌道の一例を示す。ここで n_{90} は格子点が 90 度回転するのに必要な格子数を表すパラメータであり、大きいほど緩やかに構造が変化するため光軌道も緩やかに蛇行する。格子点が反時計回り回転の時、光軌道は直線軌道からまず y 正の方向に湾曲し、その後蛇行する軌道を描くことが分かる。同図(b)に $a^{(0)}$ = 220 nm として、Si で作製した DPC の SEM 像の一例を示す。比較のため、PC 領域と DPC 領域とを同じサンプル内に作製しており、DPC 領域の楕円格子点は $y/a^{(0)}$ = 37 付近において、90 度回転しているため、PC 領域の楕円格子点と鏡面対称な構造になっていることが見て取れる。このサンプル上面に量子ドットを塗布し、グレーティングカップラを介して波長 1110 nm のレーザーを入射したときの蛍光散乱光を観測した結果を同図(c)に示す。PC 領域が直線軌道を描いているのに対して、DPC 領域では軌道が湾曲し、n_{90} = 37.5 のサンプルでは蛇行していることが明らかである。また、n_{90} = 56.25 のサンプルでは、n_{90} = 37.5 のサンプルに比較して、その湾曲が緩やかであることもわかる。サンプル構造や実験系等の詳細は当日報告する。【謝辞】本研究の一部は、JST-さきがけ(JP20345471)、JSPS 科研費(22H01991)から支援を受けた。

【文献】1) K. Nanjyo *et al.*, Phys. Rev. A **108**, 033522 (2023). 2) 本多 他, 2021 年春応物 18p-Z10-11.

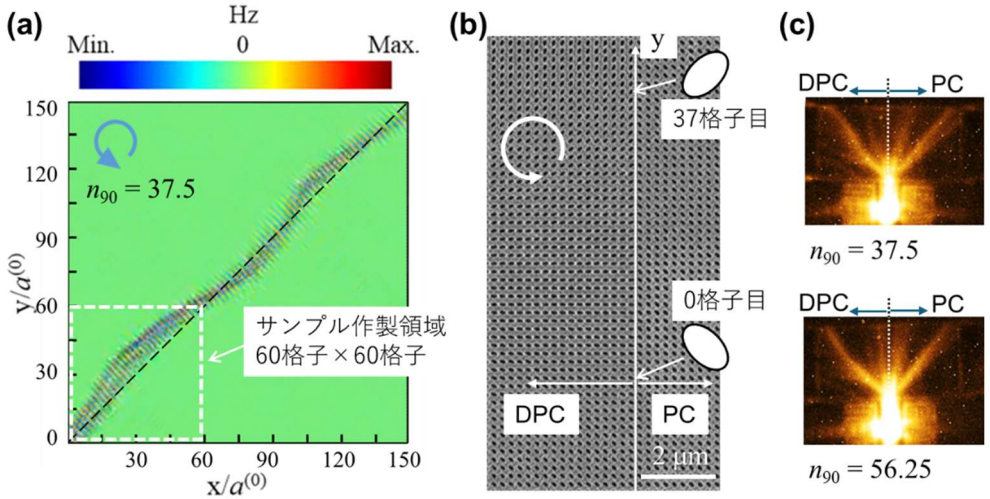


図 1：楕円格子点回転 DPC の蛇行光軌道 (a) シミュレーション、(b) サンプル SEM、(c) 光軌道の可視化 PC 領域は直線軌道を示すのに対して DPC 領域は湾曲している

© 2025年 応用物理学会

フォトニックグラフェンリボン構造における スローライトモード

Slow-light modes in photonic graphene ribbon structures

東大先端研 [1], 東大生研 [2] ○張成昆 [1,2], 石田夏子 [1], 岩本敏 [1,2]

RCAST [1], IIS [2], Univ. of Tokyo

○Chengkun Zhang[1,2], Natsuko Ishida[1], Satoshi Iwamoto[1,2]

E-mail: zck20@iis.u-tokyo.ac.jp

Topological photonic crystal (PhC) heterostructure, consisting of gapless photonic graphene inserted between two domains of topologically distinct PhCs, has been widely investigated for supporting wide-mode-width single guided modes [1-3]. It raises a question of whether topological PhCs claddings are essential for achieving wide-mode-width single modes. Previously, we found that pure photonic graphene ribbons (PGNs) can support wide-mode-width single modes even without topological PhCs claddings, with zigzag-zigzag boundaries formed at top and bottom edges [4]. Here, we report that slow-light modes with wide mode widths are realized in photonic graphene ribbons with bearded-bearded and zigzag-bearded boundaries.

Figure 1 shows the schematic configurations and projected band structures of transverse electric (TE) mode for PGNs with (a) zigzag-zigzag, (b) bearded-bearded, and (c) zigzag-bearded interfaces. It is evident that slow-light modes are supported in PGNs with bearded-bearded and zigzag-bearded interfaces. The out-of-plane magnetic field distributions H_Z of slow-light modes marked as red and blue points are shown in Fig. 1(b) and (c), which expands in the whole domain of PGNs, indicating wide-mode-width slow-light modes. Furthermore, for PGNs with zigzag-bearded interfaces, slow-light modes exist even at $N = 2$, realizing a two-layer slow-light PhC waveguide.

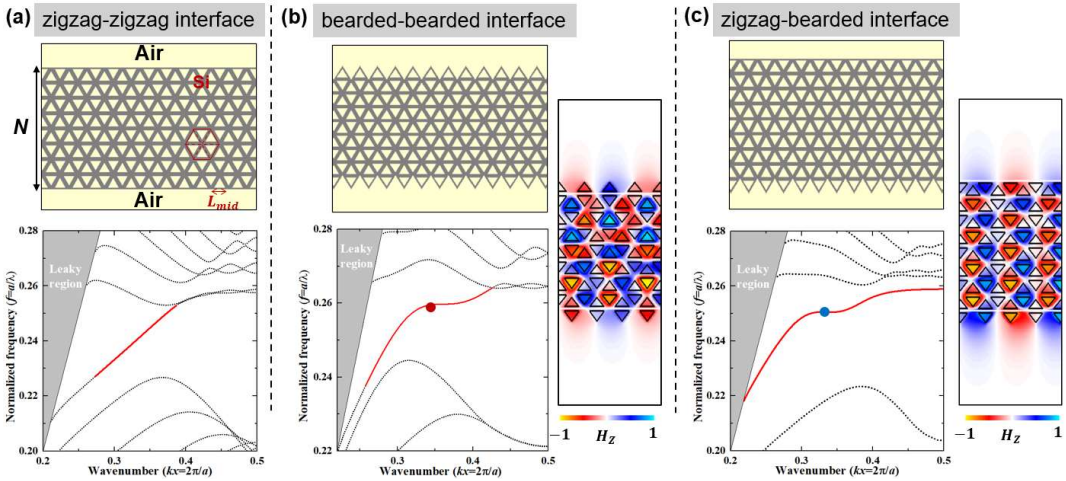


Fig. 1 Schematic configurations, projected band structures of TE mode for PGNs with interfaces of zigzag-zigzag in (a), bearded-bearded in (b), and zigzag-bearded in (c). The PGNs consist of *N*-layer triangular air holes on Si slab, terminated by air in top and bottom. *N* is 8, 9, 9 for (a), (b) and (c). The side length of triangular air holes $L_{mid} = a/\sqrt{3}$, where a is period. Out-of-plane field distributions (H_Z) of slow-light modes are depicted in (b) and (c). All calculations are based on the 2D plane-wave expansion method.

Acknowledgement This work is supported by JST CREST(JPMJCR19T1), KAKENHI (22H00298, 22H01994), and Asahi Glass Foundation. **References** [1] M. Wang *et al*., Phys. Rev. Lett. **126**, 067401 (2021). [2] Q. Chen *et al*., ACS Photonics **8**, 1400-1406 (2021). [3] C. Zhang *et al*., Opt. Mater. Express **14**(7), 1756-1766 (2024). [4] C. Zhang *et al*., 72nd JSAP Spring Meeting, 14p-K505-2 (2025).

© 2025年 応用物理学会

GaN 系 PCSEL の電流注入分布の制御に関する検討

Investigation of Current Injection Distribution Control of GaN-Based PCSELs

京大院工 [1]，スタンレー電気 [2]，京大高等研究院 [3] ○十鳥雅弘 [1]，北村篤史 [1]，小泉朋朗 [2,1]，
江本渓 [2,1], De Zoysa Menaka[1]，増山知輝 [2,1]，井上卓也 [1]，石崎賢司 [1]，吉田昌宏 [1]，勝野峻平 [3]，野田進 [1,3]
Kyoto Univ.[1], Stanley Electric CO., LTD.[2], KUIAS[3] ○Masahiro Jutori[1],
Atsushi Kitamura[1], Tomoaki Koizumi[2,1], Kei Emoto[2,1], Menaka De Zoysa[1], Tomoki Masuyama[2,1],
Takuya Inoue[1], Kenji Ishizaki[1], Masahiro Yoshida[1], Shumpei Katsuno[3], Susumu Noda[1,3]
E-mail: juttori@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, menaka@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

【序論】フォトニック結晶レーザー（PCSEL）は，活性層近傍に形成した二次元フォトニック結晶の特異点（Γ 点など）における共振効果を利用することで，大面積かつコヒーレントな発振が可能な面発光レーザーであり，加工やセンシングなどに用いる小型レーザー光源としての応用が期待されている．我々は，PCSEL の材料系の一つとして GaN を採用し，青色波長帯における PCSEL の開発に取り組んできた [1–3]．2008 年には電流注入によるレーザー発振を実証し [1]，その後，デバイス作製技術の改良や二重格子フォトニック結晶構造の導入等の様々な展開を進めて来た [2]．さらに，空孔の重心間距離を $a/4$（a : 格子定数）程度に近づけることで共振器面内の光結合を弱め，光を面内に広げる構造を導入し，初期検討として 500 μmΦ デバイスの設計・作製を進めて来た [3,4]．今後，GaN 系 PCSEL において，共振器サイズの更なる拡大（直径≧1 mm）を行う場合，周辺部の n 側窓電極から発振領域中心部への電流注入が相対的に減少するため，GaN 系 PCSEL で起こりうる，キャリアプラズマ効果による共振器内外での屈折率差に起因する意図しない発振 [4]や，高次モード等の不要なモードでの発振が誘発される可能性が懸念される．そこで，今回，GaAs 系 PCSEL でこれまで検討されて来た，電極形状の工夫による電流分制御手法 [5,6]を GaN 系 PCSEL に展開し，その一例としてガウス型電流注入分布を導入した場合のデバイス特性について初期的な解析を行った結果を報告する．

【結果】図 1(a)に，従来の単一 p 側電極構造を有する GaN 系 PCSEL の断面模式図と共振器サイズを 1 mmΦ としたときの電流注入分布を示す．同図より，n 側の窓電極に近い発振領域の端部と比べて，発振領域の中心部への電流注入が 2~3 割程度減少する．このような分布では，上述したように基本モードの発振に加えて，高次モード発振や意図しない発振の誘発が懸念される．一方，図 1(b)に示す，ガウス型の電流分布(1/e 幅は 1 mmΦ の例)を採用することで，共振器中央に腹を有する基本モードに有利な利得を与えることが出来ると考えられる．次に，上記 2 つの電流注入分布を仮定して PCSEL の過渡応答解析を実施した．解析におけるフォトニック結晶共振器は，重心間距離 $a/4$ の二重格子構造 [3,4]を仮定し，結合係数(エルミート結合係数: R, I，非エルミート結合係数: μ)[7]は，それぞれ R=112 cm^{-1}，I=108 cm^{-1}，μ= 13 cm^{-1} とした．各分布に対して，注入電流を閾値の 2 倍とした場合の近視野像，遠視野像，および Γ-X 方向の強度プロファイルを図 2 に示す．単一電極構造(図 2(a))では，注入電流密度の高い周囲の領域で意図しない発振が生じており，Γ-X 方向にビーム拡がり(規格化強度~10^{-3} 程度)が確認されるが，ガウス型電流分布(図 2(b))では，このような意図しない発振が抑制され，単峰性の高いビームが得られていることが分かる．電流分布の様々な形状に関する詳細な検討等，当日報告する．

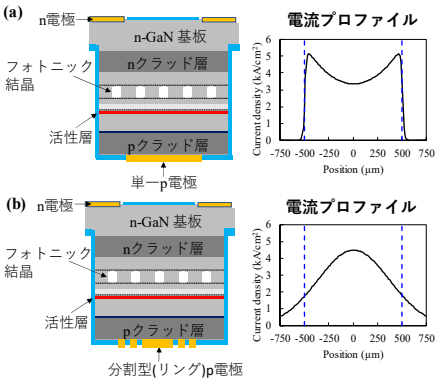


図1: **(a)** p側単一電極構造，**(b)** p側リング状電極構造

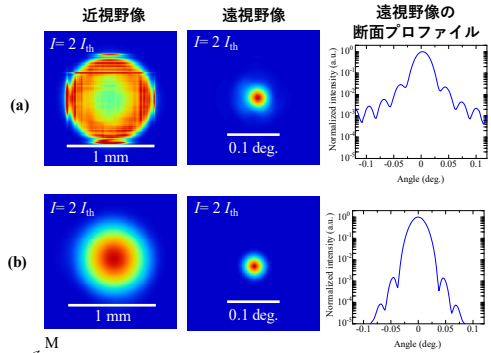


図2: **(a)** 単一電極の電流注入による近視野像と遠視野像の解析結果，**(b)** ガウス型電流注入による近視野像と遠視野像の解析結果

【謝辞】本研究の一部は，科研費(22H04915)のもと行われた．**【文献】**1) H. Matsubara et al., Science **319**, 445 (2008). 2) K. Emoto, et al, Comms. Materials **3**, 72 (2022). 3) 十鳥 他，応物秋, 23p-11E-2 (2024). 4) 増山 他，応物春，15p-K505-6 (2025). 5) 榎 他，応物秋，20p-E207-2 (2019). 6) 宮井 他，応物秋，21a-A101-7 (2022). 7) T. Inoue, *et al.*, Nat. Commun. **13**, 3262 (2022).

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.10 Photonic structures and phenomena

[9p-N221-1~14] 3.10 Photonic structures and phenomena

[9p-N221-1]
Restoration of a singularity near exception points by gain saturation

○Takahiro Uemura[1,2], Kouta Yagi[1,2], Kenta Takata[2,3], Masaya Notomi[1,2,3] (1.Science Tokyo, 2.NTT BRL, 3.NTT NPC)

[9p-N221-2]
Generation and control of exceptional point in Silicon Mie resonator on metal substrate

○Naoki Oya[1], Junichi Takahara[1,2] (1.Osaka Univ., 2.Photonics Ctr.)

[9p-N221-3]
Fabrication of a vertical photonic-crystal coupler based on non-Hermitian/Hermitian control.

○(M2)Tomoki Kanesaka[1], Takuya Inoue[1], Masahiro Yoshida[1], Susumu Noda[1,2] (1.Kyoto Univ., 2.KUIAS)

[9p-N221-4]
Fabrication of PCSELs with in-plane distribution of non-Hermitian coupling coefficient for implementation of non-radiative region below surface electrode

○(M2)Kotaro Okuda[1], Masahiro Yoshida[1], Shumpei Katsuno[2], Takuya Inoue[1], Menaka De Zoysa[1], Kenji Ishizaki[1], Susumu Noda[1,2] (1.Kyoto Univ., 2.KUIAS)

[9p-N221-5]
Numerical simulation of skin effect in a non-Hermitian photonic crystal

○ThanhHuyen Phan[1], Katsunori Wakabayashi[1] (1.Kwansei Gakuin Univ.)

[9p-N221-6]
Investigation of unidirectional radiation from stacked one-dimensional moiré photonic crystals

○Taiyu Okajima[1], Takahiro Ito[1], Siyuan Gao[1], Satoshi Iwamoto[2], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.RCAST)

[9p-N221-7]
Expansion of injection-locking frequency-range of photonic-crystal surface-emitting lasers (PCSELs) and dynamic control of lasing frequency

○Ryo Kitada[1], Takuya Inoue[1], Masahiro Yoshida[1], Susumu Noda[1,2] (1.Kyoto Univ., 2.KUIAS)

[9p-N221-8]
Tight binding modeling for one-dimensional moiré bilayer photonic crystals

○(DC)Stepan Maksimovich Trushin[1], Takahiro Ito[1], Shuma Ito[1], Satoshi Iwamoto[2], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.RCAST, Tokyo Univ.)

[9p-N221-9]
Evaluation of Interlayer Coupling between Split-Ring Resonator Tri-Layer Structure

○Rinka Nakao[1], Ken Terazawa[1], Yuichi Hasegawa[1], Kazuyuki Kuzumoto[1], Ken-ichi Matsuda[1] (1.Nihon Univ.)

[9p-N221-10]

Fabrication and characterization of high-Q moiré photonic crystal nanocavities based on stacked nanobeams

○Takahiro Ito[1], Akinari Fujita[1], Shuma Ito[1], Stepan Trushin[1], Jinkwan Kwoen[3], Masahiro Kakuda[3], Yasuhiko Arakawa[3], Satoshi Iwamoto[2], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.RCAST, Tokyo Univ., 3.NanoQuine)

[9p-N221-11]

Observation of localized cavity modes in twist-stacked moiré photonic crystals

○(M1)Shuma Ito[1], Takahiro Ito[1], Akinari Fujita[1], Jinkwan Kwoen[3], Masahiro Kakuda[3], Yasuhiko Arakawa[3], Satoshi Iwamoto[2], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.RCAST, Tokyo Univ., 3.NanoQuine)

[9p-N221-12]

Analysis of a large-area coherent photonic-crystal laser array

○Takuya Inoue[1], Masahiro Yoshida[1], Kenji Ishizaki[1], Menaka De Zoysa[1], Susumu Noda[1,2] (1.Kyoto Univ., 2.KUIAS)

[9p-N221-13]

Response characteristics of a photonic charge sensor to alpha radiation

○Wataru Takahama[1,2], Kohtaku Suzuki[3], Yasuki Okuno[4], Ayumi Ishihara[1,2], Rikuto Ichinose[1], Yuta Kanemaru[1], Shoei Yamasaki[1], Yasushi Takahashi[1,2] (1.Osaka Met. Univ., 2.Okayama Univ., 3.The Wakasa Wan Energy Research Center, 4.RIKEN RAP)

[9p-N221-14]

Radiation tolerance evaluation of high-*Q* silicon nanocavities: Absorption loss induced by proton and gamma irradiation

○Ayumi Ishihara[1,2], Kohtaku Suzuki[3], Wataru Takahama[1,2], Kosei Otsuka[1], Yasushi Takahashi[2] (1.Osaka Met. Univ., 2.Okayama Univ., 3.The Wakasa Wan Energy Research Center)

利得飽和による例外点近傍での特異性の回復

Restoration of a singularity near exception points by gain saturation

科学大理 [1]，NTT 物性研 [2]， NTT NPC[3]

◦上村 高広 [1,2]，八木 滉太 [1,2]，高田 健太 [2,3]，納富 雅也 [1,2,3]

1. Institute of Science Tokyo, 2.NTT BRL, 3. NTT NPC

◦Takahiro Uemura[1,2], Kouta Yagi[1,2], Kenta Takata[2,3], Masaya Notomi[1,2,3]

E-mail: uemura.t.ac@m.titech.ac.jp

非エルミート系における例外点（EP）は、光センサーや単一方向伝搬など多くの応用が期待されている[1]。しかしながら、EPは微小な摂動に対して敏感であり、その特性が容易に「ぼける」ことから、応用には精密なパラメータ制御が不可欠である[2,3]。一方、散逸結合で接続されたレーザー共振器アレイのような非線形開放系では、特別な対称性を導入しなくとも、引き込み現象を通じて非線形分岐点が形成される[4]。ここで、先行研究[4]の系と線形な反PT（APT）対称系は、利得飽和非線形とAPT対称性の有無を除き共通の微分方程式に従うため、両者の動力学には類似性があることが示唆される。本研究では、APT対称性が破れた複素結合共振器系において、利得飽和の導入によってEPに類似した性質を持つ分岐点が出現し、「ぼけた」EPの特異性が回復することを示す。

Fig.1(a)に散逸結合共振器系の模式図を示す。系のダイナミクスは以下の式に従うと仮定する:

$$H(\boldsymbol{a}) = \begin{bmatrix} \Delta\omega + i(g - \beta|a_1|^2 - |\kappa|) & -i\kappa e^{i\theta} \\ -i\kappa e^{i\theta} & -\Delta\omega + i(g - \beta|a_2|^2 - |\kappa|) \end{bmatrix}, \quad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{a}(t) = -iH(\boldsymbol{a}(t))\boldsymbol{a}(t)$$

a_1, a_2 は共振器の複素振幅、βは非線形係数、$\Delta\omega = 1$は離調、κ_1は散逸結合係数、gは利得、$\gamma = g - |\kappa_1|$ は正味の利得である。θは結合の位相を表し、θ＝0が純虚数結合に対応する。Fig. 1(b) はβ=0のもとでの線形固有値であり、θ = 0.05 の場合は線形固有値EPがぼける(Fig.1(b))。他方、$\beta > 0$とおいた場合には非線形平衡問題として扱うことができ、星印で示す分岐点が安定ブランチ（赤線）の左端へ出現する。他の点線はすべて不安定解を表す。また、Fig.1(d)に示すように、安定ブランチ $\boldsymbol{a}^*$における行列 $H(\boldsymbol{a}^*)$ の2つの固有状態の内積の大きさから、利得の増大とともにハミルトニアンの非直交性が増大していることが示される。さらに、時間発展から計算されたフーリエスペクトルから、分岐点の左側でピーク周波数の傾きが発散的になることがわかる（Fig.1(e)）。以上から、線形固有値解析においてEPがぼけている状態であっても、利得飽和の導入によって周波数特異性や非直交性といったEPの性質が回復することが示される。一連の解析は、線形開放性と非線形開放系の興味深い関連を明らかにするための手掛かりとなる。

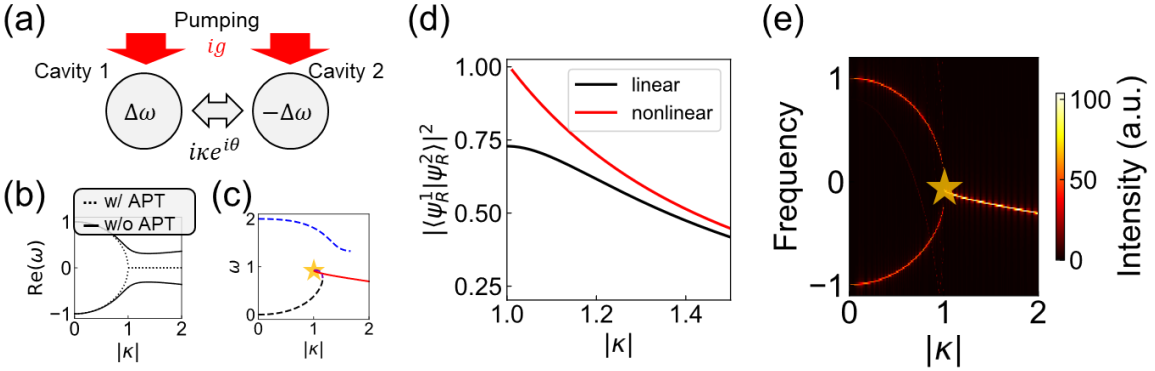


Fig.1 (a) Schematic of the dissipative coupled cavities system. (b) Real part of the eigenfrequencies of the linearized system (β = 0). (c) Equilibrium frequencies of the fix point in nonlinear equations of motion for β = 10^{-3} and g = 3. (d) (e) Fourier spectrum in the system.

【参考文献】[1] L. Feng *et al.*, Nature Photonics **11**, 752 (2017). [2] K. Takata et al. Phys. Rev. A **105**, 013523 (2022). [3] T. Uemura *et al.*, Phys. Rev. A **111**, 033513 (2025). [4] N. Takemura *et al.*, Scientific Reports **11**, 8587 (2021).

【謝辞】本研究は、科学研究費補助金 (KAKENHI JP20H05641, JP21K14551, 23K26581, 24K01377, 24H02232 および 24H00400)の援助の下に行われた。

© 2025年 応用物理学会

金属基板上のシリコンミー共振器における例外点の発現とその制御

Generation and control of exceptional point in Silicon Mie resonator on metal substrate

阪大院工[1]，阪大フォトニクスセ[2]　○(M1)大屋 尚輝[1]，高原淳一[1,2]

Grad. School of Eng., Osaka Univ.[1], Photonics Ctr., Osaka Univ.[2]

○Naoki Oya[1] and Junichi Takahara[1,2]

E-mail: oya@ap.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

ミー共振器と金属基板の間にスペーサー層を入れることで高い Q 値（Q~100）をもつ熱エミッターが実現できる [1]。本構造はプラズモニック非エルミート系における PT（Parity-Time）対称性の構造と同じである。PT 対称性はスペクトル分岐や例外点（Exceptional Point : EP）といった新たな物理現象で近年注目を集めている[2]。本研究では金属基板上のシリコン（Si）ミー共振器を対象に、EP の発現条件を FDTD シミュレーションにより解析し、デバイス設計指針の確立を目指す。

2. シミュレーション解析

金属基板上にスペーサー層を介して Si 円柱ナノ構造を周期的に配列したメタサーフェスの単位構造を Fig. 1 に示す。スペーサー層距離を変えて Si と金属間の結合を制御し、EP の出現領域に近づけ、PT 対称性を実現させる。Fig. 2 は波長 λ=550~950nm における Si 共振器厚さ h_{Si} = 100nm、半径 r_{Si} = r_{SP} = 120nm、金属厚さ h_M = 100nm、周期 p = 600nm、スペーサー : SiO_2、金属 : Al のメタサーフェスの吸収スペクトルマップである。本研究では Fig. 2 の構造を基準とし、構造および材料パラメータを変えて、EP および分岐の変化を調べた。Fig. 3 にその一例を示す。基準から損失を増やすと、分岐モードの Q 値が低下することがわかる。

講演では EP 発現における基板およびスペーサー材料の選択の重要性について報告する。

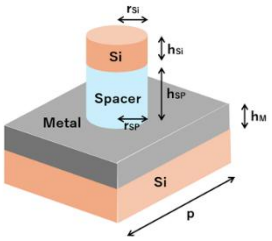


Fig. 1 Schematic of the meta-atom.

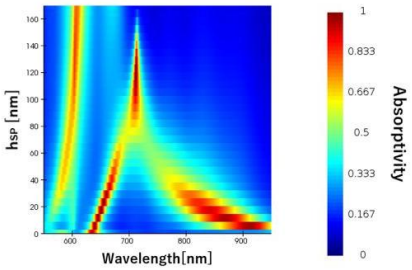


Fig. 2 Absorptivity spectral map with h_{Si} =100 nm, r_{Si} =120 nm, r_{SP} =120 nm, h_M =100 nm, p=600 nm, spacer: SiO_2 and metal: Al.

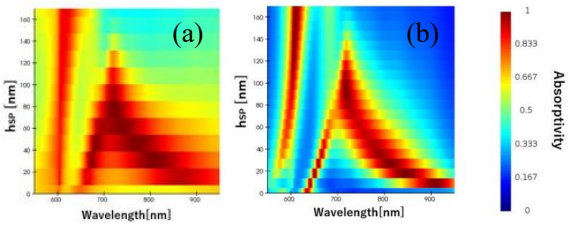


Fig. 3 Absorptivity spectral maps with (a) metal substrate of Ti and (b) lossy spacer layer.

謝辞　東京農工大 久保若奈教授との有益な議論に感謝する。

参考文献

[1] 柏原昌渡, 髙原 淳一 : 第 20 回プラズモニクスシンポジウム、2024 年 6 月 8 日.

[2] F. Yang, et al. Opt. Mater. Express, 11, 2326 (2021).

© 2025年 応用物理学会

非エルミート・エルミート結合制御に基づく垂直入出射型フォトニック結晶光結合器の作製

Fabrication of a vertical photonic-crystal coupler based on non-Hermitian/Hermitian control.

京大院工[1]，京大高等研究院[2]，○金坂知樹[1]，井上卓也[1]，吉田昌宏[1]，野田進[1,2]
Kyoto Univ.[1], KUIAS[2], ○T. Kanesaka[1], T. Inoue[1], M. Yoshida[1], S. Noda[1,2]
E-mail: kanesaka@nano.kuee.kyoto-u.ac.jp, noda.susumu.6a@kyoto-u.ac.jp

[序]フォトニック結晶は放射損失に起因する非エルミート性を発現するため、非エルミート系特有の物理現象を観測・活用するための有用な舞台となりうる。これまで、我々は、180°回折を表すエルミート結合係数κ_{1D}を抑制しつつ、90°回折を表すエルミート結合係数κ_{2D}と非エルミート結合係数μの空間制御（変調）を導入したフォトニック結晶において、自由空間から垂直入射したガウスビームを、任意の強度分布をもつ放射ビームへと高効率に変換可能であることを提案した[1,2]。今回、その実証に向けた基礎検討として、非エルミート・エルミート結合制御に基づく垂直入出射型フォトニック結晶光結合器の作製と初期評価を行ったので報告する。

[設計] 検討するフォトニック結晶光結合器の模式図を Fig. 1 に示す。本素子は、500μm 角の光入射部に垂直方向から入射したガウスビームを、離れた位置の 500 μm 角の光出射部からガウスビームとして垂直出射する素子である。入出射部においては、Fig. 1(b)に示すような、1/4 波長周期のフォトニック結晶に面積変調を導入した構造[2]を採用しており、180°・90°回折を抑制しつつ、同図(a)に示すように、非エルミート結合係数μを連続的に変調することで、500 μm 角の大きな領域に対してガウスビームを高効率に垂直結合可能としている。また、外側の領域には、結合効率を高めるため、Fig.1(c) に示す半波長周期のフォトニック結晶を配置しており、適切な位相で反射が生じるように設計を行った。

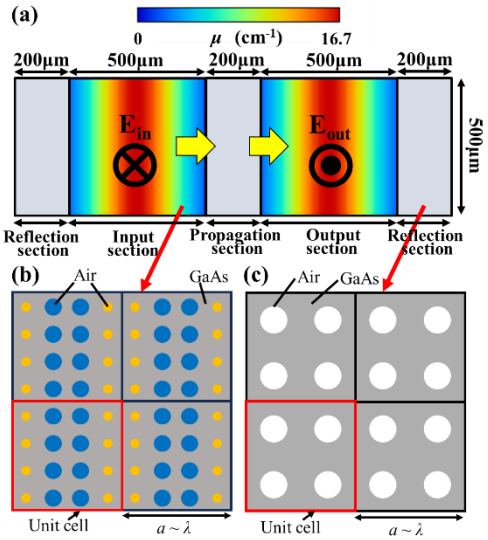


Fig1. (a)Schematic of a vertical photonic-crystal coupler. (b) Photonic crystals with controllable non-Hermitian coupling coefficients. (c) Photonic crystals for light reflection.

[作製と初期評価] 上述の設計に基づきフォトニック結晶光結合器を作製した。入出射領域および反射領域のフォトニック結晶の電子顕微鏡写真を Fig. 2(a), (b)に示すが、設計に近い構造が作製出来ていることが分かる。また、作製構造の 1 つに対して、垂直方向から光を入射した際の出射効率と、効率が最大となる波長における出射部の発光強度分布の測定結果を Fig.3(a), (b)に示す。入出射領域のフォトニック結晶のバンド端周波数と一致する波長 (λ_1) 付近で、500 μm 角の出射領域全体からガウス形状に近い垂直出射光が確認された。他の作製構造の評価結果も含め、詳細は当日報告する。**[謝辞]** 本研究の一部は科研費（22H04915, 24H00430）の支援を受けた。**[文献]** 1) 井上他, 2023 年秋応物 21p-A308-10. 2) 金坂他, 2024 年春応物 22p-11E-3.

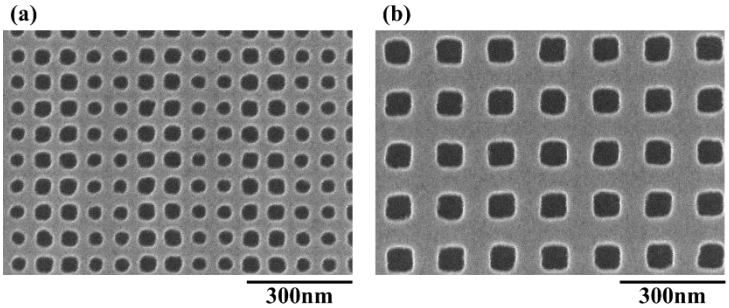


Fig 2. Scanning electron microscope image of the fabricated photonic crystals for (a) input/output sections and (b) reflection sections.

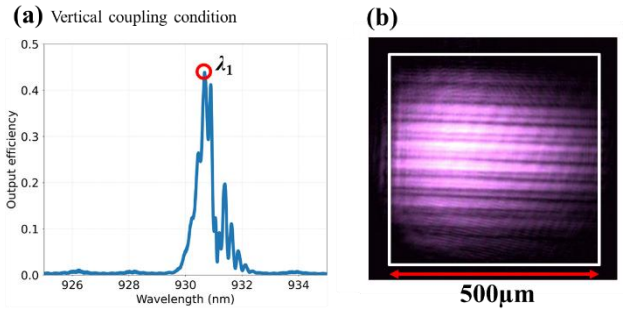


Fig 3. (a) Measured wavelength dependence of the vertical output efficiency of the coupler. (b) Near-field image of the output section at λ_1.

© 2025年 応用物理学会

表面電極下部への非放射領域形成に向けた非エルミート結合係数分布を導入したフォトニック結晶レーザーの作製

Fabrication of PCSELs with in-plane distribution of non-Hermitian coupling coefficient for implementation of non-radiative region below surface electrode

京大院工[1], 京大高等研究院[2], ○奥田 功太郎[1], 吉田 昌宏[1], 勝野 峻平[2], 井上 卓也[1], De Zoysa Menaka[1], 石崎 賢司[1], 野田 進[1,2]

Kyoto Univ.[1], KUIAS[2], ○K. Okuda[1], M. Yoshida[1], S. Katsuno[2], T. Inoue[1], M. De Zoysa[1], K. Ishizaki[1], and S. Noda[1,2]

E-mail: okuda@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー（PCSEL）は、活性層近傍に設けた 2 次元フォトニック結晶の特異点（Γ 点等）におけるバンド端共振効果を利用した面発光型半導体レーザーである[1]。我々は、これまで直径 3mmPCSEL において単一モード 50W 級 CW 動作を実現し[2]、さらなる高輝度・高出力化を目指して、直径 10mmPCSEL の開発を進めている[3]。これらの大面積 PCSEL では、光出射面側に放射状の表面電極を設けることで、デバイス全面への適切なキャリア注入を実現しているが、出射光の一部は表面電極により遮蔽され、損失になるという課題がある。そこで前回、表面電極下部のフォトニック結晶への非放射領域の導入を提案し、表面電極下部において放射波への結合を表す非エルミート結合係数 μ を 0cm^{-1} とすることで、遮蔽損失が抑制できることを、数値解析により明らかにした[4]。今回、このような非放射領域を形成した PCSEL の実現に向けて、μ に意図的な面内分布を導入するための作製プロセスの開発と、μ に面内分布を導入した直径 1mmPCSEL の試作を行ったので報告する。

[実験] 非エルミート結合係数 μ は、フォトニック結晶層-裏面 DBR 層間の距離を変え、上方への放射波と DBR 層からの反射波の干渉位相を調整することで制御出来る[5]。そこで、図 1(a)に示すように、フォトニック結晶層と DBR 層の間に位相調整層を設け、この厚さに面内分布を形成したデバイス構造を考案し、その作製プロセスを開発した。図 1(b)に、開発したプロセスにより、実際に位相調整層（図中水色）に面内分布を形成した試料の断面 SEM 像の一例を示す。同図から、フォトニック結晶層と DBR 層の距離に面内分布を形成出来ていることが分かる。

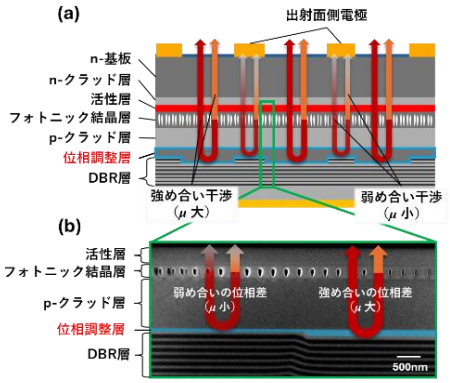


図 1. (a)非放射領域の導入に関する模式図。**(b)**位相調整層厚さに面内分布を導入した試料の断面 SEM 像。

以上の作製プロセスに基づき、μ に面内分布を導入した直径 1mmPCSEL の試作を行った。なお、今回は μ の変化による発光強度分布などへの影響を観察することを目的とし、放射状電極を想定した μ の面内分布を設定しつつも、放射状電極自体は形成せず、発振領域全体に開口を有する窓状電極のみを形成した直径 1mmPCSEL を作製した。作製したデバイスについて、位相調整層の膜厚分布を反映したデバイス裏面の高さ分布を測定したところ、図 2(a)に示すように、領域間で 20nm 程度の厚さ差を形成出来ていることを確認した。次に、デバイスのレーザー発振時の近視野像を図 2(b)に示す。同図より、図 2(a)の弱め合い干渉領域に対応するように、放射状に暗い領域が存在することが分かる。以上のように、μ の面内分布の導入により、非放射領域が形成可能であることを示唆する結果が得られた。詳細は、当日報告する。

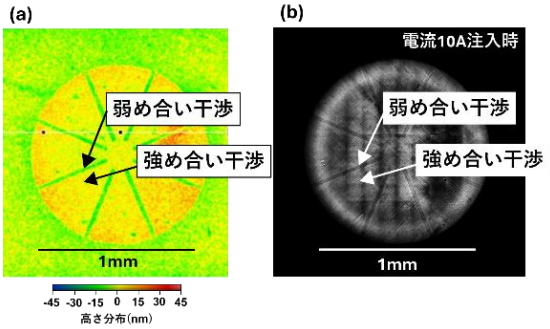


図 2. (a) 作製したデバイスの裏面高さ分布（位相調整層の膜厚分布を反映）。**(b)** μ に面内分布を導入した直径 1mmPCSEL の発振時の近視野像。(注)μ の面内分布導入以外に見られる近視野像のわずかなむらは、プロセス時の別の影響で発生したものである。

[謝辞] 本研究の一部は、科研費特別推進研究（22H04915）、NEDO 委託事業(JPNP22007)の支援を受けた。
[文献] 1) S. Noda, *et al*., Adv. Opt. Photon. **15**, 977 (2023). 2) M. Yoshida, *et al*., Nature **618,** 727 (2023). 3) 吉田 他, 2024 年秋季応物, 18p-A34-5. 4) 本多 他, 2025 年春季応物, 14p-K505-11. 5) T. Inoue, *et al*., Nat. Commun. **13,** 3262 (2022).

© 2025年 応用物理学会

Numerical simulation of skin effect in a non-Hermitian photonic crystal

Kwansei Gakuin University [1],
°Huyen Thanh Phan[1], Katsunori Wakabayashi[1]
E-mail: hik01465@kwansei.ac.jp

The topological states in Hermitian systems have been identified via the property of the band inversion and experimentally realized in serval photonic crystal systems. On the other hand, studies of non-Hermitian systems have pointed out the non-Hermitian skin effects, which are theoretically proved to be protected by non-trivial winding of complex eigenfrequencies in complex plane and are unique without Hermitian counterpart [1]. Therefore, skin effects promise to make the gain and loss in systems become controllable. To experimentally realize non-Hermitian skin effects, theoretical calculations and simulations are required.

In this work, we focus on numerical generation of skin effects in a two-dimensional non-Hermitian photonic crystal system. Our photonic crystal consist of one dielectric block in one unit cell, whose dielectric constant is $n=2-i$ as shown in Fig. 1(a). Figure 1(b) is its photonic band structure. The non-trivial point gap is numerically observed in the complex plane at several k-points. At the real normalized frequency 0.52 as shown in Fig. 1(c), there are two corresponding imaginary part, which indicates the different damping rate at the same frequency. Field distribution of a bulk mode and a skin mode of a finite structure are shown in Fig. 1(d). We will numerically generate electromagnetic waves in a finite structure to observe skin effect. Our results support for the experimental realization of skin effects.

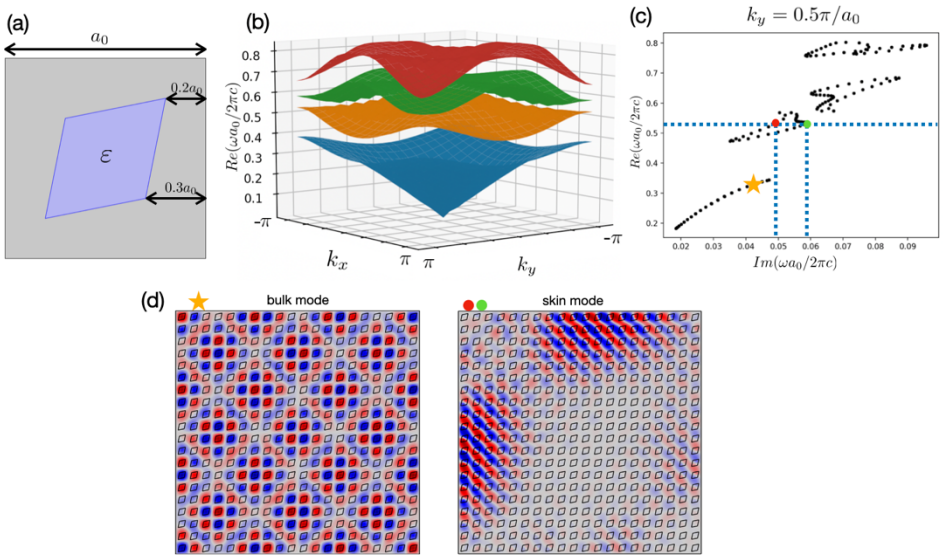


Fig. 1: (a) A schematic of a unit cell of non-Hermitian photonic crystal. (b) The photonic band structure for photonic crystal in (a). (c) Non-trivial point gap are obverved at $k_y = 0.5\pi/a_0$. (d) Bulk (marked as star) and skin (marked as circles) modes in a finite structure.

References: [1] X. Zhang, et al., *Advances in Physics: X*, *7*(1) (2022).

© 2025年 応用物理学会

積層 1 次元モアレフォトニック結晶による一方向放射の検討

Investigation of unidirectional radiation from stacked one-dimensional moiré photonic crystals

慶應理工 [1]，東大先端研 [2]　○(M2)岡島大優 [1]，伊藤貴裕 [1]，高思源 [1]，岩本敏 [2]，太田泰友 [1]

Keio Univ. [1], RCAST, the Univ. of Tokyo [2], ○Taiyu Okajima [1], Takahiro Ito [1], Siyuan Gao [1], Satoshi Iwamoto [2], Yasutomo Ota [1]

E-mail: tokajima2000@keio.jp, ota@appi.keio.jp

はじめに シリコンフォトニクスにおいて高効率な面外光入出力構造は重要である[1]。特にボトムミラーなどを用いない簡便な構造での実現が求められている。先行研究では、多段階や斜めエッチングを用いた Blazed グレーティング構造等が広く検討され、Unidirectional guided resonance などのトポロジカル現象の活用も議論されている[2,3]。同様の構造・現象は、同一のグレーティング構造を二層ずらして重ねた系でも検討されている[4]が、周期の異なる構造を重ねたモアレフォトニック結晶の活用は未開拓で、二層の相対シフトに対しロバストな放射特性が得られる可能性がある。本研究では、周期の異なる Si グレーティングを二層重ねたモアレフォトニック結晶からの一方向放射の可能性を検討した。検討構造は転写プリント法などを用いることで容易に作製可能と見込まれる。

計算結果 図 1(a)に検討した積層 1 次元モアレフォトニック結晶の概念図を示す。空気中に距離 g を隔てて、2 層の Si グレーティングを設置した。Si ロッドの幅は上下それぞれ 720 nm, 480 nm、上下層の厚みは 180 nm, 360 nm である。下層は上層の 2/3 倍の周期を有し、上下反転対称性の破れた周期 1.80 μm のモアレ構造を形成している。同構造に対し、有限要素法を用いて分散関係とともに各モードの上下放射比を計算した(図 1(b))。周波数 138 THz 近傍において、放射比 18.4 dB を示し下方へ強く放射するモードが存在することが分かった。同モードの電磁場分布を図 1(c)に示す。分散が反交差している近傍で放射比が大きくなったことから、モード結合に起因する一方向性放射が発現している可能性がある。詳細な計算結果は当日報告する。

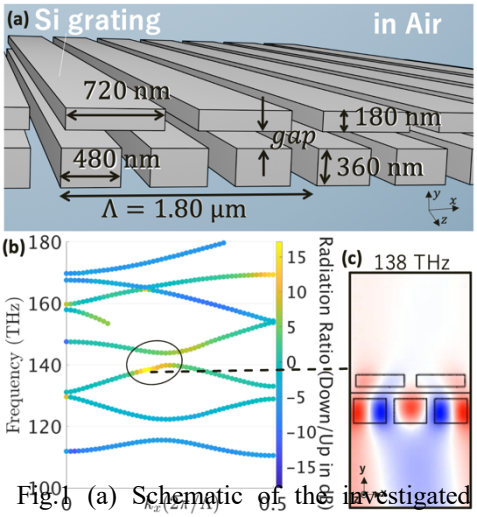


Fig. 1 (a) Schematic of the investigated moiré photonic crystal. (b) Computed photonic band structure. The color indicates down/up radiation ratios. (c) Field profile of the mode around 138 THz.

参考文献 [1] Cheng, L. *et al. Micromachines*, **11**, 666 (2020) [2] Yin, X. *et al.*, *Nature* **580**, 467. (2020) [3] W, Haoran. *et al. Sci. Adv.***10**, eadn4372 (2024) [4] Zhuang, Z. P. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 113801 (2024). **謝辞** 本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR213F および科研費 22H01994、22H00298 により遂行された。

© 2025年 応用物理学会

フォトニック結晶レーザーの光注入同期周波数範囲の拡大と発振周波数の動的制御

Expansion of injection-locking frequency-range of photonic-crystal surface-emitting lasers (PCSELs) and dynamic control of lasing frequency

京大院工[1]，京大高等研究院[2]，○北田諒[1]，井上卓也[1]，吉田昌宏[1]，野田進[1,2]
Kyoto Univ.[1]，KUIAS[2]，°R. Kitada[1]，T. Inoue[1]，M. Yoshida[1]，S. Noda[1,2]
E-mail: kitada@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp，noda.susumu.6a@kyoto-u.ac.jp

[序] 我々は，フォトニック結晶レーザー（PCSEL）の高出力・高輝度化[1)]の実現に向けて，二重格子フォトニック結晶[2)]の格子点設計の深化を進めており，これまでに 3 mmΦ PCSEL において 50 W 級の単一モード連続動作の実証に成功している[3)]．また，出力光の 1/1000 以下のパワーの注入光に対する位相同期動作が可能であることを，理論解析および実験により実証した[4,5)]．今回，注入光パワーの増大により，同期周波数範囲を 10 倍以上に拡大することに成功するとともに，注入光の変調による発振周波数の動的制御にも成功したので報告する．

[実験結果] PCSEL の光注入同期の測定に用いた光学系を Fig. 1(a)に示す．直径 1 mm の単一モード二重格子 PCSEL（共振波長λ_{pc}，出力P_{out}~1 W）に対して，面垂直方向から同じ偏光をもつ波長可変レーザー光（入射波長λ_{in}，入射直径約 1.2 mm，入射パワーP_{in}）をシード光として入射した．また，PCSEL の出力光を Fabry-Perot エタロン（FSR10 GHz，波長分解能 0.2 pm）に結合させ，その透過波長を走査することで，PCSEL の発振スペクトルの高分解測定を行った．入射パワーP_{in}を，前回の実験[5)]の 10 倍以上に相当する10 mWと50 mWに設定して，λ_{in}を変更しながら光注入を行った場合の PCSEL の発振スペクトルの測定結果を Fig. 1(b)に示す．入射パワーの増大により，単一モード発振が得られる同期範囲が拡大し，P_{in}~50 mWの条件では，前回の 10 倍以上の同期範囲（$\Delta\lambda$~14 pm，Δf~4.7 GHz）が得られた．また，P_{in}~50 mW，$\lambda_{in}-\lambda_{pc}$~−5 pm（$f_{in}-f_{pc}$~1.7 GHz）の条件でPCSELを同期させた状態で，シード光源の発振周波数を時間的に変調（変調周波数5 kHz，周波数偏移幅~2 GHz）し，PCSEL の出力光と参照光のヘテロダイン干渉波形のビート周波数変化から、PCSEL の発振周波数の時間変化を測定した結果を Fig. 1(c)に示す．シード光の変調に対応して， 周波数5 kHz，偏移幅2 GHzの周波数変調が生じており，比較的低出力な光注入同期を利用して，W 級 PCSEL の発振周波数の動的制御が可能であることがわかる．詳細は当日報告する．

[謝辞] 本研究の一部は科研費（24H00430, 22H04915）および宇宙戦略基金の支援を受けた．

[文献] 1) Noda *et al.*, Adv. Opt. Photon. **15**, 977 (2023). 2) Yoshida *et al.*, Nat. Mater. **18**, 121 (2019). 3) Yoshida *et al.*, Nature **618**, 727 (2023). 4) 井上他, 2024 年春季応物 23a-11E-8. 5) 井上他, 2024 年秋季応物 18a-A34-2.

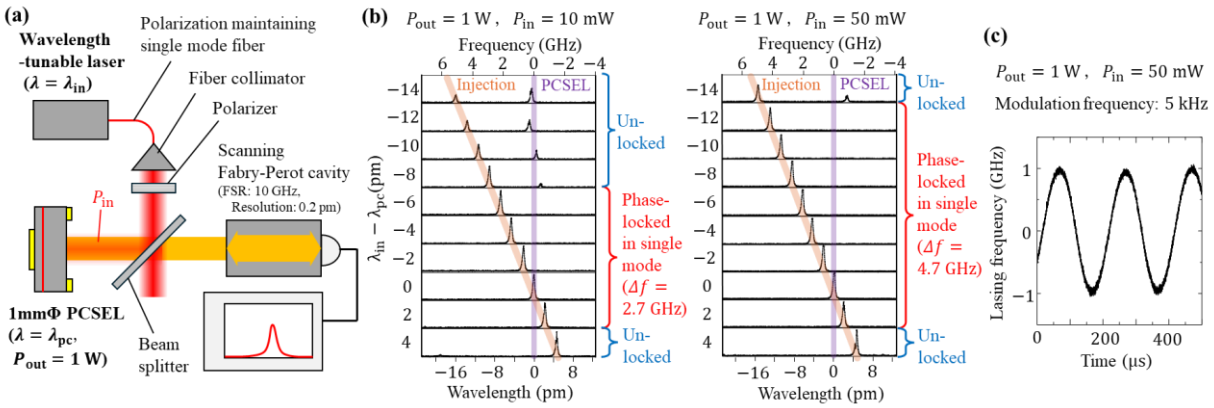


Fig. 1. (a) Experimental setup for injection locking of PCSELs. (b) Measured lasing spectra when λ_{in} is varied at P_{in} = 10 mW and 50 mW. (c) Measured temporal change of the lasing frequency of the PCSEL injection-locked by a frequency modulated seed laser.

© 2025年 応用物理学会

Tight binding modeling for one-dimensional moiré bilayer photonic crystals

Keio Univ. [1], RCAST, the Univ. of Tokyo[2], ○ S.M. Truhsin[1], T. Ito[1], S. Ito[1] and S. Iwamoto[2], Y. Ota[1]

E-mail: trushin.stepan@keio.jp

Moiré photonic crystals (PhCs) exhibit a variety of intriguing phenomena, including flatband light localization [1]. One-dimensional (1D) moiré bilayer PhCs have been shown to support flatbands, whose properties can be effectively described by guided-wave-based continuum models [2]. Such models are useful in predicting bandwidth of the flatband modes and the emergence of magic distances. However, they may become inadequate when dealing with complex moiré structures with randomness, defects and discontinuity. In this work, we discuss a tight-binding (TB) model for computing the band structures of moiré bilayer PhCs and compare them with full electromagnetic simulations using the finite element method (FEM). The simple TB model captures bandwidth evolution of a flatband mode when varying the layer-to-layer distance, building a starting point to explore more complex moire PhCs.

We consider a moiré PhC shown in Fig. 1(a), which consists of two layers of silicon rod arrays (thickness $h = 180$ nm) with different periods (a_1, a_2) satisfying a commensurate condition $(N+1)a_1 = Na_2$. Here, N is set to be 13. We vary the interlayer distance d and investigate flatbands found in the system. We modeled the moiré PhC by a TB chain shown in Fig. 1(b). Each chain consists of two alternating atoms, each with a different eigenenergy ε_i ($i = 1, 2$), representing the dielectric and air regions. We consider only near-neighbor hoppings parameterized by t. To extract the necessary parameters (ε_1, ε_2, t), we first fit the bands of the single layer PhC (Fig. 1(c)). Then, we model the moiré system by introducing interlayer couplings that decay exponentially depending on atom-to-atom distances. Figure 1(d) shows the band structures computed with the respective FEM and TB model, showing the formation of a pair of flat bands in both cases. Figure 1(e) shows the evolutions of the bandwidths of the flatbands as a fucntion of d, exhibiting the presence of a magic distance. These results demonstrate that the simple TB model can reasonably reproduce the FEM simulations.

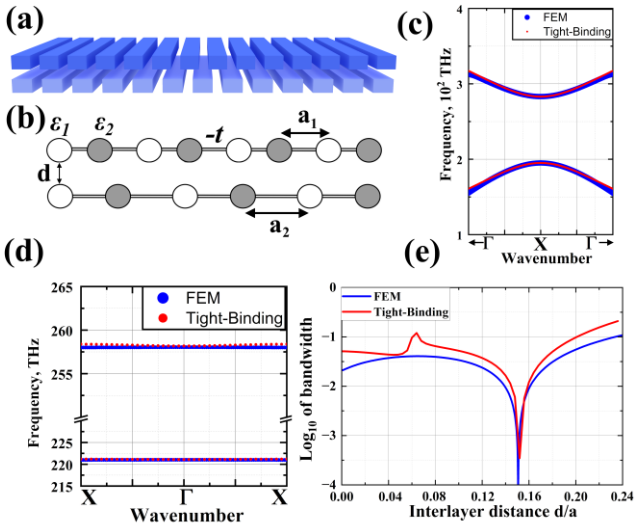


Figure 1. (a) Investigated moiré PhC. (b) Bilayer Moire TB chain. (c) Band structure of the 1D PhC (blue) and the single TB chain (red). (d) Band structure of the moire PhC (blue) and TB moire chain (red) for $d = 0.1a$. (e) Bandwidth curves computed by the FEM and TB models.

Acknowledgment: This work was supported by KAKENHI (22H00298, 22H01994, 22K18989), JST CREST(JPMJCR19T1) and JST FOREST Program (JPMJFR213F).

References: [1] X. R. Mao, *et al.*, Nat. Nanotechnol. 16, 1099 (2021). [2] D. X. Nguyen, *et al.*, Phys. Rev. Res. 4, L032031 (2022).

© 2025年 応用物理学会

近接相互作用する分割リング共振器三層構造の層間結合の強さと共鳴分裂

Evaluation of Interlayer Coupling between Split-Ring Resonator Tri-Layer Structure

日大理工[1]，○(M2) 中尾 琳花[1]、寺澤 謙[1]，長谷川 雄一[1]，葛本 和之[1]，松田 健一[1]
Nihon Univ.[1], ○R. Nakao[1], K. Terazawa[1], Y. Hasegawa[1], K. Kuzumoto[1], K. -i Matsuda[1]
E-mail: csri24015@g.nihon-u.ac.jp

【研究背景と目的】分割リング共振器 (Split-ring resonater: 以下，SRR) は電磁メタマテリアルを構成する電磁波共振器として用いられてきた．近年，これらを応用したメタサーフェスや各種センサーの実現が着目されている [1]．SRR が高密度に集積された場合，近接した SRR 間に強い電磁相互作用が働くことが予想され，それを積極的に利用したメタデバイスを作製する研究が進行している [2,3]．本研究の目的は，バラクタダイオードを搭載した VLSRR(Varactor-loaded SRR : VLSRR) を用いた三層構造を作製し，その電磁波反射特性を明らかにすること，また，層間に働く電磁相互作用の解明を目的とした．

【実験方法】本研究では外径 6 mm，線幅 0.5 mm，35 μm 厚の銅円環を採用し，円環上の二か所にバラクタダイオードを設置した VLSRR を作製した．VLSRR と同一基板上に制御回路を設け，外部電流 I_b によって VLSRR の共振周波数を変調可能にした．同等の共振特性をもつ VLSRR を 3 つ作製し，三層構造の電磁波反射特性 (S_{11} スペクトル）を VNA を用いて測定した．

【結果と考察】VLSRR 三層構造に関する S_{11} スペクトルを Fig. 1 に示す．このなかで，二層目と三層目の VLSRR には 2.5 mA の制御電流を流しているため，各々の固有の共振周波数はほぼ一致している．一方，一層目の VLSRR には，二，三層目とは異なる制御電流（1，3，5 mA）を加えているため，共振周波数も異なっている．このような状況下で測定したスペクトルには，三つの共鳴をしめすバレー構造が観測された．また，それぞれの共振位置は，一層目の制御電流を変えることで連動して移動している．すなわち，このスペクトルの変化は，各 VLSRR 層間に電磁相互作用が働いていることを示している [2]．この結果を，固体中の電子系に対する LCAO 近似と類似の取り扱いによって考察したところ，図の点線のように実験結果をよく説明できることが見いだされた [4]．

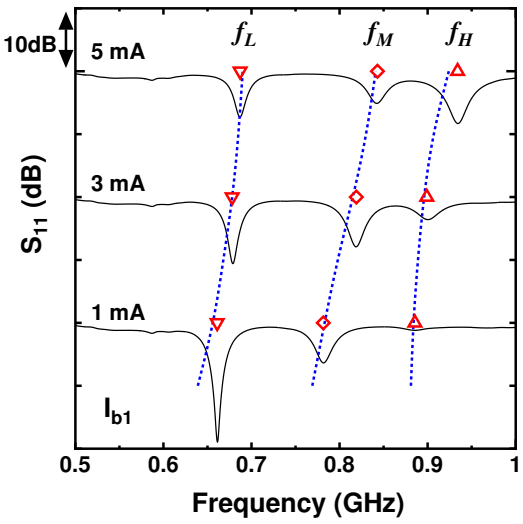


Fig. 1: S_{11} spectra for a tri-layered VLSRRs with different bias conditions.

ただし，ここでは最近接層間（一層と二層，二層と三層）の相互作用に加え，次近接層間（一層目と三層目）の相互作用も想定して評価した．その結果，Fig.1 のように，この周波数範囲においては比較的によく実験結果を説明できる結果を得た．発表では，層間距離を変化させた場合の相互作用の変化についても報告する．

1) N. I. Zheludev and Y. S. Kivshar, Nat. Mater., **11**, 917 (2012)
2) D. A. Powell, et al., Phys. Rev. **B 82**, 155128 (2010)
3) M. Baraclough, I. R. Hooper, and W. L. Barnes, Phys. Rev. **B 98**, 085146 (2018)
4) R. Nakao, et al., Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. 2024, 157 (2024)

© 2025年 応用物理学会

積層ナノビーム構造に基づく
高 Q 値モアレフォトニック結晶微小共振器の作製と評価

Fabrication and characterization of high-Q moiré photonic crystal nanocavities based on stacked nanobeams

慶応理工[1]，東大先端研[2]，東大ナノ量子機構[3] ○(M)伊藤 貴裕[1]、藤田 晃成[1]、伊藤 秀真[1]、S. Trushin[1]、權 晋寛[3]、 角田 雅弘[3]、荒川 泰彦[3]、岩本 敏[2]、 太田 泰友[1]

Keio Univ.[1], RCAST, the Univ. of Tokyo[2], NanoQuine[3]○T. Ito[1], A. Fujita[1], S. Ito[1], S. Trushin[1], J. Kwoen[3], M. Kakuda[3], Y. Arakawa[3], S. Iwamoto[2] and Y. Ota[1]

E-mail: fastsloth@keio.jp, ota@appi.keio.ac.jp

はじめに　モアレフォトニック結晶(PhC)におけるフラットバンド光局在は、再構成可能な高 Q 値微小光共振器を実現するアプローチとして注目されている[1,2]。しかし、高 Q 値モアレ微小光共振器の実験実証は単層に 2 つの周期構造を導入した重畳構造に留まっており[3]、積層モアレ PhC に基づく高 Q 値微小共振器構造は報告されていない。前回我々は、GaAs/Si ヘテロ積層ナノビーム PhC における高 Q 値(~ 10^5)かつ共振位置可変な 1 次元モアレ PhC 共振器の設計を報告した[4]。今回、初期検討として GaAs 積層ナノビーム構造に基づく 1 次元モアレ PhC を転写プリント法を用いて作製し、光学評価を行ったので報告する。

結果　今回検討した構造を Fig. 1(a)に示す。ガラス上に 2 層の GaAs ナノビーム(厚み 150 nm、幅 300 nm)が積層されている。上下層に形成された周期の異なる円孔アレイ(周期a_1, a_2)により 1 次元モアレ PhC が構成される。同構造に対し、(a_1,a_2) = (286, 294) nm として電磁界解析を行ったところ、波長 1086 nm 近傍で局在を伴うフラットバンド形成が確認された。検討下の積層モアレ PhC は通常の電子線リソグラフィーと転写プリント集積を組み合わせることで作製した。作製素子の光学および電子顕微鏡像を Fig. 1(b)に示す。積層角度ずれは~ 2 °であった。作製素子を低温(4.6 K)顕微分光法により評価した結果を Fig. 1(c)に示す。波長 1055 nm において空間局在を伴った Q~1000 の光共振ピークが観測された。詳細は当日報告する。

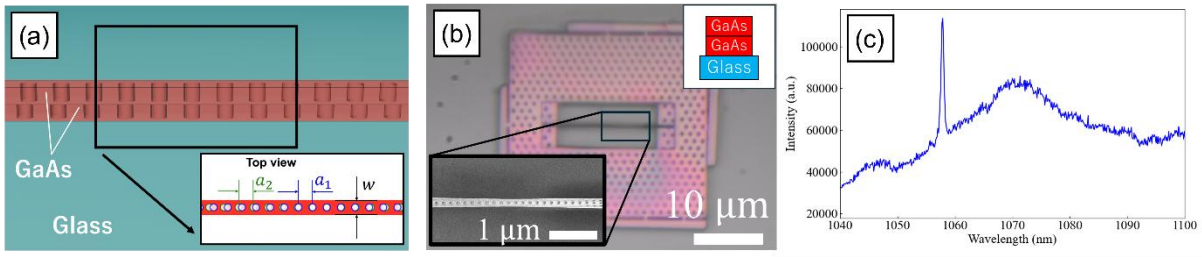


Figure 1 (a) Structure of the investigated moiré PhC based on stacked nanobeams. (b) Optical microscope image of the fabricated stacked nanobeams. The left lower inset shows a SEM image. (c) PL spectrum measured around the center of the structure.

参考文献 [1] Tang, H. *et al.* Light Sci. Appl. **10**, 157 (2021). [2] Nguyen, D. X. *et al.* Phys. Rev. Res. **4**, L032031 (2022). [3] X-R. Mao, *et al*. Nat. Nanotechnol. **16**, 1099 (2021). [4] 伊藤貴裕, 太田泰友他, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会 15p-K505-5 (2025). 謝辞　本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR213F および科研費 22H01994、22H00298 により遂行された。

© 2025年 応用物理学会

ツイスト積層モアレフォトニック結晶における局在共振器モードの観測

Observation of localized cavity modes in twist-stacked moiré photonic crystals

慶応理工[1]，東大先端研[2]，東大ナノ量子機構[3] (M)伊藤 秀真[1]、伊藤 貴裕[1]、藤田 晃成[1]
權 晋寛[3]、角田 雅弘[3]、荒川 泰彦[3]、岩本 敏[2]、 太田 泰友[1]
Keio Univ.[1], RCAST, the Univ. of Tokyo[2], NanoQuine[3], ◦S. Ito[1], T. Ito[1], A. Fujita[1],
J. Kwoen[3], M. Kakuda[3], Y Arakawa[3], S. Iwamoto[2] and Y. Ota[1]
E-mail: shuma.mx8@keio.jp, ota@appi.keio.ac.jp

はじめに ツイスト積層モアレフォトニック結晶では、ツイスト角や層間距離を調整することでフラットバンド形成[1]に基づく光局在が得られることが知られている。同構造は積層時におけるツイスト角や層間距離を変えることで共振状態を幅広く制御できるため、自由度の高い微小光共振器として注目されている。ごく最近、積層技術の開発が進み積層モアレフォトニック結晶による光共振観測の報告がなされたが、層間距離が制御されておらず実験Q値はわずか数十に留まっている[2, 3]。今回我々は、転写プリント法を用いて層間にガラス薄膜を挿入し層間距離を制御することで、積層モアレ構造に基づく局在共振器モードの観測に成功した。同共振モードは利得として QD を含む媒質において鋭いピークを示しており、レーザー発振が見込まれる。

結果 検討構造を Fig. 1(a)に示す。量子ドットを含む GaAs からなる三角格子フォトニック結晶スラブ(厚み 150 nm, 格子定数 295 nm, 空孔半径 85 nm)二枚を角度$\theta = 6.01^\circ$で回転積層した。中間層として、厚み 60 nm の SiO_2 層が挿入されている。同構造で見出されるフラットバンドモードの電磁場分布を Fig. 1(b)に示す。モアレ中心付近に強い局在が見られ、高Q値$Q\sim4.2\times10^4$が得られた。設計構造を転写プリント法により作製し(Fig. 1(c))、フォトルミネッセンス測定(4 K, 637 nm パルス励振)による光学評価を行ったところ、空間局在した鋭い共振ピークが見られた(Fig. 1(d))。また低励起状態において評価を行ったところ、Q値は$Q\sim5.8\times10^3$と見積もられた。作製・評価の詳細は、当日報告する。

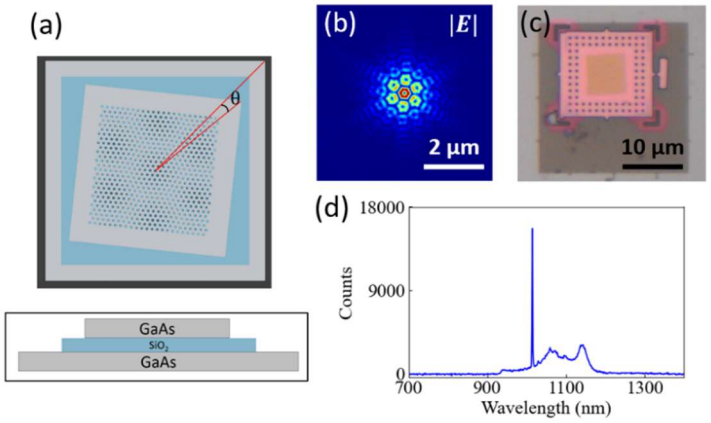


Figure. 1(a) Investigated twist-stacked moiré photonic crystal. (b) Field distribution of a cavity mode. (c) Optical microscope image of a fabricated structure, and (d) its experimental spectrum.

参考文献 [1] Tang, H. *et al. Light Sci. Appl.* **10**, 157 (2021). [2] Lesley Spencer. *et al*. arXiv:2502.09839. [3] Qing Wang. *et al*. arXiv:2503.04366. **謝辞** 本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR213F および科研費 22H01994、22H00298 により遂行された

© 2025年 応用物理学会

大面積コヒーレントフォトニック結晶レーザーアレイの動作解析

Analysis of a large-area coherent photonic-crystal laser array

京大院工[1], 京大高等研究院[2], ○井上卓也[1], 吉田昌宏[1], 石﨑賢司[1], De Zoysa Menaka[1], 野田進[1,2]

Kyoto Univ.[1], KUIAS[2] ○T. Inoue[1], M. Yoshida[1], K. Ishizaki[1], M. De Zoysa[1], S. Noda[1]

E-mail: t_inoue@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, noda.susumu.6a@kyoto-u.ac.jp

[序] 我々は、フォトニック結晶レーザー(PCSEL)の高出力・高輝度化の実現に向けて、フォトニック結晶の格子点設計の深化・最適化[1)]を進めており、これまでに、作製した 3 mmΦPCSEL の高輝度連続動作の実現に成功している[2)]。また、複数の PCSEL のコヒーレント結合動作の実現に向けて、外部光注入による PCSEL の位相同期動作の実証にも成功している[3,4)]。今回、多数（19 個）の単一モード PCSEL を互いに弱結合させたフォトニック結晶レーザーアレイの動作解析を行い、全ての PCSEL の同位相コヒーレント発振が実現可能であることを見出したので報告する。

[解析モデル] 大面積 PCSEL アレイの解析モデルを Fig. 1(a)に示す。デバイス全面に二重格子フォトニック結晶が導入されており、その中に、直径 1 mm の電流注入領域を三角格子状に 19 個配置した構造である。二重格子フォトニック結晶のエルミート・非エルミート結合係数[1)]の値は、直径 1 mm での単一モード動作に適した値（R=60 cm^{-1}, I=40 cm^{-1}, μ=40 cm^{-1}）を仮定した。アレイ間隔 D は 80 μm に設定しており、各電流注入領域からの電流拡がりと、発振光の再吸収によって、中間領域はほぼ透明状態となる。ただし、電流注入領域と中間領域の蓄積キャリア密度の差に起因して、中間領域は発振光に対して弱いモードギャップとして働き、光子は各電流注入領域に主に局在する。なお、本解析では、電流注入による発熱の効果は考慮せずに解析を行った。

[解析結果] 上記のアレイ構造に対して、合計 450 A の電流を注入した際の光子分布、遠視野像（FFP）、発振スペクトルの解析結果を Fig. 1(b)の上段に示す。拡がり角 0.02° 以下の単峰なビーム形状と、単一ピークの発振スペクトルが得られており、全ての PCSEL が同位相でコヒーレントに発振していることがわかる。比較のため、同じ結合係数のフォトニック結晶に対して、同面積の単一円電極（直径 4.3mm）からの電流注入を仮定して、発振特性の解析を行った結果を Fig. 1(b)の下段に示すが、電極直径に対して結合係数が大きすぎるため、多モード発振が生じていることがわかる。以上より、隣接する PCSEL 間の光注入率を調整しつつアレイ化を行うことで、大面積でのコヒーレント同期発振が実現可能であることが示唆される。詳細は当日報告する。

[謝辞] 本研究の一部は科研費（24H00430, 22H04915）および宇宙戦略基金のもとで行われた。

[文献] 1) Inoue *et al*., Nat. Commun. **13**, 3262 (2022). 2) Yoshida *et al*., Nature **618**, 727 (2023). 3) 井上他, 2024 年秋季応物 18a-A34-2. 4) 北田他, 本応物.

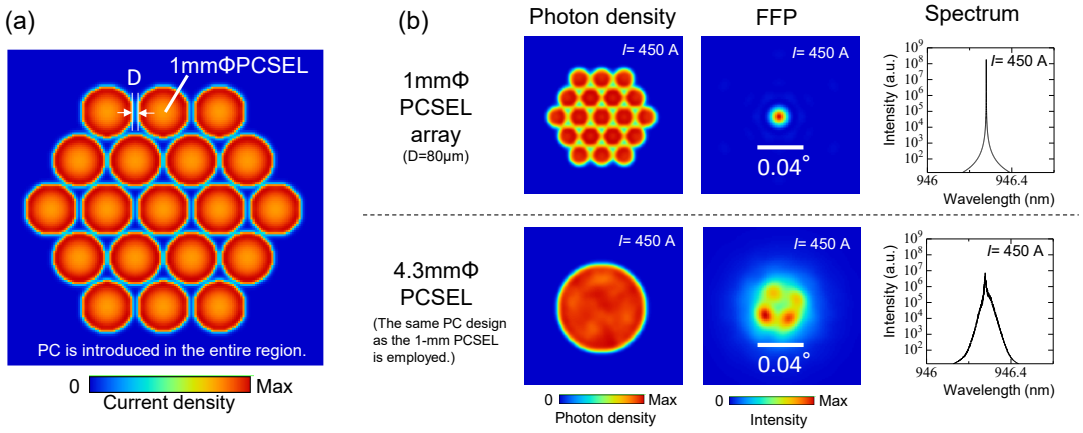


Fig. 1. (a) Simulation model of a coherent PCSEL array. (b) Calculated lasing characteristics of the coherent PCSEL array and a single-electrode PCSEL with the same emission area at 450 A.

© 2025年 応用物理学会

α線照射に対するフォトニック帯電センサの応答特性

Response characteristics of a photonic charge sensor to alpha radiation

大阪公大院工[1]，岡山大院環境生命自然[2]，若狭湾エネルギー研究センター[3]，理研光量子[4]
○高濱渉[1,2]，鈴木耕拓[3]，奥野泰希[4]，石原歩[1,2]，市之瀬陸人[1]，金丸優太[1]，山崎祥英[1]，
高橋和[1,2]

Osaka Met. Univ.[1], Okayama Univ.[2], The Wakasa Wan Energy Research Center[3], RIKEN RAP[4]
○W. Takahama[1,2], K. Suzuki[3], Y. Okuno[4], A. Ishihara[1,2], R. Ichinose[1], Y. Kanemaru[1],
S. Yamasaki[1], and Y. Takahashi[1,2]

E-mail: sk24054w@st.omu-u.ac.jp

序論　我々は，シリコンフォトニック結晶を用いた空間電荷検知技術を研究してきた[1-3]．本技術は空間電荷によりフォトニック結晶中に発生する自由キャリア吸収を用いて空間電荷を検知する．従来センサと比べて，電気技術を検知メカニズムに用いないため，放射線や静電気放電に強い特長を持つ．さらにセンサモジュールの小型化が期待できるため，空間電荷が長年課題になっている宇宙空間での利用に適すると考えられる．そこで我々は，フォトニック結晶導波路チップを組み込んだフォトニック帯電センサモジュールを開発し，宇宙機の電位計測や放射線計測に応用することを目指している．これまでに，真空中でのプラズマ検知，陽子線照射に対する高耐性を確認している[4,5]．今回，主要な宇宙放射線の 1 つであるα線照射に対する応答特性を調べるとともに，放射線がん治療法の 1 つである BNCT 治療で必要とされる中性子線検出センサ応用を検討したので報告する．

実験方法・結果　図 1(a)は帯電センサの中核をなすフォトニック結晶導波路，(b)は実験系の概要を示している．CMOS 互換プロセスにより作製されたフォトニック結晶チップは，3 cm 角サイズを持つモジュールの金属筐体内に設置された．入射光と透過光は，光ファイバと筐体内の微小レンズを介して導波路と結合する．α線照射実験は，若狭湾エネルギー研究センターのマイクロ波イオン源イオン注入装置を使用した[6]．図 1(c)は，10 keV，35 nA/cm^2 のα線を，真空度 1.8×10^{-5} Pa，温度 20 ℃において 30 秒間照射したときの透過光強度の時間変化である．このとき照射されたα線は，概算で宇宙の低軌道における約 60 年分に相当する．α線により光強度は減衰し，照射を止めた後の回復はほとんど観察されなかった．このことから，吸収の原因は，α線によりシリコン内に形成される欠陥が支配的であると推測される．中性子センサ応用など，詳細は当日報告する．

【謝辞】本研究は若狭湾エネルギー研究センター公募型共同研究，JST-START の支援を受けた．

【参考文献】[1] S. Yasuda, *et al.*, Opt. Express **29**, 16228 (2021). [2] M. Fujimoto, *et al.*, Opt. Continuum **2**, 349 (2023). [3] Y. Takahashi, *et al.*, Opt. Express **30**, 10694 (2022). [4] 大塚亘晟，他, 2024 年春季応物講演会 24p-11E-6. [5] 高濵渉，他, 2024 年秋季応物講演会 17p-A34-6. [6] S. Hatori, *et al.*, Quantum Beam Sci. **5(2)**, 14 (2021).

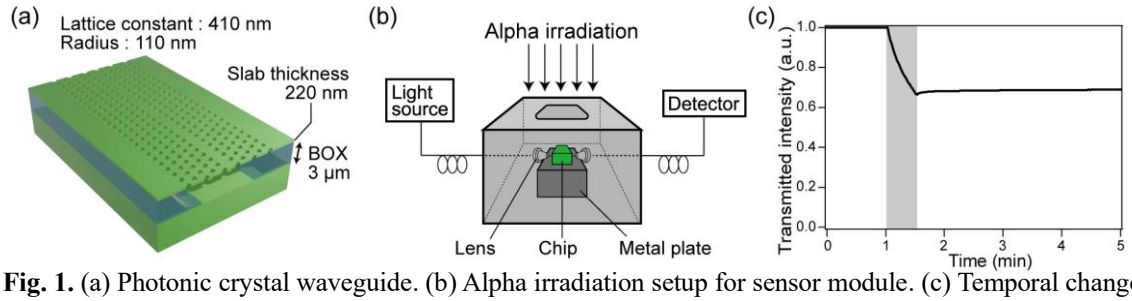


Fig. 1. (a) Photonic crystal waveguide. (b) Alpha irradiation setup for sensor module. (c) Temporal change in the intensity of the light transmitted through the module due to alpha irradiation.

© 2025年 応用物理学会

高 Q 値シリコンナノ共振器の放射線耐性評価：陽子線及びガンマ線による吸収損失
Radiation tolerance evaluation of high-Q silicon nanocavities: Absorption loss induced by proton and gamma irradiation

大阪公大院工[1]，岡山大院環境生命自然[2]，若狭湾エネルギー研究センター[3]
○石原 歩[1,2]，鈴木 耕拓[3]，高濱 渉[1,2]，大塚 亘晟[1]，高橋 和[1,2]
Osaka Met. Univ.[1], Okayama Univ.[2], The Wakasa Wan Energy Research Center[3]
○ A. Ishihara[1,2], K. Suzuki[3], W. Takahama[1,2], K. Otsuka[1], and Y. Takahashi[1,2]
E-mail: sj24832s@st.omu.ac.jp

序論　近年，人工衛星が取り扱うデータ量は飛躍的に増加しており，今後は衛星機内での情報処理の高速化および省エネルギー化が重要となる．この課題の解決策として，地上のデータセンターで活用されているシリコントランシーバ技術の宇宙応用が検討されている[1]．一方で，宇宙空間には高エネルギーの放射線が存在し，半導体デバイスに性能劣化を引き起こすことが知られている[2]．そのため，シリコンフォトニクス素子の宇宙応用には放射線耐性の評価が不可欠である．我々は，CMOS 互換プロセスで大量製造されたシリコンナノ共振器において，平均 Q 値 300 万以上の高 Q 値動作を実現している[3]．このような高 Q 値共振器に放射線を照射し，Q 値の低下を評価することで，ごくわずかな吸収損失の増加を正確に見積もることが可能となる．前回は，中性子線照射の影響について報告した[4]．本稿では，陽子線およびガンマ線の照射が，高 Q 値シリコンナノ共振器に与える吸収損失について報告する．

実験方法・結果　図 1 に，実験に使用したマルチヘテロ構造ナノ共振器の模式図を示す．陽子線照射は，エネルギー20 keV，ビーム電流 20 nA/cm^2 の条件で 1 分間行った（若狭湾エネルギー研究センターで実施，マイクロ波イオン源イオン注入装置を使用[5]）．ガンマ線は，千代田テクノルコバルト照射施設にて，総線量 10 kGy を照射した．いずれの照射においても，11 個のシリコンナノ共振器 に照射を行い，Q 値の変化を調べた．図 2(a), (b)に，陽子線，及びガンマ線照射に対する 11 個の共振器の Q 値変化を示す．表 1 には，照射前後における平均 Q 値（Q_{ave}）と，$1/Q_{loss} = 1/Q_{ave_after} - 1/Q_{ave_before}$ の式から算出した付加損失 $1/Q_{loss}$ を示す．陽子線照射後は，Q_{ave} が 251 万から 81 万へと低下し，付加された損失 $1/Q_{loss}$ は 8.31×10^{-7}，吸収係数換算では 1.61×10^{-2} cm^{-1} が見積もられた．ガンマ線照射による Q_{ave} の低下はこれよりも小さく，吸収係数に換算すると 1.10×10^{-2} cm^{-1} となった．今回照射した放射線量は，低軌道において，それぞれ約 24 年分，10 年分と見積もられる．本測定結果は，宇宙用シリコンフォトニクス素子開発のための基礎的指針を与えると期待される．

謝辞　本研究は若狭湾エネルギー研究センター公募型共同研究，JST-START 及び科研費の支援を受けた．

参考文献　[1] M. Dun, *et al*., Sci. Adv. **10**, eadi9171 (2024). [2] K. Toyoda, *et al*., IEEE T. Plasma Sci. **36**, 2413 (2008). [3] M. Katsura, *et al*., Opt. Express **31**, 37993 (2023). [4] 石原歩, 他, 2024 年秋季応物講演会, **20a-C42-9** [5] S. Hatori, et al., Quantum Beam Sci. **5(2)**, 14 (2021).

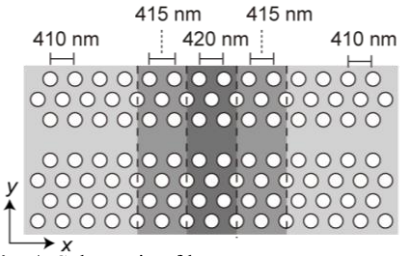


Fig. 1. Schematic of heterostructure nanocavity.

Table 1. Summary of experimental

	Q_{ave_before}	Q_{ave_after}	$1/Q_{loss}$
Proton beam irradiation (1 min)	2.51×10^6	8.13×10^5	8.31×10^{-7}
Gamma irradiation	2.25×10^6	2.00×10^5	5.65×10^{-8}

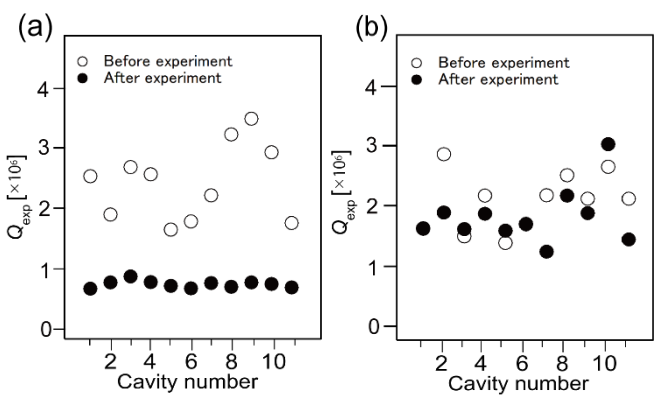


Fig. 2. (a) Q values before and after proton irradiation. (b) Q values before and after gamma irradiation.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.10 Photonic structures and phenomena

[10a-N221-1~10] 3.10 Photonic structures and phenomena

[10a-N221-1]
Investigation of double-lattice structure for high-beam-quality, narrow-divergence operation of modulated PCSELs

○Kenji Ishizaki[1], Souki Tnaka[1], Takuya Inoue[1], Menaka De Zoysa[1], Kouhei Kameda[1], Susumu Noda[1] (1.Kyoto Univ.)

[10a-N221-2]
Proposal and demonstration of continuously variable semiconductor pattern emitter

○Yoshitaka Kurosaka[1], Akio Ito[1], Masahiro Hitaka[1], Yutaka Takagi[1], Kosuke Hironaka[1], Kibo Ote[1], Tadataka Edamura[1] (1.Hamamatsu Photonics K.K.)

[10a-N221-3]
Study of optical skyrmion-skyrmionium hybrid lattice generation using integrated photonics

○Wenbo Lin[1], Tomohiro Amemiya[1], Yasutomo Ota[2], Satoshi Iwamoto[3] (1.Science Tokyo, 2.Keio Univ., 3.RCAST, Univ. Tokyo)

[10a-N221-4]
Design of short-pulse high-speed photonic-crystal surface-emitting lasers introducing global band-edge frequency distribution and separate electrodes (II) -Structural optimization for continuous-wave operation-

○Yuuki Shibata[1], Takuya Inoue[1], Ryohei Morita[1,2], Shouta Ishimura[3], Hidenori Takahashi[3], Takehiro Tsuritani[3], Masatoshi Suzuki[4], Susumu Noda[1,5] (1.Kyoto Univ., 2.Tohoku Univ., 3.KDDI Research, Inc., 4.CIST, 5.KUIAS)

[10a-N221-5]
Fabrication and Evaluation of a Metal-Loaded Si Waveguide for Generating OAM Light

○Masato Takiguchi[1,2], Ryuji Kuruma[3], Yuto Moritake[3], Eiichi Kuramochi[1,2], Hisashi Sumikura[1,2], Masaya Notomi[1,2,3] (1.NTT NPC, 2.NTT BRL, 3.Science Tokyo)

[10a-N221-6]
High-power operation of 1.3 μm-wavelength InP-based PCSELs with in-plane heterostructure

○Makoto Ogasawara[1,2], Yuhki Itoh[1,2], Takeshi Aoki[1,2], Kousuke Fujii[1], Shun Kimura[1], Yusuke Sawada[1,2], Hiroyuki Yoshinaga[1,2], Naoki Fujiwara[1,2], Hideki Yagi[1], Masaki Yanagisawa[1], Masahiro Yoshida[2], Takuya Inoue[2], Menaka De Zoysa[2], Kenji Ishizaki[2], Susumu Noda[2,3] (1.Sumitomo Electric Industries, 2.Kyoto Univ., 3.Kyoto Univ. Institute for Advanced Study)

[10a-N221-7]
Chiral OAM Mode Control by Complex Perturbations in Coupled Resonator Systems

○(M1)Kota Yagi[1,2], Takahiro Uemura[1,2], Yuto Moritake[1], Masaya Notomi[1,2,3] (1.Science Tokyo, 2.NTT BRL, 3.NTT NPC)

[10a-N221-8]
20 W peak power InP-based photonic crystal surface-emitting laser fabricated by mass production wafer process line

○Kazumasa Kishimoto[1], Daisuke Tsunami[1], Eiji Nakai[1], Shoyo Hara[1], Takahiro Ueno[1], Hirofumi Matsuoka[1], Ryo Okuhata[1], Yasuyuki Nakagawa[1], Yasunori Miyazaki[1] (1.Mitsubishi Electric Corp.)

[10a-N221-9]

Design of nanobeam photonic cavities for telecom quantum light sources based on vanadium center in SiC

○Wenbo Lin[1], Shigeru Nakagawa[1], Nobuhiko Nishiyama[1] (1.Science Tokyo)

[10a-N221-10]

Influence of surface oxidation on resonance characteristics of SiC and Si photonic nanocavities

○Heungjoon Kim[1], Bong-Shik Song[2], Susumu Noda[1,3], Takashi Asano[1] (1.Kyoto Univ., 2.Sungkyunkwan Univ., 3.KUIAS)

変調フォトニック結晶レーザーの高ビーム品質・狭発散角動作に向けた二重格子構造の深化

Investigation of double-lattice structure for high-beam-quality, narrow-divergence operation of modulated PCSELs

◦石崎 賢司，田中 聡記，井上 卓也, De Zoysa Menaka，亀田 航平，野田 進（京大）
◦K. Ishizaki, S. Tanaka, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Kameda, and S. Noda (Kyoto Univ.)
E-mail: ishizaki@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, noda.susumu.6a@kyoto-u.ac.jp

【序】 変調フォトニック結晶レーザー（M-PCSEL）は、2 次元フォトニック結晶のバンド構造における M 点での大面積共振作用を利用し、格子点にサイズや位置の変調を加えることで、外部光学系フリーで、ビーム出射方向の制御や様々なビームパターンの生成等を可能とする半導体レーザーである [1-3]。最近では、M-PCSEL の特徴を活かして、SPAD アレイ検出器と組み合わせた、オールチップ型 LiDAR への展開も行っている [4]。このような LiDAR においては、特に、関心領域における高空間分解能化が重要となる。基本的な空間分解能は、アレイ検出器の視野範囲と画素数で決定されるが、光源の出射ビームを十分に狭発散角化し、照射角度情報を併用することで、さらなる高空間分解能化が期待される。今回、多点ビーム出射 M-PCSEL の高ビーム品質・狭発散角動作の検討を行ったので報告する。

【結果】 図 1 には、多点ビーム出射 M-PCSEL の概念図を示すが、高ビーム品質・狭発散角動作を実現するためには、単一（もしくは少数）モードでの発振を維持しつつ、発振面積を拡大することが重要となる。これまでに、垂直出射（Γ 点）PCSEL において開発された、二重格子構造 [5] の適用可能性を、2 つの楕円からなる二重格子構造（図 1 挿入図中央参照）を有する直径 250μm の M-PCSEL にて検討してきたが [6]、本研究では、まず、その延長線での大面積化への適用可能性の検討を行った。結果として、2 つの楕円からなる二重格子構造では、2 次元結合（図 1 挿入図左側の $\kappa_{2D+,-}$）の異方性により、大面積化時に等方的な円形の狭発散角ビームを得ることが困難であることが判明した。そこで、$\kappa_{2D+,-}$の異方性を解消すべく、楕円と円を組み合わせた格子点（図 1 挿入図右側参照）を用いることを検討した。図 2 には、直径 1mm M-PCSEL のビームパターンの理論計算結果の一例を示すが、等方的な円形狭発散角動作が期待できることが分かる。そこで、本構造の有効性を示すために、～35°×35°範囲に 100 点同時出射可能な、直径 1mm M-PCSEL を作製し、遠視野像を評価した。その結果、図 3 に示すように、各点において半値全幅 0.1°以下の円形・狭発散角ビームを得ることに成功した。今後、結合係数の微調整や、面積の拡大により、発散角をさらに低減することが可能と考えられ、遠距離 LiDAR の高分解能化に繋がると期待される。詳細は当日報告する。

【謝辞】 本研究の一部は、NEDO 委託事業（JPNP23023）、科研費（22H04915, 24K01384）の支援を受けた。_【文献】 [1] S. Noda, et al., IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. **23**, 4900107 (2017). [2] R. Sakata, S. Noda, et al., Nat. Commun. **11**, 3487 (2020). [3] S. Noda et al., Nature Reviews Electrical Engineering **1**, 802 (2024). [4] 八木, 野田, 他 本応物. [5] T. Inoue, S. Noda, et al., Nat. Commun. **13**, 3262(2022). [6] 石崎, 野田, 他 2023 年秋季応物 22p-A308-9 (2023).

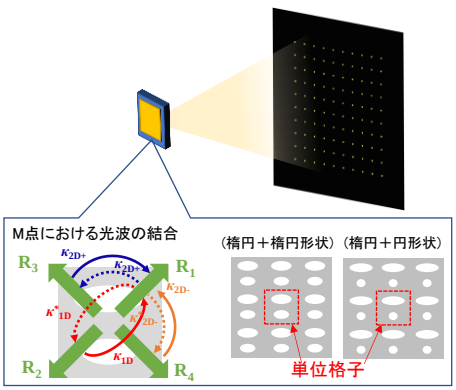


図1. 多点同時出射M-PCSELとM点二重格子フォトニック結晶の概念図。

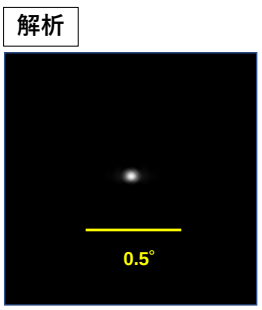


図2. 楕円+円形二重格子におけるビームパターンの解析結果。

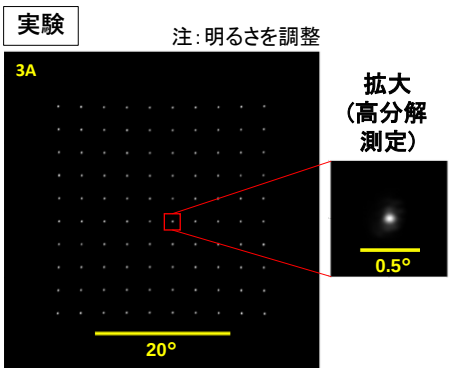


図3. 多点ビーム出射デバイスにおけるビームパターンの評価結果。

© 2025年 応用物理学会

パターン連続変化光源の提案と原理実証

Proposal and demonstration of continuously variable semiconductor pattern emitter

浜松ホトニクス㈱，○黒坂剛孝，伊藤昭生，日高正洋，高木豊，廣中厚祐，大手希望，枝村忠孝，
Hamamatsu Photonics K.K., ○Yoshitaka Kurosaka, Akio Ito, Masahiro Hitaka, Yutaka Takagi,
Kosuke Hironaka, Kibo Ote, Tadataka Edamura
E-mail: yoshitaka.kurosaka@crl.hpk.co.jp

我々は，フォトニック結晶レーザ[1]，および変調フォトニック結晶レーザ[2]をベースとしたパターン光源[3]の研究を行っている．発振後に波長と波数が単一となる通常のレーザとは異なり，発振後も様々な方向へ同時に出力するビームパターンが得られる興味深い光源である．これまでの研究から，ビームパターンを構成する輝点の数だけ，輝点方向に対応する波数へフォトニックバンドが複製されており[4]，単一波長で複数の波数で同時に発振することの説明が出来た．つまり，原理的に走査なしに，全ての瞬間に全ての波数へのビームが得られていることから，複数のパターンを波面として重ねることが可能であると期待される．今回，このようなパターン光源を複数コヒーレントに動作させ，遠方界で複素振幅としてビームパターンを重ねることにより連続的に変化可能なパターン光源を提案し，原理実証したので報告する．

作製した素子を図1に示す．コヒーレントな動作を実現するため2つのパターン光源を単一のフォトニック結晶共振器の中に埋め込んだ構造（図1（c））となっている．孔のシフト方法には回転方式と軸上シフト方式があるが[5]，位相に応じて軸上をシフトさせる軸上シフト方式（図1（d））とした．この場合，位相0に対応する孔位置は正方格子M点フォトニック結晶の格子点と一致し，パターン領域と正方格子領域をスムーズに接続することが出来る（図1（f））．原理実証に用いた要素パターンは位相差が互いに90°の正弦波分布である．この場合，干渉項なしに強度分布として重畳した場合には平坦分布となる．測定結果を図2（a），（b）に示す．2つの要素パターンの強度比に応じて連続的にパターンが変化しており，複素振幅としての重畳が実現出来ていると考えられる．図2（c）はトップハット形状とガウシアン形状の間を連続変化した例である．なお，本研究の一部は JSPS 科研費 JP23K04529 の助成を受けた．

[1] M. Imada, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **75,** 316 (1999), [2] 沖野，他，第 60 回応用物理学会春季学術講演会，28p-C1-17 (2013), [3] Y. Kurosaka, *et al.*, Sci. Rep. **6,** 30138 (2016), [4] Y. Kurosaka, *et al.*, Phys. Rev. B **103,** 245310 (2021),[5] Y. Takiguchi, *et al.*, Opt. Express **26,** 10787 (2018).

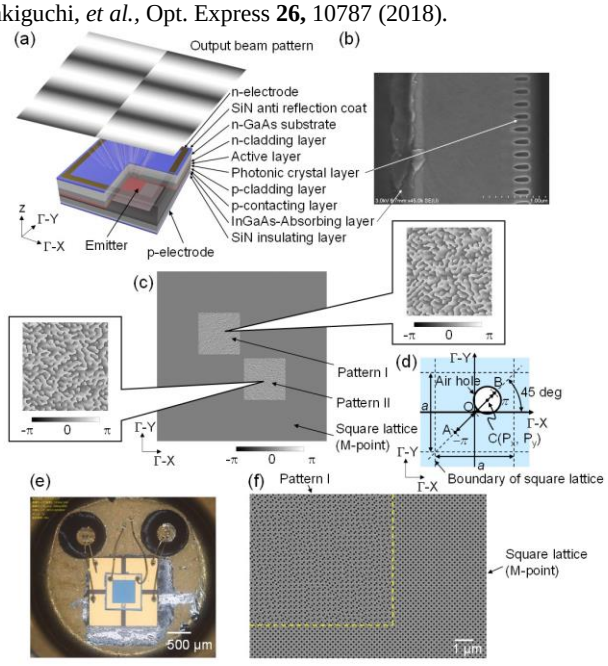


Fig.1 (a) Device structure, (b) Scanning microscopy image of the device cross-section, (c) Phase distribution of the photonic crystal layer, (d) Schematic of an air hole position, (e) Fabricated device, (f) Scanning microscopy image of the photonic crystal layer around the lower right area of pattern I.

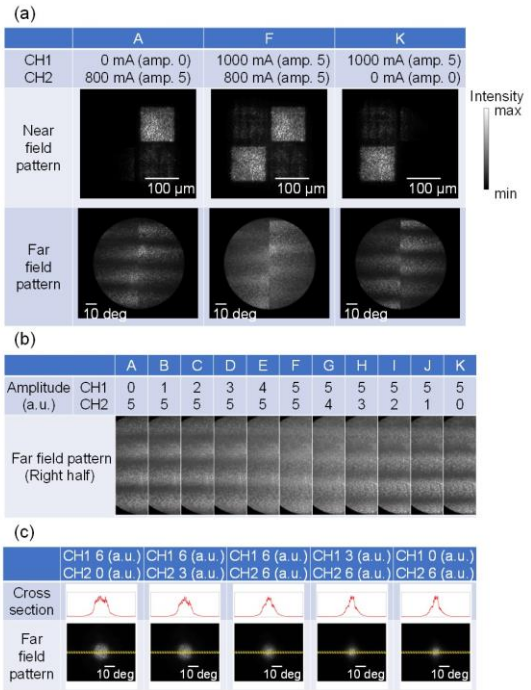


Fig.2 (a) Measurement results from the device, (b) Measurement far-field patterns in which the output amplitude ratios of CH1 and CH2 are varied, (c) Measurement far-field patterns for the Gaussian beam and the top hat beam.

© 2025年 応用物理学会

集積フォトニクスを用いた光スキルミオン-スキルミオニウム複合格子生成の検討

Study of optical skyrmion-skyrmionium hybrid lattice generation using integrated photonics

東京科学大 [1], 慶應大 [2], 東大先端研 [3], ○ 林 文博 [1], 雨宮 智宏 [1], 太田 泰友 [2], 岩本 敏 [3]
Science Tokyo[1], Keio Univ.[2], RCAST, Univ. Tokyo[3], ○W. Lin[1], T. Amemiya[1], Y. Ota[2], S. Iwamoto[3]
Email: lin.w.ebb4@m.isct.ac.jp

近年光スキルミオンや光ホプフィオン等の 2 次元・3 次元空間で定義されるトポロジカル光構造が続々と発見されている．これら高次元の光構造は従来から知られている光渦よりも優れた性質を持つことが期待され，実際に堅牢な情報媒体として光スキルミオンを活用する議論も出始めている [1, 2]．しかし，3 次元の構造を有する光ホプフィオンは極最近発見 [3–5] されたばかりであり，物理的性質/応用可能性の大部分は未だ帳が下りたままである．その中で我々は，伝搬可能な光ホプフィオンを構成する手法を見出しており [6]，光ホプフィオンの応用を広げる足掛かりを築いている．同提案ではオンチップで光ホプフィオンを生成する手法も検討しているが，前段階としてスキルミオニウム (極性の異なるスキルミオンの入れ子構造) 結晶を生成する必要があり，16 個もの偏光・位相が制御された円偏光放射源を並べることが求められる．一方，ナノフォトニクスによる実装を考慮すると，少ない放射源数かつ直線偏光の方が容易である．今回，光スキルミオニウムをより簡単に生成する手法を検討し，半数となる 8 個の直線偏光放射源を用いることでスキルミオニウムを内包する新奇空間偏光構造を得られることを見出したので報告する．

提案構成は図 1(a) に示す位相と偏光が制御された 4 セットの放射源ペアである．隣接ペア間は偏光軸と位相差の双方が $\pi/4$ ずつ回転しており，後述する光回路実装における光路長を考慮して偏光軸は縦軸・横軸からさらに $\pi/8$ 傾けられている．点光源を仮定したトイモデルによる解析では，遠視野において $|\circlearrowleft\rangle$ 偏光 (黒色の下向きストークスベクトルで表示) が○と × 状の分布を交互に繰り返す三目並べのような偏光分布を示し (図 1(b))，○と × 状の構造はそれぞれスキルミオニウムと少し特殊なスキルミオンとなっている (図 1(c))．この放射源配置の実装には図 1(d) に例示する集積光回路が考えられる．出射素子 (グレーティングカプラ) までの光路長は高い構造的な対称性により一定に保たれており，4 つの位相シフタにより位相を調整することで提案放射源構成を実現出来る．当日は光回路設計の詳細や光ホプフィオンへの展開も交えて報告する．

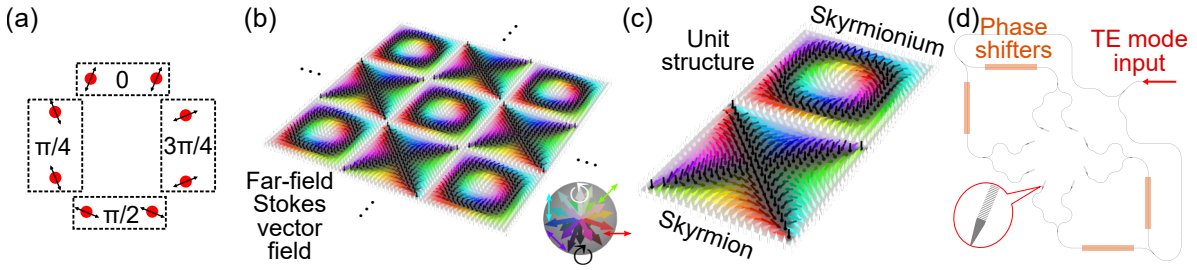


Fig. 1. **(a)** Schematic of the proposed emitter arrangement. Red dots indicate emitter positions, arrows represent polarization orientations, and accompanying text denotes the phase. Each emitter pair enclosed by dashed lines shares the same phase and polarization. **(b)** Far-field normalized Stokes vector distribution generated by the emitter array in (a) and **(c)** its unit structure. The bottom inset shows the color mapping used for visualizing the Stokes vectors: the vertical component S_3 is encoded as brightness/saturation, while the in-plane azimuthal angle $\mathrm{atan}\,(S_2/S_1)$ is mapped to hue. **(d)** Example configuration of a photonic circuit with wire-waveguides and grating couplers designed to implement the polarization pattern shown in (a).

参考文献: [1] C. Liu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **129**, 267401 (2022). [2] A. A. Wang *et al.*, Light. Sci. & Appl. **13**, 314 (2024). [3] D. Sugic *et al.*, Nat. Commun. **12**, 6785 (2021). [4] C. Wan *et al.*, eLight **2**, 22 (2022). [5] H. Wang and S. Fan, Phys. Rev. Lett. **131**, 263801 (2023). [6] W. Lin *et al.*, arXiv:2408.16226 (2024).
謝辞: 本研究はキヤノン財団，JST CREST(JPMJCR19T1) および同 ASPIRE(23837157) の助成を受けたものです．

© 2025年 応用物理学会

大域的バンド端周波数分布と分割電極を導入した短パルス・高速変調フォトニック結晶レーザーの検討（II）－連続動作に向けた構造最適化－

Design of short-pulse high-speed photonic-crystal surface-emitting lasers introducing global band-edge frequency distribution and separate electrodes (II) -Structural optimization for continuous-wave operation-

京大院工[1]，東北大院工[2]，KDDI 総合研[3]，千歳科技大[4]，京大高等研究院[5]，○柴田悠樹[1]，井上卓也[1]，森田遼平[1, 2]，石村昇太[3]，高橋英憲[3]，釣谷剛宏[3]，鈴木正敏[4]，野田進[1, 5]

Kyoto Univ.[1], Tohoku Univ.[2], KDDI Research, Inc.[3], CIST[4], KUIAS[5], ○Y. Shibata[1], T. Inoue[1], R. Morita[1, 2], S. Ishimura[3], H. Takahashi[3], T. Tsuritani[3], M. Suzuki[4], S. Noda[1, 5]

E-mail: shibata.y@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, noda.susumu.6a@kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー(PCSEL)[1]は、2 次元フォトニック結晶の特異点(Γ点等)での共振作用を用いた高輝度面発光レーザーである。我々は、これまで、PCSEL に大域的バンド端周波数分布を導入することによる高ピーク出力（>100 W）・短パルス動作の実証に成功するとともに [2,3]、同構造に分割電極構造を導入して直流電流と変調電流信号を独立に注入することで、短パルス・高速変調動作が実現可能になることを、発熱の影響を無視した初期的な数値解析によって提案した [4]。今回、上記で提案した分割電極を導入した短パルス・高速変調 PCSEL について、連続動作時の発熱の影響を考慮した厳密な数値解析手法による構造最適化を行った結果、タイミングジッタの大きさを抑制しつつ、短パルス・高ピーク出力・高速変調動作可能な構造の設計に成功したので報告する。

[解析結果] 検討する PCSEL の模式図を Fig. 1(a)(b)に示す。Fig. 1(a)に示すフォトニック結晶層には、中央が高周波数となるバンド端周波数分布を導入している。同構造では、初期状態では光が中央に局在して放射損失の高い状態となるが、発振後は光が外側に拡がって放射損失の低い状態へと遷移するため、Q スイッチングによる短パルス・高ピーク出力が得られる [3]。また、Fig. 1(b)に示すように、電流注入領域を 2 つに分割し、周囲の領域(A)に予め直流電流（振幅 I_1）を注入して多くのキャリアを蓄積しつつ、中央の領域に変調電流（振幅 I_2、バイアス電流 I_3、パルス幅 Δt、クロック周波数 f)を注入することで、小振幅の変調電流で高いピーク出力の光信号を得る [4]。ただし、連続動作時には、周囲の領域と中央領域の電流密度の差によって、面内に温度勾配が生じ、(a)で示したバンド端周波数が変化するため、パルス発振特性やビーム形状も変化する。そこで、今回、光・キャリア・熱の影響を自己無撞着に考慮した解析手法 [5] を用いて、連続動作時にも、変調信号に応じたタイミングジッタの少ない短パルス・高出力動作が実現可能な構造の設計を、共分散行列適応進化戦略による最適化により行った。設計変数は、中央領域 B の直径 d、注入電流条件(I_1, I_2, I_3, Δt)、バンド端周波数分布の形状、およびフォトニック結晶の結合係数を考慮し、高いピーク輝度 P と、小さなタイミングジッタ t_{jitter} が両立するように、P/t_{jitter}を最大化するような構造の探索を行った。探索結果の一例として、f=0.5 Gbaud の条件で最適化した構造(d = 121 μm、I_1 = 14.4 A、I_2 = 0.19 A、I_3 = 0.038 A、Δt = 0.95 ns)について、光出力の時間波形、遠視野像、アイダイアグラムを解析した結果を Fig.2(a)~(c)に示す。同図(a)(b)より、低振幅(<0.2A)の変調電流で、高ピーク出力（>40W）の短パルス発振が得られ、ビーム形状も単峰かつ狭発散角であることが分かる。また、同図(c)に示したアイダイアグラムから、タイミングジッタの標準偏差（19 ps）は、パルス幅（73 ps）よりも十分小さな値に抑制出来ていることが分かる。詳細は当日報告する。**[謝辞]** 本研究の一部は科研費（24H00430, 22H04915）および宇宙戦略基金の支援を受けた。

[文献] 1) Noda *et al*., Adv. Opt. Photon. **15**, 977 (2023). 2) Inoue *et al.,* Nat. Commun. **14**, 50 (2023). 3) 上田他, 2024 春季応物 22p-11E-7. 4) 柴田他, 2024 秋季応物 18a-A34-9. 5) Katsuno *et al*., Opt. Express **29**, 25118 (2021).

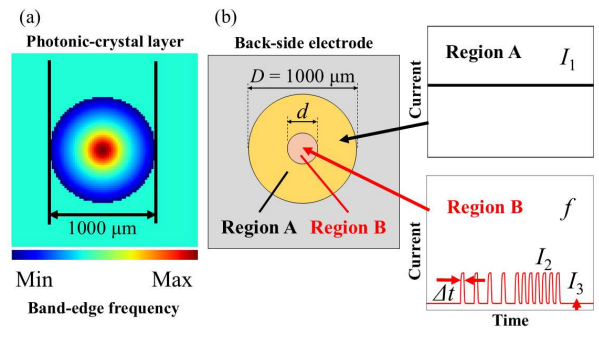


Fig. 1 (a)(b) Design of band-edge frequency distribution and back-side separate electrodes of the proposed short-pulse high-speed PCSEL. The rightmost panels show the injection current waveform for each electrode.

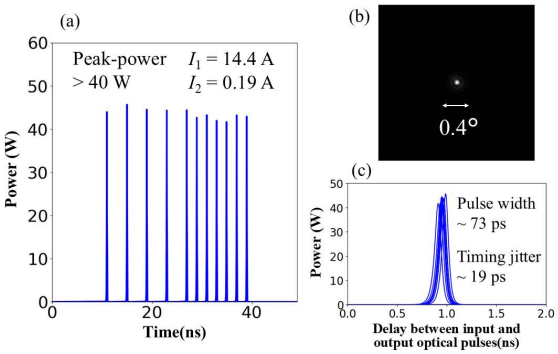


Fig. 2. Calculated output power (a), far-field pattern (b), and eye diagram (c), of the optimized PCSEL.

© 2025年 応用物理学会

OAM 光生成金属装荷 Si 導波路の作製と評価
Fabrication and Evaluation of a Metal-Loaded Si Waveguide for Generating OAM Light

NTT ナノフォトニクスセンタ [1], NTT 物性研 [2],科学大理 [3]
○滝口雅人 [1,2], 来馬龍治 [3], 森竹勇斗[3], 倉持栄一 [1,2], 角倉久史 [1,2], 納富雅也 [1,2,3]
NTT NPC[1], NTT BRL[2], Science Tokyo [3]
○M. Takiguchi[1,2], R. Kuruma[3], Y. Moritake[3], E. Kuramochi[1,2],
H. Sumikura[1,2], and M. Notomi[1,2,3]
E-mail: masato.takiguchi@ntt.com

トポロジカル光、すなわち螺旋波面を持つ光渦は軌道角運動量（OAM）を持ち、新たな次元の信号多重化、トルクをもつ光ピンセット、レーザ加工などへの応用の可能性から、光学分野で関心の高いテーマとなっている。これまで OAM 光はコンピュータホログラムや螺旋位相板などのバルキーな系や、メタ表面やリング共振器など数 10μm サイズのチップ上で実現されてきた。OAM 光は鏡映対称性を破る非エルミートな系を適切に最適化することで実現でき、我々はこれまで GaN 多角形中空ナノワイヤ[1]に金属構造を近接させた素子[2]や、中空ナノワイヤの穴の形状で散乱損失を加えた構造[3]など、鏡映対称性を壊す複素変調を用いた OAM 生成について研究してきた。さらに、作製面での課題も加味し、Si 矩形導波路にこの原理を適用することで、OAM を生成する金属装荷 Si 導波路構造の設計も行った[4]。そこで、本研究では、この Si 導波路を実際に作製し、その光学特性を評価した。

図 1(a)は設計した素子の概念図である。入力光は入力導波路から導入し、波数選択用の結合器を通して Cr 装荷した導波路へと出力される。作製では、Si 層が 700nm の SOI ウエハを用い、ドライエッチングで導波路構造を作製した。その後、リフトオフプロセスの Cr 細線構造を導波路上に装荷した。さらに、外界との対称性を維持するため、全体を PMMA で埋め込んでいる。図 1(b)は作製した OAM 生成用 Si 導波路の電子顕微鏡画像である。底辺 960 nm/上辺 860 nm の台形断面の Si 導波路に、幅 130 nm 厚み 23nm の Cr 細線を Si 導波路の導波路中心から 327 nm ずらした位置に装荷した。レーザの波長を掃引し、λ=1331 nm の時に出力光を赤外カメラで確認し、中央に穴のあるモードを観測した。図 1(c)のように、この出力光を参照光と干渉させたところ、$|l|=1$ を示す Y 字型の干渉パターンが観測できた。これは、この出力光が非エルミート摂動によって生成された OAM であることを示しており、計算結果ともよく一致した。本研究は JSPS 科研費 20H05641, 24H00400, 24K01377, JP24H02232 の助成を受けたものである。

[1] M. Takiguchi, et.al., ACS Photonics, 11, 789 (2024)
[2] 来馬, 滝口他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23a-11E-1
[3] Lim, 滝口他, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-K505-4
[4] 来馬, 滝口他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-A33-5

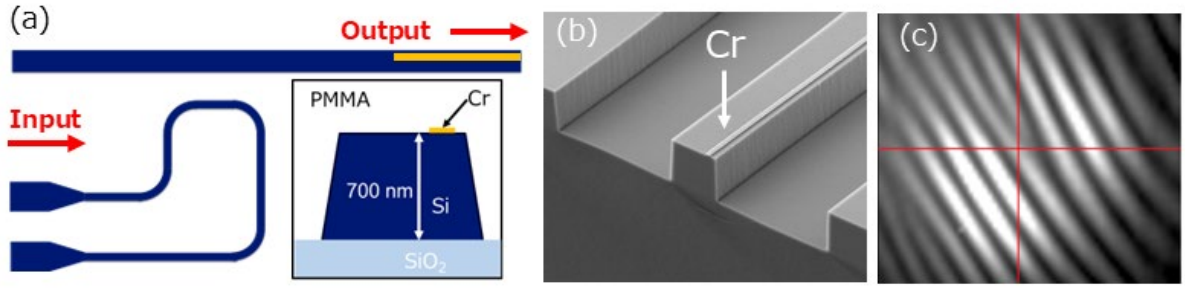


Fig. 1 (a) Schematic image of Cr-loaded Si waveguide and mode coupler. The inset shows a cross-sectional view of the Cr-loaded Si waveguide. (b) Cross-sectional angled SEM image of the Cr-loaded Si waveguide (c) Measured interference pattern of waveguide output and reference light.

© 2025年 応用物理学会

面内ヘテロ構造を有する InP 系フォトニック結晶レーザーの高出力動作

High-power operation of 1.3 μm-wavelength InP-based PCSELs with in-plane heterostructure

住友電工 [1]，京大院工 [2]，京大高等研究院 [3]，小笠原 誠 [1,2]，伊藤 友樹 [1,2] 青木 健志 [1,2]，藤井 康祐 [1]，木村 峻 [1]，
澤田 祐甫 [1,2]，吉永 弘幸 [1,2]，藤原 直樹 [1,2]，八木 英樹 [1]，柳沢 昌輝 [1]，
吉田 昌宏 [2]，井上 卓也 [2]，メーナカデゾイサ [2]，石崎 賢司 [2]，野田 進 [2,3]

Sumitomo Electric Industries[1], Kyoto Univ.[2,3], ○M. Ogasawara[1,2], Y. Itoh[1,2], T. Aoki[1,2], K. Fujii[1], S. Kimura[1],
Y. Sawada[1,2], H. Yoshinaga[1,2], N. Fujiwara[1,2], H. Yagi[1], M. Yanagisawa[1],
M. Yoshida[2], T. Inoue[2], M. D. Zoysa[2], K. Ishizaki[2] and S. Noda[2,3]

E-mail: ogasawara-makoto@sei.co.jp, noda.susumu.6a@kyoto-u.ac.jp

【はじめに】フォトニック結晶レーザー (PCSEL) は、活性層近傍に設けた 2 次元フォトニック結晶 (PC) における 2 次元共振を利用した面発光型の半導体レーザーであり、原理的に、高光出力・高ビーム品質なレーザー発振が可能である[1]。我々はこの特長を活かして、光通信やセンシング用光源として通信波長帯（1.3 μm, 1.55 μm）の InP 系 PCSEL を検討している。これまでに、1.3 μm 帯の InP 系 PCSEL において、二重格子 PC 構造及び金属ミラー電極の採用により室温 CW 駆動における高光出力（400 mW）かつ単一モード動作を実証してきた[2]。今回、面内ヘテロ構造[3]を InP 系 PCSEL に導入することにより、室温 CW 駆動において、700 mW の高光出力動作を実現したので、報告する。

【構造】Fig. 1(a)に従来の PC 構造及びそのフォトニックバンド構造の模式図を示す。面内に均一な二重格子 PC を有しており、CW 駆動時に高電流が注入されると、自己発熱により PC 領域の中心部の温度が上昇する。その結果、バンド端周波数が下に凸の分布となり、面内の光の閉じ込めが低下し、PC 端部に光が漏れるため、光出力が制限される。一方、Fig. 1(b)に示す面内ヘテロ構造では、空孔サイズを調整することで、中心部に比べて端部のバンド端周波数をあらかじめ低下させている。そのため、高電流注入時の自己発熱によるバンド端周波数の変形が生じても、端部のフォトニックバンドギャップにより光の漏れを抑制できるため、光出力が増大する。

【特性】作製した面内ヘテロ構造を有する PCSEL 及び、有しない従来構造の PCSEL の 25℃、CW 駆動時の電流-光出力特性を Fig. 2 に示す。いずれも p 電極直径は 200 μm である。低注入電流領域ではしきい値電流（200 mA）とスロープ効率（0.37 W/A）は両者でほぼ同等であるが、面内ヘテロ構造を有する PCSEL では、高注入電流領域において、設計通り光出力の向上を確認した。面内ヘテロ構造の導入により最大光出力が 550 mW から 700 mW に向上した。面内ヘテロ構造を有する PCSEL の 25°C、注入電流 2 A における遠視野像 (FFP) を Fig. 2 内に示す。円形の狭発散ビームを観測し、発散角は 0.75°であった。その他の特性については当日報告する。

【謝辞】本研究の一部は、内閣府 SIP プログラム・BRIDGE プログラム、科研費(22H04915, 24H00430)の支援を受けた。【参考文献】[1] S. Noda et al., Adv. Opt. Photonics 15, 977 (2023). [2] Y. Itoh et al., Optics Express 32, 12520 (2024). [3] T. Inoue et al., Opt. Express 28, 5050 (2020).

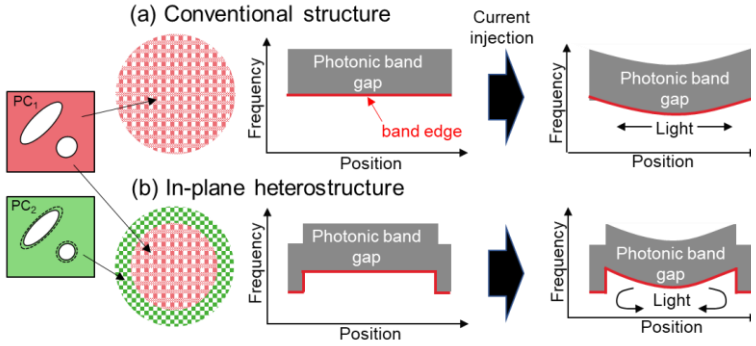


Fig.1 Top-view and photonic-band diagrams at high injection current of (a) conventional structure and (b) in-plane heterostructure.

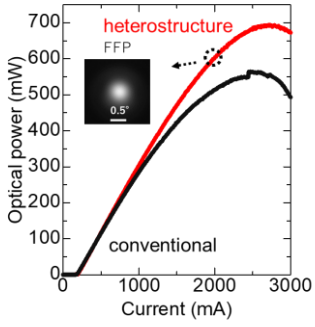


Fig.2 L-I characteristics of in-plane hetero and conventional PCSELs at 25°C under CW condition.

© 2025年 応用物理学会

複合共振器系における微小複素摂動による OAM 状態制御

Chiral OAM Mode Control by Complex Perturbations in Coupled Resonator Systems

科学大理 [1]，NTT 物性研 [2]，NTT NPC[3]

◦八木 滉太 [1,2]，上村 高広 [1,2]，森竹 勇斗 [1]，納富 雅也 [1,2,3]

1. Science Tokyo, 2.NTT BRL, 3. NTT NPC

◦Kota Yagi[1,2], Takahiro Uemura[1, 2], Yuto Moritake[1] and Masaya Notomi[1,2,3]

E-mail: yagi.k.9241@m.isct.ac.jp

非エルミート系に特有の特異点である例外点（EP）は、その近傍での摂動応答が顕著であることから超高感度センシングやカイラル光レーザー等の新しい原理として注目を集めている[1]。我々は、これまでに GaN 中空ナノワイヤに金属ナノ構造を近接させることで、光渦に対応する軌道角運動量（OAM）を持つモードが出現することを報告した[2]。しかし、類似の現象がどれだけ小さな摂動量で実現できるかということや、EP との関わりについての理解が進んでおらず、この現象の物理的起源を探ることは理論と実用の両面で大変興味深い対象である。そこで、本研究では、軌道角運動量を持つモードが生じる最も単純な系である結合三共振器系(Fig.1:(a))に対して、微小な複素摂動によってカイラルな OAM 状態が生成可能か調査した。具体的には、結合モード理論（CMT）により、微小な複素摂動によって誘起されるカイラル状態の発現と、例外点に関連したカイラルスイッチングが可能であることを示した。この結果は、非エルミートな微小摂動を用いた、新たな光スイッチとしての応用可能性を拓く。

Fig.1:(a)の構造の CMT によるモデルハミルトニアンは以下のようになる ：

$$H = H_0 + \alpha H'_+ + \beta H'_-, \quad H_0 = \begin{pmatrix} \omega_0 & \kappa & \kappa \\ \kappa & \omega_0 & \kappa \\ \kappa & \kappa & \omega_0 \end{pmatrix}, H'_\pm = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\pm i2\pi/3} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\pm i4\pi/3} \end{pmatrix}$$

ここで、共振器間の結合定数κと固有周波数ω_0によるH_0は無摂動状態のモデルハミルトニアンであり、α, β が摂動強度を表す。また、H'_+, H'_- は、系に与える複素摂動をモデル化したものである。そして、CMT による解析より求めた固有状態$\boldsymbol{a}$を用いてそれぞれ右回り、左回りに対応するカイラル成分L_+, L_-を評価した：

$$H\boldsymbol{a} = \omega\boldsymbol{a} \Rightarrow L_\pm = (a_1 + \exp(\pm i2\pi/3)a_2 + \exp(\pm i4\pi/3)a_3)/\sqrt{3}$$

Fig.1:(b)- (e)に、カイラル成分の非対称性 $L_{\mathbf{net}} = |L_+| - |L_-|$の摂動強度$\alpha, \beta$依存性を示す。(b)のカラーバーはカイラリティの非対称性の大きさに対応し、明線と暗線がそれぞれ右回り、左回りのカイラル成分の極大極小に対応している。特に、(c)に摂動H'_+の大きさ α に対する $L_{\mathbf{net}}$ の変化を示す。無摂動状態 $H_0(\alpha = \beta = 0)$ から無限小の摂動強度 $|\alpha/\kappa| \ll 1, \beta = 0$ を与えた場合にカイラリティが不連続に変化する。また、(d)と(e)は $\beta/\kappa = 0.2$ における L_{net} と複素固有値の α 依存性である。例外点においては、複素固有周波数の縮退が起こる。よって、 (b)の陽線と陰線は、それぞれカイラリティの極大極小点になっているだけでなく、それぞれが EP に対応していることが確認できる。また、パラメータ空間上で(b)の陽線と陰線との間を移動することでカイラリティの反転が実現される。 (b)のプロットにより、固定する β を小さくすることで、カイラリティの反転に必要な α の変調を小さくできる。カイラリティの反転に必要な α の変調量が少ないことは、カイラリティの反転に必要な消費エネルギーが小さいことに対応する。

発表では具体的な対象としてフォトニック結晶共振器構造での電磁場解析に基づく数値解析の結果も報告する。本研究は、微小な複素摂動によって生じる例外点物理の理解を深めると同時に、微小複素摂動による低消費エネルギーで動作可能な光スイッチング素子の設計指針を与える。

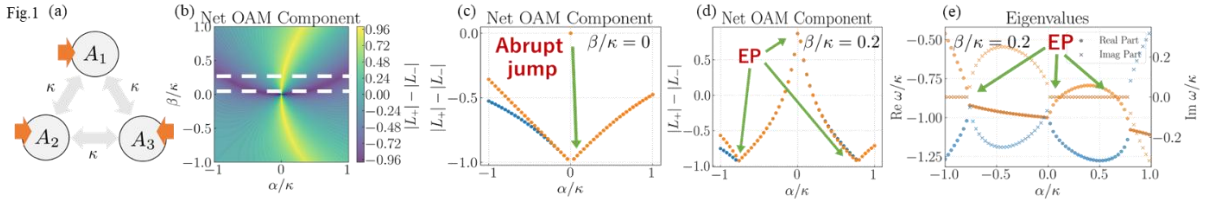


Fig.1 (a) Schematic of a triply-coupled resonator system. A complex frequency detuning is applied to each resonator. **(b)**:Dependence of chiral asymmetry on α and β. Dependence of chiral asymmetry on α for $\beta/\kappa = 0$ **(c)** and 0.2 **(d)**. **(e)**:Dependence of eigenvalues on α for $\beta/\kappa = 0.2$. (d) and (e) are evident that the extremum of the chiral asymmetry corresponds to the exceptional point (EP). The colors of line in (c)-(e) correspond to two modes that were degenerate in the unperturbated states.

【参考文献】[1] B. Peng, Ş. K. Özdemir, F. Lei, F. Monifi, M. Gianfreda, G. L. Long, S. Fan, F. Nori, C. M. Bender and L. Yang, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113, 6845 (2016). [2] Ryuji Kuruma et al. META 2024, Toyama, Japan, 2024. 【謝辞】本研究は、科学研究費補助金 (KAKENHI JP20H05641, 24K01377, 24H02232, 24H00400)の援助の下に行われた。

© 2025年 応用物理学会

量産ウェハプロセスラインによるパルス駆動・20 W 級 InP 系フォトニック結晶面発光レーザー

20 W peak power InP-based photonic crystal surface-emitting laser fabricated by mass production wafer process line

三菱電機株式会社，○岸本一誠，津波大介，中井栄治，原翔洋，上野貴寛，
松岡拓史，奥畑亮，中川康幸，宮崎泰典

Mitsubishi Electric Corporation, ○K. Kishimoto, D. Tsunami, E. Nakai, S. Hara, T. Ueno, H. Matsuoka, R. Okuhata, Y. Nakagawa, Y. Miyazaki

E-mail: Kishimoto.Kazumasa@bk.MitsubishiElectric.co.jp

【背景】 高出力、高ビーム品質を両立する半導体レーザー光源としてフォトニック結晶面発光レーザー（PCSEL）が注目されており、光センシング、レーザー加工機等への応用が検討されている。高い出力・ビーム品質を得るには大面積での安定したレーザー発振が必要であるが、これを実現するフォトニック結晶（PC）構造として二重格子構造が提案されている[1]。光センシング用としてはアイセーフの観点から 1.5 μm 帯にニーズがあり、二重格子構造及び p 電極ミラーを採用した同波長帯の InP 系 PCSEL で高出力・高ビーム品質が実証されている[2]。PCSEL の社会実装に向けては、上記性能に加えて、製造時の形状再現性を考慮した PC 設計、及び長期通電時の特性安定性が必要になる。

【検討内容】 光センシング用光源としての PCSEL の社会実装を想定し、生産性と特性の両立が可能な 1.5 μm 帯 InP 系 PCSEL の検討及び量産ウェハプロセスラインによる試作を行った。Fig. 1 に素子構造及び PC 構造模式図を示す。PC 構造は、共振器直径 D = 500 μm の大面積発振に有利な二重格子構造を採用した。孔形状については形状再現性が得られるようサイズ、アスペクト比調整を行いつつ、3 次元結合波理論[3]に基づく解析から結合係数κ_{1D}を適切に抑え、特性（出力、モード選択性）との両立を図った。p 側への回折光を出力光に寄与させるべく、p 電極ミラーの高反射率化及び p クラッド層厚調整を行った。活性層材料は高温動作に有利な AlGaInAs 系を採用した。

【試作結果】 今回試作した PCSEL のウェハ状態での写真を Fig. 2 に示す。チップ分離した PCSEL を 5.6Φ-CAN に実装し、パルス駆動時の *L-I* 特性、ビームプロファイル、及びスペクトルの測定を行った。結果を Fig. 3(a)、(b)に示す。ピーク光出力 21 W（50 A 注入時）、単峰かつ狭ビーム（約 0.4°）、単一波長でのレーザー発振が確認できる。さらに、パルスでの連続通電の結果を Fig. 3(c)に示す。初期的な光出力低下は見られず、長期通電における特性安定性を確認した。

【文献】 [1] S. Noda, *et al.*, Adv. Opt. Photonics **15**, 977 (2023). [2] T. Aoki, *et al.*, ISLC 2024, TuD1. [3] Y. Liang, *et al.*, Opt. Express **20**(14), 15945 (2012).

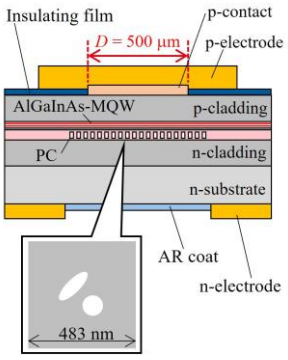


Fig. 1. Schematic view of PCSEL and PC.

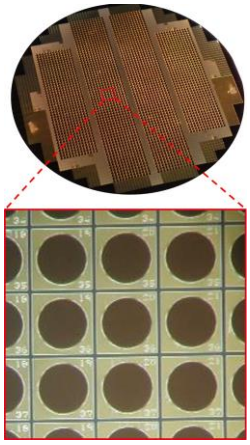


Fig. 2. PCSELs fabricated on an InP wafer.

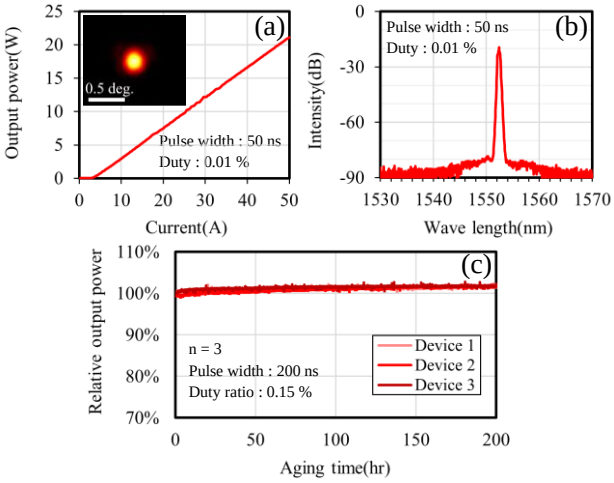


Fig. 3. (a)*L-I* characteristics, beam profile(inset), and (b)lasing spectrum under pulse operation. (c)The results of aging test under pulse operation at 80°C.

© 2025年 応用物理学会

SiC のバナジウム中心に基づく通信波長帯量子光源に向けたナノビーム光共振器の設計

Design of nanobeam photonic cavities for telecom quantum light sources based on vanadium center in SiC

東京科学大 [1], ○ 林 文博 [1], 中川 茂 [1], 西山 伸彦 [1]
Science Tokyo[1], ○W. Lin[1], S. Nakagawa[1], N. Nishiyama[1]
Email: lin.w.ebb4@m.isct.ac.jp

室温において量子状態の長距離伝搬を可能とする光子は量子技術の中核要素の 1 つに数えられ，単一の光子を生成する量子光源は量子技術の発展に不可欠である．数ある量子光源の内，ワイドギャップ半導体中の点欠陥 (色中心) は原子系のように超高真空やレーザー冷却を必要とせず，固体系としても半導体量子ドットに比べ安定した性質を示すことから有望なプラットフォームと目されている．一方，多くの色中心は遷移波長が可視域に位置するため長距離伝送に適さず，シリコン光回路との組み合わせも制限される．また，しばしばダイヤモンドのような高価かつ加工困難な材料系を用いるため，コスト面も課題となる．その中で近年，パワー半導体用基板として広く利用されている SiC において，バナジウム中心が O バンドの遷移波長を示すことが見出され [1]，同色中心は通信波長帯の量子光源として注目されている [2, 3]．しかし，SiC のバナジウム中心はバルク物性が明らかにされたばかりであり，微細構造を組み合わせた高機能素子の報告は未だ限られている．今回我々は，回折限界に近いモード体積を実現でき，結晶歪みの調整を通して物性の制御にも利用可能なナノビーム構造 [4] を用いた輻射場制御を検討したので報告する．

検討構造は図 1(a) に示す 4H-SiC の宙吊り細線 (幅 500 nm 厚み 300 nm) を基本構造とし，8 周期分の半径・周期長が変調された貫通穴配列により両側から挟むことで光共振器が構成される．4H-SiC の V^{4+} 中心は液体ヘリウム温度において遷移波長 $\approx 1.28\,\mu$m を示し [1]，同波長における屈折率 $n = 2.57$ を用いて数値解析を行った．穴半径を 90 nm から 120 nm へ，周期長を 320 nm から 430 nm へそれぞれ中心位置から線形に変調し，共振器長 $L = 130$ nm として 3 次元 FDTD 法による解析を行ったところ，中心波長 $\lambda \approx 1.277\,\mu$m において $Q \approx 3.6 \times 10^4$，モード体積 $V \approx 0.3\left(\frac{\lambda}{n}\right)^3$ の基本 TE モードが得られた (図 1(b))．同設計では，活性領域とモードの空間的・スペクトル的な重なりを考慮しない Purcell 係数 $F_\mathrm{p} = \frac{3}{4\pi^2}\left(\frac{\lambda}{n}\right)^3 \frac{Q}{V}$ が $\approx 10^4$ となり，大きな自然放出レート増強が期待できる．この設計を基に共振器長 L と周期長 A を変化させたところ，共振波長 $1.28 \pm 0.01\,\mu$m の範囲内でより大きな F_p の極大値 $\approx 2.3 \times 10^4 (L = 130\,\mathrm{nm},\ A = 490\,\mathrm{nm})$ が得られた (図 1(c))．当日は本設計に加え，Si 細線導波路への光結合に向けた構造最適化も含めて議論する．

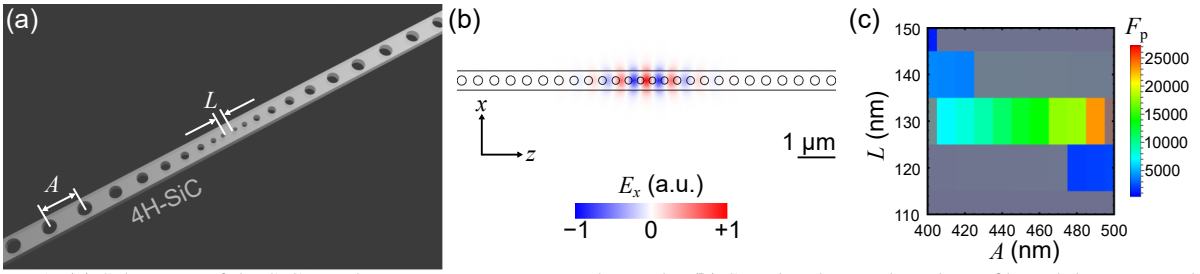


Fig. 1. **(a)** Schematic of the SiC nanobeam cavity structure under study. **(b)** Simulated optical mode profile, exhibiting a mode volume of $V \approx 0.3\left(\frac{\lambda}{n}\right)^3$. The cavity shape is outlined with solid black lines. **(c)** Calculated Purcell factor F_p as a function of cavity length L and period length A. The translucent gray region indicates parameter combinations resulting in wavelengths outside the range $1.28 \pm 0.01\,\mu$m.

参考文献: [1] L. Spindlberger *et al.*, Phys. Rev. Appl. **12**, 014015 (2019). [2] G. Wolfowicz *et al.*, Sci. Adv. **6**, eaaz1192 (2020). [3] P. Cilibrizzi *et al.*, Nat. Commun. **14**, 8448 (2023). [4] Y.-I. Sohn *et al.*, Nat. Commun. **9**, 2012 (2018).
謝辞: 本研究は JST ALCA-Next(JPMJAN24E6) および英国 EPSRC 共同プロジェクトの助成を受けたものです．

© 2025年 応用物理学会

Influence of surface oxidation on resonance characteristics of SiC and Si photonic nanocavities

◦H. Kim[1], B. S. Song[2], S. Noda[1,3], T. Asano[1]

Kyoto Univ. [1], Sungkyunkwan Univ. [2], KUIAS[3]

E-mail: songwiz@skku.edu, tasano@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp

Photonic crystal nanocavities based on semiconductors such as silicon (Si) [1] and silicon carbide (SiC) [2] have demonstrated ultrahigh Q factors exceeding 10^5 and small mode volumes on the order of a cubic wavelength in the material, thus playing a critical role in integrated photonic circuit architectures. However, once the fabricated cavities are exposed to ambient air, their resonance properties typically vary due to surface oxidation. In this work, we apply controlled oxidation using ozone gas followed by hydrofluoric acid (HF) treatment to Si and SiC cavities, and quantitatively investigate the influence of oxidation on the resonance characteristics.

Two samples of Si and SiC photonic crystal nanocavities with similar Q factors and resonant wavelengths are prepared. Two-step processing is used: surface oxidation via ozone gas (60 ppm) under ambient air, followed by hydrofluoric acid (HF) treatment to remove the oxide layers. The resonant spectra of both cavities are measured at each step. Figures 1(a) and 1(b) show the resonant spectra of the Si and SiC nanocavities before and after ozone oxidation, and after HF treatment, respectively. As shown in Fig. 1(a), the resonant spectrum of the Si cavity shifts toward shorter wavelengths by ~0.6 nm after ozone oxidation, and subsequent HF treatment further shifts it by ~1.6 nm, resulting in a total blue shift of ~2.2 nm. These are due to the surface oxidation of the cavity (which decreases the refractive index of the surface layer), and the removal of the oxidized layer (which further reduces the effective refractive index of the cavity), respectively. On the other hand, as shown in Fig. 1(b), the resonant wavelength of the SiC nanocavity slightly shifts to a longer wavelength by ~ 0.1 nm after ozone treatment, and subsequent HF treatment causes a shift to shorter wavelengths by ~ 0.13 nm, resulting in a small blue shift of 0.03 nm in total. It is clearly shown that the effects of surface oxidation are significantly smaller in the SiC nanocavity, which may be attributed to higher bond energy (~4.6 eV) of SiC compared to that (~3.2 eV) of Si. Moreover, the fact that a slight red shift observed after the oxidation of the SiC nanocavity (which corresponds to an increase in the refractive index) implies an oxidation mechanism different from that of Si [3]. We also repeat the above steps and measurements over two cycles and confirm the reproducibility, as shown in Fig. 2. Details will be presented at the conference. **Refs.:** [1] T. Asano, et al., Opt. Express 25, 1769 (2017), [2] B. S. Song, et al., Optica 6, 991 (2019), [3] G. G. Jernigan, et al., Appl. Phys. Lett. 77, 1437 (2000).

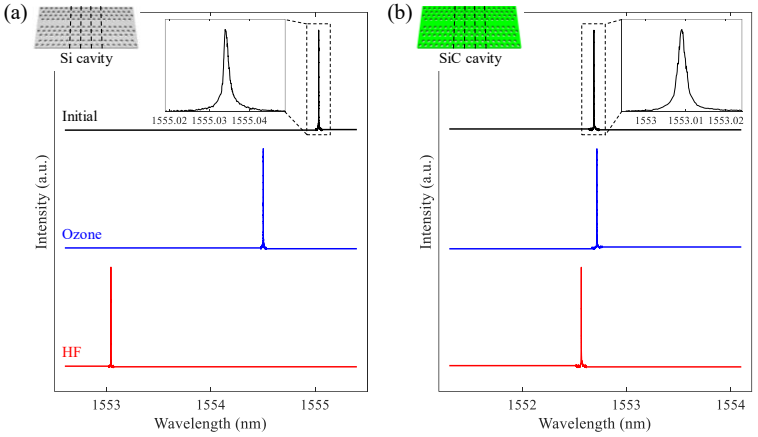


Fig. 1. Measured resonant spectra of the (a) Si and (b) SiC photonic crystal nanocavities after initial fabrication (black), ozone oxidation (blue), and HF treatment (red). Insets show magnified resonant spectra after initial fabrication

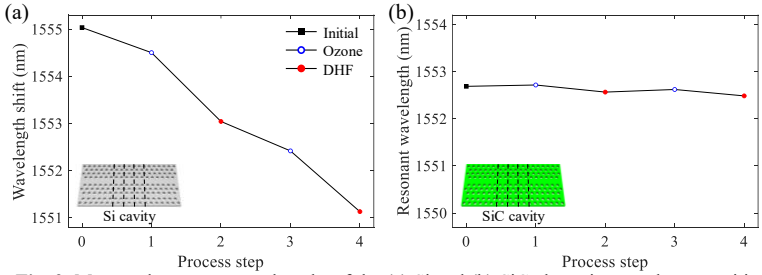


Fig. 2. Measured resonant wavelengths of the (a) Si and (b) SiC photonic crystal nanocavities during repeated cycles of ozone oxidation followed by HF treatment.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.10 Photonic structures and phenomena

[10p-N221-1~10] 3.10 Photonic structures and phenomena

[10p-N221-1]
Long term analysis of coupled nanocavity system using GPU-accelerated FDTD method

○(M1)Masahiro Horibe[1], Takashi Asano[1] (1.Kyoto Univ.)

[10p-N221-2]
Fabrication and Evaluation of an Inverse-Designed High-Q SiN Photonic Crystal L6/5 Cavity

○Masato Takiguchi[1,2], Xuen Zhen Lim[2], Peter Heidt[2], Takuma Aihara[3], Sotatsu Yanagimoto[2], Hisashi Sumikura[1,2], Masaya Notomi[1,2,4] (1.NTT NPC, 2.NTT BRL, 3.NTT DTL, 4.Science Tokyo)

[10p-N221-3]
Mode modulation of photonic crystal resonators using the phase-change material Sb_2Se_3.

○Keiju Iwatani[1,2], Takahiro Uemura[1,2], Yuto Moritake[1], Eiichi Kuramochi[2,3], Hisashi Sumikura[2,3], Masaya Notomi[1,2,3] (1.Science Tokyo, 2.NTT BRL, 3.NTT NPC)

[10p-N221-4]
Suppression of *Q*-factor variation in an asymmetric heterostructure nanocavity with the designed *Q*-factor exceeding 300 million

○(M1)Yuta Kanemaru[1], Takashi Asano[2], Rikuto Ichinose[1], Yasushi Takahashi[3] (1.Osaka Met. Univ., 2.Kyoto Univ., 3.Okayama Univ.)

[10p-N221-5]
Investigation of compact magneto-optical circulators based on a-Si photonic crystals with YIG defects

○(M1)Daisuke Sato[1], Kota Taniguchi[1], Yambe takeru[1], Siyuan Gao[1], Satoshi Iwamoto[2], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.RCAST, the Univ. of Tokyo)

[10p-N221-6]
Fabrication and optical characterization of photonic crystal nanocavities based on monocrystalline yttrium iron garnet

○Kota Taniguchi[1], Takeru Yambe[1], Daisuke Sato[1], Siyuan Gao[1], Hironobu Yoshimi[1], Hideo Otsuki[2], Satoshi Iwamoto[2], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.RCAST, the Univ. of Tokyo)

[10p-N221-7]
Investigation of photonic nanostructures with aperiodic monotile ~ cavity and waveguide

○Shunki Nakamura[1], Toshihiko Baba[1] (1.Yokohama Nat'l Univ.)

[10p-N221-8]
Investigation of slow light waveguides based on mode-coupling-induced BICs at off-high symmetry points

○(B)Sae Endo[1], Yuta Tanimura[1], Kenta Takata[2], Takahiro Uemura[3,4], Masaya Notomi[3,4,5], Satoshi Iwamoto[6], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.NTTRI PHI Lab, 3.Inst. Sci. Tokyo, 4.NTT BRL, 5.NTT NPC, 6.RCAST, Univ. of Tokyo)

[10p-N221-9]
Optimization of Topological Z-Bend Waveguide Characterization Using Transfer Learning

○(M2)QIANSHUO WANG[1], Liyan Hu[1], Xing-Xiang Wang[1], Sho Okada[2], Xiao Hu[3], Tomohiro Amemiya[1] (1.Institute of Science Tokyo, 2.National Institute of Information and Communications Technology, 3.Shanghai University)

[10p-N221-10]

Investigation on coupling of Si wire waveguides with three-dimensional crossovers

○Hironobu Yoshimi[1], Akinari Fujita[1], Siyuan Gao[1], Takahiro Ito[1], Yuma Tachizaki[1], Satoshi Iwamoto[2,3], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.RCAST, UTokyo, 3.IIS, UTokyo)

GPU で高速化した FDTD 法による共振器結合系の長時間解析

Long term analysis of coupled nanocavity system using GPU-accelerated FDTD method

京大院工　○堀部匡洋、　浅野卓
Kyoto Univ. ○M. Horibe, T. Asano
E-mail: tasano@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp

【序】フォトニック結晶光ナノ共振器は光を微小体積中に長時間閉じ込めることができ、光に対する特異な制御を行うことができる。我々はこれまでに、3 つの共振器を直列に結合した系で、中心の共振器の共振周波数を正弦波状に変調することで、両端の共振器間に方向に依存した位相差を持つ結合を形成可能であり、これを利用して非相反な光操作が可能となることをモード結合理論を用いて示してきた [1]。しかしながら、このような光操作を FDTD 法等の電磁界シミュレーションで再現するには、変調周期の数倍に相当する ns 程度の長い時間の数値解析が必要になるため、第一原理的な解析はできていなかった。今回、GPU を利用して高速に FDTD 計算を行うプログラムを作成し、共振器間結合の初期検討を行ったので報告する。**【プログラム】**GPU を用いて多くの FDTD セルを並列計算できる 2 次元 FDTD プログラムを作成した。これにより、440×2200 セル程度の領域を 1 億ステップ(7ns 程度に相当)計算するのに要する時間を 3.5 時間程度に短縮できた (Nvidia RTX 6000 Ada, CUDA core 数 18176 個, 単精度性能 91.1 TFLOPS を使用)。**【2 共振器結合系(変調なし)】**まず基本となる 2 つの共振器を導波路を介して結合させた系(図(a))の計算を行った。片方の共振器を励振したところ図(b)に示すように 0.21ns の周期で 2 つの共振器間でエネルギーが振動する様子が計算できた。この振動周波数から計算される共振器間の結合係数は 14.7 Grad/s であり、これは別途計算した共振器と導波路の結合の Q 値(3.994 万)からモード結合理論によって得られる結合係数値 14.65 Grad/s とほぼ一致した。若干のエネルギーの減衰は吸収境界の影響と考えられる。**【3 共振器結合系】**図(c)に示す 3 共振器結合系に対して、制御用の共振器 C に変調を加えない場合と、共振器 C に変調周波数 7.31GHz, 最大周波数変化量 113.4GHz の周波数変調を加えた場合の計算を行った。その結果、図(d)に示すように、前者ではエネルギーは共振器 L に留まるが、後者では共振器 R に移行する様子が確認できた。今後、パラメータの調整により完全なエネルギーの移行も可能と考えられる。詳細は当日報告する。**【参考文献】**[1] 永江 他, 2024 秋応物, 17p-A34-7.**【謝辞】**本研究の一部は科研費 25K01695 の支援を受けた。

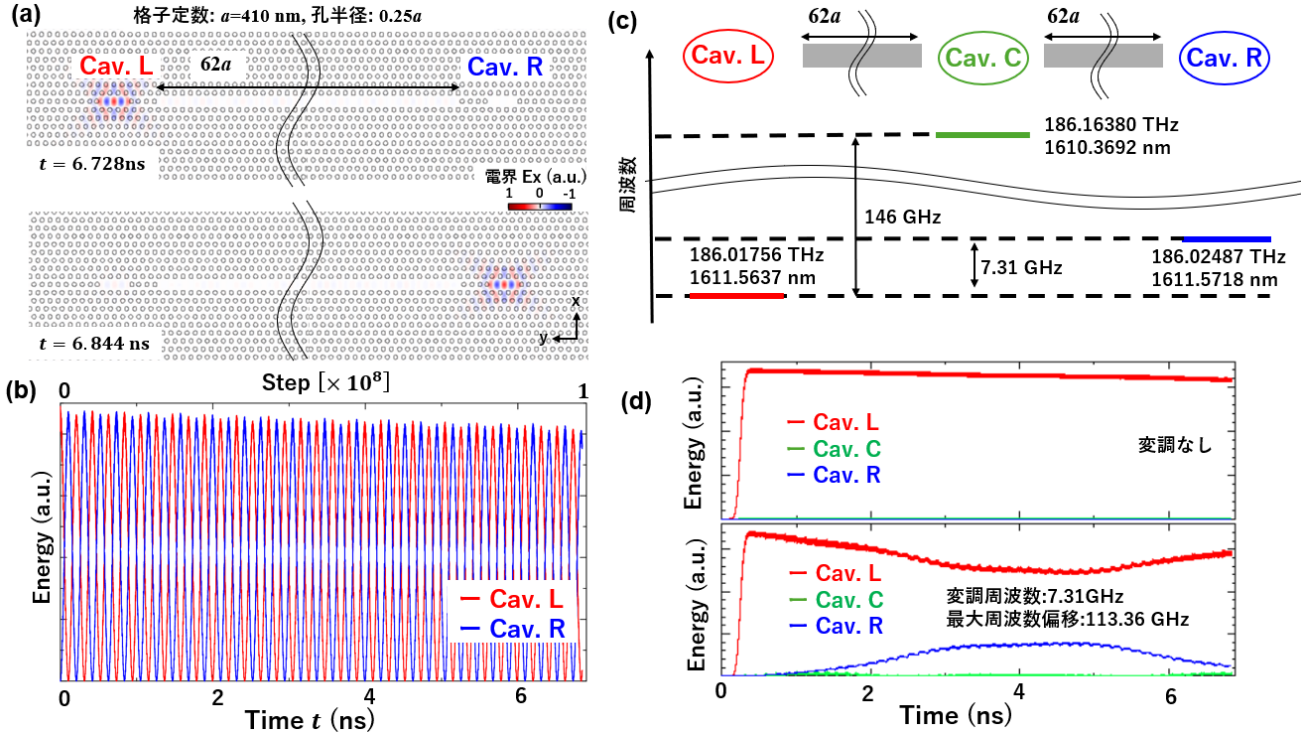


図: (a)導波路を介した共振器結合系の構造と電界のスナップショットの例。 (b) 導波路を介した結合による Cav. L と Cav. R の間のエネルギー振動の様子。(c) 3 共振器結合系の模式図。(d) Cav. C に変調を加えていないとき(上)と加えたとき(下)の Cav. L, Cav. R, および Cav. C のエネルギーの時間変化。

© 2025年 応用物理学会

逆設計による高 Q-SiN フォトニック結晶 L6 /5 共振器の作製と評価
Fabrication and Evaluation of an Inverse-Designed High-Q SiN Photonic Crystal L6/5 Cavity

NTT ﾅﾉﾌｫﾄﾆｸｽｾﾝﾀ [1], NTT 物性研 [2], NTT 先デ研 [3], 科学大理 [4]
○滝口雅人 [1,2], X. Z. Lim[1,2], P. Heidt[1,2], 相原卓磨 [1,3], 柳本宗達 [1,2], 角倉久史 [1,2], 納富雅也 [1,2,4]
NTT NPC[1], NTT BRL[2], NTT DTL[3], Science Tokyo[4]
○M. Takiguchi[1,2], X. Z. Lim[1,2], P. Heidt[1,2], T. Aihara[1,3], S. Yanagimoto[1,2], H. Sumikura[1,2], and M. Notomi[1,2,4]
E-mail: masato.takiguchi@ntt.com

窒化シリコン（SiN）は、CMOS 互換の材料で可視光に透過性を持ち、低損失という特徴がある。さらに、Si と異なり 2 光子吸収が無いため熱光学効果が小さく、光学非線形の発現閾値が高いため高出力動作にも適しており、将来の可視プラットフォームとして有望である。そこでこのプラットフォームに光学機能素子を実装することは重要であり、SiN を使った高性能なフォトニック結晶（PhC）共振器の実現や、可視材料を用いたハイブリッド集積は重要なマイルストーンとなっている。しかしながら、これまで決定論的方法で設計した 2 次元 SiN PhC 共振器において高 Q/V の報告例はない（V:モード体積）。この理由は主に、SiN が低屈折率材料であり空気との屈折率コントラストが低いためバンドギャップが大きく開かない、また、Si に比べて面外損失が非常に大きいことがあげられる。そこでこれまで我々は、逆設計の手法を用いて Q 値が 50 万を超える L6/5 型 PhC 共振器構造を設計し（屈折率 n = 2.0）、これまで報告されている SiN Lx 型共振器の Q 値を 2 桁改善し、V も 30%ほど小さくすることに成功した[1]。さらに本研究では、この逆設計[2]で作製した共振器を実際に作製し、その特性を評価した。

図 1(a)は、有限要素法で計算した最適化後の L6/5 PhC 共振器の電場分布である。最適化では空孔位置に関して 54 個（27 個の空孔）のパラメータを変調した。格子定数 a、厚み T、半径 r は、波長λに対して、a = 0.444×λ、T = 0.5×a、r = 0.25×a の関係を持つ。SiN は PE-CVD で Si 上に成膜した。PhC 構造は電子線描画/CHF_3 系ドライエッチングで作製し、Si を KOH でウェットエッチングすることでエアブリッジ化している。この共振器は入出力導波路を持ち、共振器/導波路共にエアブリッジ構造をもつ（図 1(b)）。図 1(c)は格子定数 740 nm のサンプルの透過測定スペクトルで、Q は 84000 であった。本共振器は計算上の共振波長ともよく一致し、実験的にも Q 値が結合導波路の位置依存性を示すことから、確かに所望の共振器モードであると結論付けた。本研究は JSPS 科研費 23H01888 の助成を受けたものである。

[1] Heidt, 滝口他, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-A501-3
[2] M. Takiguchi, et.al., Opt. Express, 33, 2060 (2025)

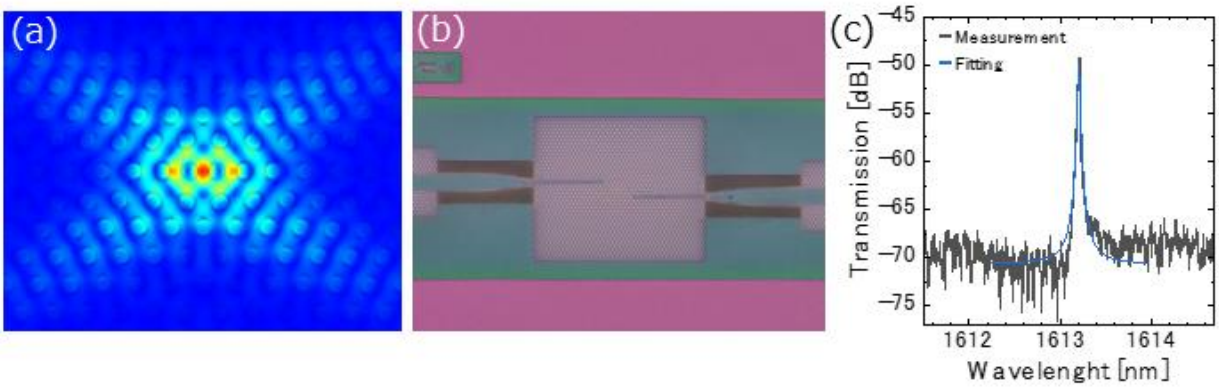


Fig. 1 (a) Simulated electric field of SiN L6/5 cavity. (b) Optical microscope image of SiN photonic crystal cavity with input-output waveguide (c) Measured cavity spectra.

© 2025年 応用物理学会

相変化材料 Sb_2Se_3 によるフォトニック結晶共振器のモード変調

Mode modulation of photonic crystal resonators using the phase-change material Sb_2Se_3

[1] 科学大理，[2]NTT 物性研，[3]NTT NPC

○岩谷 圭樹[1,2]，上村 高広[1,2]，森竹 勇斗[1]，倉持 栄一[2,3]，角倉 久史[2,3]，納富 雅也[1,2,3]

[1]Science Tokyo, [2]NTT BRL, [3]NTT NPC

○Keiju Iwatani[1,2], Takahiro Uemura[1,2], Yuto Moritake[1], Eiichi Kuramochi[2,3], Hisashi Sumikura[2,3], Masaya Notomi[1,2,3]

E-mail: iwatani.k.90ce@m.isct.ac.jp

フォトニック結晶共振器は、わずかな屈折率変調でも大きなモード変調が実現できるため、低損失かつ高集積な光スイッチや不揮発性メモリへの応用が期待されている。我々はこれまで、相変化材料である$Ge_2Sb_2Te_5$(GST)を使用して、フォトニック結晶共振器のモードチューニングが実現できることを報告した [1]。一方で、GSTの複素屈折率はアモルファス相で$4.39 + 0.16i$、結晶相で$7.25 + 1.55i$と大きな材料吸収を持つため、大きなモード変調を観測するためにGSTの装荷量を増やすと、共振器のQ値が減少し共振ピークが不明瞭になる問題があった。今回、アモルファス相と結晶相の両相で消衰係数が10^{-3}オーダー以下[2]の透明な相変化材料であるSb_2Se_3を用いることで、相転移前後で[1]に比べて高いQ値を維持したまま、共振モードを変調することに成功したので報告する。

Fig.1(a)に、Sb_2Se_3装荷L5シリコンフォトニック結晶共振器の模式図を示す。格子定数$a = 400$ nm, 丸穴半径$r = 100$ nm, スラブ厚$h = 200$ nm とした。Sb_2Se_3ナノ薄膜は、縦方向を$l_y = 200\sqrt{3}$ nmに固定し、 横方向l_xを$0 \sim 5a$の範囲で変化させ、膜厚を30 nmに設定してフォトニック結晶の欠陥中心に装荷した。リフトオフ直後のSb_2Se_3はアモルファス相であり、ホットプレートによるアニール（200℃、10分）によって結晶化を実現した。それぞれ場合について共振器に透過光スペクトルを測定し、共振ピークの変化を調査した。Fig.1(b)から、アニールの前後で最大で共振波長に8 nmのシフト(Fig.1(c))を確認した。得られた共振波長シフトは、数値シミュレーションとおおむね一致する。Fig.1(d)に対応する共振Q値を示し、最大の波長シフトを達成した $l_x = 5a$ におけるQ値は結晶相で$Q = 900$であった。GST装荷フォトニック結晶共振器[1]では吸収が大きいため、明瞭な共振ピークを観測するにはQ値(Q>200)を維持する必要があり、そのためGSTの装荷量に制限があった。結果として先行研究[1]では1stピークの共振波長シフトは、約1 nmが限界であった。低損失なSb_2Se_3を使用したことで比較的高いQ値を維持できていることこそが、GST[1]では実現できなかった大きなピークシフトを実現できた直接的な要因である。以上の結果は、Sb_2Se_3の相変化によるフォトニック結晶共振器の高効率なモード変調を実証するものである。本構造は、材料損失が小さくより性能の高い低損失かつ高集積な光スイッチや不揮発性メモリへの指針となる。さらに講演では、単なるモードチューニングに留まらず、W1導波路上のSb_2Se_3の相状態を制御することで、[1]と同様に相変化による共振器の生成、消滅が可能であることを報告する。

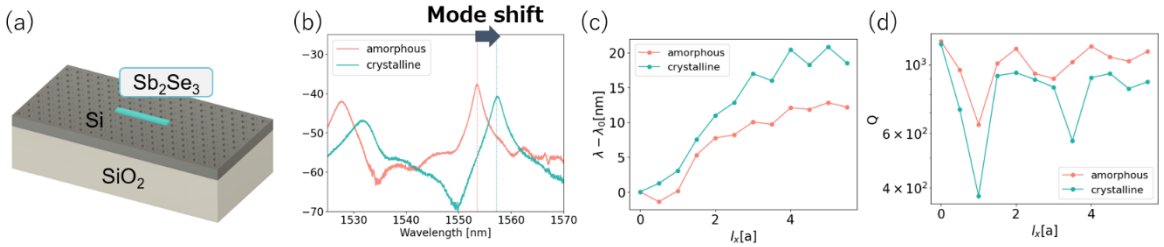


Fig.1 (a) Schematic of L5 photonic crystal resonator with Sb_2Se_3. (b) Moving-averaged transmittance spectra before and after annealing (smoothed over a ± 50 pm window). (c) Dependence of the resonance wavelength on l_x. (c) Dependence of the Q factor on l_x.

【参考文献】[1] T. uemura et al. *Opt. Express*. **32**, 1802–1824 (2024). [2] M. Delaney et al. *Adv.Funct. Mater*. **30**, 2002447 (2020).

【謝辞】本研究は、科学研究費補助金 (KAKENHI JP20H05641, JP21K14551, 23K26581, 24K01377, 24H02232 および 24H00400)の援助の下に行われた。

© 2025年 応用物理学会

設計 Q 値 3 億を越える非対称ヘテロ構造ナノ共振器の Q 値ばらつき抑制

Suppression of Q-factor variation in an asymmetric heterostructure nanocavity with the designed Q-factor exceeding 300 million

大阪公大院工 [1]，京大院工 [2]，岡山大院環境生命自然 [3]
◦(M1)金丸 優太 [1]，浅野 卓 [2]，市之瀬 陸人 [1]，高橋 和 [1,3]
Osaka Metro. Univ.[1], Kyoto Univ. [2], Okayama Univ[3]
◦Y. Kanemaru[1], T. Asano[2], R. Ichinose[1], and Y. Takahashi[1,3]
E-mail: sr25622m@st.omu.ac.jp

【概要】我々はフォトニック結晶ナノ共振器の高 Q 値化に取り組みヘテロ構造共振器[1]をベースとした構造において 1100 万の高い実験 Q 値を達成している[2]．しかし応用を見据えると，サンプル間の Q 値ばらつきを抑制することも重要である．Q 値ばらつきの主因は作製精度に起因する空気孔の位置・半径揺らぎであるため[3]，この課題に対しては，作製精度の向上に加え，空気孔揺らぎの影響を受けにくい構造を見出すことが有力な方策である．これまでに我々は，共振器中心に対して空気孔の位置が鏡面対称性を持たないナノ共振器（非対称共振器）に注目し，その有効性を調べてきた．その結果，Q 値 25 万を有する非対称 L3 型共振器では，対称 L3 型と比較して Q 値ばらつきが 39% 抑制されることを実験的に確認した[4]．次なる関心は，数千万以上の設計 Q 値が得られるヘテロ構造ナノ共振器にも，本戦略が有効であるかどうかである．今回，設計 Q 値が 3 億を超える非対称ヘテロ構造ナノ共振器（図 1）を機械学習を活用して設計し，その Q 値ばらつきを調査したので報告する．

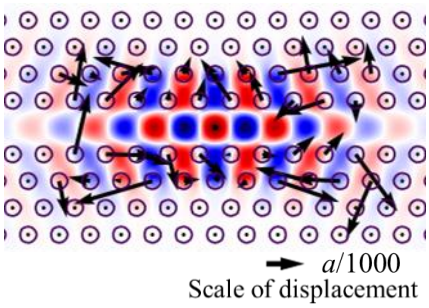


Fig. 1. Asymmetric hetero nanocavity.

【実験方法・結果】図 2 に示す設計 Q 値 1.27 億を持つ対称ヘテロ共振器の各空気孔に対して標準偏差 0.001a の位置シフトをランダムに与えた非対称な共振器を 1000 個用意し，その Q 値を FDTD 法によって計算した．これをデータセットとして用いて，ニューラルネットワークに空気孔位置シフトパターンと Q 値の関係を学習させた．そして学習後のニューラルネットワークに構造変化に対する Q 値の勾配を予測させ，それをもとに勾配法によって構造を最適化することで，図 1 に示す設計 Q 値 3.39 億の非対称共振器を得た．つぎに，揺らぎに対する耐性を調べるため，図 1, 2 の構造の各空気孔に対して，0.25 nm の標準偏差を持つ位置揺らぎを 100 パターン与えて Q 値を計算した．結果を図 3 に示す．赤色の補助線は全パターンに対する最頻 Q 値である．同図から，対称共振器(図 3b)と比較すると非対称共振器(図 3a)では，最頻値より低い Q 値が得られる頻度がより小さくなっていることが分かる．詳細は当日報告する．

【謝辞】本研究は，JST-START，科研費 25K01695 の支援を受けた．

【参考文献】[1] B. S. Song, *et al.*, Nat. Mater. **4**, 207 (2005). [2] Nakadai *et al.*, APEX **13**, 012002 (2020). [3] H. Hagino, e*t al.*, Phys. Rev. B **79**, 085112 (2009). [4] A. Fukuda, *et al.*, Opt. Express **31**, 15495 (2023).

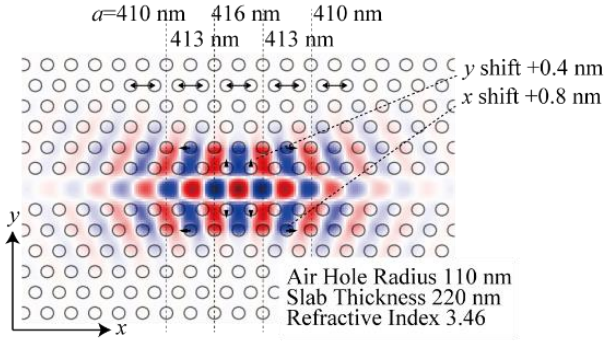


Fig.2. Symmetric hetero nanocavity.

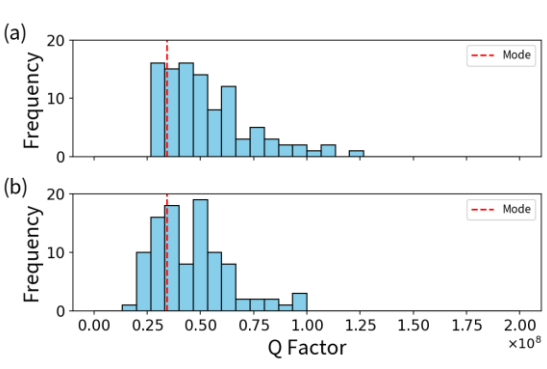


Fig.3. Histograms for calculated Q factors.
(a) Asymmetric cavity. (b) Symmetric cavity.

© 2025年 応用物理学会

YIG 欠陥部を内包する a-Si フォトニック結晶に基づく微小磁気光学光サーキュレータの検討

Investigation of compact magneto-optical circulators based on a-Si photonic crystals with YIG defects

慶応理工[1]，東大先端研[2]（M1）佐藤 大介[1]、谷口公太[1]、山家 健[1]、高 思源[1]、岩本 敏[2]、 太田 泰友[1]

Keio Univ.[1], RCAST, the Univ. of Tokyo[2] °D. Sato[1], T. Yambe[1], K. Taniguchi[1], S. Gao[1], S. Iwamoto[2] and Y. Ota[1]

E-mail: DaisukeSato@keio.jp, ota@appi.keio.ac.jp

はじめに 磁気光学(Magneto-Optical: MO)効果に基づく非相反集積光デバイスは、外部電力が不要かつ広い入力パワー領域で安定動作が可能であり、幅広い応用が期待されている[1]。しかし、光通信波長帯においては透明材料の MO 効果は小さく素子の小型化が難しいという課題がある。先行研究では、磁性鉄ガーネットを母材とした H1 型フォトニック結晶ナノ共振器による微小 MO サーキュレータが理論提案されている[2]が、複雑な磁化分布を仮定していることや鉄ガーネットの高品質微細加工が一般に困難なことから、実験実証には至っていない。本研究では、イットイリウム鉄ガーネット(YIG)を導入した a-Si 磁気フォトニック結晶(PhC)ナノ共振器による微小光サーキュレータの検討を行った。共振器中央部にのみ YIG を導入することで、複雑な磁化分布が不要な微小光サーキュレータが設計可能となる。

結果 検討構造を Fig. 1(a)に示す。三角格子 a-Si 二次元フォトニック結晶(厚み $d = 300$ nm)の中央に Bi:YIG ロッドが埋め込まれ、H1 型ナノ共振器を形成している。垂直磁場印加を仮定し(誘電率テンソルの非対角項$g = 0.005$)、3 次元固有周波数解析を行ったところ、Q 値 6.0×10^4 および欠陥共振器 MO 効果によるモード間結合 20.0 GHz が得られた。さらに、設計共振器をベースとした光サーキュレータ素子について２次元有限要素法による動作解析を行った。Fig. (b)は共振器に接続した三つのポートからそれぞれ光を入射した際の H_z 分布を示しており、サーキュレータ動作が確認できている。検討構造は最近構築された YIG 微細加工技術[3]を活用することで十分に実現可能と考えられる。その詳細は当日報告する。

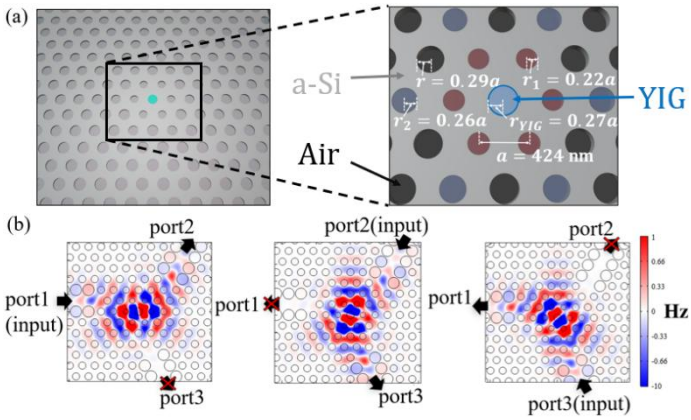


Fig. 1(a)Investigated PhC nano cavity. (b) H_z distributions computed with light injection from the respective port.

参考文献 [1] B. J. H. Stadler and T. Mizumoto, *IEEE Photonics J*, 6, 0600215(2014)[2] Z. Wang et al., *Appl. Phy,* B 81, 369 (2005). [3] 谷口公太ら, 春季応物, 24p-11F-12 (2024).

謝辞 本研究に協力、助言頂いた石田悟己氏、大槻秀夫氏、松清秀次氏、に感謝する。本研究の一部は JST FOREST (JPMJFR213F), JST CREST (JPMJCR19T1)、科研費(25K01697)、日本板硝子財団、池谷科学技術振興財団、の支援の下遂行された。

© 2025年 応用物理学会

単結晶イットリウム鉄ガーネットを母材とした フォトニック結晶ナノ共振器の作製と光学評価

Fabrication and optical characterization of photonic crystal nanocavities based on monocrystalline yttrium iron garnet

慶應理工 [1], 東大先端研 [2] ○谷口 公太 [1], 山家 健 [1], 佐藤 大介 [1], 高 思源 [1], 吉見 拓展 [1], 大槻 秀夫 [2] 岩本 敏 [2], 太田 泰友 [1]

Keio Univ., Japan [1], RCAST, the Univ. of Tokyo, Japan [2], ○Kota Taniguchi[1], Takeru Yambe[1], Daisuke Sato[1], Siyuan Gao[1], Hironobu Yoshimi[1], Hideo Otsuki[2], Satoshi Iwamoto[2], Yasutomo Ota[1]

E-mail: kota-t10@keio.jp

はじめに イットリウム鉄ガーネット(YIG)系単結晶は、室温・光通信波長帯における最も優れた透明磁気光学材料の一つである[1]。一方、YIG は微細加工が難しく、フォトニック結晶ナノ共振器などの高度なフォトニックナノ構造[2]の作製については進展が乏しかった。これまでに我々は、SiO_2 上の単結晶 YIG 薄膜の作製手法と同薄膜に対する微細加工技術を構築し、L5 型と H1 型のフォトニック結晶ナノ共振器構造の作製を報告してきた[3, 4]。今回、作製した共振器の電子線顕微鏡観察や光学評価を進めたので報告する。

結果 前回まで報告した手法で YIG ナノ共振器の作製を行った。まず SiO_2 上に単結晶 YIG 基板を融着し、研磨とドライエッチングにより薄膜化した。その後、電子線リソグラフィーとドライエッチングを行い、共振器構造を作製した。作製した共振器の走査電子顕微鏡(SEM)像を図 1(a)に示す。格子定数 570 nm、円孔直径 290 nm の L5 型共振器が形成されている。次に、作製した共振器に対して顕微分光測定による光学評価を行った。L5 型共振器の反射光スペクトルを図 1(b)に示す。波長 1567 nm において Q~330 のピークが観測された。反射光スペクトルの YIG 膜の厚み依存性を図 1(c)に示す。膜厚が薄くなるほどピークは短波長側へシフトし、共振器構造由来の共振ピークと推定される。その他の実験結果の詳細については当日報告する。

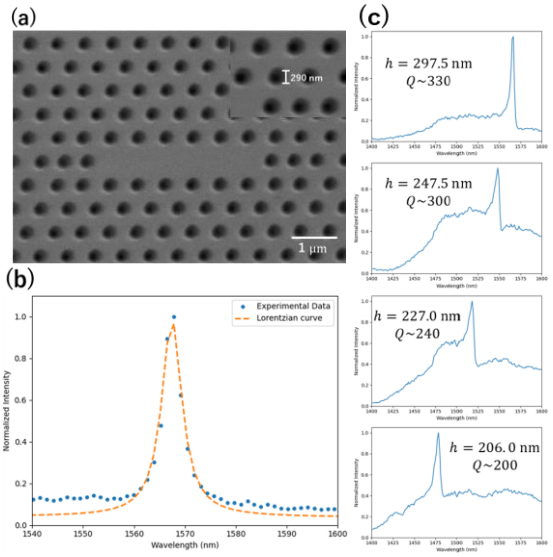


Fig.1 (a) Scanning electron microscope image of the YIG based L5-type nanocavity. (b) Reflection spectrum of L5-type nanocavity. (c) Dependence of reflection spectrum on thickness of YIG film.

参考文献 [1] K. Srinivasan et al., Opt. Mater. Express, 12, 697 (2022). [2] D. O. Ignatyeva et al., Nat. Commun., 11, 5487 (2020). [3] 谷口公太, 太田泰友他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 24p-11F-12 (2024). [4] 谷口公太, 太田泰友他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 19a-A33-6 (2024). **謝辞** 実験に協力、助言頂いた石田悟己氏、松清秀次氏に感謝する。本研究の一部は JST FOREST (JPMJFR213F), JST CREST (JPMJCR19T1)、科研費(25K01697, 24K17582)、みずほ学術振興財団、日本板硝子財団、池谷科学技術振興財団の支援の下遂行された.

© 2025年 応用物理学会

非周期モノタイルによるフォトニックナノ構造の検討　～共振器と導波路

Investigation of photonic nanostructures with aperiodic monotile ~ cavity and waveguide

横国大院工 ○中村舜希, 馬場俊彦
Yokohama Nat'l Univ., S. Nakamura, T. Baba
E-mail: Nakamura-shunki-vt@ynu.jp

我々は前回 [1], 非周期モノタイルとして初めて発見された帽子型図形[2]を光素子に導入した際の光物性を報告した. ただし, 帽子型図形の充填パターンには一定の頻度で裏返しタイルが含まれており, これが純粋な光物性の顕現を妨げている可能性があった. そこで今回は, 帽子型図形から派生して発見された非周期モノタイルの一種であり, 裏返しタイルを含まない図 1(a), (b)のような幽霊型図形(スペクター)を採用し, さらに共振器や導波路を検討した.

図 1(c)にスペクターの配列に高屈折率(n = 3.44)を背景とし, 円孔と三角孔を配置した構造の光透過スペクトルを示す. スペクターの方位を反映する三角形構造で明瞭なギャップが確認された. フォトニック結晶の場合と同様に, このギャップを利用して, 点欠陥共振器と線欠陥導波路を 2 種類ずつ検討した. スペクターでタイル張りをする際, その回転角は 60°の整数倍となるのが基本であるが, 一部に 30°や 90°となるタイル(図 1(b)の赤色)もあり, これが帽子型図形の裏返しタイルと似た頻度で登場する. これに着目し, 共振器では 60°と 30°の回転タイルに欠陥を導入した. 導波路では直線的な線欠陥と「コンウェイ芋虫」[3]による線欠陥を検討した. コンウェイ芋虫は図 3 のような曲線であり, 30°タイル同士を向きが連続したタイルで結ぶことで描かれる. 図 2 と図 4 の結果を見ると, 30°タイルの点欠陥でより強い局在が起こり, コンウェイ芋虫でより明瞭な導波モードが確認できる.

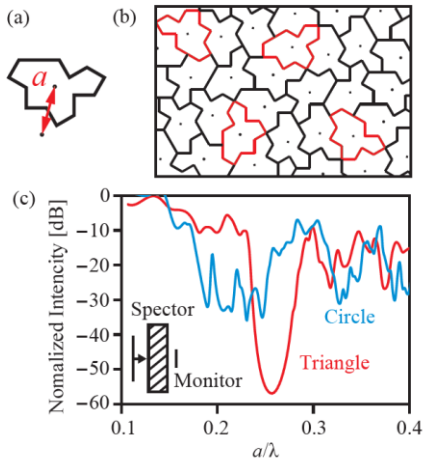


Fig. 1 (a) スペクターモノタイル. (b) そのタイル張り. 黒点は重心. 赤は 30°回転タイル. (c) 挿入図のモデルに対する透過スペクトル.

参考文献 [1] 中村ら, 応物春季, 15p-K505-2 (2025). [2] D. Smith et al., arXiv 2303 (2023). [3] M. Gardner, Scientific American 236 #1 (1977).

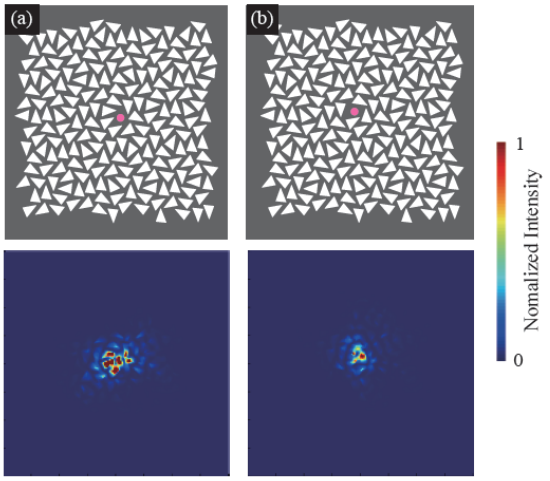


Fig. 2 スペクタータイルによる点欠陥共振器の計算モデル(上)と光強度分布(下). (a) 60°回転タイル点欠陥, (b) 30°回転タイル点欠陥.

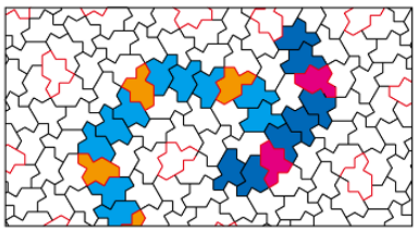


Fig. 3 コンウェイ芋虫の概要. 同じ向きで連なったタイル(青)と 30°回転タイル(赤)の組み合わせで結ばれる.

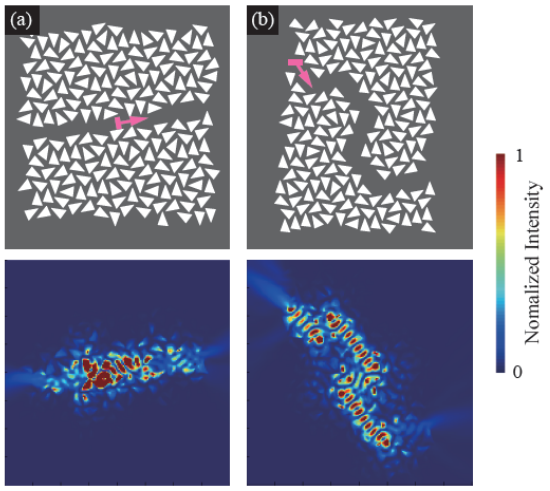


Fig. 4 スペクタータイルによる線欠陥導波路. 計算モデル(上)と光強度分布(下). (a) 直線的な線欠陥. (b) コンウェイ芋虫による線欠陥.

© 2025年 応用物理学会

モード結合に基づく非対称点 BIC を用いたスローライト導波路の検討

Investigation of slow light waveguides based on mode-coupling-induced BICs at off-high symmetry points

慶應理工[1]，NTTRI PHI 研[2]，科学大理[3]，NTT 物性研[4]，NTT NPC[5]，東大先端研[6]

○(B4)遠藤沙恵[1]，谷村優太[1]，高田健太[2]，上村高広[3,4]，納富雅也[3,4,5]，岩本敏[6]，太田泰友[1]

Keio Univ.[1], NTTRI PHI Lab[2], Inst. Sci. Tokyo[3], NTT BRL[4], NTT NPC[5], RCAST, Univ. of Tokyo[6]

◦Sae Endo[1], Yuta Tanimura[1], Kenta Takata[2], Takahiro Uemura[3,4], Masaya Notomi[3,4,5], Satoshi Iwamoto[6], and Yasutomo Ota[1]

E-mail: s_endo@keio.jp, ota@appi.keio.ac.jp

はじめに　ポリマ細線を装荷した薄膜スラブ光導波路では、スラブ材料の加工が不要である一方、偏波混合に起因して TM-like 導波モードの面内放射損失が一般的に大きくなる。しかし、BIC（bound states in the continuum）による横閉じ込めを活用することで、難加工性材料と光の相互作用の増強につながる低損失 TM-like 導波路を実現できることが知られている[1], [2]。我々は、当該構造に 1 次元フォトニック結晶を導入することで、BIC スローライト状態が実現できることを明らかにしている[3]。一方、この低損失・低群速度状態は、対称点（X 点）においてのみ確認されていた。本研究では、モード結合により誘起される Friedrich-Wintgen BIC（FW-BIC）を活用することで、非対称点における BIC スローライト状態を見出したので報告する。

結果　検討構造を Fig. 1(a-b)に示す。SiO_2 上に設置された YIG 薄膜（膜厚 300 nm）の上に、余弦波変調された電子線レジストが装荷されている。余弦波変調の格子定数を $a = 0.45$ μm、振幅を $\Delta w = 0.4w$ とし、レジスト幅 $w = 2.45$ μm の導波路構造について COMSOL Multiphysics で固有モード解析を行った。TM_0 と TM_2 モードに着目して分散関係を調べたところ、Fig. 1(c)のように反交差が見られた。その近傍において伝搬損失を調べたところ、波数 $ka/\pi = 0.9721$ において損失が急峻に減少する（最小値 3.93×10^{-5} dB/cm）ことが分かった(Fig. 1(d))。これは TM_0 と TM_2 モードが損失先の TE スラブモードにおいて輻射結合することで生じた FW-BIC の発現と解釈できる。さらに、w や Δw を適切にチューニングすることで、FW-BIC を出発点とした低損失なスローライト状態の形成にも成功している。計算結果の詳細については当日報告する。

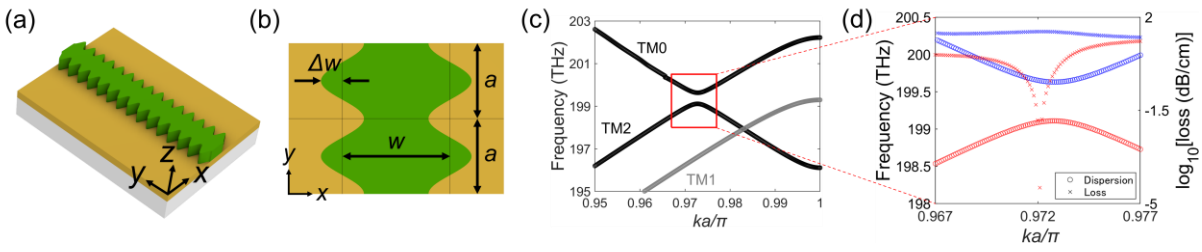


Fig. 1 (a) Schematic, (b) top view, and (c) dispersion curves of the investigated FW-BIC slow light waveguide. (d) Dispersion curves and corresponding propagation loss at $\Delta w = 0.4w$ and $w = 2.45$ μm.

参考文献　[1] C.-L. Zou *et al*., Laser & Photonics Rev. **9**, 114 (2015). [2] Z. Yu *et al.*, Optica **6**, 1342 (2019). [3] Y. Tanimura *et al*., Opt. Lett. **50**, 2013 (2025).

謝辞　本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR213F により遂行された。

© 2025年 応用物理学会

Optimization of Topological Z-Bend Waveguide Characterization Using Transfer Learning

Qianshuo Wang[1], Liyan Hu[1], Xing-Xiang Wang[1], Sho Okada[2], Xiao Hu[3] and Tomohiro Amemiya[1]

[1]Institute of Science Tokyo, [2]National Institute of Information and Communications Technology, [3]Shanghai University

E-mail: wang.q.ak@m.titech.ac.jp

1. Introduction

Topological photonic waveguides ensure robust light propagation and resist scattering at sharp bends [1]. Optimizing unit cell parameters enhances performance but faces computational challenges. This study introduces a transfer learning method [2] to optimize parameters in Z-bending waveguides to reduce propagation loss.

2. Transfer learning for optimizing topological Z-bending waveguide

A total of 2000 datasets were generated using 2D-FDTD simulations, focusing on 36 unit cells near the sharp bend (Fig. 1(a)). Parameters were varied using Gaussian noise to simulate fabrication tolerances. A convolutional neural network (CNN) was trained on 1900 datasets with two convolutional layers and fully connected layers activated by ReLU. The network achieved a 0.956 correlation between simulated and predicted propagation intensities, demonstrating reliable performance (Fig. 1(b)). To adapt the model to 3D predictions, transfer learning was employed using 100 datasets from 3D-FDTD simulations. This involved fine-tuning the pre-trained 2D network, preserving its ability to recognize sharp-bend features while refining predictions for 3D-specific characteristics. This adapted network achieved a 0.962 correlation as shown in (Fig. 1(c)). The fine-tuned network was used to explore parameter configurations, targeting reduced scattering and higher propagation intensities.

3. Experimental results

The optimized design reduced scattering at sharp bends. Red and blue circles in (Fig. 1(d)) represent parameter R(%) increases and decreases from the structure (238 nm (triv), 292 nm (topo)). The adjustments specifically targeted reducing bending loss. Devices were fabricated on a silicon photonics platform with a 220-nm silicon core layer [3-6]. And test on Waveguide Alignment and Measurement System to get infrared camera image(Fig. 2(b)). The input light intensity is set at 10 dBm. After integrating the pixel, data shows the loss intensity reduce 43.4% after optimization (Fig. 2(a)). By measuring the output power(-75 dBm before and -70 dBm after) and subtracting the background loss (-55.6dBm on Non-Topological Waveguide), the calculated optimization efficiency is approximately 25.8%.

Acknowledgments

This work was supported by JST ASPIRE (23837157), JST A-STEP (JPMJTR22RG), JST CREST (JPMJCR24R1).

References

[1] L.-H. Wu and X. Hu, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 223901 (2015).
[2] F. Zhuang *et al.*, Proc. IEEE 109, 43–76 (2020).
[3] J. Kang *et al.*, Appl. Phys. Express 7, 032202 (2014).
[4] Z. Gu *et al.*, Opt. Express **23**, 22394 (2015).
[5] Y. Wang *et al.*, *Jpn. J. Appl. P hys.* **59**, 052004 (2020).
[6] Z. Gu *et al.*, *Appl. Phys. Express* **11**, 022102 (2018).

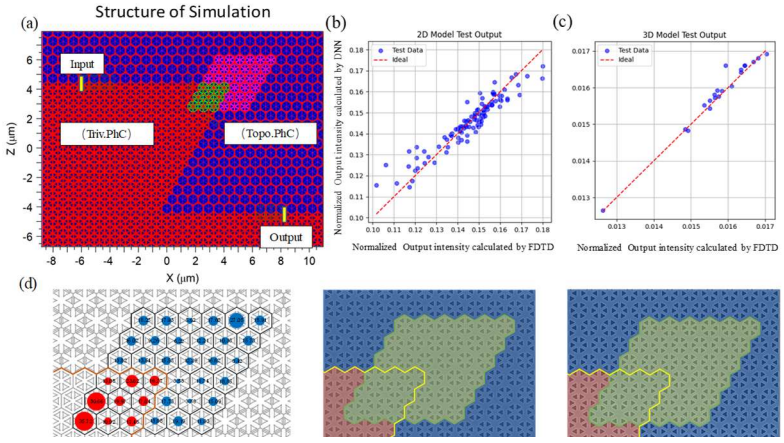


Fig. 1 (a) A topological waveguide with a sharp bend used in the analysis. (b) Results of output values obtained by 2D FDTD analysis and predicted output values using trained networks. (c) Results of output values obtained by 3D FDTD and predicted output values using the transfer learning network.(d) Parameter shift distribution optimized by transfer learning and SEM image: (left) initial structure, (right) optimized structure.

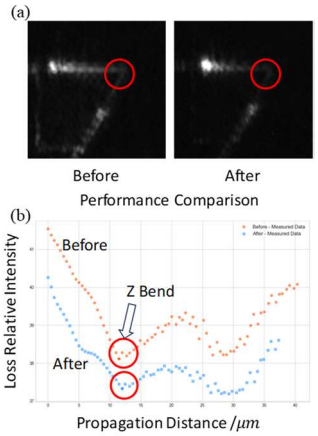


Fig. 2 (a) Infrared camera image around the structural design area. (b) Lost light intensity contrast from image pixel integration, the orange line before optimization, and the blue line after optimization.

© 2025年 応用物理学会

三次元立体交差による Si 細線導波路結合の検討

Investigation on coupling of Si wire waveguides with three-dimensional crossovers

[1] 慶應大，[2] 東大先端研，[3] 東大生研

○吉見 拓展[1]，藤田 晃成[1]，高 思源[1]，伊藤 貴裕[1]，立崎 裕真[1]，岩本 敏[2,3]，太田 泰友[1]

[1]Keio Univ., [2]RCAST, [3]IIS, The Univ. of Tokyo

°H. Yoshimi[1], A. Fujita[1], S. Gao[1], T. Ito[1], Y. Tachizaki[1], S. Iwamoto[2,3], and Y. Ota[1]

E-mail: hyoshimi@keio.jp

集積フォトニクスにおいて、精密な位置合わせを必要としない自在な光導波路の結合技術は、ハイブリッド光集積や多層光配線に向けて重要な役割を果たす。一方で、汎用的に用いられているテーパー導波路やグレーティングカプラーは高い位置合わせ精度を必要とし、実装が複雑化する課題がある[1]。これに対して近年、導波路の立体的な交差構造を用いることで、面内方向への位置ずれにロバストな光結合方法が提案・実証されている[2–4]。しかし、これまでの報告では、通信波長帯におけるパラメータ依存性や構造ずれへの耐性といった詳細な解析は十分に検討されていなかった。同構造の詳細な検討に向けて、今回我々は、Si 細線導波路の立体交差構造の解析と素子作製を進めたため報告する。

図 1(a, b)に、検討した Si 導波路の立体交差構造の概念図を示す。ガラスクラッド内とクラッド上の Si 導波路が角度θで立体的に交差し、交差部分で導波路が光学的に結合している。同構造において、下方の導波路から入射した光（波長 1550 nm）が上方の導波路に遷移して伝搬する透過率を三次元有限差分時間領域法によって計算した（図 1(c)）。その結果、交差角度 13 度、ギャップ 140 nm において、約 99.4%の高い透過率が得られることが分かった。さらに、転写プリント法を用いて作製した立体交差構造の光学顕微鏡画像を図 1(d)に示す。長さ約 60 μm の Si 導波路が、角度をつけて配置された別の Si 導波路と交差している様子が確認できる。詳細は講演で報告する。

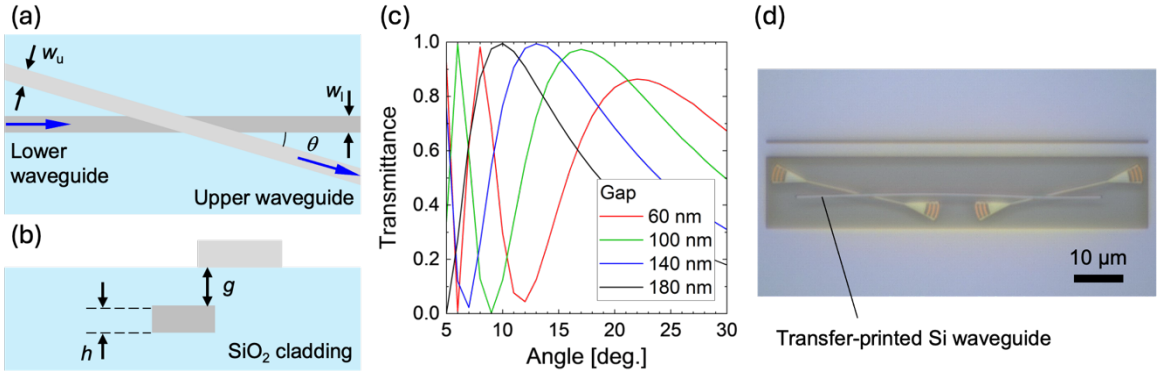


Fig. 1 (a, b) Schematics of the investigated three-dimensional crossover of Si waveguides. (a) Top view and (b) cross sectional view. The widths of the upper and lower waveguides are respectively w_u = 470 nm and w_l = 440 nm. The height of both waveguides is h = 220 nm. θ: the angle of intersection. g: the vertical gap between the waveguides. Blue arrows indicate light transmission from the lower waveguide to the upper one. (c) Simulated transmittance through the crossover of the waveguides. (d) Optical microscope image of the fabricated three-dimensional waveguide crossovers.

参考文献 [1] A. Marinins *et al*., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **29**, 8200311 (2023). [2] S. Bandyopadhyay and D. Englund, arXiv:2110.12851 (2021). [3] K. Takada *et al*., Opt. Express **33**, 22769 (2025). [4] 岡山他, 第 72 回応物春季講演会, 17p-K305-7 (2025). **謝辞** 本研究の一部は JST 創発により遂行された。有益な議論や技術的な支援をいただいた前田圭穂氏、山家健氏、西岡政雄氏、石田悟己氏、大槻秀夫氏、原田直氏、張成昆氏に感謝する。

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.11 Nanoscale optical science and near-field optics

[8p-N204-1~18] 3.11 Nanoscale optical science and near-field optics

[8p-N204-1]

Enhancement of Near-Infrared Sensitivity of Silicon Image Sensors by Wide-Angle Plasmonic Diffraction

○(M2)Koya Okazaki[1], Nobukazu Teranishi[2], Atsushi Ono[1,2] (1.Shizuoka Univ., 2.RIE Shizuoka Univ.)

[8p-N204-2]

Fabrication and Optical Characterization of a Polarization-Selective UV-A Perfect Absorber Using Al Nanohole Array Structures

○Keita Narita[1], Takeshi Kato[2,3], Kazumasa Hiramatsu[1], Atsushi Motogaito[1] (1.Mie Univ., 2.Nagoya Univ., 3.IMaSS Nagoya Univ.)

[8p-N204-3]

pH dependence of the Ag nanoparticles immobilized on the glass substrates modified by thiol-group.

○Ryoya Onishi[1], Suzuki Hitoshi[1], Sakaue Hiroyuki[1] (1.Hiroshima Univ.)

[8p-N204-4]

Dramatic near-field enhancement based on one-dimensional photonic crystal–plasmon coupled systems

○Keisuke Imaeda[1], Rin Miyazaki[2], Sou Ryuzaki[1], Kosei Ueno[1] (1.Fac. Sci., Hokkaido Univ., 2.Grad. Sch. Chem. Sci. Eng., Hokkaido Univ.)

[8p-N204-5]

Growth of gold needle-leaf like dendrites structures and their optical properties

○Kenta Iida[1], Nobuyuki Takeyasu[1] (1.Okayama Univ.)

[8p-N204-6]

Ultraviolet Emission Enhancement of Ga_2O_3 and ZnO by Surface Plasmon Resonance of Al and Post Annealing

○Kai Funato[1], Yuta Nozu[1], Tetsuya Matsuyama[1], Shunsuke Murai[1], Kenji Wada[2], Koichi Okamoto[1] (1.Osaka Metro. Univ., 2.OMU-ESCARI)

[8p-N204-7]

Localized surface plasmon resonance properties of intermetallic nanoparticles with $B8_1$-type anisotropic crystal structure

○HYUNJI LEE[1], Takekuma Haruka[1,2], Sato Ryota[2], Iida Kenji[3], Teranishi Toshiharu[1,2] (1.Kyoto Univ., 2.ICR, Kyoto Univ., 3.ICAT, Hokkaido Univ.)

[8p-N204-8]

Effect of odd-even alkyl chain and solvent environment on the formation of sub-1 nm gap interfaces in AuNP dimerization

○Keiko Esashika[1], Toshiharu Saiki[1] (1.Keio Univ.)

[8p-N204-9]

Observation and evaluation of the plasmonic diffraction confinement within the pixel using trench formation

○Yusuke Yoshizawa[1], Soh Uenoyama[1], Kazunori Tanaka[1], Hiroyasu Fujiwara[1] (1.Hamamatsu Photonics K.K.)

[8p-N204-10]

Observation of electromagnetic coupling between radiant or subradiant plasmon and dye molecular exciton using ultrafast surface-enhanced fluorescence

○Tamitake Itoh[1], Yuko S. Yamamoto[2] (1.AIST, 2.JAIST)

[8p-N204-11]

Control of molecular dynamics and chemical processes under strong and weak coupling regimes

○Kosei Ueno[1], Sarasa Kano[2], Shimba Ushikoshi[2], Hiroki Takeuchi[2], Keisuke Imaeda[1], Sou Ryuzaki[1] (1.SCI, Hokkaido Univ., 2.CSE, Hokkaido Univ.)

[8p-N204-12]

Changes in geometry of silver dendrites under laser irradiation at different wavelengths

○(M2)Rintaro Adachi[1], Nobuyuki Takeyasu[1] (1.Okayama Univ)

[8p-N204-13]

Temperature-Dependent Optical Responses of Mie-Resonant Silicon Nanoparticles

○Kana Kondo[1], Mojtaba Karimi Habil[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1] (1.Kobe Univ.)

[8p-N204-14]

Studies on Optical and Mechanical Characteristics of 2D-Material Single Crystals

Mihir Kumar Sahoo[1], ○Masanobu Iwanaga[1] (1.NIMS)

[8p-N204-15]

Control of Scattering Colors of Silicon Nanoparticles on a Mirror

○(M1)Takeru Kambayashi[1], Jialu Song[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1] (1.Kobe Univ.)

[8p-N204-16]

Deterministic arrangement of $CsPbBr_3$ nano-light source in Cs_4PbBr_6 thin films by electron beam irradiation

○(M2)Tomoyasu Fujimaru[1], Kanta Hirai[2], Masato Inamata[1], Hiromu Tanaka[1], Midori Ikeuchi[3], Hidehiro Yamashita[3], Shiro Ihara[3], Mitsuhiro Murayama[3,4], Hikaru Saito[3] (1.IGSES, Kyushu Univ., 2.Kyushu Univ., 3.IMCE, Kyushu Univ., 4.Virginia Tech.)

[8p-N204-17]

Evaluation of SERS substrates uniformity using relative standard deviation

○(M2)Shoma Suzuki[1], Balois-Oguchi Maria Vanessa[1], Kajikawa Kotaro[1] (1.Science Tokyo)

[8p-N204-18]

Fabrication of single crystals of Au@Ag core-shell nanoparticle superlattices for *in-vivo* SERS detection

○Taito Ikeuchi[1], Saki Kozawa[1], Lidong Zhang[1], Hiromasa Niinomi[2], Satoshi Ogawa[1,3], Makoto Kuwahara[3], Kotaro Hiramatsu[4], Miho Tagawa[3] (1.Grad. Sch. of Eng., Nagoya Univ., 2.IMRAM, Tohoku Univ., 3.IMaSS, Nagoya Univ., 4.Faculty of Science, Kyushu Univ.)

広角プラズモニック回折による Si イメージセンサの近赤外感度向上

Enhancement of Near-Infrared Sensitivity of Silicon Image Sensors by Wide-Angle Plasmonic Diffraction

静大院工 [1]，静大電研 [2] ○(M2) 岡﨑 幸也 [1], 寺西 信一 [2], 小野 篤史 [1,2]

Shizuoka Univ. [1], RIE Shizuoka Univ. [2] ○Koya Okazaki[1], Nobukazu Teranishi[2], and Atsushi Ono[1,2]

E-mail: ono.atsushi@shizuoka.ac.jp

本研究目的は，Si イメージセンサの近赤外感度向上である．一般的なイメージセンサの Si 吸収層厚さ 3 μm における近赤外光の吸収効率は数%であるため，近赤外感度は可視域と比較して著しく低い．Si イメージセンサの近赤外高感度化により，Time-of-Flight や生体イメージングなどの応用におけるセンシング精度の向上が期待される．Si イメージセンサの近赤外感度向上技術として，Si ピラミッドアレイの光屈折による実効的な伝播距離の増長[1]や表面プラズモン共鳴下における増強電場[2]が報告されている．報告された近赤外感度向上技術では，約 2 倍の感度向上が得られている．可視域と同等な撮像感度を有する Si イメージセンサの実現に向け，さらなる近赤外感度向上が求められる．我々はこれまで，準表面プラズモン共鳴下におけるプラズモニック回折による実効的な伝播距離の増長を提案・実証してきた[3-6].

本研究では，広範囲入射角に対するプラズモニック回折により Si イメージセンサの近赤外感度が大幅に向上することを明らかにした．表面プラズモン共鳴では，入射光は 90 度回折し，金属/誘電体界面を伝播する．表面プラズモン共鳴から僅かに外れた準共鳴とすることにより，広範囲入射角の光が Si 側へ高効率に回折することを見出した(Fig.1. (a, b))．プラズモニック回折光の画素内往復伝播により光が閉じ込められ，Si 吸収率が 40%以上まで大幅に向上することをシミュレーションにより明らかにした(Fig.1. (c, d))．許容入射角は±15 度であり，レンズの F 値 1.9 に相当することから，超小型カメラを除き実用において十分な角度範囲といえる．準共鳴を用いた光閉じ込めにより，近赤外感度が広範囲入射角において大幅に向上することを明らかにした．

本研究は，科学研究費補助金 (22K18984)，(25K01286)のもと実施された．

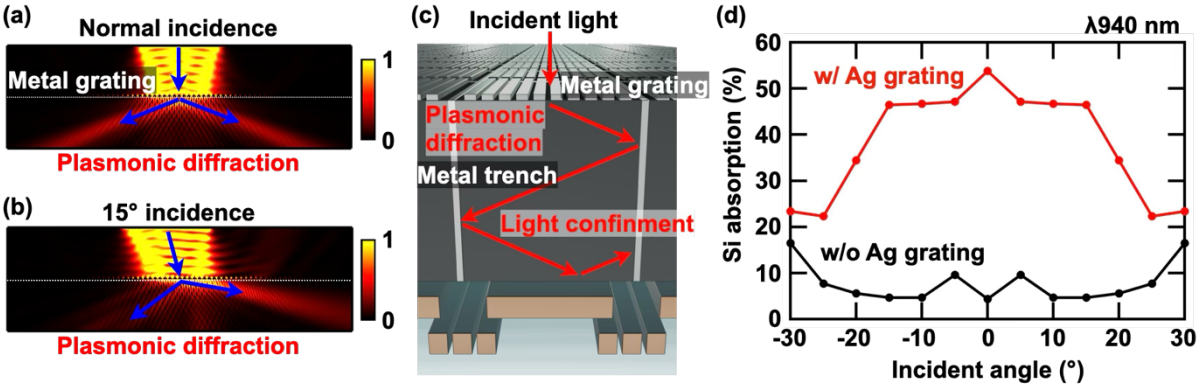


Fig.1. (a) Plasmonic diffraction at normal incidence, (b) plasmonic diffraction at 10 degrees incidence, (c) schematic image of light confinement pixel with silver grating, (d) Si absorption dependence on incident angle.

[1] S. Yokogawa *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 1, 3832 (2017). [2] E. Scattolo *et al.*, *Sensors* **23**, 856 (2023).
[3] A. Ono *et al.*, *Opt. Exp.* ***29***, 14, 21313 (2021). [4] T. Yoshinaga *et al.*, *Opt. Exp.* ***30***, 20, 35516 (2022).
[5] S. Uenoyama *et al.*, *ACS Appl. Electron. Mater.* ***6***, 9, 7046 (2024). [6] K. Okazaki *et al.*, *IEEE J-EDS* ***13***, 278 (2025).

© 2025年 応用物理学会

Al ナノホールアレイ構造を用いた偏光選択性 UV-A 完全吸収体の作製と光学特性評価

Fabrication and Optical Characterization of a Polarization-Selective UV-A Perfect Absorber Using Al Nanohole Array Structures

三重大院工[1]，名大院工[2]，名大 IMaSS[3] ○成田圭太[1]，加藤剛志[2, 3]，平松和政[1]，元垣内敦司[1]

Mie Univ.[1], Nagoya Univ.[2], IMaSS Nagoya Univ.[3], ○Keita Narita[1], Takeshi Kato[2, 3], Kazumasa Hiramatsu[1], Atsushi Motogaito[1]

E-mail: 424M232@m.mie-u.ac.jp

紫外光通信は、従来の無線通信や可視光通信とは異なる特性を持ち、新興の通信技術として注目されている。特に、UV-A 光（320-400nm）を用いた通信技術は、大気吸収の低減、長距離伝送、高い安全性、低コストな光源・受光素子の活用が可能となる。我々は波長 375nm において、Al ナノホールアレイにおけるファノ共鳴を用いた TM 偏光と TE 偏光を選択的に完全吸収できる光吸収体を実現した[1]。これを紫外光通信用スイッチングデバイスに応用するには動作波長域の拡張が不可欠であり、これまでに波長 340nm の光吸収体の設計と動作機構の考察を行った[2]。本発表では波長 340nm の光吸収体作製と光学特性評価について報告する。

Al ナノホールアレイは電子線描画と真空蒸着により作製した。作製したナノホールアレイの表面 SEM 像を Fig.1 に示す。直径 125nm、周期 250nm のナノホールアレイがほぼ設計通りに作製できた。次に波長 340nm UV-LED 光源を用いた光学特性評価の実験に向け光学測定系を作製し、波長 395nm UV-LED 光源で反射率測定を行った。その結果と厳密波結合解析法により計算した Al ナノホールアレイ構造での吸収率・反射率・透過率の入射角依存性を Fig.2 に示す。Fig.2 より、入射角 32 度で吸収率がピークを示し、その角度で反射率が急激に低下することが実験及びシミュレーションで確認された。この現象はファノ共鳴に起因するものと考えられる[1, 2]。

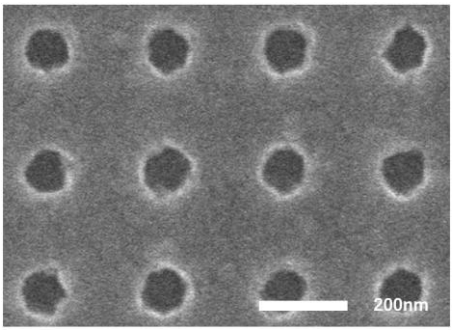


Fig.1: SEM image of Al nanohole array structure

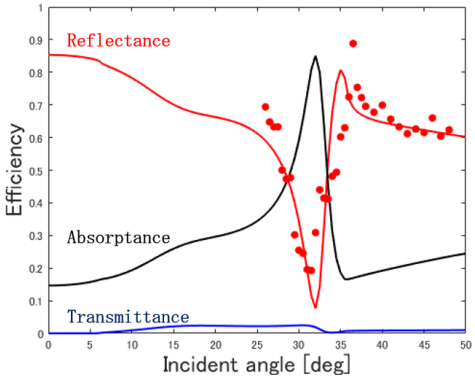


Fig.2: Simulation and Experimental Results

謝辞 本研究は科研費（23K04611）、名古屋大学 IMaSS 共同研究（2025-1-042）、名古屋大学 ARIM 事業(JPMXP1225NU0206, JPMXP1224NU0209)によるものである。

参考文献 [1] K. Akatsuka, et al., Appl. Phys, B 130, 64 (2024). [2] 成田他 第 72 回応用物理会春季学術講演会 14p-K506-10（2025）.

© 2025年 応用物理学会

チオール基修飾ガラス基板上の銀ナノ粒子固定量のpH依存性

pH dependence of the Ag nanoparticles immobilized on the glass substrates modified by thiol-group.

広島大先進理工，○(M2)大西 凌矢，鈴木 仁，坂上 弘之

Hiroshima Univ., ○(M2) Ryoya Onishi, Hitoshi Suzuki, Hiroyuki Sakaue

E-mail: ronishi0921@hiroshima-u.ac.jp

[背景・目的]　内側が空洞の金ホロナノ粒子は粒径だけでなく、シェル厚によっても吸光特性が変化することが知られており、金ナノ粒子よりも広範囲で吸光特性を調整することができる[1]。金ホロナノ粒子は、ガラス基板に銀ナノ粒子を固定し、固定した銀ナノ粒子に金を被覆した後、銀のみを溶解する方法で作製を目指している。本研究は、銀ナノ粒子コロイド液のpHを変化させたときの固定量の変化を調べた。

[実験方法]　ガラス基板のチオール基修飾のため、50mMに調整したシラン剤(3-メルカプトプロピルトリメトキシシラン)水溶液にpH調整剤を添加し、有機物除去洗浄したガラス基板を浸漬させた。処理液のpHは6.5に調製し1500rpmで撹拌しながら24時間処理した。処理した基板をエタノールに 1時間浸漬させた後、ホットプレートを用い加熱処理(150℃，1時間)を行った。銀ナノ粒子を固定するため、クエン酸ータンニン酸還元法で作製した銀ナノ粒子コロイド液にガラス基板を24時間浸漬させた。銀ナノ粒子コロイド液のpHは7及び8に調製した。その後、X線光電子分光法(XPS)で銀の固定量及び表面化学構造を評価した。

[実験結果]　図1に銀ナノ粒子コロイド液で処理した基板のXPSスペクトル((a)Ag3d，(b)S2p，(c)Si2p)を示す。Ag3dのスペクトルにおいて、pHによって銀のピーク強度は大きく変化した。pH7条件ではpH8条件よりも大きく観察された。S2pのスペクトルではSHとSoxのピークが銀ナノ粒子固定処理後に減少した。pH8条件ではほとんど観察されず、pH7条件では4分の1に減少し新たな成分がチオールの低エネルギー側に観察された。Si2pのスペクトルでは銀ナノ粒子固定処理後にはシラン分子由来のシロキサンの成分が見られなくなり、基板由来の成分のみ観察された。分子由来の硫黄及びシロキサンのピーク成分が減少したことから、銀ナノ粒子の固定処理中に加水分解が進行し、シラン剤が基板から脱離したと考えられる。シラン剤の脱離が少ないpH7条件で、より多くの銀ナノ粒子が固定されたと考えられる。

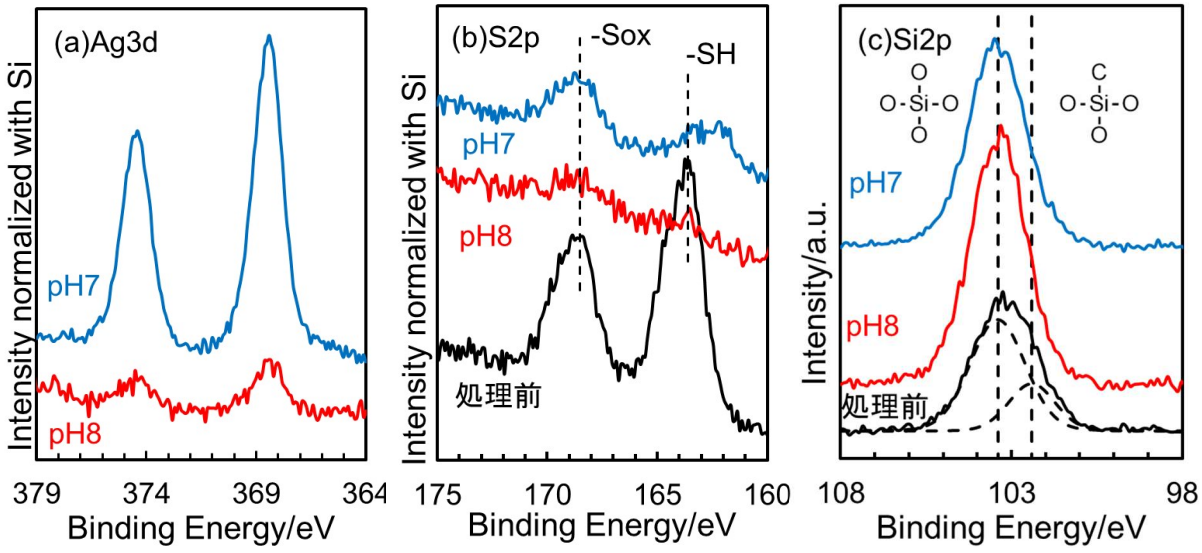


Fig 1 XPS spectra ((a)Ag3d, (b)S2p, (c)Si2p) of the glass surfaces treated by the Ag nanoparticles.

[参考文献]　[1] J. Phys. Chem. B,110,19935-19944(2006)

© 2025年 応用物理学会

1 次元フォトニック結晶–プラズモン結合系を利用した増強光場の構築

Dramatic near-field enhancement based on one-dimensional photonic crystal–plasmon coupled systems

北大院理 [1]，北大院総化 [2]

○今枝佳祐 [1]，宮﨑凜 [2]，龍﨑奏 [1]，上野貢生 [1]

Dept. Chem., Fac. Sci., Hokkaido Univ. [1], Grad. Sch. Chem. Sci. and Eng., Hokkaido Univ. [2]

◦Keisuke Imaeda[1], Rin Miyazaki[2], Sou Ryuzaki[1], Kosei Ueno[1]

E-mail: k_imaeda@sci.hokudai.ac.jp

金属ナノ構造に代表されるプラズモニック物質は，発光やラマン散乱をはじめとする様々な光学過程を著しく増強することから，従来の光科学を革新するナノ材料として注目されている。プラズモンによる光電場増強は，光が空間的・時間的に閉じ込められることに起因する。空間的な光閉じ込め効果は，ナノ構造を精緻に設計することで制御でき，特にナノギャップ構造を作製することで顕著な空間的光閉じ込めを実現できることが知られている。一方，時間的な光閉じ込め効果を向上することは困難であり，光学禁制なプラズモンモードを利用する手法などが提案されているが，より汎用性高い手法の確立が強く求められている。我々は最近，一次元フォトニック結晶とプラズモニック構造をカップリングさせることで時間的な光閉じ込め効果を高め，近接場強度を増大できることを明らかにした。本発表では，その詳細について報告する。

一次元フォトニック結晶（中心波長 808 nm，ストップバンド幅 34 nm）に電子線リソグラフィー／リフトオフ方を用いて金ナノブロック二量体構造を作製した。試料の基礎的な分光特性は，光学顕微鏡を用いた消光スペクトル測定からを評価した。また，波長可変モードロックチタンサファイヤレーザー（波長 700~900 nm，繰り返し周波数 80 MHz）を照射して二光子発光を計測し，金ナノブロック二量体の励起スペクトルを測定した。さらに，光学系にマイケルソン干渉系を導入して，二つのパルスの遅延時間を変化させながら試料の二光子発光強度を検出することで自己相関波形を計測し，プラズモンの位相緩和時間を評価した。

金ナノブロック二量体の消光スペクトルには，近赤外波長領域にプラズモン共鳴に由来する共鳴バンドが観測された。また，二光子発光励起スペクトルを測定したところ，ストップバンドのバンド端付近においてシャープなピークが観測された。これは，1 次元フォトニック結晶上の金二量体構造において Q 値の高いプラズモン共鳴が誘起されたことを示唆している。これを検証するために二光子発光自己相関波形を測定した結果，ガラス基板上に比べてプラズモン位相緩和時間が長くなり，スペクトル測定の結果と定性的に一致することがわかった。さらに，電磁気学計算から，ガラス基板上に比べて金二量体の近接場強度が 3 倍以上増大することが明らかとなった。

参考文献

K. Imaeda, R. Miyazaki, S. Ryuzaki, K. Ueno “High-Q Plasmonic Nanocavities Enabled by Integration of Au Nanogap Dimers with a Distributed Bragg Reflector” *J. Phys. Chem. C* **2025**, *129*, 5095-5104.

© 2025年 応用物理学会

金針葉樹状構造の成長とその光学特性

Growth of gold needle-leaf like dendrites structures and their optical properties

岡山大院[1]，　○(M2)飯田　健太[1]，武安　伸幸[1]

Okayama Univ.[1], ○Kenta iida[1], Nobuyuki Takeyasu[1]

E-mail: pklq1mnz@s.okayama-u.ac.jp

【緒言】金ナノ粒子は局在表面プラズモン共鳴(LSPR)に由来する光学的性質に加え，化学的に安定な性質を有するため，生体計測に用いられる [1]．金ナノロッドは，そのアスペクト比によって共鳴波長が決まり，アスペクト比が大きい構造ほどその共鳴波長は長波長に現れる[2]．一つの構造内にサイズの異なるナノロッドを無数に持つ樹状構造では，個々のナノロッド由来のプラズモン・モードが干渉し，広帯域光学応答が観測される[3]．ヘキサデシルトリメチルアンモニウムブロミド(CTAB)を含む水とエタノールの混合溶媒を用いると，金樹状構造を成長させることができる[4]．エタノールと水の混合比により，溶媒の粘度や表面張力が変化し，その結果ナノスケールで形状が変化する．本研究では，成長溶液にグリセリンを混合することにより，高粘度条件下で成長させた金樹状構造の形状と光学的性質を調べたので報告する．

【実験方法】(a)エタノール・水の混合溶媒(水:42 vol%)，および (b) エタノール・グリセリン・水の混合溶媒(水:42 vol%，[エタノール]:[グリセリン]＝3:1)を調製した．それぞれの溶媒に CTAB を加え，塩化金(III)酸イオンをアスコルビン酸で還元することにより，金樹状構造を合成した．合成した金樹は走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した．SEM 像から計算モデルを作成し，discrete dipole approximation (DDA)によって消光スペクトルを計算した．

【結果】Fig. 1 に示す通り，(a), (b)両方の溶媒中で金樹状構造の成長が観測された．SEM 像から二つの形状は(a)より(b)の方が，枝が細く，枝の密度も低いことがわかる．Fig. 1(c)には計算によって求めた消光スペクトルを示す．(a)は 650 nm 付近から光学応答を示し， (b)は 750nm から急激に消光度が上昇する．細長い枝を多く持つ(b)では，その形状に由来して，より長波長側にプラズモン共鳴がシフトしたと考えられる．発表では表面増強ラマン散乱による光学応答の違いについても示す．

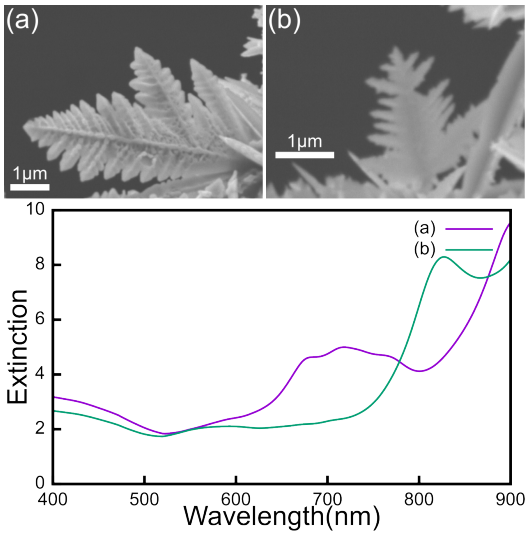


Figure 1.　SEM images of gold dendrites, which were grown in a mixed solvent of (a) ethanol and water, (b) ethanol, glycerin and water, (c) calculated extinction spectra of gold dendrites.

【参考文献】

[1] X. Huang, *et al., J. Adv. Res*. **1**, 13−28 (2010). [2] B. Nikoobakht, *et al., Chem. Mater*., **15**, 1957, (2003).

[3] K. Nogami, *et al.*, *Appl. Phys. A* **128**, 860 (2022). [4] K. Iida, *et al., Langmuir* **41**, 14156 (2025).

© 2025年 応用物理学会

Al の表面プラズモン共鳴と加熱処理による Ga_2O_3 および ZnO の紫外発光増強

Ultraviolet Emission Enhancement of Ga_2O_3 and ZnO by Surface Plasmon Resonance of Al and Post Annealing

阪公大工 [1], 阪公大研究推進 [2]
○舩戸魁 [1], 野津佑太 [1], 松山哲也 [1], 村井俊介 [1], 和田健司 [2], 岡本晃一 [1]
Osaka Metro. Univ.[1], OMU-ESCARI[2]
○Kai Funato[1], Yuta Nozu[1], Tetsuya Matsuyama[1], Shunsuke Murai[1], Kenji Wada[2], Koichi Okamoto[1]
E-mail: sj24924j@st.omu.ac.jp

1. はじめに

我々は Fig. 1(a)に示す Ga_2O_3 ナノ半球(Ga_2O_3NH)の上に Al を堆積した MoNH (Mirror on Nano Hemisphere)構造において，紫外波長域における発光を伝搬型表面プラモン共鳴によって増強できることを報告した[1]．本研究では，この MoNH 構造に加熱処理を施すことで，さらなる発光強度の増強に成功したことを報告する．また，より広範な発光材料への適用可能性を探るため，本研究では ZnO にも着目した．同様に伝搬型表面プラズモン共鳴によって紫外発光増強が期待される Fig. 1(b)のような Al on ZnO 構造においても同様の加熱処理を施したところ，ZnO のみの試料と比較して 338 倍という著しい発光強度の増強を確認した．本手法による加熱処理を伴う発光増強は，そのメカニズムが金属と誘電体界面の物性変化に起因すると推測されるため，あらゆる発光材料への応用可能性を秘めている点で重要である．

2. 実験方法

MoNH 構造の作製では，まず高真空抵抗加熱蒸着によりサファイア基板上に Ga を 15 nm 堆積した．その後，300 ℃の窒素雰囲気下で 10 分間，次いで 1100 ℃の大気下で 20 分間加熱することにより Ga_2O_3NH を作製した．この上に原子層堆積法(ALD)により Al_2O_3 を 15 nm 堆積し，さらに Al を蒸着することで MoNH 構造を作製した．Al on ZnO 構造は，RF スパッタによりサファイア基板上に ZnO を 10 nm 堆積した後，900 ℃で 10 分間加熱した．その後，MoNH 構造と同様の手順で Al_2O_3 と Al を堆積することで作製した．以上の手順で作製した MoNH 構造と Al on ZnO 構造に対し，450 ℃の大気下で 10 分間加熱処理を加えた．また，比較のために Al の代わりに Ag を用いて，同様の手順により Ag on ZnO 構造を作製した．発光スペクトルは，レーザー励起プラズマ(LDLS)光源を分光器に通した光および波長 325 nm の He-Cd レーザー光を試料の基板側(裏面)から照射し，得られた発光をマルチチャンネル分光器で測定した．

3. 結果と考察

Fig. 2(a)に加熱前後の Ga_2O_3NH および MoNH 構造の PL スペクトルを示す．MoNH 構造を加熱することにより，Ga_2O_3NH のみの試料と比較して発光強度が 6.7 倍に増強した．Ga_2O_3NH のみの試料では同様の加熱処理を行っても顕著な増強は見られなかったことから，この増強は加熱によるスペーサー層および金属層への影響が原因だと考えられる．Fig. 2(b)は加熱前後の ZnO 薄膜および Al on ZnO 構造の PL スペクトルを示している．追加の加熱により，ZnO のみの試料と比較して 338 倍という著しい増強が得られた．一方，Al を Ag に置換した場合，加熱処理による著しい増強は得られなかった．このことから，増強の主な原因は Al/Al_2O_3 界面に起因しており，界面の構造変化が影響を与えている可能性が高いと考えられる．今回の現象は，金属と誘電体界面で生じる普遍的なメカニズムに基づいていると推測されるため，幅広い発光材料への応用が期待される．

発光増強機構に関する詳細な解析については現在進行中であり，当日に詳しく議論する予定である．

[1] K. Funato, T. Kubota, S. Tokimori, T. Matsuyama, K. Wada, and K. Okamoto, ALPS2024, ALPSp2-21.

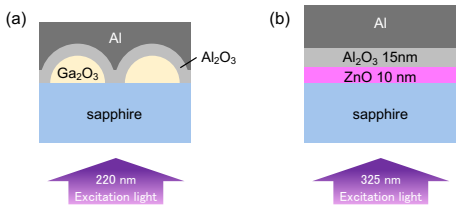


Fig. 1 Schematic diagrams of MoNH structure (a) and Al on ZnO structure (b).

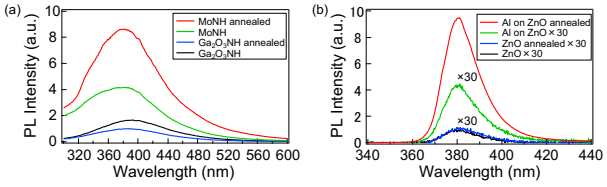


Fig. 2 PL spectra of MoNH structure (a) and Al on ZnO structure (b).

© 2025年 応用物理学会

異方性 $B8_1$ 型金属間化合物ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴特性
Localized surface plasmon resonance properties of intermetallic nanoparticles with $B8_1$-type anisotropic crystal structure

京大院理 [1]，京大化研 [2]，北大触媒科学研 [3]
○(D)イ ヒョンジ [1]，竹熊 晴香 [1,2]，佐藤 良太 [2]，飯田 健二 [3]，寺西 利治 [1,2]
Graduate School of Science, Kyoto Univ. [1], ICR, Kyoto Univ. [2], ICAT, Hokkaido University [3]
○Hyunji Lee [1], Haruka Takekuma [1,2], Ryota Sato [2], Kenji Iida [3], Toshiharu Teranishi [1,2]
E-mail: lee.ji.25s@st.kyoto-u.ac.jp

金属ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴（LSPR）は、ナノ粒子の自由キャリアが入射電場に共鳴し、集団振動する現象である。可視光領域におけるプラズモン研究が *fcc*（Cu 型）構造の 11 族元素（Au、Ag、Cu）のナノ粒子を用いて展開されている中、当研究室では、11 族金属を含まない *C*1（CaF_2 型）構造の $PtIn_2$ 規則合金ナノ粒子が可視域 LSPR を示すことを発見した [1]。さらに、異方性結晶構造の合金ナノ粒子である $B8_1$（NiAs 型）構造の球状 PtSn ナノ粒子の合成を行い、消光スペクトルにおいて可視域（約 380 nm）と近赤外域（約 850 nm）に LSPR 由来の二つのピークを示すことを報告した [2]。二つのピークは、入射光に対するナノ粒子の結晶方位に由来すると予想したが、従来の LSPR 材料は *fcc* や *C*1 構造の等方性結晶構造であり、結晶構造の対称性が LSPR 特性に与える影響は解明できていない。

$B8_1$-PtSn の誘電関数を調べるため、アルミナ製るつぼ内で Pt と Sn を融解させ、バルクの PtSn（図 a）を得た。驚くべきことに、同じ組成であるにもかかわらず、表面に異なる色の領域を目視により確認することができた。それぞれの領域について、分光エリプソメトリー測定を行うと、図 b のように二種類の異なる形状の誘電関数が得られた。さらに有限差分時間領域（FDTD）法によりナノ粒子の電磁場解析を行うと、黄領域 I では二つのピークが、銀白色の領域 II では一つのピークが現れた（図 c）。加えて、$Pt_{291}Sn_{306}$ ナノ粒子を用いた量子化学計算から、二つのピークがナノ粒子を光励起した際の結晶方位に由来することが分かった。以上の結果は、異方性結晶構造ナノ粒子の LSPR 特性における結晶方位の重要性を強く示唆している。

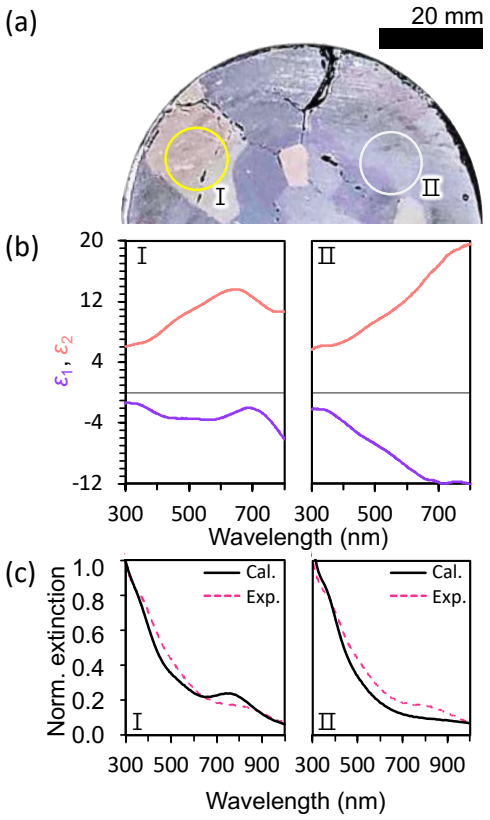


図 (a) $B8_1$（NiAs 型）PtSn のバルク表面の写真（I：黄色領域、II：銀白色領域）、領域 I と II の **(b)** 誘電関数および **(c)** FDTD 計算で得た消光スペクトル（実線）（破線は粒径 10 nm PtSn ナノ粒子のクロロホルム分散溶液の消光スペクトル）

[1] H. Takekuma, R. Sato, T. Teranishi *et al.*, *Adv. Sci.*, **2024**
[2] LEE HYUNJI など、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会（18p-A33-12）

© 2025年 応用物理学会

金ナノ粒子二量体化におけるサブ 1nm ギャップ界面での アルキル鎖偶奇性と溶媒環境の影響

Effect of odd-even alkyl chain and solvent environment on the formation of sub-1 nm gap interfaces in AuNP dimerization

慶大理工　○江刺家　惠子，　斎木　敏治

Keio Univ. ○Keiko Esashika, Toshiharu Saiki

E-mail: esashika@saiki.elec.keio.ac.jp

金ナノ粒子(AuNP)二量体は、局在表面プラズモン共鳴(LSPR)に基づく光学特性を示し、LSPR 波長はその局所的な誘電環境に敏感であり粒子サイズや粒子間距離等に依存した特性が顕著に現れる。また粒子間ギャップには強い電場増強（ホットスポット）が発生し、このホットスポットを利用した表面増強ラマン散乱(SERS)による単一分子検出などの研究が盛んに行われている。これらの光学特性を均一に保持する二量体の作製技法は確実な制御が必要であるが、二量体化メカニズムは未だ不明な点が多く、金界面におけるナノ構造制御の解明が求められる。

本研究では、50 nm-AuNP にアルキル鎖の-(CH_2)- ユニット数(n) (n=2, 3, 4, 5)が 1 つずつ異なる末端カルボン酸アルカンチオールを TBE/pH8 溶媒中で十分担持し分散させ、この分散溶媒環境を塩酸や塩化ナトリウム等の塩化物溶媒に置換し凝集させることで、1nm 近傍の極小粒子間距離に制御した二量体や三量体の作製を行っている。二量体懸濁液はアガロース電気泳動法により粒子量でバンド分離し回収することで得ている(図 1(a))。この二量体懸濁液は担持させたアルカンチオールの-(CH_2)- (n)の違いと、凝集させる溶媒環境の違いでそれぞれの光学的特性を示し、すべて均一な粒子間制御を持ち合わせた二量体であった。LSPR スペクトルにおける縦モードの共鳴波長から粒子間距離を推定し、SERS スペクトルにより界面構造を評価し、結果を模式図として示した。HCl (図 1(b))での二量体は(n)の増加とともに粒子間距離が単調増大する一方、NaCl (図 1c))では HCl より粒子間距離は増加し、またアルキル鎖の偶奇性により(n)が 1 つ増加しても粒子間距離は同等であった。SERS スペクトルはアルキル鎖長による大きな違いは見られないことから、二量体化は末端のカルボン酸の溶媒環境（一価カチオン）による解離状態変化と、アルキル鎖の偶奇による末端カルボン酸の配向が関与した二量体化であると示唆された。光学特性からナノ界面近傍にける分子構造やイオン状態が観察できる二量体化法は、ナノ構造制御に貢献できる手法である。

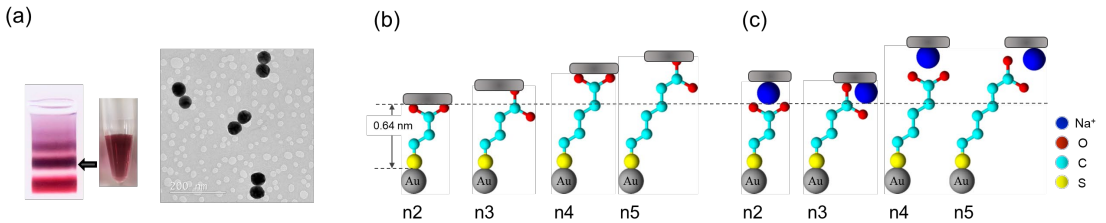


図 1.(a) Suspensions recovered from the second (dime) band in electrophoresis separation of multimers of 50-nm AuNPs. Schematic of dimerized AuNPs gap states modified with R2 to R5 COOH-alkanethiols with HCl (b) and NaCl (c) solvent.

© 2025年 応用物理学会

トレンチ形成によるプラズモニック回折光の光閉じ込め効果の観測と評価

Observation and evaluation of the plasmonic diffraction confinement within the pixel using trench formation

浜松ホトニクス（株）中央研究所　○吉澤 裕輔，上野山 聡，田中 和典，藤原 弘康

Central Research Lab., Hamamatsu Photonics K.K.

○Yusuke Yoshizawa, Soh Uenoyama, Kazunori Tanaka, Hiroyasu Fujiwara

E-mail: yusuke.yoshizawa@hpk.co.jp

CMOS イメージセンサは可視域から近赤外域まで感度を有しており，スマートフォンやディジタルカメラ以外にも車載 LiDAR やナイトビジョンなど近赤外帯域での活用も期待されている．近年は CMOS イメージセンサの画素微細化と多画素化が進む一方で，近赤外帯域においてシリコンの光吸収長が長いことによる光感度層での光吸収の低下や画素間クロストークによる感度低下が課題となっている．この課題に対して，ディープトレンチの画素間分離によるクロストークの低減やトレンチを利用した光閉じ込め効果による近赤外光帯域の高感度化が報告されている [1,2]．同様に，我々もプラズモニック回折現象に着目して研究を進めてきた [3]．しかし，近赤外帯域においてトレンチ形成によるプラズモニック回折光の光閉じ込め効果は，これまで直接観測することはできていない．そこで今回はプラモニック回折構造を搭載した 1 次元光検出器の画素間にトレンチを形成し，近赤外帯域における光閉じ込め効果を観測する．

図 1(a)に実験で使用した 1 次元光検出器（画素周期 25μm）を示す．1 次元光検出器の中央画素にのみプラズモニック回折構造（周期 P: 520nm，高さ H: 200nm，ギャップ G: 80nm）を作製し，画素間には幅 2μm 深さ 10μm の空気層のトレンチが設けられている．図 1(b)はプラズモニック回折構造の有無による光電流増幅率を示しており，赤線は画素間にトレンチがある場合，青線は画素間にトレンチがない場合の光電流増幅率である．この結果より，トレンチ形成による光閉じ込め効果によって光電流増幅率の向上が確認された．本発表では，トレンチ形成による光閉じ込め効果について定量的な評価結果を報告する．

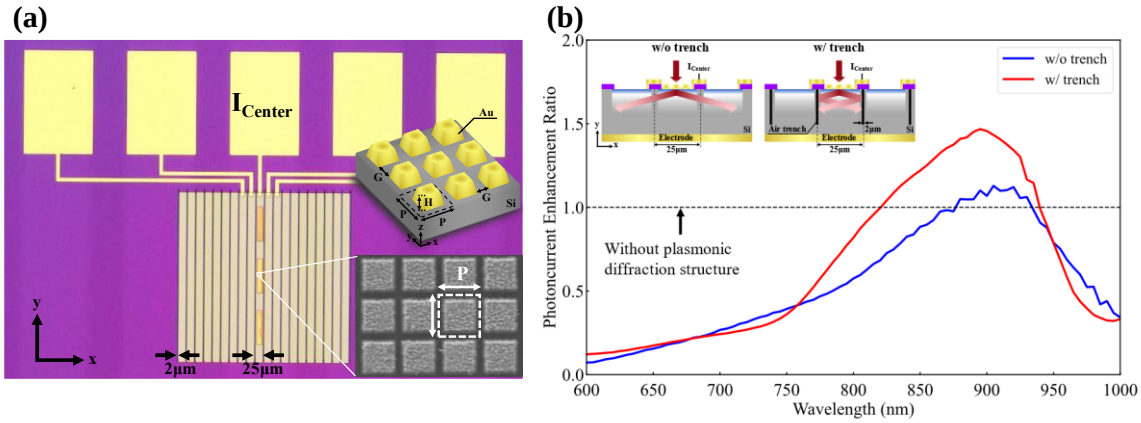


Fig.1 (a) Plasmonic diffraction structures formed on a 1D photodetector array with trenches. (b) Experimental results of the photocurrent enhancement ratio between with and without the plasmonic structure. Red lines and blue lines correspond to with and without the trench, respectively.

[1] S. Yokogawa, et.al. Scientific Reports, 7 (2017), 3832.

[2] A. Ono, K. Hashimoto, & N. Teranishi: Opt. Express, 29 (2021), 21313 - 21319.

[3] S. Uenoyama, et.al. ACS. Applied Electronic Materials, **6** (2024), 7046–7054.

© 2025年 応用物理学会

超高速表面増強蛍光を用いた放射型もしくは準放射型のプラズモンと色素エキシトンとの電磁気学的結合の観測

Observation of electromagnetic coupling between radiant or subradiant plasmon and dye molecular exciton using ultrafast surface-enhanced fluorescence

産総研健医工 [1]，北陸先端大 [2]，○伊藤 民武 [1]，山本 裕子 [2]，

AIST[1], JAIST[2], ○Tamitake Itoh[1], Yuko S. Yamamoto[2]

E-mail: tamitake-itou@aist.go.jp

【序】金や銀のナノ粒子 2 量体間隙ではプラズモン共鳴による電場増強効果によって蛍光レートが 10^5 程度増大し振動緩和レートを超える[1]。この間隙はホットスポット(HS)、この現象は超高速表面増強蛍光(超高速 SEF)と呼ばれる[2]。HS ではプラズモンと少数色素分子のエキシトンとが強結合系を形成している可能性がある[1]。この強結合の観測の為に放射型プラズモンのレーリー散乱スペクトル変化が利用されてきたが、レーリー散乱で観測できない準放射型プラズモンが強結合を支配している系はより普遍的に存在すると考えられる。従って、量子光学的に準放射型プラズモンも観測可能である超高速 SEF を用いて強結合によるスペクトル変化の観測を試みた。

【実験】銀ナノ粒子 2 量体を白色光で暗視野照明しレーリー散乱を測定した。2 量体間隙にローダミン 123 分子を担持させてレーザー波長 456 nm で励起し超高速 SEF を測定した。このスペクトルを無数の銀ナノ粒子の超高速 SEF スペクトルで割ることで表面増強因子(F_R)スペクトルを導いた[3]。

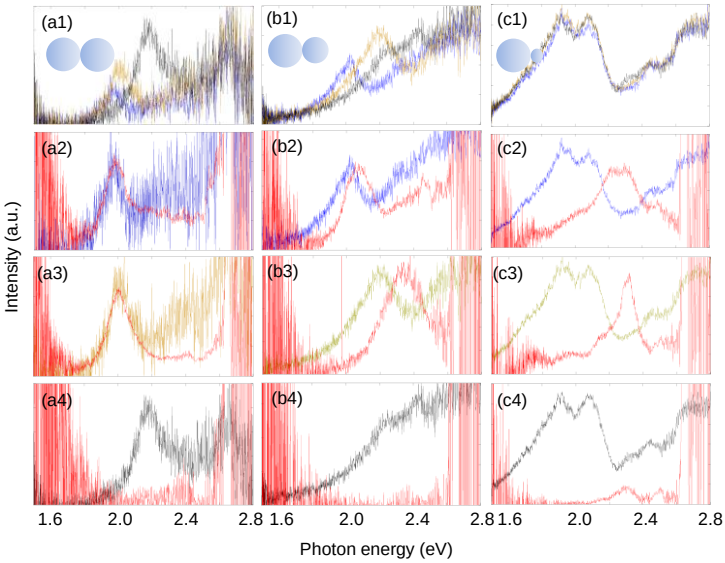


FIG.1(a1)-(c1) Temporal spectral changes (blue to black) in Rayleigh scattering of three dimers during laser excitation. Insets are images of dimers. (a2)-(a4), (b2)-(b4), (c2)-(c4) F_R (red) showing similar, roughly similar, and not similar change to Rayleigh scattering, respectively.

【結果と考察】FIG. 1(a1)-(c1)はレーザー励起と共にスペクトル変化するレーリー散乱を示す。FIG. 1(a2)-(a4)はレーリー散乱と同じ変化をする F_R で放射型プラズモンが超高速 SEF を引き起こしている。FIG. 1(b2)-(b4)はレーリー散乱から高エネルギーシフトして変化する F_R で放射型と準放射型の両方が超高速 SEF を引き起こしている。FIG. 1(c2)-(c4)は両スペクトル形状の変化が少ない為、準放射型が超高速 SEF を引き起こしている。これらの実験結果の解釈を結合振動子モデルとの比較で考察する。

[1] T. Itoh, Y. S. Yamamoto, et al., *Chem. Rev.* **123**, 1552 (2023).

[2] T. Itoh, Y. S. Yamamoto, *J. Chem. Phys.* **159**, 034709 (2023).

[3] T. Itoh, Y. S. Yamamoto, *J. Chem. Phys.* **160,** 024703 (2024).

© 2025年 応用物理学会

強結合・弱結合条件下での分子ダイナミクスと化学過程の制御

Control of molecular dynamics and chemical processes under strong and weak coupling regimes

北大院理[1]，北大院総化[2]
○上野 貢生[1]，加納 更紗[2]，牛越 新波[2]，武内 浩輝[2]，今枝 佳祐[1]，龍崎 奏[1]
Dept. Chem., Fac. Sci., Hokkaido Univ.[1], Grad. Sch. Chem. Sci. and Eng., Hokkaido Univ.[2]
°Kosei Ueno[1], Sarasa Kano[2], Shimba Ushikoshi[2], Hiroki Takeuchi[2], Keisuke Imaeda[1], Sou Ryuzaki[1]
E-mail: ueno@sci.hokudai.ac.jp

近年、光共振器や局在表面プラズモンと分子の電子あるいは振動状態との強い光－物質相互作用の探究が進展し、化学反応性制御における新たなパラダイムが拓かれつつある。この学際的領域は「ポラリトン化学」として知られ、反応経路や電荷輸送特性の量子レベルでの制御を可能にする点で注目を集めている。我々は、自然放出速度を変調する Purcell 効果に加え、光と物質が強く結合したハイブリッド系に固有のコヒーレントな量子状態が、光化学過程やダイナミクスに本質的影響を及ぼす可能性を提唱してきた。一方で、多くの先行研究が強結合に焦点を当てる中、必要とされる高濃度条件が物理化学的メカニズムの定量的解明を困難にしているという課題もある。そこで我々は、より低濃度の弱結合条件に着目し、光－物質相互作用が分子ダイナミクスや化学反応に与える影響の包括的理解を目指して研究を進めている。本研究では、強結合および弱結合条件下において、分子ダイナミクスと化学過程の制御を行うことを目的とした。

強結合条件では、電子線リソグラフィとリフトオフ法により、メロシアニンをドープした PMMA 薄膜あるいは J 凝集体ポルフィリンを銀または金ナノブロック配列上に形成し、顕微分光および干渉型フェムト秒ポンプープローブ測定により光反応性と位相緩和ダイナミクスを解析した。弱結合条件では、1 mM アセトン溶液中のメロシアニンと分散した金ナノ粒子との相互作用を対象とし、過渡吸収分光により光異性化ダイナミクスを追跡した。さらに中赤外領域における振動弱結合の効果を評価すべく、中赤外波長域にプラズモン共鳴を有する金ナノチェイン構造やマイクロキャビティを作製し、Eosin Y の発光特性および MoS_2 二層構造の面外振動モードの振動緩和を、それぞれ蛍光分光およびコヒーレント振動測定により観測した。

強結合下では、メロシアニンの光異性化が著しく抑制されたが、高濃度に起因する機構解釈には限界があった。一方、ポルフィリン J 会合体では位相緩和時間の顕著な長寿命化が観測された。弱結合条件下でも光異性化の抑制が確認され、さらに金ナノ粒子の存在により基底状態ブリーチ回復の時定数が約 2 倍に加速し、蛍光強度も同程度に増強された。これらは Purcell 効果による放射緩和の促進を示唆する。また、中赤外振動結合系においても位相緩和時間の短寿命化が観測され、赤外 Purcell 効果によるエネルギー散逸の加速と整合する結果が得られた。以上より、強結合・弱結合を問わず、電子および振動状態の緩和ダイナミクスが精密に制御可能であることが示され、化学反応や物理化学過程の動的制御に向けた強力な手段を提供するものと期待される。

© 2025年 応用物理学会

異なる波長のレーザー照射下で成長させた銀樹状構造の形状変化

Changes in geometry of silver dendrites under laser irradiation at different wavelengths

岡大院環境生命自然　○(M2) 安達 麟太郎，武安 伸幸

Okayama Univ., ◦Rintaro Adachi, Nobuyuki Takeyasu

E-mail: payy79qf@s.okayama-u.ac.jp

【背景】表面張力の低い溶媒中で銀イオンを急速に還元すると、約 20 nm の尖鋭な先端を持ち、全体としては 10 μm を超える銀樹状構造が成長する。本構造は、スケールの異なる自己相似形を数多く含有するフラクタル構造であるため、可視から近赤外域に渡って、広帯域の光と強く相互作用する[1-3]。これまで、温度や溶媒の種類など、成長環境が形状やサイズに及ぼす影響に関する研究が行われてきた。本研究では、成長環境の要因として、従来の温度や溶媒に加え、レーザー照射下における銀樹状構造の成長を試み、その形状やサイズへの影響を調査している。成長過程において、本構造の先端部には常にナノ構造が形成されており、照射レーザーは、構造全体ではなく、形状やサイズに依存してナノ構造に局所的に結合し、次の瞬間の形状形成に影響を及ぼすと考えられる。その結果、照射条件によって成長する構造の形状を制御できる可能性が示唆される。そこで、本研究では、450 nm、532 nm、640 nm、785 nm のレーザー照射下で銀樹状構造を成長させ、形成した構造の形状・サイズの違いを調査した。

【実験】ITO／ガラス基板に銀ナノプレートを修飾し、硝酸銀／アセトン溶液（12.5 mM）とアスコルビン酸／アセトン溶液（20.0 mM）を調製し、0℃に冷却した。銀ナノプレートを修飾した ITO／ガラス基板をシャーレに入れて 0℃に冷却し、アスコルビン酸溶液で浸した。基板の表面にレーザーを照射すると同時に硝酸銀溶液を滴下し、レーザーを 2 分間照射し続けることで、基板の表面に銀樹状構造を析出させた。その後、基板を取り出し、洗浄・乾燥して、走査型電子顕微鏡（SEM）により観察した。

【結果・考察】図 1 は、450 nm（上）と 785 nm（下）のレーザー照射下（いずれも 40 mW）で合成した銀樹状構造の SEM 像を示す。785 nm のレーザーを照射した場合の方が、サイズが大きく、枝葉の広がりが顕著な銀樹状構造が成長する傾向が見られた。これらの結果から、短波長レーザーを照射した方が、構造異方性が強く、したがって、より速く構造が成長したと推察する。

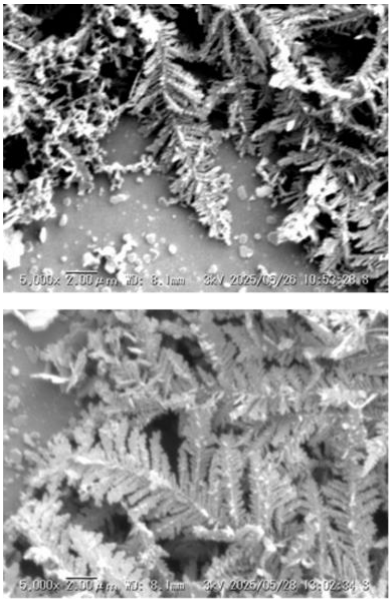


Fig.1.　SEM image of silver dendrites synthesized under 450 nm (top) and 785 nm (bottom) laser irradiation

【参考文献】

[1] N. Takeyasu, et al., APL Photon. **1**, 050801 (2016).

[2] N. Taguchi, et al., Appl. Phys. Express **11**, 025201 (2018).

[3] K. Nogami, et al., Appl. Phys. A **128**, 860 (2022).

© 2025年 応用物理学会

シリコンナノ粒子の Mie 共鳴特性の温度依存性

Temperature-Dependent Optical Responses of Mie-Resonant Silicon Nanoparticles

神戸大院工[1], ○近藤 香奈[1], Mojtaba Karimi Habil[1], 杉本 泰[1], 藤井 稔[1]

Kobe Univ[1], ○Kana Kondo[1], Mojtaba Karimi Habil[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1]

E-mail: sugimoto@eedept.kobe-u.ac.jp

Mie 共鳴を示す高屈折率誘電体ナノ粒子は、粒子内部や近傍に電磁場を閉じ込め、高効率な光吸収を示す。これを利用し、熱光学効果により Mie 共鳴スペクトルを制御できる可能性がある。我々は結晶シリコンナノ粒子の高 Q 値 Mie 共鳴に基づく波長選択的な光吸収と温度上昇を、ラマン散乱ピークの周波数シフトを用いて実験的に実証した[1-2]。本研究では、光加熱による屈折率変化に着目し、レーザー照射下のシリコンナノ粒子の温度上昇特性（吸収特性）を調査する。また、Mie 共鳴スペクトルの温度依存性が特定波長の吸収効率に与える影響を定量的に明らかにする。

図 1 は励起レーザー強度と単一のシリコンナノ粒子（直径 152 nm）の上昇温度の関係を示している。各レーザー強度でのナノ粒子の温度はラマン散乱スペクトルより見積もった。レーザー強度に対する温度上昇は線形からはずれていることがわかる。この結果は、温度上昇に伴うシリコンの屈折率変化が、励起波長の光吸収特性に影響を与えていることを示唆している。

これを確かめるため、シリコンナノ粒子を波長 405 nm のレーザーで加熱しながら、散乱スペクトルを測定した。図 2 は室温(黒線)、515 K(青線)、698 K(緑線)、884 K(赤線)におけるシリコンナノ粒子（直径 221 nm）の散乱スペクトルを示す。室温では磁気四重極子（MQ）および電気四重極子（EQ）モードに起因するピークが明瞭に観測される。温度が上昇するにつれて、スペクトルが全体的にブロードになり、長波長シフトする。特に、698 K 以上では MQ モードは消失している。これは、温度上昇によりシリコンの屈折率の実部および虚部が増加することに起因すると考えられる。これにより、固定波長で見た場合は温度とともに吸収量が変化すると予想される（図 1）。講演では、シリコンの屈折率の温度依存性を用いて計算した吸収スペクトルとともに詳細に議論する。

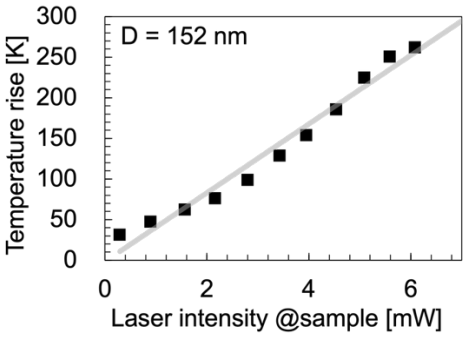


Figure 1. Temperature rise of 152 nm Si NP as a function of 405 nm laser intensity.

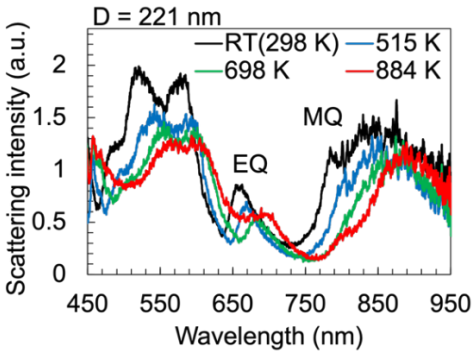


Figure 2. Measured scattering spectra of a 221 nm diameter Si NP measured at room temperature (black curve), 515 K (blue curve), 698 K (green curve), and 884 K (red curve).

[1] 近藤他, 2023 年第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 23p-A309

[2] K. Kondo *et al. ACS Appl. Nano Mater.* **7**, 23101 (2024).

© 2025年 応用物理学会

2 次元物質単結晶の光学特性、力学特性の検討

Studies on Optical and Mechanical Characteristics of 2D-Material Single Crystals

NIMS　サホー ミヒルクマル，○岩長 祐伸
NIMS　Mihir Kumar Sahoo, ○Masanobu Iwanaga
E-mail: iwanaga.masanobu@nims.go.jp

遷移金属ダイカルゴゲナイト（TMDC）などの 2 次元物質はファンデルワールス力によって層状に積層し 3 次元的な単結晶を形成する。TMDC は原子層物質として注目されており、化学気相成長される単原子層の研究は電気的、光学的特性観点から世界中で精力的に行われている。

我々はこれまでに平方センチメートル級の大面積 TMDC 単原子層をメタ表面上に転写して顕著な発光増強効果を報告した［1,2］。そのなかでウェットトランスファーを行ったが、単原子層を理想的に転写するには至らなかった。TMDC の光学的、電気的な特性を最大限活用するためには 2 次元物質の転写を理想的に行う手法の確立と、その手法で配置された人工環境（メタ表面やトランジスタなど）における特性の解明が重要である。

今回、二硫化モリブデン（MoS_2）結晶から出発して、剥離とドライトランスファーを繰り返すことにより熱酸化処理シリコン（Si）基板上に 2 次元層状単結晶の薄片を多数得た。図 1 は室温における光学特性評価の一例を示している。

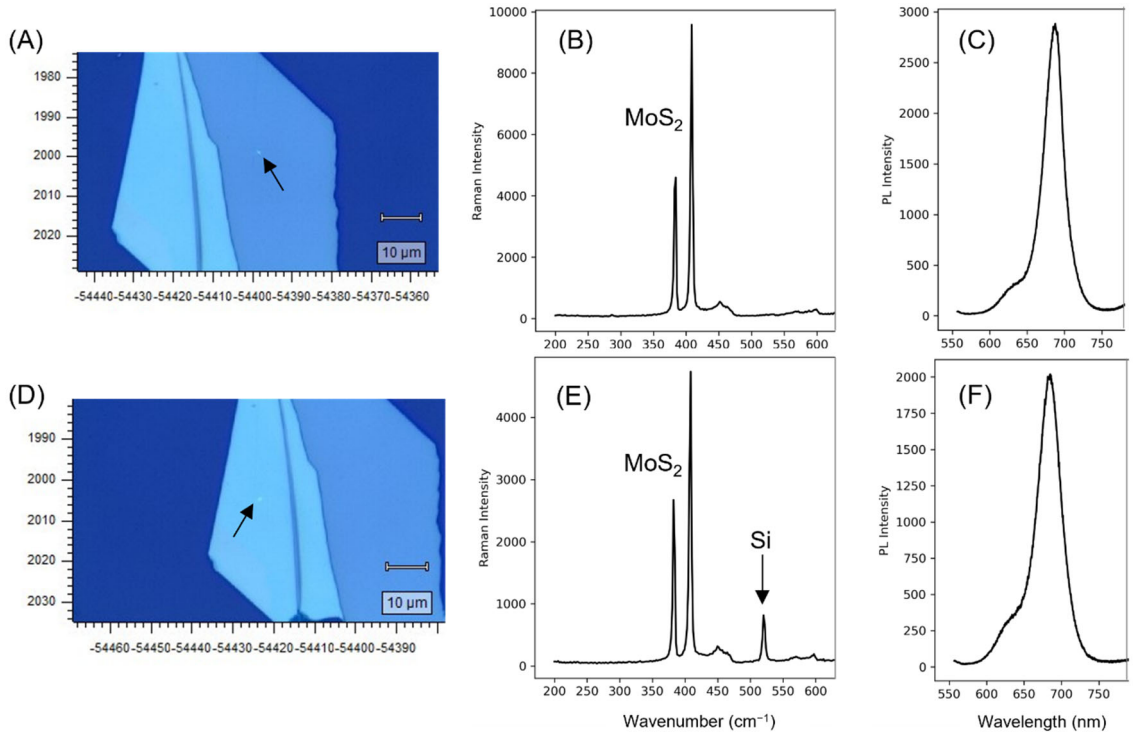


図 1． (A) MoS_2 結晶薄片の光学顕微鏡写真と励起レーザー光スポット（矢印位置）．(B), (C) それぞれ A の測定位置おけるラマン散乱スペクトルと励起子発光スペクトル．(D)–(F) 励起スポット以外は A–C と同様．E では Si ラマン線が観測され、結晶が A での測定位置より数倍薄いことを示唆している．

講演ではピックアップ・タッチダウン方式による単結晶薄片の移送に関する力学的な変化についても検討した結果を報告する予定である。

謝辞：測定装置等で協力を受けた NIMS 佐久間芳樹氏、大竹晃浩氏、岩崎拓哉氏に感謝する。

[1] M. Iwanaga, X. Yang, V. Karanikolas, *et al*., “Prominently enhanced luminescence from a continuous monolayer of transition metal dichalcogenide on all-dielectric metasurfaces,” Nanophotonics **13**, 95 (2024).
[2] M. Iwanaga X. Yang, V. Karanikolas, *et al*., “2D-Material-Fused High-Emittance Plasmo–Photonic Metasurfaces,” Adv. Opt. Mater. **12**, 2303309 (2024).

© 2025年 応用物理学会

ミラー上のシリコンナノ粒子の散乱発色制御

Control of Scattering Colors of Silicon Nanoparticles on a Mirror

神戸大院工[1]，○(M1)上林　武尊[1]，Jialu Song[1]，杉本　泰[1]，藤井　稔[1]

Kobe Univ.[1], ○Takeru Kambayashi[1], Jialu Song[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1]

E-mail: sugimoto@eedept.kobe-u.ac.jp

光学的な共鳴をもつナノ粒子を金属ミラー上に配置（nanoparticles-on-mirror; NPoM）した構造は、粒子ーミラー間の距離に依存した光学特性を示す。特に、粒子ーミラー間の Fabry-Pérot モードを利用したナノ粒子の共鳴吸収・散乱制御技術は、リアルタイムな湿度・ガスセンサーや動的な発色制御を利用したディスプレイへの応用が期待されている[1,2]。これまでの金属ナノ粒子を用いた NPoM 構造では電気双極子共鳴の制御が主な研究対象とされてきた。本研究では、可視域で電気的・磁気的 Mie 共鳴を示す高屈折率誘電体（Si）のナノ粒子をミラー上に配置した構造に着目した。図(a)に示すミラー上の Si ナノ粒子(SiNPoM)について、反射面での電場と磁場のふるまいの違いを利用し、電気双極子・磁気双極子 Mie 共鳴モードを独立に制御することで、スペーサー膜厚の調整による広い色域での散乱発色制御を試みる。

図(b)に SiNPoM 構造（Si 粒径 160 nm）の後方散乱スペクトル（計算）の SiO_2 スペーサー膜厚依存性を示す。Fabry-Pérot 干渉により Si ナノ粒子の電気双極子共鳴と磁気双極子共鳴がスペーサー膜厚の変化とともに変調されていることがわかる。特に、電気双極子(ED)と磁気双極子共鳴(MD)で、強度が最大となるスペーサー膜厚が異なっている。図(c)はスペーサー膜厚 120 nm、230 nm における後方散乱スペクトルである。膜厚 120 nm では、電気双極子共鳴が選択的に抑制されており、磁気双極子共鳴でのみ強く散乱する。これにより、非常に彩度の高い赤色発色が可能であると期待できる。230 nm では磁気双極子共鳴が抑制され、電気双極子共鳴が支配的となる。これは、SiNPoM 構造のスペーサー膜厚制御により広範囲に色相を制御可能であることを示唆している。講演では、当グループで開発した球状シリコンナノ粒子[3]を利用し、SiNPoM 構造の光学特性を実験的に示す。[1] J. Qin, *et al.*, *J. Phys. Chem. C* (2017). [2] T. D. James, *et al.*, *Nano Lett.*(2016). [3] H. Sugimoto, *et al.*, *Adv. Opt. Mater.* (2020).

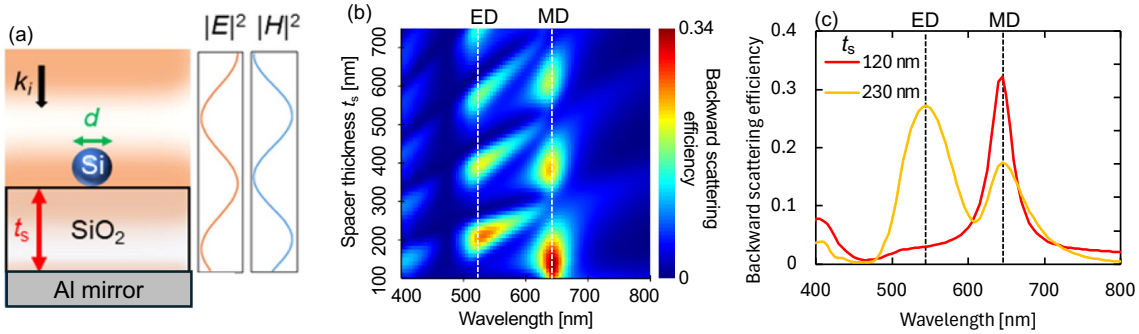


Figure 1. (a) Schematic of a Si NP on an Al mirror *via* a SiO_2 spacer. (b) Contour plot of calculated backward scattering spectra of a 160 nm-Si NP on an Al mirror with different SiO_2 spacer thicknesses. (c) Backward scattering spectra extracted from (b).

© 2025年 応用物理学会

Cs_4PbBr_6への電子線照射による$CsPbBr_3$ナノ光源自在配置

Deterministic arrangement of $CsPbBr_3$ nano-light source in Cs_4PbBr_6 thin films by electron beam irradiation

九大総理工[1]，九大工[2]，九大先導研[3]，バージニア工科大[4] ○(M2)藤丸朋泰[1]，(B4)平井寛太[2]，(M2)稲又雅人[1]，(M2)田中宏武[1]，池内みどり[3]，山下英博[3]，井原史朗[3]，村山光宏[3,4]，斉藤光[3]

Kyushu Univ.[1,2], IMCE, Kyushu Univ.[3], Virginia Tech.[4],

○*Tomoyasu Fujimaru*[1], *Kanta Hirai*[2], *Masato Inamata*[1], *Hiromu Tanaka*[1], *Midori Ikeuchi*[3], *Hidehiro Yamashita*[3], *Shiro Ihara*[3], *Mitsuhiro Murayama*[3,4] *and Hikaru Saito*[3]

E-mail: fujimaru.tomoyasu.622@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

ハライドペロブスカイトは高いフォトルミネセンス量子収率を示し、さらに室温でも単一光子源として機能することが知られている[1]。また、$Cs_4PbBr_6/CsPbBr_3$ ナノ複合膜に大電流電子線を照射すると、その照射領域のCL(Cathodoluminescence)強度が上昇することが確認されている[1]。本研究では、$CsPbBr_3$ナノ結晶を含まないように組成制御し、CsBr 相を含むものの、Cs_4PbBr_6相が主となる薄膜を作製した。この Cs_4PbBr_6-CsBr 複合膜に 1 nA 以上の大電流電子線照射（強照射）によって、ナノ光源を自在配置した。さらに、194 pA の低電流電子線によって CL 分光計測を実施し、強照射領域に生じた変化を解析した。

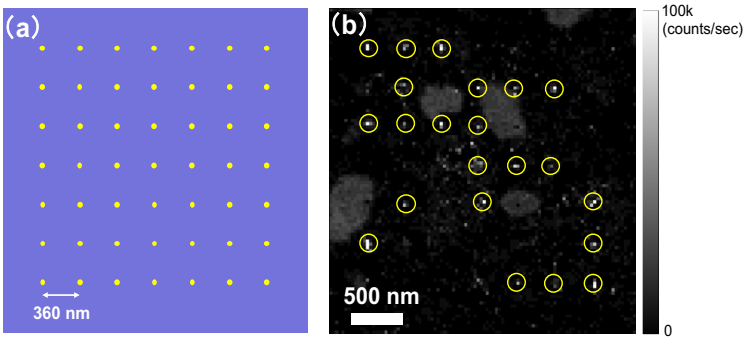


Fig. 1 (a) Schematic of the 7×7 irradiated points. (b) Panchromatic CL intensity map corresponding to (a) after strong irradiation. Yellow markers indicate where light sources were successfully generated.

2. 実験結果と考察

強照射及び CL 分光計測には、加速電圧 300 kV で JEOL 社製走査透過電子顕微鏡(JEM-3200FSK)を用いた。成膜基板には、SiMPore 社製の TEM 用 Si_3N_4 薄膜(20 nm)付グリッドを用いた。液相合成した Cs_4PbBr_6-$CsPbBr_3$ 粉末に CsBr 粉末を混合し、蒸着法により厚さ 100 nm に堆積させた。RF マグネトロンスパッタリングにより SiO_2 層で Cs_4PbBr_6-CsBr 複合層の上下をコーティングし、全体として SiO_2(10 nm)/ Cs_4PbBr_6-CsBr(100 nm)/ SiO_2(5 nm)/ Si_3N_4(20 nm)多層膜とした。この多層膜を真空中で 250℃、30 分間加熱し、結晶性を向上させた。Fig. 1(a)に示すように、7×7（周期 360 nm、計 49 点）の正方格子状に、一点あたり 10 秒間、強照射した。その後、低電流条件で同視野の CL 強度マップを取得したところ、Fig. 1 (b)に示すように、正方格子状にナノ光源が生成されたことが明瞭に確認された。一方で、強照射箇所が光源化していない箇所も観察され、光源化率は 45%であることがわかった。また、ナノ光源から取得された CL スペクトルは波長 523 nm にピークを示し、$CsPbBr_3$ ナノ粒子が電子線照射によって生成されたことを示唆した。

参考文献

[1] C. Zhu et al., Nano Lett. 22, 3751–3760 (2022)

[2] M. Inamata et al., 13th Asia Pacific Microscopy Congress, Brisbane, Australia, February 2-7, 2025

© 2025年 応用物理学会

相対標準偏差を使った SERS 基板の均一性評価

Evaluation of SERS substrates uniformity using relative standard deviation

東京科学大学　工学院

○(M2)鈴木翔真, Maria Vanessa Balois-Oguchi, 梶川浩太郎

○Suzuki Shoma. , Maria Vanessa Balois-Oguchi , Kotaro Kajikawa

E-mail: kajikawa@ee.e.titech.ac.jp

近年、アニール処理、金属ナノ粒子の修飾、あるいは企業独自の製造方法を用いた多様な SERS 基板が開発されているが、ラマン信号の均一性や再現性に課題がある。本研究では、 6 種類の異なる SERS 基板を用いて、感度と均一性を比較し、今後の化学センシングやバイオ分析への応用に適した基板を選定することを目的とした。用意した基材は①直径 50nm の金ナノ粒子を用いた SERS 基板　②直径 30nm の金ナノ粒子を用いた SERS 基板　③、④、⑤　膜厚 5nm で真空蒸着した金島状薄膜を 500℃、700℃、900℃で 1 時間アニール処理した SERS 基板　⑥市販の基板。これら 6 種類の SERS 基板上に濃度 64 μ M のローダミン 6G エタノール溶液を 20μl 滴下し、ラマン信号を測定した。均一性を評価する方法として RSD（relative standard deviation）を求めた。[1] Fig. 1(a)に示す通り、①の基板（50nm 金ナノ粒子装飾基板）は、他の基板と比較して RSD 値が最も低く、優れた均一性を示した。さらに Fig. 1(b)における正規化およびスケーリングされたスペクトルの比較から、同一条件下において①の基板が最も高い SERS 増強効果を有することが確認された。以上の結果より、①の基板は今後の分子吸着競合実験などの応用に適していると判断された。

この研究の一部は CREST(MJCR22B4)の支援によるものです。

(a)

	RSD(%) 654 cm^{-1}	RSD(%) 834 cm^{-1}
NPs (50 nm)	34.71	38.44
NPs (30 nm)	247.9	301.0
Annealing (500°C)	247.0	193.9
Annealing (700°C)	237.3	354.7
Annealing (900°C)	220.3	-
Commercial	80.77	203.6

(b)

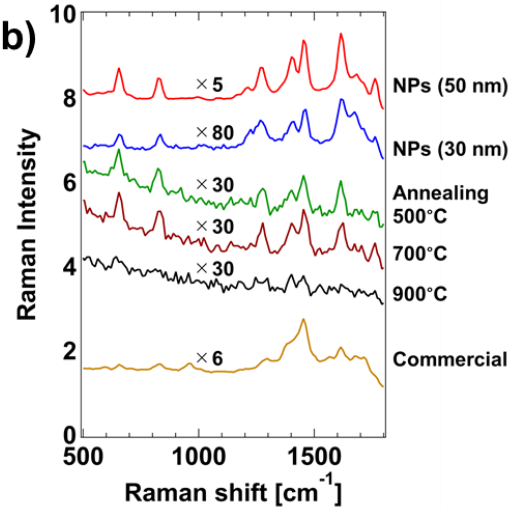


Figure 1. Comparison of 6 substrates: (a) RSD and (b) SERS spectra.

参考文献

[1] Yu Liu & Yang Zhang & Morgan Tardivel & Médéric Lequeux & Xueping Chen & Wei Liu & Jiaoqi Huang1&Huiyan Tian & Qiqian Liu & Guorong Huang & Raymond Gillibert & Marc Lamy de la Chapelle & Weiling Fu, *Plasmonics* 15, 743–752 (2020).

© 2025年 応用物理学会

In-vivo センシングに向けた金-銀コアシェルナノ粒子超格子の単結晶作製

Fabrication of single crystals of Au@Ag core-shell nanoparticle superlattices for in-vivo SERS detection

名大院工 [1]，東北大 多元研 [2]，名大 未来研 [3]，九大 理学研究院 [4]
○池内 泰士 [1]，小澤 咲季 [1]，張 力東 [1]，新家 寛正 [2]，小川 智史 [1,3]，
楽原 真人 [3]，平松 光太郎 [4]，田川 美穂 [3]，
Grad. Sch. of Eng., Nagoya Univ. [1], IMRAM Tohoku Univ. [2],
IMaSS Nagoya Univ[3]., Faculty of Science, Kyushu Univ[4].
○Taito Ikeuchi[1], Saki Kozawa[1], Lidong Zhang[1], Hiromasa Niinomi[2],
Satoshi Ogawa[1,3], Makoto Kuwahara[3], Kotaro Hiramatsu[4], Miho Tagawa[3]
E-mail: ikeuchi.taito.j6@s.mail.nagoya-u.ac.jp

【緒言】近年、貴金属ナノ構造による表面増強ラマン散乱（SERS）を利用した生体組織のセンシングに注目が集まっている。特に DNA 修飾金ナノ粒子(DNA-AuNP)結晶は、生体適合性に優れ、構造の設計自由度や再現性が高いことから、安定して SERS を発現する生体内光学プローブとして有望である。本研究では DNA-AuNP 超格子の単結晶を作製し、結晶のナノ構造や光学特性について調べた。
【実験方法】DNA-AuNP を二種類作製し、それらを架橋する DNA と混合して昇温、徐冷することで DNA-AuNP 結晶を作製した。硝酸銀の還元反応により結晶を構成する金ナノ粒子表面へ銀を被覆した。その後、過塩素酸ナトリウム水溶液で結晶を洗浄し、高濃度の硝酸銀水溶液を加えることで DNA を収縮させた。それらの結晶を純水中に分散させ、X 線小角散乱(SAXS)法により構造解析を行った。蛍光分子である Rhodamine B (RhB) を異なる濃度でそれぞれ添加し、溶液中でラマン分光測定を行った。
【結果と考察】SEM 像の解析結果から、結晶中のナノ粒子が均一に被覆され、単結晶形状が維持されていることが分かった(Fig. 1a)。純水中に分散させた結晶で X 線小角散乱法による測定を行ったところ、複数のピークが出現し秩序性が確認された(Fig. 1b)。結晶と RhB の混合液に対しラマン分光測定を行った結果、RhB 特有のピークが現れ、広い濃度域で安定した分子検出を達成した(Fig. 1c)。

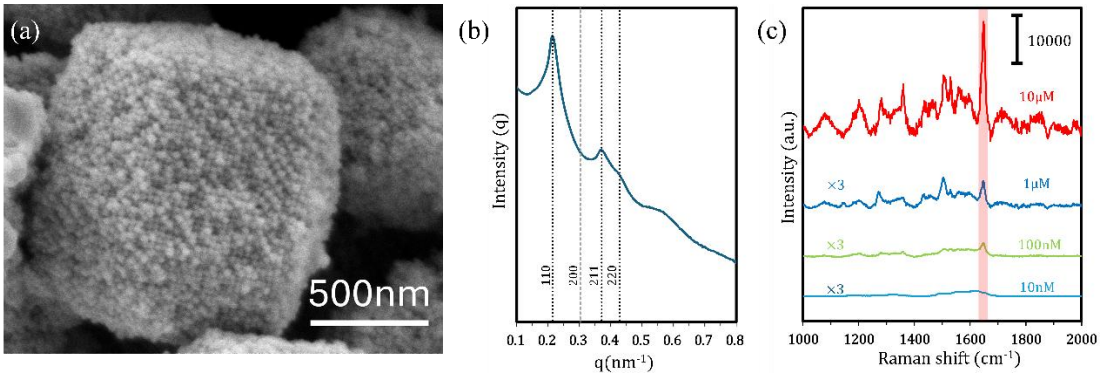


Fig. 1 (a) SEM image of DNA-AuNP crystals with Ag shell and shrinked DNA. (b) SAXS profile of the crystals. (c) Raman spectrum of RhB solution in different concentrations, using crystals as SERS probes.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.11 Nanoscale optical science and near-field optics

[9p-N204-1~16] 3.11 Nanoscale optical science and near-field optics

[9p-N204-1]

[The 58th Young Scientist Presentation Award Speech] InP metasurface lens and polarization beam splitters at telecom wavelengths

○Ikue Hiraoka[1], Masashi Miyata[1], Yuki Yamada[1], Toshikazu Hashimoto[1], Fumito Nakajima[1] (1.NTT)

[9p-N204-2]

Energy conversion from near-field thermal radiation based-on optical rectenna technology

○Yuji Oka[1], Zhen Liu[1], Makoto Shimizu[1], Olivier Merchiers[2], P-Olivier Chapuis[2], Hiroo Yugami[1] (1.Tohoku Univ., 2.INSA LYON)

[9p-N204-3]

Low-voltage-driven silicon-organic-hybrid optical metasurface modulator

○(D)Go Soma[1], Koto Ariu[1], Seidai Karakida[1], Yusuke Tsubai[1], Takuo Tanemura[1] (1.The Univ. of Tokyo)

[9p-N204-4]

GHz-Bandwidth Plasmonic-Organic-Hybrid Surface-Incident Optical Modulator

○Koto Ariu[1], Go Soma[1], Hiroki Miyano[1], Seidai Karakida[1], Takuo Tanemura[1] (1.The Univ. of Tokyo)

[9p-N204-5]

Chiral Shaping of Isotropic Nanoparticles by Chemical Reactions under Circularly Polarized Light

○Takuya Ishida[1,2], Jiajie Liu[1], Yuri Kameoka[1], Seug Hyuk Lee[1], Hiroki Kasai[3], Hiroshi Sugimoto[3], Minoru Fujii[3], Tetsu Tatsuma[1] (1.IIS, the Univ. of Tokyo, 2.PRESTO, JST, 3.Kobe Univ.)

[9p-N204-6]

Chiral 2nd-order nonlinear optical properties of asymmetric Al nanorod dimer

○Natsuho Konno[1], Kamiya Masayoshi[1], Sugita Atsushi[1] (1.Shizuoka Univ.)

[9p-N204-7]

Design of X-shaped Chiral Metamaterial for Multi-mode Vibrational Circular Dichroism Reponses

○Soma Hiramatsu[1], Kosuke Yunoki[1], Yuri Fukaya[1], Kenji Turuta[1] (1.Okayama Univ.)

[9p-N204-8]

Second harmonic generation of NLO polymer/Si nanoparticles hybrid structure

○(M2)Marina Shimada[1], Marina Shimada[1], Haruka Nakayasu[1], Masayoshi Kamiya[1], Atsushi Sugita[1] (1.Shizuoka Univ.)

[9p-N204-9]

Chiral growth of manganese oxide on the surface of colloidal gold nanorods under circularly polarized light irradiation

○koichiro saito[1], Yoshie Ishikawa[1] (1.AIST)

[9p-N204-10]

Enhanced SHG effect of NLO polymer/1D Au nanoprism array structure

○Shusaku Nandate[1], Goushi Kawamura[1], Masayoshi Kamiya[1], Atsushi Sugita[1] (1.Shizuoka Univ.)

[9p-N204-11]

Surface-Enhanced Infrared Photothermal Spectroscopy Using Visible Mie Resonances of Si Nanoparticles

○(M2)Daiki Hanano[1], Keisuke Moriasa[2], Hiroshi Sugimoto[2], Minoru Fujii[2], Takuo Tanaka[1,3], Taka-aki Yano[1,3] (1.Tokushima Univ., 2.Kobe Univ., 3.RIKEN)

[9p-N204-12]

Design and Characterization of Long Range Surface Plasmon Resonance Sensors towards Highly Sensitive Detection of Odor Molecules in Aqueous Solution

○Yusuke Mochizuki[1], Masahiko Hasumi[1], Hiromasa Shimizu[1] (1.TUAT)

[9p-N204-13]

SPR Sensor Modified with Highly Cationic Polymers: Toward Selective Detection of Acetic Acid and Ethanol

○Asahi Kaji[1], Ryuta Minowa[1], Masahiko Hasumi[1], Hiromasa Shimizu[1] (1.TUAT)

[9p-N204-14]

Technique of Casimir force computation from limited frequency responses of material permittivities

○HIDEO IIZUKA[1] (1.KEK)

[9p-N204-15]

Design and Evaluation of High-Speed SICM Z-Scanner with Modular Probe-Exchange

○(M1)Nami Fujii[1] (1.Kanazawa Univ.)

[9p-N204-16]

Development of an Automated High-Throughput Scanning Probe Microscope System for Live-Cell Measurements

○(M1)Tatsuya Toda[1], Shinji Watanabe[2] (1.Math. &Phys., Kanazawa Univ., 2.WPI-NanoLSI, KanazawaUniv)

光通信波長帯 InP メタサーフェスを用いた集光及び偏光分離の実証

InP metasurface lens and polarization beam splitters at telecom wavelengths

日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所 [1]

○平岡 郁恵 [1]，宮田 将司 [1]，山田 友輝 [1]，橋本 俊和 [1]，中島 史人 [1]

NTT Device Technology Labs., NTT Corporation[1]

○Ikue Hiraoka[1], Masashi Miyata[1], Yuki Yamada[1], Toshikazu Hashimoto[1], Fumito Nakajima[1]

E-mail: ikue.hiraoka@ntt.com

1. 背景

大容量光通信のためには，光回路の小型化，低コスト化が重要であり，近年は光メタサーフェスの応用が報告されている[1]．我々は，光回路の大幅な小型化及び発光・受光デバイスへの集積を目的として，光通信用デバイスに用いられる InP 材料を用いた光メタサーフェス形成を検討した[2]．本講演では，InP 光メタサーフェスによる集光及び偏光分離を設計し、作製評価した結果を報告する．

2. InP 光メタサーフェスの設計

Fig. 1 に，今回検証した光メタサーフェスの概略を示す．InP 基板には機械強度の高いナノホールが形成され， InP 表面には TiO_2 と SiO_2 からなる反射防止(AR)層が形成された構造を想定した[3]．ナノホール高さ h は 1500 nm，直径 d は 100-400 nm，周期は 450 nm とし，入射光は波長 1550 nm とした．本構造は透過率 99.2 %を示す他，直径に応じた位相変化量は 0-2π を超えており，十分な光波面制御性を有している．

主な光回路機能として集光及び偏光分離を逆設計手法により設計した．Fig. 2 に設計した偏光分離素子の透過光強度分布を示す．半導体基板を想定した 600 μm の焦点距離において，素子全域に入射するコリメート光から約 4 μm への集光及び 2 偏光の分離を確認した．また，Fig. 3 に設計結果をもとに作製した偏光分離素子を示す．InP 基板にメタサーフェス構造の形成が可能であることを確認した．以上より，発光・受光デバイスへの光メタサーフェスの適用性が示唆される．

3. 結論

光通信波長帯における InP メタサーフェスを設計し，光通信用デバイスとメタサーフェスの集積において，所望の集光，偏光分離の実現を期待できる計算結果が得られた．実際の評価結果については当日報告する．

[1] K. Komatsu *et al.*, OFC (2024)
[2] 平岡郁恵 他，2025 応物春季学術講演会
[3] M. Miyata *et al.*, Opt. Express **32**, 48943 (2024)

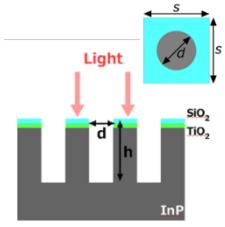


Fig. 1 Schematic of an InP metasurface with AR layers.

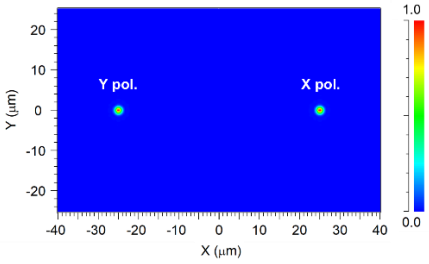


Fig. 2 Calculated light transmitted through the polarization separation metasurface.

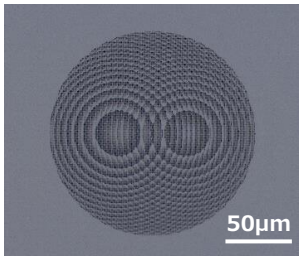


Fig. 3 Fabricated polarization separation metasurface.

© 2025年 応用物理学会

光レクテナ技術に基づく近接場熱放射の電力変換

Energy conversion from near-field thermal radiation based-on optical rectenna technology

東北大院工[1]，INSA LYON[2] ○(M2) 岡祐志[1]、Liu Zhen[1]、
清水信[1]、Olivier-Merchiers[2]、P-Olivier Chapuis[2]、湯上浩雄[1]
Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.[1], INSA LYON[2] ○(M2)Yuji Oka[1], Zhen Liu[1],
Makoto Shimizu[1], Olivier-Merchiers[2], P-Olivier Chapuis[2], Hiroo Yugami[1]
E-mail: yuji.oka.t7@dc.tohoku.ac.jp

近年、自然界の微小なエネルギーを電力に変換するエネルギーハーベスティング技術への需要が高まっている。その中でも熱放射は、有限温度のあらゆる物体から放出されることや、産業界には多くの排熱が存在するため、このエネルギーを電力変換することは有意義である。

レクテナとは、電磁波のエネルギーを電力に変換するデバイスの一つである。レクテナはアンテナとダイオードによって構成され、アンテナが電磁波を受信し内部の交流電流に変換し、ダイオードが交流電流を直流電流に変換することで発電することができる。この技術は無線電力伝送技術としてマイクロ波領域において既に用いられているが、近年、可視光や赤外光といった一般的な電波に対して非常に高い周波領域においても応用できることが報告されている[1]。レクテナは、PV セルのような光電変換デバイスに比べて、理論上の変換効率が 100 %近くに達することや、アンテナの構造によって変換波長を自由に設計できるといった大きな利点があり、新たな熱輻射の電力変換技術として大きな注目を集めている。

本研究では、レクテナの原理に基づいたデバイスを使用し、近接場熱放射の電力変換技術について解析的な研究を行った。具体的には揺動電磁気学および波動関数解析に基づくトンネル電流解析によって電力変換特性を検証し、近接場熱放射を電力変換するデバイス設計最適化を行った。近接場熱放射とは、熱を放出するエミッターと熱を受け取るレシーバーの距離を放射波長よりも小さくした場合に発生する熱放射の形態であり、その放射強度は理想的な黒体放射を超越することが明らかになっている。本研究では Fig. 1(a)に見られるような、金属-絶縁体-金属 (MIM)トンネルダイオードと呼ばれる、電子のトンネル効果を利用して整流効果を実現するダイオードを用いた簡単な構造から 1 次元の解析を始めた。はじめに、近接場熱放射によるエネルギーがデバイス構造内でどの程度吸収されるかを計算し[2, 3]その結果生成されるトンネル電流の大きさを導いた[4]。Fig. 1(b)に、異なるトンネルダイオードの絶縁体層の厚さにおける、エミッターとデバイス間の距離を変化させた際の生成されるトンネル電流が示されている。エミッターとデバイス表面の距離が小さくなり、近接場領域に達すると生成電流は大きく上昇することがわかる。また、絶縁体層の厚さが小さくなると生成電流も急激に増加する。これらの結果から、近接場熱放射による強力なエネルギーを本構造を用いて利用できることがわかる。また、本デバイスはセンシングシステム等に利用できる可能性を示しており、今後の構造の最適化によってレクテナの実用化にも応用されることが期待される。

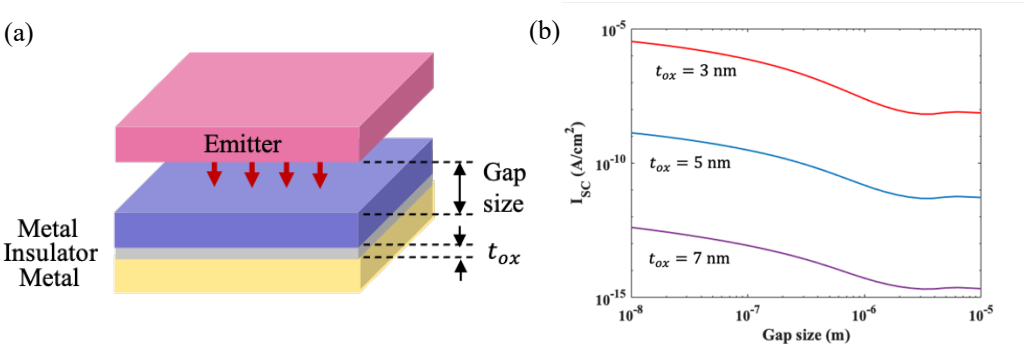


Figure 1. (a) Calculation model using a metal-insulator-metal diode (b) Generated short-circuit current I_{SC} with variable gap size and thickness of insulator layer

[1] Sharma, A., Singh, V., Bougher, T., et al. A carbon nanotube optical rectenna. *Nature Nanotech* **10**, 1027–1032 (2015)
[2] P.S. Davids and J. Shank, Density matrix approach to photon-assisted tunneling in the transfer Hamiltonian formalism. *Phys. Rev. B* **97**, 075411 (2018)
[3] Julien Legendre, Theoretical and numerical analysis of near-field thermophotonic energy harvesters. PhD thesis, INSA Lyon (2023)
[4] Blake J. Eliasson, Metal-Insulator-Metal Diodes For Solar Energy Conversion. PhD thesis, University of Colorado (2001)

© 2025年 応用物理学会

低電圧駆動シリコン有機ハイブリッド型光メタサーフェス変調器

Low-voltage-driven silicon-organic-hybrid optical metasurface modulator

○(D)相馬豪，蟻生高人，唐木田晴大，鍔井雄介，種村拓夫（東大院･工）
○Go Soma, Koto Ariu, Seidai Karakida, Yusuke Tsubai, Takuo Tanemura (The Univ. of Tokyo)
E-mail: go.soma@tlab.t.u-tokyo.ac.jp

背景：従来の LCoS (liquid crystal on silicon) や DMD (digital micromirror device) に代わる高速な空間光変調器は，多くの光応用での活用が期待される．そこで近年，有機電気光学 (OEO: organic electro-optic) 材料とナノ構造共振器を用いた電気光学メタサーフェス変調器が注目を集めている[1-4]．しかし従来デバイスでは，十分な変調のために 10 V 以上の駆動電圧が必要であり，実用を妨げる大きな要因となっていた．本研究では，低電圧で駆動可能なシリコン有機ハイブリッド型光メタサーフェス変調器を提案し，作製デバイスを用いて実験実証を行う．

提案構成：提案する変調器は，シリコンの二次元周期メタサーフェス構造に対して OEO 材料を埋め込むことで実現される[Fig. 1(a)]．シリコンの微細な突出部の幅 $w_{\pm}$ に摂動を加えた二量化構造を用いることで，x 偏波の面入射光に対して，導波モード共鳴に基づく高 Q 値の共振が発生し，反射および透過スペクトルに鋭い変化が生じる[5]．ドープしたシリコン格子を介して OEO 材料に外部電界を印加することで，ポッケルス効果により共振波長がシフトし，出力光強度の変調が可能となる[Fig. 1(b)]．ここで，Fig. 1(c)に示される通り，OEO 材料が埋め込まれた幅 150 nm の狭いスロット領域において，光共振電界が強く閉じこもるため，低電圧で効率的な変調が実現される．

実験結果：Fig. 1(d)に作製したデバイスの写真を示す．SOI (silicon on insulator) 基板上に電子線描画及びドライエッチングで微細構造を形成した後，OEO 材料 (NLM Photonics 社 JRD1[6])を回転塗布し，ポーリングを行った．Fig. 1(e)に測定した変調反射スペクトルを示す．2,400 の高 Q 値，63%の反射率変調(ΔR)，0.24 nm/V の共振波長変調効率 (=単位電圧当たりの共振波長シフト) が得られた．また，周波数応答測定の結果，46 MHz の変調帯域が得られた[Fig. 1(f)]．最後に，高効率・高速な変調特性を活かし，1 V 未満の駆動電圧で，50 Mbaud の NRZ 及び PAM4 信号のデータ変調に成功した [Fig. 1(g)]．

まとめ：シリコン有機ハイブリッド型光メタサーフェス変調器を提案し，高効率・高速な変調を実験的に実証した．高い Q 値と強い光閉じ込めにより，半値全幅分の共振波長シフトに必要な駆動電圧 V_{req} として，世界最小の 2.5 V を達成した[Fig. 1(h)]．本変調器をアレイ化し CMOS 回路と組み合わせることで，大規模な高速空間光変調器が実現できると期待される．

謝辞：本研究の一部は，国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究(#JPJ012368C0360)，文部科学省科学研究費の助成(#JP23H05444, #JP24KJ0557)，ARIM の支援(#JPMXP1224UT1115)により実施された．

参考文献：[1] Y. Kosugi *et al.*, IEICE Electron. Express **13**, 20160595 (2016). [2] J. Zhang *et al.*, APL Photonics **8**, 121304 (2023). [3] I.-C. Benea-Chelmus *et al.*, Nat. Commun. **13**, 3170 (2022). [4] T. Zheng *et al.*, Nat. Commun. **15**, 1557 (2024). [5] G. Soma *et al.*, arXiv:2503.17986 (2025). [6] W. Jin *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 243304 (2014).

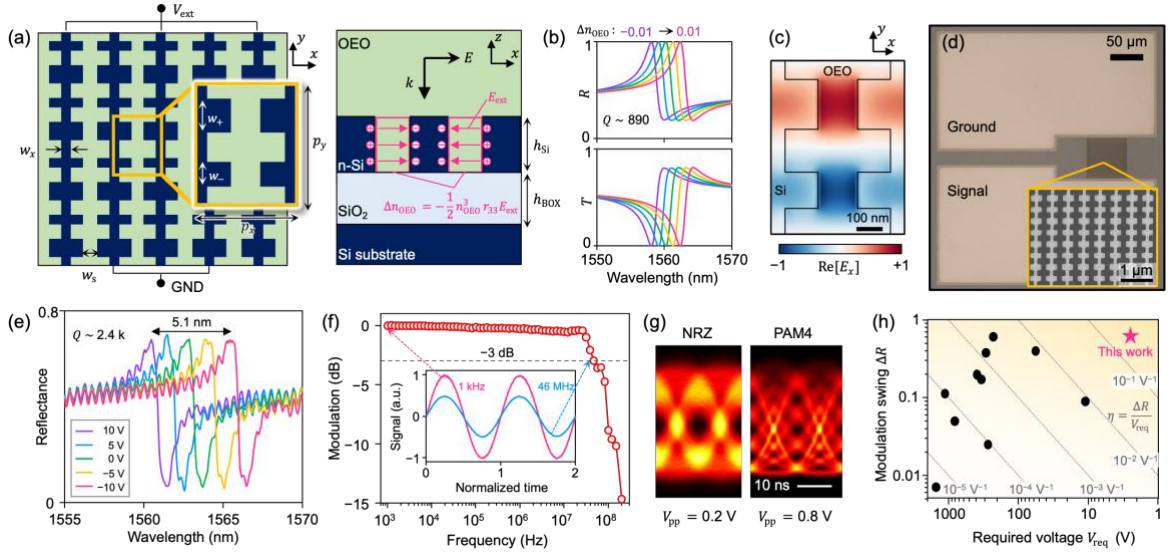


Fig. 1. (a) Schematic of the proposed modulator. (b) Simulated reflectance (R) and transmittance (T) spectra with various refractive index changes in the active OEO material Δn_{OEO}. ($h_{\mathrm{box}} = 2$ μm, $h_{\mathrm{Si}} = 400$ nm, $p_x = 500$ nm, $p_y = 650$ nm, $w_s = 150$ nm, $w_+ = 188.5$ nm, $w_- = 136.5$ nm, and $w_x = 100$ nm.) (c) Electric field distribution at the resonance wavelength. (d) Optical and scanning electron microscope images of the fabricated device. (e) Measured reflectance spectra under modulation. (f) Measured frequency response. (g) Eye diagrams of 50 Mbaud NRZ and PAM4 signals. (h) Benchmark of high-speed electro-optic metasurface modulators.

© 2025年 応用物理学会

GHz 帯域プラズモニック有機ハイブリッド面入射型光変調器

GHz-Bandwidth Plasmonic-Organic-Hybrid Surface-Incident Optical Modulator

○(D)蟻生高人，相馬豪，宮野広基，唐木田晴大，種村拓夫（東大院・工）

○Koto Ariu, Go Soma, Hiroki Miyano, Seidai Karakida, Takuo Tanemura (The Univ. of Tokyo)

E-mail: koto.ariu@tlab.t.u-tokyo.ac.jp

【背景】高密度光インターコネクト、大規模光演算、LiDAR などへの応用に向けて、GHz を超える高速な空間光変調器 (SLM: spatial light modulator) の実現が期待されている[1]。一般に面入射型光変調器は高速化と高効率化の両立が難しいが、光共振構造を組み合わせることで高効率化を目指した構造が各種提案・実証されている[2-7]。中でも高い導電性を有する金属と、高速応答が可能な有機電気光学 (OEO: organic electro-optic) 材料を融合したプラズモニック有機ハイブリッド (POH: plasmonic-organic hybrid) 面入射型変調器は超高速動作を実現する方式として注目を集めているが、これまでは、金属による光損失や不十分なモード重なりにより、性能に課題があった[2-4]。本稿では、筆者らが以前提案した二量化金属格子型 OEO 変調器[8]を作製し、サブ波長構造を用いた POH 面入射型変調器として世界最高の高効率性と高速性を併せ持つ素子の実証に成功したので報告する。

【構成と作製】素子の模式図と断面図を Fig. 1(a), (b)にそれぞれ示す。また、作製した素子の断面電子顕微鏡像を Fig. 1(c)に示す。EB 描画と Ar ミリングにより石英 (SiO_2) 基板上に金 (Au) のサブ波長格子を形成し、回転塗布により OEO 材料 (JRD1 [9], NLM Photonics 社) を成膜後、スパッタリングにより上部 Au ミラー膜を積層した。Fig. 1(b)のように Au 格子間隔に摂動を加えた二量化構造を導入することで、x 偏波光を入射すると、OEO 層内に光が強く閉じ込められ、高い Q 値の共振が得られる[7, 8]。その結果、反射特性に鋭い波長選択性が発生する。ここで、上下 Au 層を電極としても利用し、ポッケルス効果を介して共振波長を変化させることで、反射光強度が高速に変調される。

【測定結果】ポーリング処理後のチップを Fig. 1(d)のように反転させて固定した。SiO_2 基板側から光を入射し、逆側から RF プローブを介して電気的接続を取ることで、100 μm 角の素子の変調特性を評価した。印加電圧を段階的に変化させた際の各反射スペクトルを Fig. 1(e)に示す。波長 1583 nm 付近において Q 値 110 の共振を確認し、印加電圧±30 V で 11 nm (= 0.18 nm/V)の高効率な共振波長シフトを観測した。このとき、波長 1589.3 nm において 12.8 dB (= 94.8%)の変調深さを達成した。同素子の周波数特性を Fig. 1(f)に示す。4.0 GHz の 3 dB-EO 帯域を達成し、提案素子の高効率性と高速性を実証した。今後、ポーリング条件の最適化や素子の小型化により、数 V かつ数 10 GHz の変調動作が期待される。

【謝辞】本研究の一部は、文部科学省科学研究費(JP23H05444, JP25KJ1139)の支援、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究(JPJ012368C08801)により実施された。素子の作製の一部は、文部科学省 ARIM 事業(JPMXP1224UT1115)の支援を受けて、東京大学マテリアル先端リサーチインフラ・データハブ拠点武田先端知ビルクリーンルームで実施された。

【参考文献】[1] A. Kuznetsov *et al., ACS photonics,* 11, 3, 816 (2024). [2] J. Zhang *et al., Appl. Phys. Lett.* 113, 231102 (2018). [3] J. Zhang *et al., APL Photon.* 8, 12, 121304 (2023). [4] I.-C. Benea-Chelmus *et al., Nat. Commun.* 12, 5928 (2021). [5] I.-C. Benea-Chelmus *et al., Nat. Commun.* 13, 3170 (2022). [6] T. Zheng *et al., Nat. Commun.* 15, 1557 (2024). [7] H. Miyano *et al., OECC/PSC,* TuD3-2 (2022). [8] 蟻生ほか, 応物秋, 22p-A101-7 (2022). [9] W. Jin *et al., Appl. Phys. Lett.* 104, 24, 243304 (2014).

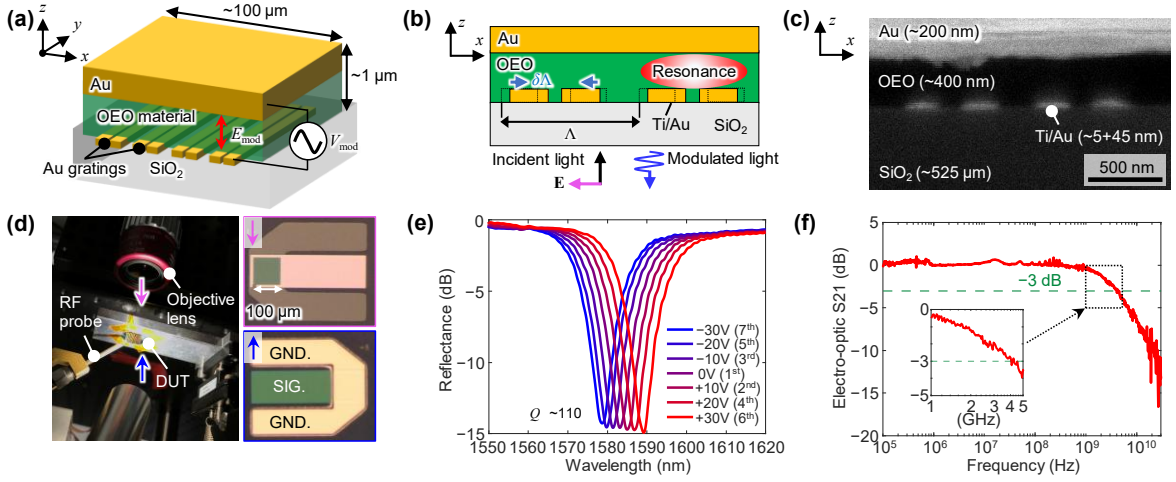


Fig. 1. (a) Schematic of the free-space POH modulator. (b) Cross-sectional view of the device. (c) Scanning electron microscope image of the fabricated device. (d) Photograph of the measurement setup. Two images on the right show microscope views of the device from the top and bottom, respectively. (e) Reflectance spectra under different applied voltages from −30 V to +30 V. The numbers in the legend correspond to the order in which the voltage was applied. Λ = 860 nm, δ = 0.06. (f) Measured EO frequency response.

© 2025年 応用物理学会

円偏光誘起反応による等方的ナノ粒子のキラル形状化

Chiral Shaping of Isotropic Nanoparticles by Chemical Reactions under Circularly Polarized Light

東大生研[1]，JST さきがけ[2]，神戸大[3] ◦石田拓也[1,2]，劉 嘉捷[1]，亀岡ゆり[1]，
イ スンヒョク[1]，笠井大幹[3]，杉本 泰[3]，藤井 稔[3]，立間 徹[1]

IIS, the Univ. of Tokyo[1], PRESTO, JST[2], Kobe Univ.[3], ◦Takuya Ishida[1,2], Jiajie Liu[1], Seung Hyuk Lee[1], Hiroki Kasai[3], Hiroshi Sugimoto[3], Minoru Fujii[3], Tetsu Tatsuma[1]

E-mail: t-ishida@iis.u-tokyo.ac.jp

局在表面プラズモン共鳴（LSPR）や Mie 共鳴を示すキラルナノ構造体は、そのサイズが光波長スケールに近いことから円偏光の捻じれを感じやすく、顕著なキラル光学応答を示す。従来、キラル構造体は主にトップダウン的手法で作製されてきたが、我々は円偏光を用いたボトムアップ的な光電気化学的手法によるキラル形状化を実現してきた[1-4]。本手法では、離散的な回転対称性を持つアキラルなプラズモニックナノ構造に円偏光を照射することで、次数の異なる共鳴モード間の干渉によりキラルな振動電場分布が生じ[5]、それが構造成長を駆動する。

本研究では、光源から見てほぼ等方的な、すなわち連続的な回転対称性（C_∞）を持つ、Au ナノディスク[4]（ND、直径 161 nm、厚さ 50 nm）または Si ナノスフィア[6]（NS、直径 177 nm）を前駆体とし、それらに円偏光照射することで Ag の還元析出を行った。その結果、顕著な円偏光二色性を示す Au-Ag および Si-Ag ナノ複合体が得られ（Fig. 1a）、析出に用いた円偏光がキラル源であることがわかった。

理想的な ND や NS に円偏光を照射した場合、時間平均された電場分布は C_∞対称性を保つため（Fig. 1b）、そのままではキラルな成長は生じない。しかし、ある 1 か所で偶発的に析出が始まると、ナノ構造は回転対称を失い、円偏光下でその周囲に生じる電場はキラルな分布となる（Fig. 1c）[4]。この局所電場によって光電気化学反応が駆動されるため、構造体はキラル形状に成長すると考えられる。

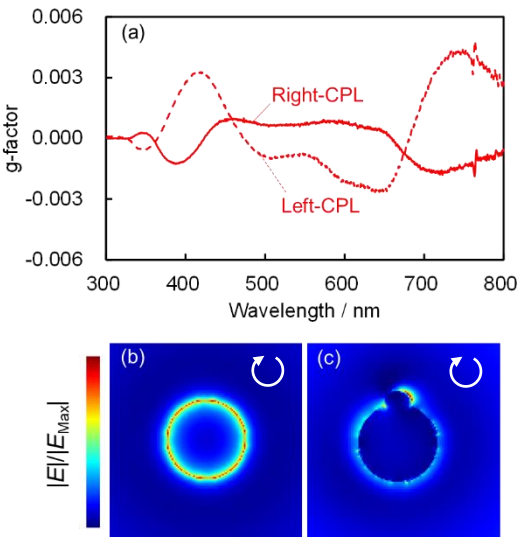


Figure 1. (a) Circular dichroism of chiral Au-Ag nanocomposites. (b,c) Electric field distributions around isotropic and anisotropic Au nanoplates under right-CPL.

1. K. Saito and T. Tatsuma, *Nano Lett.* **18**, 3209-3212 (2018).
2. T. Ishida, A. Isawa, S. Kuroki, Y. Kameoka, and T. Tatsuma, *Appl. Phys. Lett.* **123**, 061111 (2023).
3. K. Shimomura, Y. Nakane, T. Ishida, and T. Tatsuma, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 151109 (2023).
4. Y. Kameoka, T. Ishida, S. H. Lee, and T. Tatsuma, *Electrochemistry* in press.
5. N. Ichiji, T. Ishida, I. Morichika, T. Tatsuma, and S. Ashihara, *Phys. Rev. B* **109**, 035428 (2024).
6. H. Sugimoto, T. Okazaki, and M. Fujii, *Adv. Optical Mater.* **8**, 2000033 (2020).

© 2025年 応用物理学会

非対称アルミニウムナノロッド二量体のキラル二次非線形光学応答

Chiral 2nd-order nonlinear optical properties of asymmetric Al nanorod dimer

静岡大工，○(M2)近野 夏帆，神谷 眞好，杉田 篤史

Shizuoka Univ. [1], ○N. Konno[1], M. Kamiya, A. Sugita

E-mail: sugita.atsushi@shizuoka.ac.jp

私たちはこれまでサイズの異なる二つの正方形状アルミニウムナノ粒子(AlNR)をナノレベルで近接すると励起光と第二高調波(SHG)光に対して同時に SP 共鳴し、SHG 信号が大きく増大することについて報告した[1]。この研究で検討した構造は、二つの AlNR の中心軸が一致する、アキラルな構造であったが、中心軸をずらすと鏡映対称性が破れ、面性キラリティを生じる(Fig. 1)。本研究では、このキラル化した二量体構造における円二色性 SHG 現象について報告する。

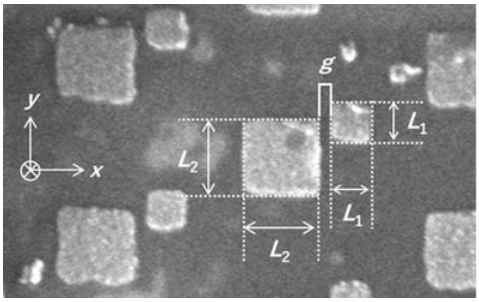


Fig.1 SEM image of asymmetric AlNR dimers along with a definition of coordinate.

Fig. 1 に検討した AlNR 二量体構造の SEM 画像を示す。小さな AlNR の長さを L_1=100 nm、 大きな AlNR の長さを L_2=200 nm、高さは T=30 nm、粒子間隔は g=45 nm とした。

Fig. 2 に AlNR 二量体構造の吸収及び SHG スペクトルを示す。ここでは右回り及び左回りに円偏光した励起光を照射した場合の結果を示す。SHG スペクトルは同じデータを励起光波長だけでなく、その半分の SHG 波長に対して表示した。

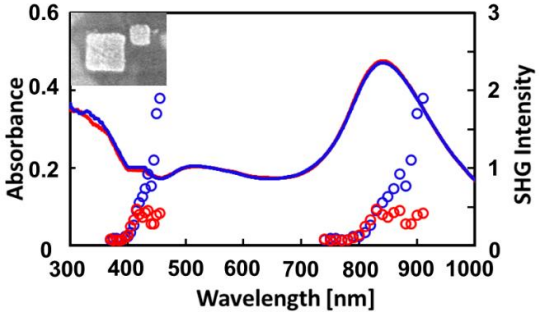


Fig. 2 Absorption (solid curves) and SHG spectra (open circles) of AlNR dimer under right hand (red) and left hand circularly polarized light (blue).

波長 820, 510 nm に吸収ピークが現れたが、それぞれ大きな AlNR 、小さな AlNR 由来の SP 共鳴に起因する。右回り偏光と左回り偏光条件で得たスペクトルはほぼ一致し、円二色性を示さなかった。これに対して、SHG スペクトルは、右回り偏光条件と左回り偏光条件でその強度は大きく異なり、SHG 信号が大きな円二色性を示すことを確認した。

SHG スペクトルに注目すると、励起波長に対して表示したスペクトルは大きな吸収バンドの長波長側に現れたのに対し、SHG 波長に対して表示したスペクトルは小さな吸収バンドの短波長側に現れた。これらを考慮すると、SHG スペクトルは、励起光波長帯と SHG 波長帯における両方の SP 共鳴効果を反映したものであると言える。

FDTD シミュレーションによると、二量体間のギャップ領域での近接場挙動は、励起光の回転方向に大きく依存していた。この違いが SHG 信号の円二色性として現れたものと考察した。

[1]：近野他　第 72 回応用物理学会，春季学術講演会 15a-K506-10

© 2025年 応用物理学会

複数の振動円二色性応答を持つX字形キラルメタマテリアルの設計

Design of X-shaped Chiral Metamaterial for Multi-mode Vibrational Circular Dichroism Reponses

岡山大院[1]　平松蒼麻[1]，柚木公祐[1]，深谷優梨[1]，鶴田健二[1]

Okayama Univ.[1] Soma Hiramatsu[1], Kosuke Yunoki[1], Yuri Fukaya[1], and Kenji Tsuruta[1]

E-mail: tsuruta@okayama-u.ac.jp

アミノ酸などの分子には鏡像異性体（キラル分子）が存在し，片方が生体にとって有益な場合や害を及ぼす場合があるため識別は重要とされる。この分子の性質として左右円偏光に対して吸収度が異なる円二色性を持つ. 分子振動に起因する振動円二色性(VCD)測定によりアミノ酸の立体構造の決定が可能となるが, その測定のためには複雑な光学系や多量のサンプルが必要であり簡易な測定を妨げている. これに対し近年，簡易かつ高感度な VCD 測定のための金属ナノ構造を集積したメタマテリアルが注目されている[1][2]．我々はこれまで，二つの正方形をずらして重ね合わせた二菱形金ナノ構造により，直線偏光を 90 度変えるだけで左右の疑似円偏光を発現させる新規デバイスを提案してきた[3]．これにより測定時の誤差の減少や時間の短縮が可能となった.

構造設計においてメタマテリアルに直線偏光を照射した際、その偏光面を回転させる力である光学活性という指標が重要になる。鏡像異性体の分子識別ができる赤外周波数は複数あるのに対し, 我々の二菱形構造では大きく高感度・効率化ができる光学活性の周波数ピークは 1 つしかなかった．本研究では，そのピークを増やすため, 大きさの違う左右対称の二菱形構造を組み合わせた構造を新たに提案する．図 1 に, 提案するメタマテリアルのユニットセルを示す. (a)は従来の二菱形構造, (b)は従来構造とくびれの大きさが違う左右対称の構造，(c)は(a)と(b)を 1 つに組み合わせた“X 字形構造”である. 図 2 に従来構造と提案する構造の光学活性の周波数特性とを示す. 従来の光学活性のピークを発現できるとともに従来構造にはない新たなピークが現れることが分かる. 講演ではこれらの詳細と電子ビームリソグラフィ等を用いたメタマテリアルの作製およびキラル分子の実測結果について報告する.

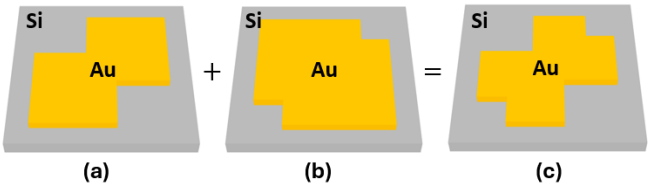


Fig.1 Metamaterial unit cells: (a) Previously proposed and (b) its symmetrical structures with different sizes, and (c) their combination.

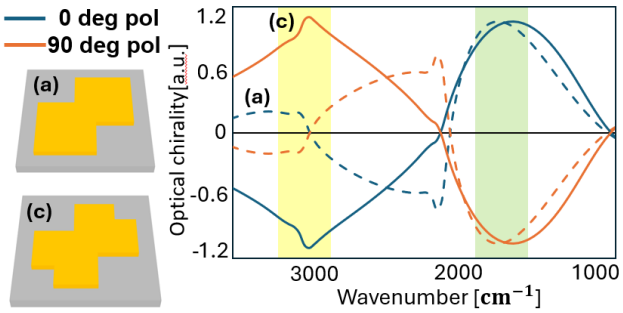


Fig.2 Frequency characteristics of optical chirality previous-(a) and new structures-(c) (Green areas are conventional peaks and yellow areas are new peaks)

参考文献

[1] E. Hendry *et al.*, *Nature Nanotechnol.* **5**, 783 (2010).
[2] T. Iida *et al.*, *Appi. Phys. Lett.* **117**, 101103 (2020).
[3] 2023 年応用物理学会秋季学術講演会，柚木公佑，他, 21p-A309-9.

© 2025年 応用物理学会

NLO ポリマー/シリコンナノ粒子複合構造における第二高調波発生現象

Second harmonic generation of NLO polymer/Si nanoparticles hybrid structure

静大院工　○(M2) 島田 真梨菜，中島 貴広，中安 陽香，神谷 眞好，杉田 篤史
Shizuoka Univ. ○Marina Shimada, Takahiro Nakashima, Haruka Nakayasu, Masayoshi Kamiya, Atsushi Sugita
E-mail: sugita.atsushi@shizuoka.ac.jp

Si ナノ粒子(SiNP)は、ミー共鳴に伴い、粒子内に強く光電場を閉じ込める。この時発生する高密度光電場は非線形光学(NLO)のための微小光源として有用だが、その利用は三次の NLO 効果に限定されている。これは、Si 結晶は反転中心を持ち、二次 NLO 感受率を示さないためである。本研究では、二次 NLO 感受率を持つポリマー材料薄膜で SiNP 構造を取り囲むことにより、二次 NLO 動作を得ることに挑戦した。

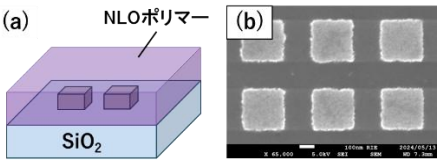


Fig. 1 (a)Schematic of NLO polymer/SiNP structure. (b) SEM image of SiNP on SiO_2 substrate.

Fig. 1 に NLO ポリマーを複合化した試料(NLO ポリマー/SiNP 構造)の構成および SiNP の SEM 画像を示す。SiNP は正方形ロッド形状(長さ L=270 nm、高さ H=110 nm)とし、周期間隔 Λ=450 nm で二次元配列した。NLO ポリマーは我々の先行研究で合成した化合物を用いた[1]。このポリマーは NLO 効果を担う色素分子をポリメチルメタクリレート(PMMA)中に分散した複合物質である。その薄膜を SiNP 構造の上に成長した。ここでは色素を分散していない純粋な PMMA と複合化した構造(PMMA/SiNP 構造)も用意した。

Fig. 2 に PMMA/SiNP および NLO ポリマー/SiNP 構造の吸収および SHG スペクトルを示す。いずれの吸収スペクトルにも、750~850 nm 帯と 500~600 nm 帯に 2 つの吸収バンドが見られた。NLO ポリマー/SiNP 構造では、PMMA/SiNP 構造と比べて短波長側の吸収バンドは大きくなったが、これは NLO ポリマーによる吸収寄与が加わったためである。

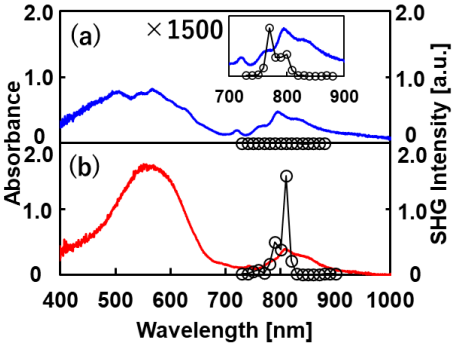


Fig. 2 Absorption (solid curve) and SHG spectra (open circles) of (a) PMMA/SiNP and (b) NLO polymer/SiNP structures.The inset in (a) shows an enlarged view of the SHG spectrum.

いずれの構造も 800 nm 付近においてピーク幅の狭い SHG 信号を示した。NLO ポリマー/SiNP 構造の変換した SHG 信号は、PMMA/SiNP 構造からの信号と比較して 3000 倍も大きく、その変換効率は 1.2×10^{-9} であった。PMMA/SiNP 構造の変換する SHG 信号は、Si の表面 NLO 感受率によるものである。この結果から、期待通りに SiNP において二次 NLO 動作を実現することに成功した。

SHG スペクトル幅は吸収スペクトル幅よりもずっと狭いが、これは Q-BIC 状態（連続体における束縛状態）に伴う強い電場増強効果が関与した可能性があると考えた。

[1] J. Photochem Photobio. A. 340, 35 (2017).

© 2025年 応用物理学会

コロイド金ナノロッド表面における円偏光照射下での酸化マンガンのキラル成長

Chiral growth of manganese oxide on the surface of colloidal gold nanorods under circularly polarized light irradiation

産総研[1], ○斎藤 滉一郎[1], 石川 善恵[1]

AIST[1], ○K. Saito[1], Y. Ishikawa

E-mail: koichiro.saito@aist.go.jp

【緒言】キラルな形状のプラズモニックナノ粒子は、キラルセンシングや不斉触媒などへの応用が期待されている[1]。円偏光をキラル源とするキラルプラズモニックナノ粒子の合成法は、キラル分子を必要としないという利点がある[2]。大量合成のためには、キラルプラズモニックナノ粒子を溶液中に分散した状態で合成することが望ましいが、合成過程でナノ粒子を固体基板上に固定する必要があり、大きな課題となっていた。我々は、溶液中に分散した金ナノロッド（AuNR）表面に円偏光で銀を析出させる光化学反応を駆動することで、円二色性(CD)を示すロッド状のキラルプラズモニックナノ粒子の合成に初めて成功している[3]。一方で、高機能化に向けては銀以外の材料もキラルな秩序で析出させ、触媒機能などを付与する必要がある。本研究では、円偏光照射下でコロイド状態の金ナノロッドの周囲に酸化マンガンをキラルな秩序で析出させることに成功した。酸化マンガンは触媒機能をもつことが知られているため、不斉触媒の開発に貢献することが期待される。

【実験】クエン酸と過マンガン酸試薬を添加した AuNR の分散液に赤色 LED（λ～630 nm）からの左回りまたは右回りの円偏光（CPL）を照射することにより、酸化マンガンを AuNR 周囲に析出させた（図 1）。また、反応温度 5 ℃、25 ℃、45 ℃で CPL 照射実験を行った。分散液の吸光度と円二色性（CD）は、UV-vis 分光計と CD 分光計を用いて測定した。

【結果と考察】AuNR が分散した反応溶液に、反応温度 25℃で CPL を照射した後の吸光度スペクトルを図 1a に示す。吸光度のピークは元の金ナノロッドに比べて長波長シフトしていた。この結果は、酸化マンガンの析出により AuNR 周辺の屈折率が上昇したことを示唆している。実際、SEM 画像では、AuNR の周囲にいくつかのシート状の構造が付着している様子が観察された（図 1b）。図 1c に示すように、CD スペクトルは CPL の左右方向に応じてピークとディップを明確に示した。CD 信号は反応温度 5 ℃のサンプルでも現れたが、45 ℃では明確な信号は見られなかった。反応温度が高い場合、CPL 照射に由来しない酸化マンガン析出が進行した可能性が考えられる。

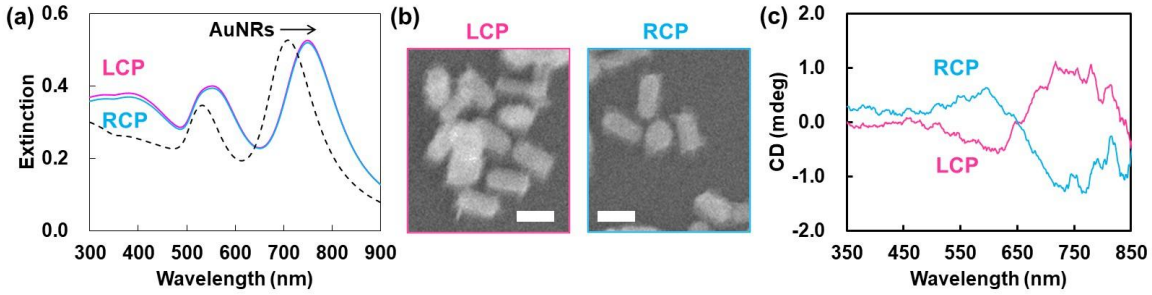


Figure 1. (a) Extinction and (c) CD spectra of the AuNRs with permanganate irradiated with LCP or RCP light at 25 ℃ (b) SEM images of the samples synthesized by LCP or RCP light. Scale bars, 100 nm.

References [1] G. Zheng et al., *Chem. Soc. Rev.*, **50**, 3738 (2021). [2] K. Saito and T. Tatsuma, *Nano Lett.*, **18**, 3209 (2018). [3] K. Saito, Y. Nemoto, and Y. Ishikawa, *Nano Lett.*, **24**, 1284 (2024).

© 2025年 応用物理学会

NLO ポリマー/金ナノプリズム一次元配列系の第二高調波発生現象

Enhanced SHG effect of NLO polymer/1D Au nanoprism array structure

静大工, ○(M2)南立 周作, 川村 豪志, 神谷 眞好, 杉田 篤史

Shizuoka Univ. [1], ○Shusaku Nandate, Goushi Kawamura, Masayoshi Kamiya, Atsushi Sugita

E-mail: nandate.shusaku.20@shizuoka.ac.jp

周期配列した金属ナノ粒子は表面格子共鳴(SLR)効果を生じ、様々な物質と光との相互作用を増大化する[1]。本発表では、この SLR 効果を利用し、非線形光学(NLO)ポリマーの変換する第二高調波(SHG)信号を増大することに成功したので、その結果を報告する。

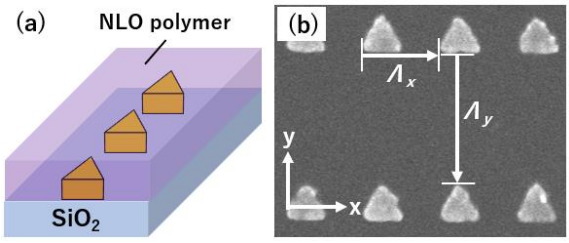


Fig. 1 (a) Schematic of NLO polymer/AuNP structure. (b) SEM image of AuNP on SiO_2 substrate.

Fig. 1 は検討した NLO ポリマー/金ナノプリズム(AuNP)一次元配列構造の構成および AuNP の SEM 画像を示す。AuNP は正三角柱プリズム形状(長さ L=140 nm、高さ H=30 nm)とし、周期間隔 Λ_x=240 nm, Λ_y=560 nm で二次元配列した。NLO ポリマーは我々の先行研究で合成した化合物を用いた[2]。ここでは y 軸方向の周期性に注目した。

Fig. 2 に NLO ポリマー/AuNP 配列構造の y 偏光励起条件、すなわち一次元配列方向と平行方向に偏光する光を入射した場合の吸収および SHG スペクトルを示す。吸収スペクトルは、550 nm と 810 nm に二つのピークを示したが、前者は NLO ポリマーの吸収、後者は AuNP の局在表面プラズモン共鳴によるものである。通常、SLR 効果を生じると線幅の狭い吸収ピークが現れるが、今回検討した構造はそのようなピークを示さなかった。

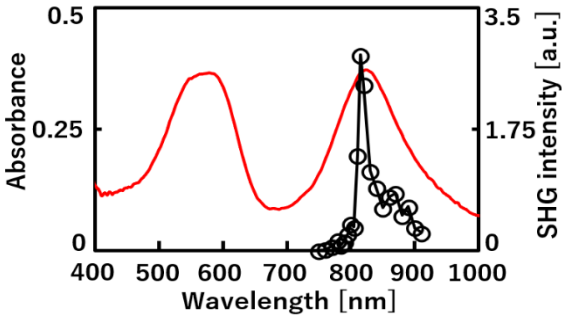


Fig. 2 Absorption (solid curve) and SHG spectra (open circles) of NLO polymer/AuNP structures.

これに対し、SHG スペクトルは 810 nm 付近に線幅の狭いピークを示した。この SHG ピーク波長は回折格子周期 Λ_y と NLO ポリマーの屈折率の積によって表されるレイリー異常波長によく一致した。よって SHG 信号は SLR 効果によって増大化したと言える。

金ナノ粒子自身も、SHG 信号を発生する。今回得られた結果は、SLR 効果によって AuNP の変換する SHG 信号を NLO ポリマーとの複合化によって増大化したという見方をすることもできる。NLO ポリマーによる SHG 信号の増強効果は、約 90 倍であった。

発表では、励起光の偏光に対する依存性についても議論する。

[1] Phys. Rev. Lett.**118**, 243904 (2017).

[2] J. Photochem. Photobio. A. **340**, 35 (2017).

© 2025年 応用物理学会

Si ナノ粒子の可視 Mie 共鳴を用いた表面増強赤外分光

Surface-Enhanced Infrared Photothermal Spectroscopy Using Visible Mie Resonances of Si Nanoparticles

徳島大 pLED[1]，神戸大[2]，理研[3] ○(M2)花野大樹[1]，森朝啓介[2]，杉本泰[2]，藤井稔[2]，田中拓男[1,3]，矢野隆章[1,3]

Tokushima Univ.[1], Kobe Univ.[1], RIKEN[3], ○Daiki Hanano[1], Keisuke Moriasa[2], Hiroshi Sugimoto[2], Minoru Fujii[2], Takuo Tanaka[1,3], and Taka-aki Yano[1,3]

E-mail: yano.takaaki@tokushima-u.ac.jp

中赤外フォトサーマル（Mid-infrared photothermal: MIP）分光は、赤外吸収による局所的な熱膨張や屈折率変化を可視光プローブで読み出すことで、従来の FTIR 顕微鏡を上回る空間分解能と感度を実現する手法として注目されている。本研究では、MIP 分光のプローブ光である可視散乱光を、シリコン（Si）ナノ粒子の Mie 共鳴によって増強することにより、表面増強 MIP 分光を実現した。従来の表面増強赤外分光（Surface-enhanced infrared absorption: SEIRA）では、赤外域にプラズモン共鳴を有する金属ナノ構造を用いるのが一般的であるが、本手法では赤外ポンプ光ではなく、読み出し側である可視プローブ光に共鳴構造を設ける点が特徴である。本手法では赤外波数に対する共鳴依存性がなく、指紋領域全域において一様な表面増強効果が得られる。これにより、従来の SEIRA における狭帯域共鳴（100–300 cm^{-1}）の制約を克服し、広帯域かつ高感度な赤外分光が実現された。

本実験では、Fig. 1(a)に示すように、ポリスチレン（PS）の薄膜（膜厚 200 nm）に包埋された結晶性 Si ナノ粒子（直径 130 nm）に、波長掃引型の赤外量子カスケードレーザー(QCL)と可視レーザー（波長 532 nm）を同軸集光照射し、QCL の波長を掃引することによって MIP スペクトルを測定した。Fig. 1(b)の暗視野散乱スペクトルに示すように、用いた単一 Si ナノ粒子は 540 nm 付近に磁気双極子由来の Mie 共鳴モードを有しており、MIP 信号であるプローブ散乱光（532 nm）を粒子近傍で効率よく増強することが可能である。この Mie 共鳴 Si ナノ粒子を用いて PS 膜の MIP スペクトルを測定した結果(Fig. 1(c))、Si ナノ粒子を用いない時と比べて MIP ピーク強度が全波数領域において有意に増強することが確認された。Si ナノ粒子近傍の光増強領域を考慮して MIP の増強度を算出した結果、増強度は２桁以上に達することがわかった。一方、Mie 共鳴から外れた波長（785 nm）のレーザーをプローブ光として用いた時は増強が確認されなかったことから、MIP 増強が Si ナノ粒子の Mie 共鳴に起因することが示された。

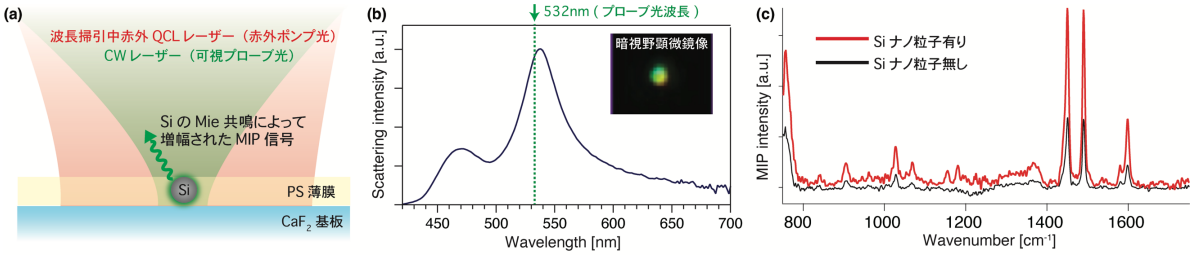


Fig. 1 (a) Mie Resonance-Enhanced Infrared Photothermal Spectroscopy using Si nanoparticles. (b) Dark-field scattering spectrum of a Si nanoparticle with a diameter of 130 nm. (c) MIP spectra of a PS film measured with and without the Mie-resonant Si nanoparticle.

© 2025年 応用物理学会

水溶液中の匂い分子の高感度検出に向けた長距離表面プラズモン共鳴センサの設計と評価

Design and Characterization of Long Range Surface Plasmon Resonance Sensors towards Highly Sensitive Detection of Odor Molecules in Aqueous Solution

東京農工大工 ○(M2)望月 勇佑, 蓮見 真彦, 清水 大雅

Tokyo Univ. of Agri. & Tech., ○Yusuke Mochizuki, Masahiko Hasumi, and Hiromasa Shimizu

E-mail: s241656q@st.go.tuat.ac.jp, h-shmz@cc.tuat.ac.jp

[はじめに] 近年、匂いセンサのニーズが医療や食品品質管理等多方面で拡大している。嗅覚受容体は匂い分子を検出するための有望なアプローチであり、グラフェン FET との集積化によるノナン酸の特異的検出に関する報告等がなされている[1]。一方、エバネセント波によって匂い分子の弱い結合の観測が期待される光センサについては報告例がない。本研究では、水溶液中で活性を示す嗅覚受容体の修飾を見据えた表面プラズモン共鳴(SPR)センサに関する設計・作製・評価を行ったので報告する。

[設計] 水溶液中（屈折率 1.33）の屈折率変化を観測するために、高屈折率プリズム N-SF11 とサファイア基板を用いることとした。波長 632.8 nm で損失の少ない Ag 薄膜の表面を厚さ 5 nm の Au で覆いチオール修飾を行うこととした。高感度化のために、長距離伝搬表面プラズモン共鳴(Long Range Surface Plasmon Resonance: LRSPR)センサ[2]を用い、低屈折率の誘電体として MgF_2（屈折率 1.38）を用いた。Ag と MgF_2 の間の接着を改善するために厚さ 50 nm（屈折率 1.46）の SiO_2 層を挟んだ。比較のために MgF_2 層の無い通常の SPR センサを用いた。伝搬行列法を用いたシミュレーションにより反射率の極小値を最小化するセンサ基板の構造を求めたところ、SPR センサでは Au 5 nm / Ag 45 nm / サファイア基板、LRSPR センサでは Au 5 nm / Ag 35 nm / SiO_2 50 nm / MgF_2 450 nm / サファイア基板となった。反射率の入射角依存性とセンサ基板の構造を図 1 に示す。嗅覚受容体が合成される脂質ナノディスクの直径が約 10 nm であることから、金属表面の 10 nm を検出層として屈折率変化を与えた状況での反射率変化を求めたところ、LRSPR 構造で 20%の感度向上が得られた。

[センサ基板の作製と評価] 電子線蒸着によりセンサ基板(①SPR, ②LRSPR)を作製し、反射率の入射角依存性を測定した結果を図 2 に示す。①SPR センサでは入射角59.6°において 0.9%の反射率、②LRSPR センサでは入射角57°において 27.7%の反射率が得られ、LRSPR において半値幅の向上を観測した。今後は、Au 表面に嗅覚受容体を修飾し匂い分子の応答を評価する。

[1] T. Yoshi et al., Analytical Science, **38**, 241 (2022)., [2] K. Toma, et al.. Biosemsors and Bioelectronics. **222**. 114959 (2023).

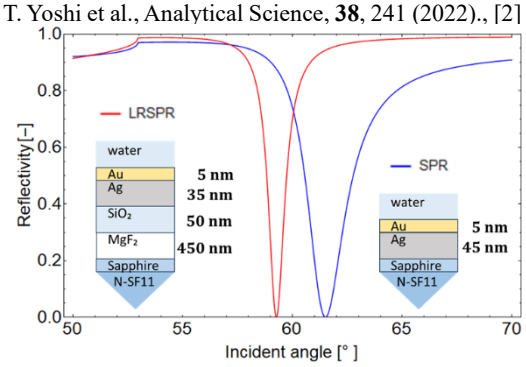


図1　センサ構造と反射率の角度依存性の計算結果

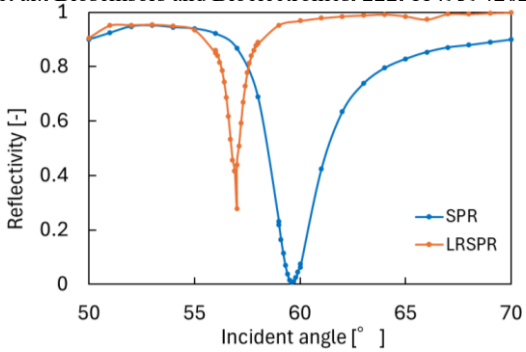


図2　反射率の入射角依存性の測定結果

© 2025年 応用物理学会

高カチオンポリマーを修飾した SPR センサ：酢酸とエタノールの選択的検出に向けて

SPR Sensor Modified with Highly Cationic Polymers: Toward Selective Detection of Acetic Acid and Ethanol

東京農工大工　○(M1)梶 朝陽，箕輪 竜太，蓮見 真彦，清水 大雅

Tokyo Univ. of Agri. & Tech., A. Kaji, R. Minowa, M. Hasumi, and H. Shimizu

E-mail: s252916z@st.go.tuat.ac.jp, h-shmz@cc.tuat.ac.jp

[はじめに] 表面プラズモン共鳴(SPR)センサは、共鳴条件が金属表面近傍の屈折率変化に敏感であることから液相中のタンパク質を特異的に検出するバイオセンサに応用されている。一方、食品管理・医療・農業等多方面への応用が見込まれるガスセンサ[1]への応用は選択的に検出するための吸着材が少ないことから改善の余地がある。本研究では、Au を用いた SPR センサ基板に多数のアミノ基をもつ高カチオン性のポリマーであるポリエチレンイミン(PEI)を修飾することで、アミノ基との静電相互作用の違いから、カルボキシ基をもつ酢酸、プロピオン酸を気相で供給したときの増感を観測したので報告する。

[測定系] 図 1 に示すように、石英ガラス基板上に Ti(3 nm) / Au(44 nm)を電子線蒸着法により製膜し、質量濃度 0.001%の PEI を滴下後、90 ℃で 5 min ベーキングを行った。作製したセンサ基板をプリズムにマウントし、波長 632.8nm の LED 光を集光してプリズム側に照射したときの反射光強度の入射角依存性を CMOS カメラで 10 秒ごとに撮影し SPR 画像とした。検出対象ガスとして、酢酸、プロピオン酸を用い、比較対象としてエタノールを用いた。微量ガス発生装置と流量計を用い、窒素で希釈した複数の濃度の校正ガスを発生させ、基板側から流量 0.5 L/min で供給した。カメラで取得した SPR 画像のうち、PEI を塗布した箇所、無修飾の箇所の輝度を入射光の輝度で割って反射率を求め、校正ガスの供給前後で反射率変化を評価した。

[結果・考察] エタノール 32 ppmv、プロピオン酸 29 ppmv、酢酸 33 ppmv をそれぞれ供給したときの校正ガス供給 2 分前からの反射率シフトを図 2 に示す。図 2 上側に示すエタノールガス供給時は、PEI の有無で反射率シフトの大きさに差は見られなかった。一方で、図 2 中央に示すプロピオン酸ガスと、図 2 下側に示す酢酸ガス供給時には、PEI を塗布した箇所で PEI 塗布なし箇所よりも大きな信号変化が得られた。PEI の塗布によって静電相互作用によってプロピオン酸と酢酸の信号を増感させることができたと判断した。

[今後の方針] 今後は、酢酸とエタノールの選択的検出に向けて、混合ガスを供給したときの応答を評価する。

[参考文献] [1] H. Shimizu, et al., Jpn. J. Appl. Phys., **64**, 050904 (2025).

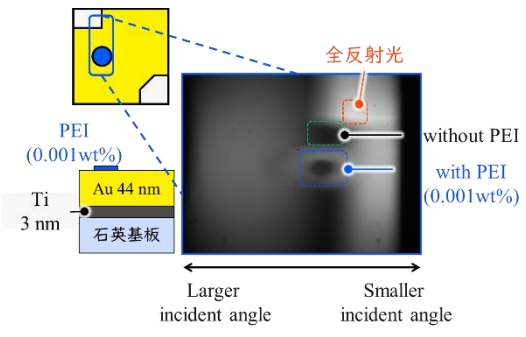


図 1. センサ基板(左)と SPR 画像(右)の概略図

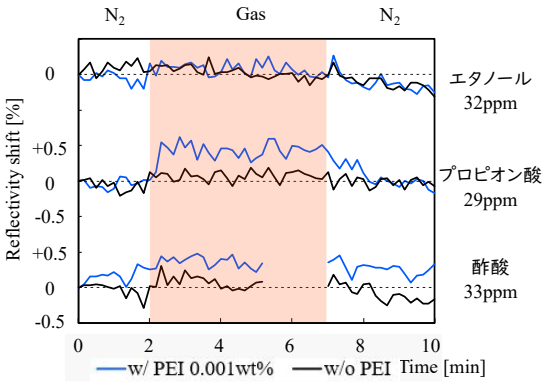


図 2. 各種ガス供給による反射率変化

© 2025年 応用物理学会

限られた周波数範囲の材料誘電率から カシミールフォースを計算する手法

Technique of Casimir force computation from limited frequency responses of material permittivities

高エネルギー加速器研究機構　○飯塚 英男

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), ○Hideo Iizuka

E-mail: hiizuka@post.kek.jp

真空中に二つの物体を数μm 以下の間隔に配置すると、量子揺動により引力が誘起される。この力はカシミールフォースと呼ばれ、1997 年に実証後、同研究分野は着実に進展している。未知の素粒子（ディラトン、B-L ゲージボソン等）により誘起される新しい力（第 5 の力）に対して、質量レンジ 0.1-10eV 付近で、現在、カシミールフォース実験が最も強い制限を与えている[1,2]。また、カシミールフォースの産業応用に向けた検討も始まりつつある[3]。

カシミールフォースを計算する際、周波数積分の範囲は、原理的に、ゼロから無限大である。実用的には、計算収束の観点で、材料の誘電率が真空の誘電率と見なせる、十分高い周波数まで積分を実行する必要がある。しかしながら、ワイル半金属を含め、新しい材料では、特に高い周波数の誘電率が未測定で入手できないことが多く、高精度な計算をすることは一般に困難である。

本講演では、平行平板を構成する材料の誘電率が、ある有限の周波数（カットオフ周波数と呼ぶ）までしか入手できなくても、平行平板の間隔をカットオフ周波数に対応する値より大きくすれば、高精度にカシミールフォースを計算できること述べる（図 1）。材料誘電率を記述する際に広く利用されているNポールローレンツドルーデモデルを使い、カットオフ周波数より高い周波数範囲に、人工的なポールをおくことで、カットオフ周波数以下では入手可能な誘電率を再現し、周波数無限大では真空の誘電率にすることが特徴である[4]。上記の物理的解釈も述べる。

[1] Y.-J. Chen, et. al. Phys. Rev. Lett. 116, 221102 (2016). [2] Y. Ema, et al. Phys. Rev. D 108, 016009 (2023). [3] H. Iizuka and S. Fan, Appl. Phys. Lett. 118, 144001 (2021). [4] H. Iizuka and S. Fan, Phys. Rev. B 110, 235409 (2024).

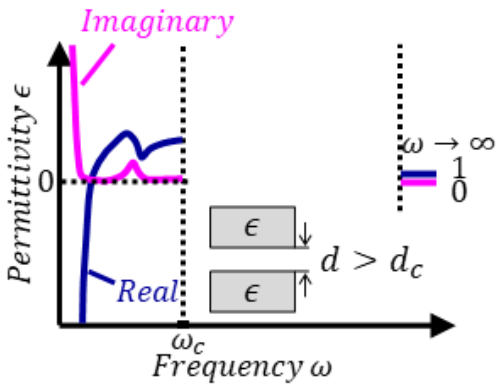


図 1 カットオフ周波数ω_c 以下の材料誘電率から、それに対応する間隔 d_c 以上の平行平板に誘起されるカシミールフォースを高精度に計算できる。

© 2025年 応用物理学会

探針の簡便交換機構を備えた SICM 高速 Z スキャナの設計と評価

Design and Evaluation of High-Speed SICM Z-Scanner with Modular Probe-Exchange Mechanism

金沢大・数物[1]，金沢大・WPI-NanoLSI[2]

○(M1)藤井 菜光[1]，渡邉 信嗣[2]

Math. &Phys., Kanazawa Univ[1]., WPI-NanoLSI, Kanazawa Univ.[2]

Nami Fujii[1], and Shinji Watanabe[2]

E-mail: namichun7355@stu.kanazawa-u.ac.jp

走査型イオン伝導顕微鏡（SICM）は、細胞などの脆弱なバイオ試料の非接触観察を可能としたプローブ顕微鏡顕微鏡であり、近年ではその高速化が重要な研究課題になっている。細胞表面の計測においては、Z スキャナには高速応答性に加え、十分な最大変位性能も求められるが、これらは一般的にトレードオフの関係にある。更に、スキャナの設計次第では、両性能がともに損なわれる場合もあるため、最適な設計指針を見出すべく研究が行われてきた[1-3]。これまでの研究では、特定の最大変位に対して高速応答性を最適化しようとする設計が多く、観察対象に応じて両性能のバランスを柔軟に調整できるような汎用性の高いスキャナ設計はほとんど報告されていない。本研究では、最大変位と共振周波数の積（TRP）に着目し、SICM 計測において観察用途に合わせた性能バランスを選択可能とする探針スキャン型 Z スキャナの設計法について検討した結果を報告する。COMSOL Multiphysics による有限要素解析を実施し、ピエゾ素子を含めたスキャナの構造（梁のサイズやバネの機構）、材料特性などが TRP に与える影響を定量的に調べ、設計自由度を評価した。得られた知見に基づき、最大変位の値が異なる 2 種類のスキャナを試作し、実測値がシミュレーション結果と 10%以内で一致することを確認した。これは、最大変位 18-33 μm、共振周波数 18–30 kHz の範囲で動作可能なスキャナ設計の知見が得られた可能性を示す（**Fig.1**）。更に、SICM のオペレーションにおける利便性向上のために、探針の迅速かつ容易に交換を可能とする機構も設計し、現在性能評価を進めている。講演では、これを含めた Z スキャナの設計・評価結果に加え、得られた生細胞タイムラプスイメージを報告する。

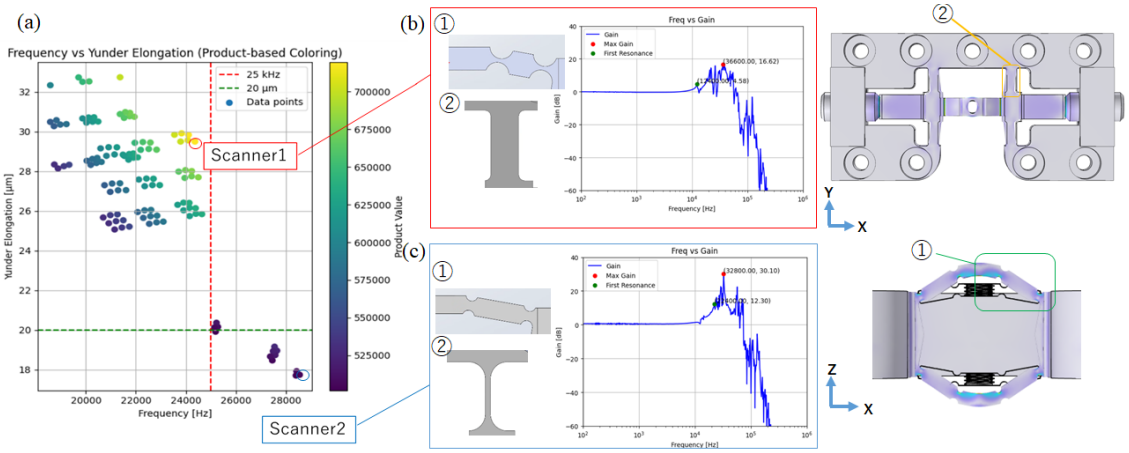


Figure 1: (a) Simulation data of eigen frequency and elongation of scanners, results from eigen frequency measurements of (b) scanner 1 (Max disp; 29.4 um) and (c) scanner 2 (Max disp; 16.7 um)

参考文献:

[1] Watanabe & Ando, Appli. Phys. Lett. 11(111) 113106 (2017). Leitao et al., ACS Nano **11**(15) 17613 (2021). Nakazawa et al., Rev. Sci. Instrum. **7**(94) 073705 (2023)

© 2025年 応用物理学会

生細胞プローブ顕微鏡計測の自動化およびハイスループット化

Development of an Automated High-Throughput Scanning Probe Microscope System for Live-Cell Measurements

金沢大・数物[1]，金沢大・WPI-NanoLSI[2] ○(M1)戸田 達弥[1]，渡邉 信嗣[2]

Math. &Phys., Kanazawa Univ.[1], WPI-NanoLSI, KanazawaUniv[2], ○Tatsuya Toda[1], Shinji Watanabe[2]

E-mail: tya_87390@stu.kanazawa-u.ac.jp

プローブ顕微鏡を用いた生細胞のシングルセル解析は、細胞間の構造力学情報を定量評価する上で重要な手法であるが、計測の低スループット性が依然として大きな課題となっている。たとえ培養下の細胞であっても、試料ごとのナノ形状や力学特性には本質的なゆらぎが存在するため、統計的解析が不可欠である。しかし現状では、細胞選定や探針と試料の位置合わせなど、多くの工程が手動操作に依存しており、データ取得の自動化・無人化が求められている。そこで本研究では、走査型イオン伝導顕微鏡（SICM）を用いた細胞計測の自動化とハイスループット化を目的とし、細胞選定および探針位置合わせのプロセス自動化に取り組んだ。

細胞培養をした 35 mm ディッシュを試料に用いて、倒立型顕微鏡の明視野画像をもとに、Cellpose [1]を用いて個々の細胞をセグメンテーションした。Fig. 1 では左上側に元の細胞画像、右下側にセグメンテーション結果を示しており、これに基づき、各細胞の重心座標および面積、周長、アスペクト比といった細胞のマクロ形状パラメタの定量化を行った。これらのデータを活用し、探針と重心座標の位置合わせ、その後に実施する SICM 計測への移行の一連のプロセスすべてを自動化した。取得したマクロ形状パラメタに基づき、あらかじめ設定された条件に最も近い細胞を次の測定対象として探索し、自動選定するアルゴリズムを構築した。これにより、連続的かつ無人で複数細胞を自動測定し、統計的に十分なデータを効率的に収集可能とした。現時点では、1 細胞当たり平均 1.5 秒で移動が可能であり、一つの細胞に要する SICM の計測時間を 10 秒とすれば、1 時間あたり 252 個の細胞データ取が可能であることが示された。現在の課題としては、本システムと SICM との同期が完全には実現されていないということが挙げられる。講演では、こうした課題の解決に向けた取り組みについて議論する予定である。

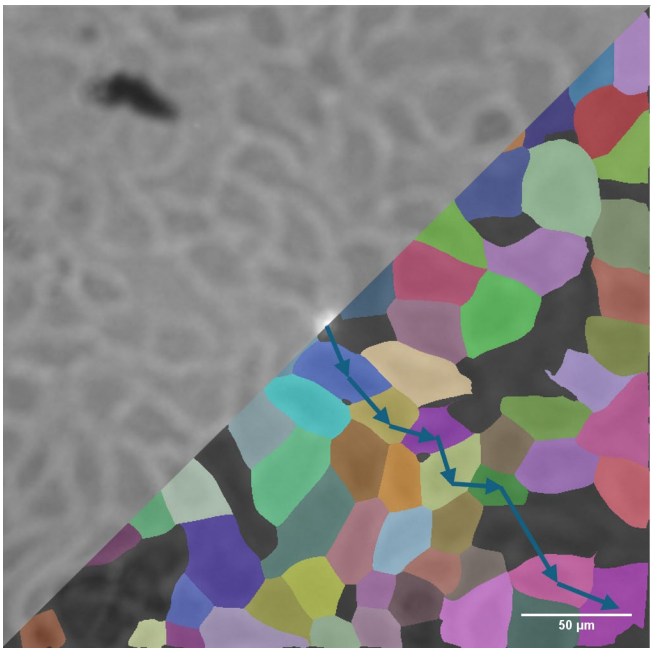


Figure. 1: Cell segmentation result and move trajectory

参考文献

[1] Stringer et al., Nat. Meth. **18**(1), 100 (2021)

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation : 3.11 Nanoscale optical science and near-field optics

[10a-P01-1~35] 3.11 Nanoscale optical science and near-field optics

[10a-P01-1]
Numerical analysis of optical-resonator based on circularly arranged nano-plate arrays
○Tetsuya Kouno[1], Haruto Yamamura[1] (1.Shizuoka Univ.)

[10a-P01-2]
Investigation of ZnO micro lasers fabricated by microfabrication
○Haruto Yamamura[1], Tetsuya Kouno[1] (1.Shizuoka Univ.)

[10a-P01-3]
Dependence on excitation light of WGM oscillation in hexagonal GaN microdisk
○(M2)Yuki Kawaguchi[1], Atsushi Syouji[1], Tetsuya Kouno[2], Akihiko Kikuchi[3], Katsumi Kishino[3], Masaru Sakai[1] (1.Univ. Yamanashi, 2.Shizuoka Univ., 3.Sophia Univ.)

[10a-P01-4]
Investigation of meta-atoms for wavelength-multiplexed hologram based on inverse design
○Kota Nakada[1], Hetsuhito Omori[1], Kentaro Iwami[1] (1.Tokyo university of agriculture and technology)

[10a-P01-5]
Improvement of tunnel diode performance using metal nanoparticles for optical rectennas
○Chitose Yasuhara[1], Liu Zhen[1], Yamamoto Takuma[1], Yugami Hiroo[1], Shimizu Makoto[1] (1.Tohoku Univ.)

[10a-P01-6]
Selective Progression of Photoisomerization Chain in Photochromic Microcrystals
○(M1)Akinobu Mochizuki[1], Kazuharu Uchiyama[1], Ryuto Horie[1], Kingo Uchida[2], Hirokazu Hori[1] (1.Univ. of Yamanashi, 2.Ryukoku Univ)

[10a-P01-7]
Photonic Nanofabrication of Semiconductor Nanoparticles and Application to Optical Devices and Materials
○SEUNGHYUK LEE[1], Tatsuma Tetsu[1] (1.IIS, The Univ. of Tokyo)

[10a-P01-8]
Plasmonic Near-Field Engineering for Discrimination of Optically Active Material
○Naoki Ichiji[1], Takuya Ishida[1], Ikki Morichika[1], Daigo Oue[2,3], Tetsu Tatsuma[1], Satoshi Ashihara[1] (1.Tokyo Univ. IIS, 2.RIKEN., 3.ICL)

[10a-P01-9]
Silicon plasmonics for sensitivity enhancement in deep-ultraviolet region
○Atsushi Ono[1,2], Yu-ichiro Tanaka[1], Wataru Inami[1,2], Yoshimasa Kawata[1,2] (1.Shizuoka Univ., 2.RIE, Shizuoka Univ.)

[10a-P01-10]
Research on light-molecular vibration analysis using machine learning
○(M1C)Haruto Maeda[1], Saoki Imai[2], Yoshiaki Nishijima[3,4] (1.interfaculty graduate school of innovative and practical studies,Yokohama National Univ., 2.Graduate School of Engineering

Science, Yokohama National Univ., 3.Faculty of Engineering, Yokohama National Univ., 4.PRESTO-JST)

[10a-P01-11]

Proposal for sensitivity improvement of colorimetric hydrogen sensor using metal nano grating on metal/dielectric/metal

○Yuusuke Takashima[1], Yua Okano[1], Yoshiki Naoi[1] (1.Tokushima Univ.)

[10a-P01-12]

Electronic state characterization of strong coupling system based on Au nanostructures and WS_2

○Sogo Akita[1], Keisuke Imaeda[2], Sou Ryuzaki[2], Kosei Ueno[2] (1.Grad. Sch. Chem. Sci. and Eng., Hokkaido Univ., 2.Dept. Chem., Fac. Sci., Hokkaido Univ.)

[10a-P01-13]

Localized surface plasmon resonance properties of Cu_2Sb intermetallic nanoparticles

○Tatsuki Fukuyama[1] (1.Department of Chemistry, Graduate School of Science, Kyoto Univ)

[10a-P01-14]

Study of dielectric cover layer for surface-enhanced Raman scattering device using periodic Al nanostructures

○Fumika Sumiyama[1], Kaho Watanabe[1], Yoshitaka Itoh[1], Mitsuaki Harada[1] (1.Seiko Epson Corp.)

[10a-P01-15]

Tuning the optical properties of metallic nanostructures by sputtering current

○Duthika Dilrangi PereraWP[1,2], Ryushi Fujimura[1,2] (1.Utsunomiya Univ., 2.CORE)

[10a-P01-16]

Fabrication of Plasmonic Photocathode Showing Photocurrent Responses Derived from Quadrupolar Plasmon Resonance

○Hiroyasu Nishi[1,2], Kouki Hirano[1], Nozomi Yamamoto[2] (1.Graduate School of Science and Engineering, Univ. of Toyama, 2.School of Science, Univ. of Toyama)

[10a-P01-17]

Silver Dendrites Grown in Irradiation Area with 405 nm Laser

○(M1)Kohei Kawamoto[1], Nobuyuki Takeyasu[1] (1.Okayama Univ)

[10a-P01-18]

Simple Fabrication of gold nanoparticle immobilized substrates and particle size control

○(M1)CHINAMI AKUMO[1], YUKIE YOKOTA[1], UCHIDA HIROSHI[1] (1.Sophia Univ.)

[10a-P01-19]

Optical Properties of Noble Metal Hybrid Nanostructures Fabricated by Galvanic Replacement Reaction

○Hirokazu Sasaki[1], Kohei Imura[1] (1.Waseda Univ.)

[10a-P01-20]

Improved stability and sensitivity of plasmonic color sensor using NHoM structure

○Ikuto Toyota[1], Kota Yamasaki[1], Shun Fukutomi[1], Tetsuya Matsuyama[1], Shunsuke Murai[1], Kenji Wada[2], Koichi Okamoto[1] (1.Osaka Metro. Univ., 2.OMU-ESCARI)

[10a-P01-21]

Wavelength-selective diffraction gratings with Nano-Hemisphere on Mirror (NHoM) structures

○Mika Iwahashi[1], Hiroaki Kawata[1], Tetsuya Matsuyama[1], Shunsuke Murai[1], Kenji Wada[2], Koichi Okamoto[1] (1.Osaka Metropolitan Univ., 2.OMU-ESCARI)

[10a-P01-22]

Spatial Frequency Analysis of Ag Random Nanograin Structures and Prediction of Quantum Dot Emission Enhancement based on FFT and STFT

○Atsushi Okada[1], Tomohiko Niwa[1], Haruki Hirauchi[1], Tetsuya Matsuyama[1], Shunsuke Murai[1], Kenji Wada[2], Hiroyoshi Naito[1,3], Koichi Okamoto[1] (1.Osaka Metro. Univ., 2.OMU-ESCARI, 3.Ritsumeikan Univ.)

[10a-P01-23]

Tailoring Emission Directionality with Toroidal Dipole Resonance in Silicon Metasurfaces

○Yosuke Ito[1], Mojtaba Karimi Habil[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1] (1.Kobe Univ.)

[10a-P01-24]

Hexagonal Array of Silicon-Germanium Alloy Nanodisks for Narrow-band Near Infrared Absorption Enhancement

○(M2)Nguyen Quoc Chien[1], Keisuke Moriasa[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1] (1.Kobe Univ.)

[10a-P01-25]

Narrow-Band Near Infrared Absorption via Fabry-Pérot BICs in Silicon Nanodisk Array Fabricated on Bragg Reflector

○(B)Takaaki Matsuura[1], Keisuke Moriasa[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1] (1.Kobe Univ.)

[10a-P01-26]

Design of Semishell structure Exhibiting Transverse Scattering for solar window

○Yuki Kobayashi[1], Ryushi Fujimura[1,2] (1.Utsunomiya Univ., 2.CORE)

[10a-P01-27]

Polarization-independent nonreciprocal transmission by a magneto toroidal metasurface

○Shunya Haruna[1], Hiroyuki Kurosawa[1], Tetsuya Ueda[1] (1.Kyoto Inst. Tech)

[10a-P01-28]

Visualization of Thermal Extraction Process Achieved by Metamaterial

○(B)Shu Watanabe[1], Wakana Kubo[1] (1.Tokyo Univ. of Agri. Technol. (TUAT))

[10a-P01-29]

Robust Design Optimization of Telecommunication-Band Metalenses Using the FDTD Method Considering Fabrication Errors

○(D)Masaki Okamoto[1], Hasebe Shodai[1], Yasufumi Yamada[1], Takeshi Sugiura[2], Shiei Kusajima[2], Toru Asahi[1], Kenta Nakagawa[1] (1.Waseda Univ., 2.OPTORUN Co.,Ltd.)

[10a-P01-30]

Detection and identification of single-digit nanoplastics using AuNP dimers

○Rikiya Sodeyama[1], Keiko Esashika[1], Toshiharu Saiki[1] (1.Keio Univ.)

[10a-P01-31]

SERS with silver dendrites on TiO_2/Au/SiO_2 substrate

○(M2)Tomoki Kawahara[1], Nobuyuki Takeyasu[1], Hiroaki Misawa[1,2], Xu Shi[2], Lin Qiao[1,2] (1.Okayama Univ., 2.Hokkaido Univ.)

[10a-P01-32]

EELS characterization of nano-light sources generated by electron beam irradiation

○(B)Kanta Hirai[1], Tomoyasu Fujimaru[2], Masato Inamata[2], Hiromu Tanaka[2], Midori Ikeuchi[3], Hidehiro Yamashita[3], Shiro Ihara[3], Mitsuhiro Murayama[3,4], Hikaru Saito[3] (1.Kyushu Univ., 2.IGSES, Kyushu Univ., 3.IMCE, Kyushu Univ., 4.Virginia Tech.)

[10a-P01-33]

Synthesis of Cd-free Quantum Dots for High-Resolution Fluorescence Imaging

○Kei Hosomi[1], Shumpei Yamazaki[1], Yu Masuda[1], Maciej Kretkowski[1], Wataru Inami[1], Yoshimasa Kawata[1] (1.Shizuoka Univ.)

[10a-P01-34]

Circular dichroism in molecular-oriented organic crystal microcavities

○(M1)Rina Nishihara[1], Reo Ohkura[1], Daichi Okada[1], Shun Takahasi[1], Kenichi Yamashita[1] (1.KIT)

[10a-P01-35]

Fabrication and evaluation of topological organic VCSEL

○(M1)Shunta Yumori[1], Kota Nakajima[1], Daichi Okada[1], Shun Takahashi[1], Kenichi Yamashita[1] (1.Kyoto Inst. Technol.)

円環状ナノプレートアレイによる微小光共振現象の数値計算

Numerical analysis of optical-resonator based on circularly arranged nano-plate arrays

静岡大工　○光野 徹也 山村　陽斗

Shizuoka Univ. , ○Tetsuya Kouno, Haruto Yamamura

E-mail: kono.tetsuya@shizuoka.ac.jp

はじめに：光と同程度の波長スケールであるナノ或はマイクロオーダーの構造は、微小光共振機構を発現し得る。典型例として、ナノワイヤを光が往復するファブリペロー・その類似現象、円形或は良好な幾何対称性を有する多角形マイクロディスクにて発現する光の周回現象であるウィスパリングギャラリーモード(WGM)、ナノ結晶の集合体にて発現するランダムレージング、そして周期的なナノ構造により発現するフォトニッククリスタルなどが知られている。そして、それぞれの微小光共振現象の特性に応じた低閾値・高出力レーザー、マイクロセンサ、スペックルフリー高出力光源などの様々な応用が提案されている。このように、微細形状のバリエーションは、微小光共振現象のバリエーションであり、他にも様々な構造が提案されている。その中にあって注目したのは、WGM とフォトニッククリスタルを組合わせたような効果が期待できるマイクロギアと呼称される構造が報告されている。[1] 本研究では、短波長領域にて前述のような WGM とフォトニッククリスタルの効果を発揮する可能性がある構造として、円環状ナノプレートアレイを提案し、その微小光共振現象を有限差分時間領域法(FDTD)によって検討したので報告する。

検討方法と結果一例：低環境負荷・低コスト・高屈折率の優れた発光材料として ZnO 結晶が知られている。そこで本検討では、円環状ナノプレートアレイの ZnO の発光利得近傍(概ね 380～390 nm)における微小光共振現象について検討した。図 1 に構造一例、当該構造の 2D-FDTD の光応答スペクトル、及び微小光共振していると考えられる光の電場分布@388.16 nm の状態を示す。これより、このようなナノ構造が微小光共振現象を発現することが期待できる。光応答スペクトルの共振ピークの数は数個であり、これは同程度の大きさのリングなどの周回型微小光共振器では共振ピークが一定間隔で多数配列する様子と大きく異なる。これは、円環状にナノ構造が周期的並んでいる効果が得られているためと推察される。このような構造について、構造パラメータと微小光共振現象（光応答スペクトル）特性の関係の詳細を当日報告する。

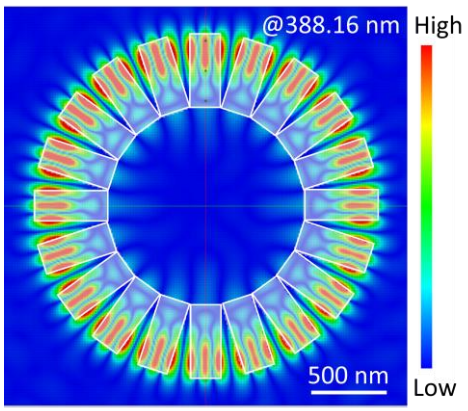


Fig. 1 Example of light distribution calculated by 2D-FDTD in a circular nanoplate array model (white region).

引用文献：[1] M. Fujita and T. Baba, Appl. Phys. Lett. **80**, 2051 (2002).

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP23K04610 の助成を受けた。

© 2025年 応用物理学会

微細加工による ZnO 微小レーザーの作製の検討

Investigation of ZnO micro lasers fabricated by microfabrication

静岡大工　○山村 陽斗，光野 徹也

Shizuoka Univ. , ○Haruto Yamamura, Tetsuya Kouno

E-mail: kono.tetsuya@shizuoka.ac.jp

はじめに：酸化亜鉛(ZnO)は、大きな直接遷移型バンドギャップ(~3.4 eV)と大きな励起子結合エネルギー(~60 meV)を有する優れた紫外域発光材料である。また、結晶成長によって形成された ZnO マイクロディスクやナノワイヤ等の微小光共振現象によるレーザー発振が報告され、これらによってフォトニックマイクロセンサへの応用が期待されている。[1, 2] これらの微小光共振現象は、その微細な形状に依存している。しかしながら、結晶成長によってその微細な形状を自在にコントロールすることは難しい。一方で、ZnO は薬品耐性が極めて低いためウェットエッチングにより微細形状をコントロールすることにも課題を有する。そこで本研究では、ZnO 微細構造を集束イオンビーム(FIB)によって加工しこれを微小レーザーとするための手法を検討したので報告する。

実験方法：Fig. 1 に作製した ZnO 微細構造の一例：ナノリング構造の電子顕微鏡像を示す。Fig. 1 のように FIB は微細構造を自在に構築することができる。しかしながら、FIB を用いると結晶へダメージを与えるため、これら試料から発光をほとんど得られなかった。そこで、FIB 加工後試料について窒素雰囲気アニール処理を行った。加工後ほとんど発光を示さなかった試料であっても、明瞭なバンド端近傍の発光を確認することができた。これは FIB による微細加工ダメージを窒素雰囲気アニールによって回復できることを示唆している。この一連のプロセスにより、自在に形状を制御した ZnO 微小レーザー作製が期待できる。

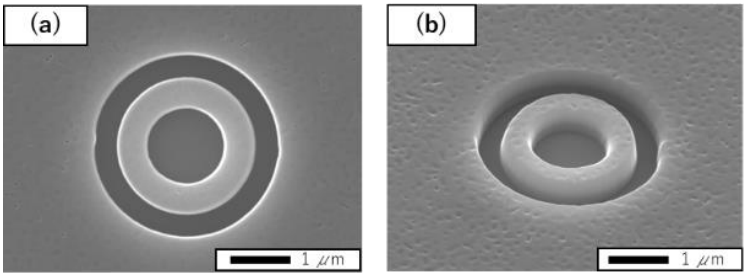


Fig.1 SEM images of ZnO nanoring formed by FIB
(a) Top view and (b) Bird's eye view.

引用文献：[1] R. Chen, et al., Adv. Mater. **23**, 2199–2204 (2011).

[2] T. Kouno et al., Phys. Stat. Sol. A **222**, 240744 (2024).

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP23K04610 の助成を受けた。

© 2025年 応用物理学会

六角形状 GaN マイクロディスクにおける WGM 発振の励起光依存性

Dependence on excitation light of WGM oscillation in hexagonal GaN microdisk

山梨大工[1]，静岡大工[2]，上智大理工[3]，○(M2)川口 雄輝[1]，東海林 篤[1]，光野 徹也[2]，
菊池 昭彦[3]，岸野 克巳[3]，酒井 優[1]
Univ. Yamanashi[1], Shizuoka Univ.[2], Sophia Univ.[3], ○Yuki Kawaguchi[1], Atsushi Syouji[1],
Tetsuya Kouno[2], Akihiko Kikuchi[3], Katsumi Kishino[3], Masaru Sakai[1]
E-mail: g24tz006@yamanashi.ac.jp

六角形状 GaN マイクロディスクは自己組織的に形成された高品質のマイクロ微結晶である。ディスクの辺長は1~2 μm、厚さはおよそ0.2 μmであり、GaN ナノコラムを支柱として基板からおよそ1 μmの高さに浮いた構造を持つ。この構造により、ディスクは強力な光閉じ込め効果を有し、GaN マイクロディスクは WGM（Whispering Gallery Mode）型の微小光共振器としての特性を有する。さらに、GaN はレーザー媒質であることから、GaN マイクロディスクはシンプルかつ微小な構造のレーザー発振器として機能する。これまで我々は、GaN マイクロディスクにおける WGM 発振の特徴として、六角形の 3 つの辺を利用した正三角形の光学パスが支配的であること、その周回方向は励起光パルス毎に右回りか左回りのいずれかが選択されること、周回方向の分布には統計的に偏りが生じること、などを実験的に明らかにしてきた[1]。

今回我々は、GaN マイクロディスクへ照射する励起光の空間分布や偏光に着目し、それらが WGM 発振にどのように寄与しているのかについて、測定及び検討を行ったので報告する。測定では、励起光として Nd:YAG レーザーの第 3 高調波（中心波長355 nm、パルス幅5 ns、繰り返し1 kHz）を使用し、ディスクへの励起光の照射位置をピエゾステージによって100 nmステップで変化させ、格子状の各点で分光測定を行った。Fig. 1 に全測定点における発光スペクトルの積算結果の一例を示す。観察された発振ピークのうち、波長378.6 nm及び382.9 nmにおける光強度を励起位置毎に色分け表示した“ヒートマップ”を Fig.2 に示す。各発振ピークについてこのようなヒートマップを作成し、またそれらを比較することで、WGM 発振における発振ピークと光学パスの関係等について新しい知見が得られると考えられる。詳細を当日報告する。

[謝辞] 本研究は、JSPS 科研費 JP22K04895 の助成を受けて行われました。

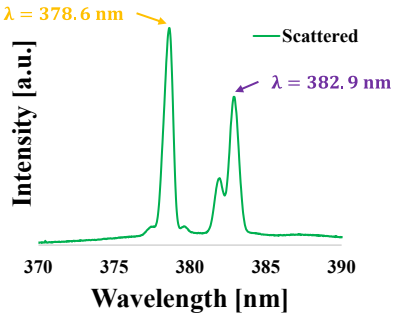


Fig. 1: Accumulated spectrum of a GaN microdisk.

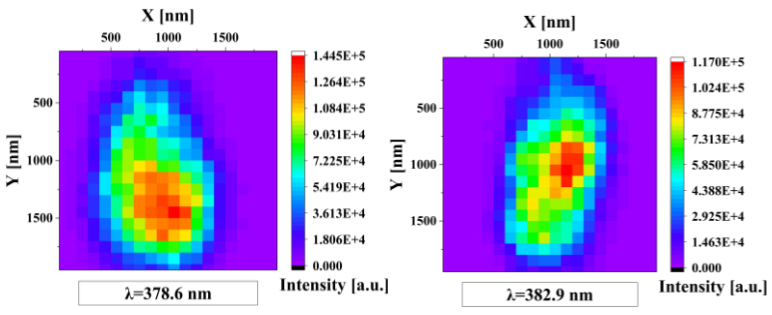


Fig. 2: Heat map for each oscillation wavelength.

[1] 川口 他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 20a-P02-1 (2024).

© 2025年 応用物理学会

逆設計による波長多重ホログラム用メタ原子の探索

Investigation of meta-atoms for wavelength-multiplexed hologram based on inverse design

農工大工，　○(B) 中田 幸多，大森哲人，岩見健太郎

Tokyo University of Agriculture and Technology , Kota Nakada, Tetsuhito Omori, Kentaro Iwami

E-mail: kota-nakada@st.go.tuat.ac.jp

1 概要

メタサーフェスホログラムはサブ波長構造により高い視域角と高解像度を実現し，3D ディスプレイへの応用が期待されている[1].ホログラムには物体光の位相の情報が記録されていて, 3 波長のあらゆる位相の値を記録できることが鮮明な再生像を得るために重要である．先行研究では，メタアトムの形状に十字型などを用いることで, 位相空間をカバーしていた[2]．しかしそれでは位相空間を網羅しきることはできていない．そこで, 本研究では逆設計を用いたメタサーフェスホログラムを開発することで位相空間を網羅することを目的とした。.

2 デザイン

本研究では位相空間を 3 波長それぞれの軸において 3 等分した計 27 個の点からなる位相ライブラリを再現するメタアトムの逆設計を試みる．これら 27 個の点の一つ一つに対して，目標となる座標とシミュレーション結果の座標の距離を目的関数として, それが最小になるように最適化を行う． シミュレーションによって得られたターゲット像と十字型のメタサーフェスホログラムと逆設計によるホログラムを Fig.1 に示した．このとき従来の十字型のメタアトムのターゲット像に対する PSNR が 29.15 dB であることと比較して, 27 分割した場合は 30.18 dB となり再生像の再現度向上が期待できる．最適化の詳細は当日報告する．

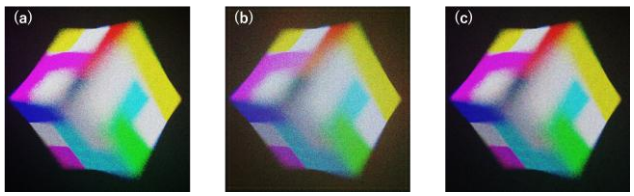


Fig.1 (a)シミュレーションのターゲット像(b)十字型メタアトムのホログラム(c)逆設計によるメタサーフェスホログラム

参考

[1] L. Huang, S. Zhang, T. Zentgraf, "Metasurface holography: from fundamentals to applications", *Nanophotonics*, vol. 7, no. 6, pp. 1169-1190, 2018

[2]Masakazu Yamaguchi, Mitsutoshi Hada, Kentaro Iwami, "Polarization-independent full-color holographic movie with a single metasurface free from crosstalk". *Optics Express*, col.33, no.2, pp3238-3249, 2025

© 2025年 応用物理学会

金属ナノ粒子による光レクテナ用トンネルダイオードの性能向上

Performance improvement of tunneling diode for optical rectenna using metal nanoparticles

東北大工 [1]，○安原 ちとせ [1]，Liu Zhen[2]，山本 拓真 [3]，湯上 浩雄 [4]，清水 信 [5]

Graduate School of Engineering, Tohoku Univ. [1], ○Chitose Yasuahra[1], Liu Zhen[2], Yamamoto Takuma[3], Yugami Hiroo[4], Shimizu Makoto[5]

E-mail: yasuhara.chitose.q2@dc.tohou.ac.jp

【緒言】身の回りにある僅かなエネルギーを回収して電力として用いるエネルギーハーベスティングの研究が進められている。中でも非接触で発電可能である光エネルギーを活用するため、光電変換システムに注目する。ここでアンテナの設計次第で感度波長域を制御することができる発電システムとしてレクテナが注目されている。レクテナは、電磁波を交流電流に変換するアンテナ部分と、交流電流を直流電流に整流するダイオード部分からなる(Fig. 1)。可視光・赤外光付近を対象にする場合、高周波数(10^{12}~10^{14}[Hz])に対する応答性能が求められる。

MIM トンネルダイオードはトンネル効果を利用するダイオードであり、高速応答が可能である。2 つの金属で絶縁体層を挟んだ構造で、順電圧と逆電圧それぞれでトンネル障壁厚さが異なるため整流効果を得ることができる。ここで、片方の電極形状を尖鋭的な形状にすると、電界集中の影響でトンネル障壁形状も非線形に変化する。これを電場集中効果といい、この効果を活用してダイオード性能を向上させることが期待されている(Fig.2)。

本研究では、原子層堆積法（ALD 法）による Pt ナノ粒子の自己組織化により、電場集中効果を付与した MIM ダイオードを作製し、その性能を検証する。

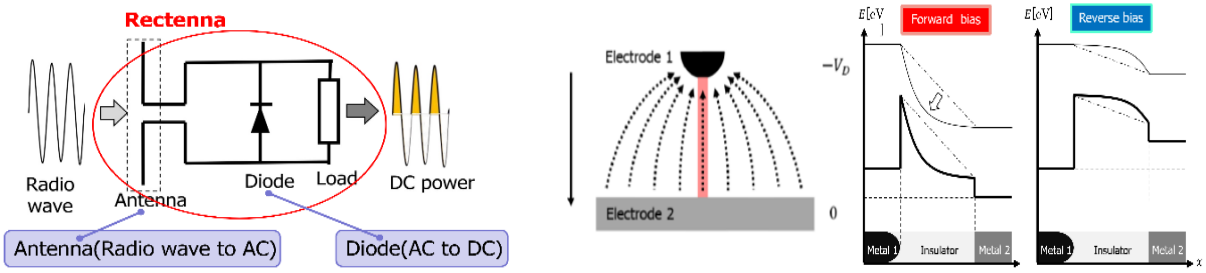


Fig. 1 (a) Schematic of Rectenna. (b) Tunnel barrier shape change with electric-field concentration effect

【実験方法および結果と考察】片方の電極に幾何学構造を付与した Pt-TiO_2-Pt MIM ダイオードを石英基板上に作製し、その I-V 特性を測定した。幾何学構造は、原子層堆積法の成膜初期段階の島状構造を利用することで Pt ナノ粒子をトンネル層内に作製した。また、WKB 近似法を用いて I-V 特性解析を行った結果、ナノ粒子の有無によって、このダイオードの電流密度と非対称性を、大きく向上させることができた。この要因については発表で詳細を説明する。

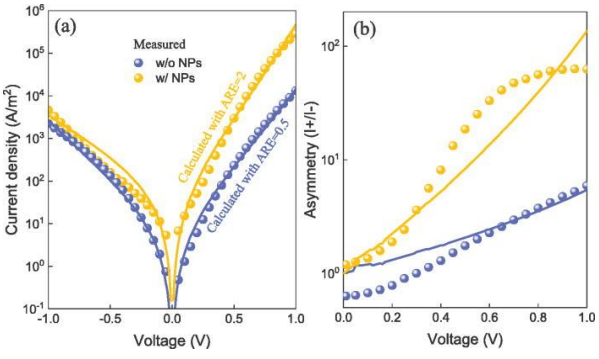


Fig.3 Current density and asymmetry of the MIM diodes without and with nano-particless.[1]

【結言】本研究では、絶縁体と電極の界面に Pt ナノ粒子を付与した MIM ダイオードを開発した。Pt ナノ粒子は、トンネル層内の電界分布を変化させる幾何学的電極として機能しており、その結果電流密度と非対称性が同時に増加した。ナノ粒子を含んだ MIM ダイオードを実装することで、電界増強による整流効率の理論的改善が期待される。

[1] Z. Liu, S. Abe, M. Shimizu, H. Yugami, Applied Physics Letters, 122, 093502 (2023).

© 2025年 応用物理学会

フォトクロミック微結晶アレイにおけるナノ光異性化連鎖の選択的進行

Selective Progression of Photoisomerization Chain in Photochromic Microcrystals

山梨大工 [1], 龍谷大先端理工 [2] ○(M1)望月 章伸 [1], 内山 和治 [1], 堀江 龍斗 [1], 内田 欣吾 [2], 堀 裕和 [1]

Univ. of Yamanashi [1], Ryukoku Univ.[2] ○Akinobu Mochizuki[1], Kazuharu Uchiyama[1], Ryuto Horie[1], Kingo Uchida[2], Hirokazu Hori[1]

E-mail: g25tz020@yamanashi.ac.jp

我々はフォトクロミックジアリールエテン結晶における光異性化現象に注目し、生物の並列機能と履歴特性を模して組み合わせ爆発を解決する高性能、高集積のナノ光電機能デバイスの作製を目指している。本研究では、可視光と UV 光を照射することで閉環体と開環体の 2 つの異性体に可逆的に変化するジアリールエテン(図 a)の数 100 nm サイズの微結晶を作製し、演算構造の基本となるフォトクロミック微結晶 2 次元アレイ構造を形成した。この構造は、微結晶に局所励起を加えることで、微結晶が光異性化を伴い近接場光源となり、近接場光による励起移送の連鎖が起こり、波長以下のスケールにナノ光回路が形成されうる構造である。異性化の連鎖は一様に広がるわけではなく、微結晶間の距離のみならず、分子形状の光異性化に伴う変化、微結晶内部の異性化微細構造の出口位置などの要因により、選択的に進行すると予想される(図 b)。微結晶アレイにおける選択的光異性化連鎖を捉え、その原理を解明するため、光異性化の進行を観察光で破壊せずに計測可能な走査型トンネル顕微鏡法（STM）を用いた電子的な計測[1](図 c)を行った。用いるフォトクロミック微結晶自体の結晶性をアニール処理により向上させ、微結晶の結晶方位を外形を通して確認可能とし、結晶の異方性、結晶変形と光異性化の関係を計測した。

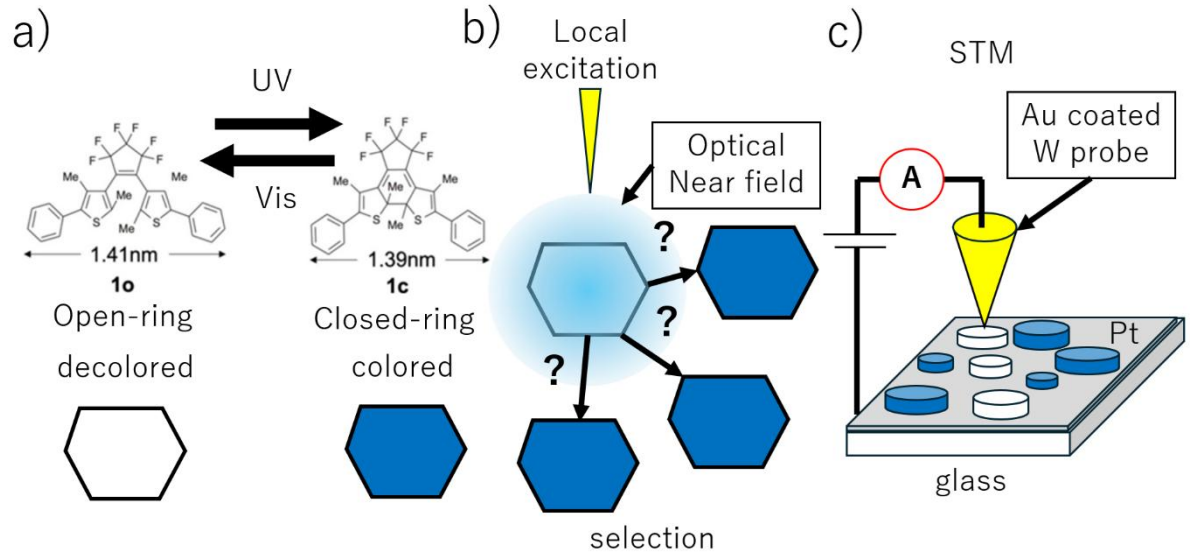


Fig. a) Photochromic diarylethene and photoisomerization. b) Selective progression of photoisomerization chain. c) STM measurement of photoisomerization progression in photochromic microcrystals.

参考文献[1] R. Horie et al, *Sci. Rep.* **15**, 5416 (2025).

© 2025年 応用物理学会

半導体ナノ粒子の光ナノ加工と光機能デバイス・材料への応用

Photonic Nanofabrication of Semiconductor Nanoparticles and Application to Optical Devices and Materials

東大生研，〇イ スンヒョク，立間 徹

IIS, The Univ. of Tokyo, 〇Seung Hyuk Lee, Tetsu Tatsuma

E-mail: sh0530@iis.u-tokyo.ac.jp

近接場光を利用する光ナノ加工は、光の回折限界より小さいナノスケールでの構造制御が可能であり、近年注目されている。これまでの光ナノ加工では、主に金属ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴（LSPR）に基づくプラズモン誘起電荷分離（PICS）を利用し、キラルナノ構造の作製[1]などに応用してきた。しかし、金属ナノ粒子は吸収が強いため光が減衰するなどの問題がある。近年我々は、半導体ナノ粒子における Mie 共鳴によって生じる近接場光を利用することで、粒子を局所的に励起し、励起電子と正孔が非局在化する前に酸化・還元反応を誘起できる、つまり部位選択的な光触媒反応が可能であることを報告した。これにより、金属ナノ粒子の LSPR に限らず、半導体ナノ粒子の Mie 共鳴を用いた光ナノ加工も可能であることが示された。例えば、六角 ZnO ナノプレートに UV 直線偏光を照射することで部位選択的に Ag ナノ粒子を担持すること[2]や ZnO の異方性ナノリングを形成すること[3]が可能である。さらに、UV 円偏光照射によるねじれた近接場光を利用することで、キラル p-n ヘテロ接合ナノ構造やスパイラルナノ構造の ZnO も形成できる。

本研究では、半導体ナノ粒子の光ナノ加工によって作製したヘテロ接合ナノ構造を発展させるとともに、新規な光応答素子への応用について検討した。まず、六角形 ZnO ナノプレート（n 型）に UV 直線偏光を照射して Co_3O_4（p 型）を析出することで異方性 p-n ヘテロ接合ナノ構造（ZnO-Co_3O_4）を作製し、直線偏光下におけるエタノール酸化活性を電流応答で調べた（Figure 1a）。その結果、作製に使用した直線偏光と偏光角が同じ場合に、偏光角が直角の場合より数十%高い光電流を示すことがわかった。また、UV 円偏光を照射して Fe_2O_3 を析出することで磁気キラルナノ構造（ZnO-Fe_2O_3）を作製し、室温、磁場中において UV 無偏光の非対称透過（非相反方向二色性）を示すことがわかった（Figure 1b）。

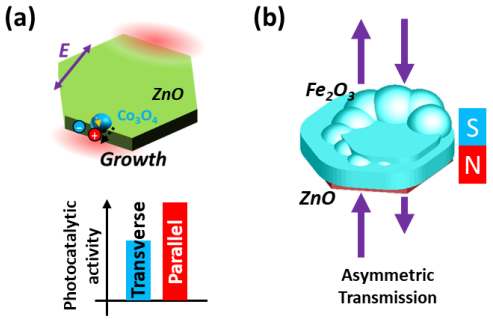


Figure 1. (a) 異方性 p-n ヘテロ接合ナノ構造と直線偏光下でのエタノール酸化活性。(b) 磁気キラルナノ構造による非対称透過。

参考文献

1. K. Saito and T. Tatsuma, *Nano Lett.*, **18**, 3209 (2018).

2. Y. Oba, S. H. Lee, and T. Tatsuma, *J. Phys. Chem. C*, **128**, 827 (2024).

3. Y. Oba, S. H. Lee, and T. Tatsuma, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **27**, 11512 (2025).

© 2025年 応用物理学会

光学活性物質の識別に向けたプラズモン近接場の設計

Plasmonic Near-Field Engineering for Discrimination of Optically Active Material

東大生研[1], 理研[2], インペリアルカレッジロンドン[3], ○伊知地直樹[1], 石田拓也[1], 森近一貴[1], 大上 能悟[2,3], 立間徹[1], 芦原聡[1]

IIS, Univ. of Tokyo[1], RIKEN[2], Imperial College London[3], ○N. Ichiji[1], T. Ishida[1], I. Morichika[1], D. Oue[2,3], T. Tatsuma[1], S. Ashihara[1]

E-mail: ichiji@iis.u-tokyo.ac.jp

【Introduction】 円偏光と物質の相互作用は円偏光の持つ二つの物理的指標、スピン角運動量（SAM）と光学キラリティ（OC）に強く依存する[1,2]。これら2つの物理量は自由空間では不可分であるが、プラズモン増強場を用いる事で両者の選択的な増強が可能になる[3]。しかし、増強された近接場は自由空間の円偏光とは電磁場の振幅比や位相関係が大きく異なり、増強されたSAMやOCが光学活性物質とどのように相互作用し、円二色性（CD）のような観測可能な物理量を生み出すかは未解明であった。本研究では、SAMとOCにそれぞれ応答する物質モデルを導入した有限要素法（FEM）シミュレーションを行い、得られたCD信号の評価から増強された物理量と現れるCD信号の関係を議論した。

【FEM simulation】 プラズモニック構造として、Ag製のナノディスクおよびナノホールアレイを用いた（図1(a)）。これらの構造はSAMとOCに対し異なる波長依存性を示し、SAMはディスク/ホール構造で符号が反転したピーク状増強を、OCはディスク構造で分散型、ホール構造ではピーク型増強特性を示す(図1(a)，下パネル)[3]。FEMシミュレーション（COMSOL Multiphysics）を用い、各構造が波長600 nm近傍に共鳴を持つよう周期配列構造を設計し、その側壁に光学活性を示す物質層を均一に配置した。光学活性物質として、(1)SAMに応答する磁気光学(MO)物質と、(2)OCに応答するキラル物質の2種類を導入した。MO物質は誘電率テンソルの非対角項 g で、キラル物質はパスツールパラメータ κ [4]を導入することでモデル化している。それぞれの寄与を峻別するため、各パラメータの吸収性（虚数部）と屈折性（実数部）が支配的な物質モデルをそれぞれ定義し、左右の円偏光に対する吸収差（CDスペクトル）を算出した。

【Results】 算出された各モデルにおけるCDスペクトルを図1(b)に示す。CDスペクトルは、プラズモニック構造（disc／hole）と光学活性物質（MO／キラル）の組み合わせによって、明確に異なる形状を示した。吸収性モデルでは、キラル物質・MO物質ともに、CDスペクトルはそれぞれのOCおよびSAMの増強スペクトルを反映した形状を示す。一方、屈折性モデルではMOモデルがプラズモン共鳴の波長シフトを通じてdisc/holeで符号が逆向きの分散的なCDスペクトルを示したのに対し、キラルモデルではdisc/holeともに微弱なディップ状の応答のみであった。これらの結果は、プラズモニック構造によって選択的に増強されるSAMおよびOCと、光学活性物質の応答特性（吸収性／屈折性）との組み合わせが、CDスペクトルの形状に特徴的なパターンを与えることを示しており、CD信号のスペクトル解析を通じて、光学活性応答の起源および物質の光学特性を系統的に識別する手法の構築に繋がる可能性を示唆している。

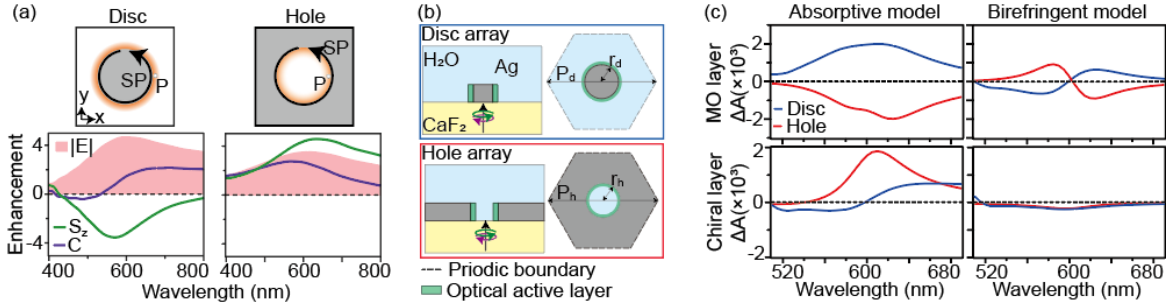


Figure 1 (a) Schematic diagrams of the simulation model. Bottom panels show the simulated enhancement spectra of the z-component of SAM (S_z) and optical chirality (C). (b) Geometry of the FEM simulation model, showing periodic disc and hole arrays with optically active layers placed on the sidewalls. (c) Calculated circular dichroism (CD) spectra (ΔA) for different combinations of plasmonic structures and optically active layers. Left: absorptive models; right: birefringent models. Top: magneto-optical (MO) layers; bottom: chiral layers.

[1] Y. Tang and A. E. Cohen, Phys. Rev. Lett. 104, 163901 (2010). [2] M. M. Coles and D. L. Andrews, Phys. Rev. A 85, 063810 (2012). [3] N. Ichiji, et al., arXiv:2505.19878 (2025). [4] M. L. Nesterov, et al., ACS Photon. 3, 578 (2016).

© 2025年 応用物理学会

シリコンプラズモニクスによる深紫外感度向上技術

Silicon plasmonics for sensitivity enhancement in deep-ultraviolet region

静大院工 [1]，静大電研 [2]　○小野 篤史 [1,2]，田中 悠一朗 [1]，居波 渉 [1,2]，川田 善正 [1,2]

Shizuoka Univ., ○Atsushi Ono, Yu-ichiro Tanaka, Wataru Inami, Yoshimasa Kawata

E-mail: ono.atsushi@shizuoka.ac.jp

表面プラズモン共鳴（SPR）は，金属/誘電体界面における自由電子の集団振動と光との結合現象であり，ナノフォトニクス分野においてセンサやラマン分光，蛍光増強等，様々な応用に展開されている．近年，金属だけでなくシリコン（Si）においても深紫外（DUV）領域にて誘電率の実部が負となり，SPR が励起されることが報告されている[1, 2]．DUV 波長域における Si の直接遷移吸収に伴い，クラマース・クローニッヒ関係により誘電率の実部が負となることに起因する．このような金属的な光学応答により，DUV 領域では Si の反射率が高くなり，Si ベースのセンサでは DUV 感度が著しく低下する．DUV 領域における SPR の誘起には一般にアルミニウム（Al）が用いられるが，Si センサに適用する場合，Si と Al の両方が負の誘電率を示すため，Al/Si 界面での SPR 励起は基本的に生じない．そこで本研究では，Si が DUV 領域において SPR が励起されるという特性に着目し，Si 単体の SPR 励起によって感度を能動的に高められるのではないかと考えた．

我々は，光伝導型素子構成とした Si センサの受光部表面に電子線リソグラフィとドライエッチングにより Si 周期凹凸ナノ構造を作製し，凹凸受光面に波長 266 nm の DUV 光を照射した結果，TM 偏光においてのみ顕著な感度向上が確認され，Si の SPR 共鳴励起による光吸収増強を世界で初めて実証した(図 1)[3]．SiC や GaN といった化合物半導体は高い DUV 感度を示すが，集積性や低コスト化に対する制約が大きい．本提案技術は，Si 単体の SPR を活用して高感度な DUV 検出を実現するものであり，既存の CMOS プロセスとの高い整合性を有することから，集積型 DUV センシングデバイスの開発に大きく貢献するものと期待される．

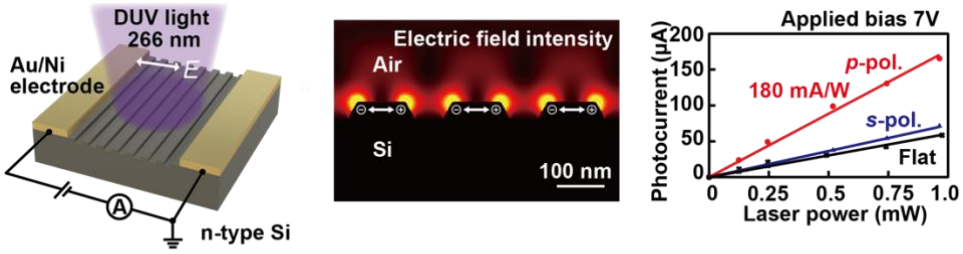


Fig. 1 Sensitivity enhancement in Deep-UV by surface plamson excitation on Si

参考文献　[1] Z. Dong, *et al*., Nano Lett. **19**, 8940-8048 (2019). [2] Z. He, *et al*., Opt. Express **28**, 12, 17595-17610 (2020). [3] Y. Tanaka, *et al*., Phys. Rev. Lett. **134**, 226901 (2025).

謝辞　本研究の一部は JST-CREST (JPMJCR2003)の支援のもと行われた．

© 2025年 応用物理学会

機械学習を用いた光–分子振動解析に関する研究

Research of light-molecular vibration analysis using machine learning

（M1C）前田 晴音 [1]，今井 彩王紀 [2]，西島 喜明 [3,4]

Interfaculty Graduate School of Innovative and Practical Studies, Yokohama National Univ.[1],

Graduate School of Engineering Science, Yokohama National Univ. [2],

Faculty of Engineering, Yokohama National Univ. [3], PRESTO-JST[4]

◦Haruto Maeda[1], Saoki Imai [2], Yoshiaki Nishijima [3,4]

E-mail: maeda-haruto-nc@ynu.jp

【緒言】MIM(金属-誘電体-金属）からなる構造を用いた赤外ガスセンシングでは構造由来のプラズモン吸収と誘電体層の分子振動による吸収 [1] が生じる。これらの吸収を分離することで分子吸収のみに注目した精度の高いセンシングに期待ができる。二つの吸収を分離する先行研究 [2] での課題として挙げられていたさらに複雑な吸収ピーク構造をとる場合におけるピーク分離の方法について報告する。

【実験手法】MIM 構造の誘電体層に対して仮想の誘電率ピークを 1~4 つ生成し、FDTD 法によって反射スペクトルのデータを収集した。収集したデータに微分演算を用いたデータ拡張と整形を行った。整形画像を二次元配列に用いたデータを用いて DenseNet や ResNet などを用いて学習を行い、ピーク位置の推定を分類モデルで行った。

【結果・考察】上記手法により学習を行った結果を表 1 に示す。DenseNet を用いた場合において最も F1score が高くなったが EfficientNetV2 を用いた場合においても同程度のスコアを得られた。ピーク数が四つの場合における分類結果を図 1 に示す。ピークの位置が隣接している場合においても離れている場合においても同様にピーク位置の推定が行うことができている。機械学習を用いたピーク分離について報告する。

【参考文献】[1] Y. Nishijima *et al.*, ***J. Mater. Chem. C***, 2022,**10**, 451-462.. [2] Saoki Imai *et al.*,修士論文

	DenseNet	EfficientNetV2	ResNet50
F1score	0.946224138	0.942174422	0.900474604
precision	0.948732596	0.941741045	0.923330953
recall	0.946670832	0.944632869	0.886201357

Table 1 F1score

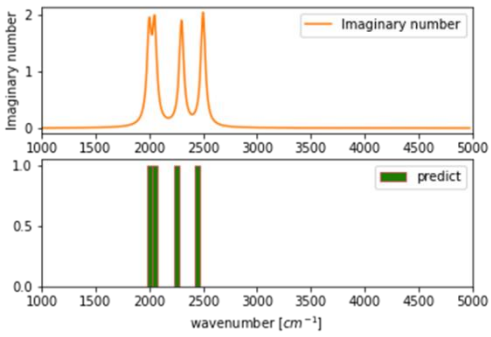


Figure 1 ω_m=[2000,2050,2300,2500]

金属ナノ格子/金属/誘電体/金属構造における複数光共鳴を用いた比色水素センサー高感度化の提案

Proposal for sensitivity improvement of colorimetric hydrogen sensor using metal nano grating on metal/dielectric/metal

徳島大理工[1]，○高島 祐介[1]，岡野 裕有[1]，直井 美貴[1]

Faculty of Sci. and Tech., Tokushima Univ.[1], ○Yuusuke Takashima[1], Yua Okano[1], Yoshiki Naoi[1]

E-mail: takashima@tokushima-u.ac.jp

比色水素センサーは、人間の目で読み取れ、電気的な配線が不要かつ爆発の危険性もないことから多分野での応用が期待される。これまでに水素吸蔵金属の誘電率変化を光共鳴現象によって検出する比色水素センサーが報告されており[1,2]、さらなる高感度化には、いかに色相を大きく変化させるかが重要である。今回、金属ナノ格子/金属/誘電体/金属構造中の複数の光共鳴を用いることで、光の RGB 成分割合を大きく変化させる手法について検討を行ったので報告する。

Figure 1 に提案構造を示す。ガラス基板上に金属/誘電体/金属(MDM: metal/dielectric/metal)構造があり、その上に水素吸蔵金属ナノ格子が配列している。本構造に光(電界が格子に垂直)が入射した際、①MDM 構造による Fabry-Pérot (FP)モード、②金属/誘電体界面での表面プラズモンポラリトン(SPP: Surface Plasmon Polariton)モード、③金属格子表面 SPP モードが、ある条件で励起され、それぞれのモード励起に起因する反射率ディップが現れる。特に FP モードと金属/誘電体界面の SPP は、誘電体内や金属膜表面に光が閉じ込められるため、ナノ格子の水素吸収による誘電体変化の影響が小さい。これを利用し、反射スペクトルの波長成分割合の大きな変化が期待できる。

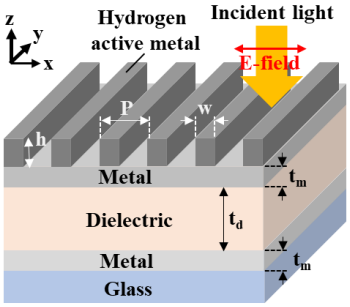


Fig. 1 Schematic of proposed hydrogen colorimetric sensor

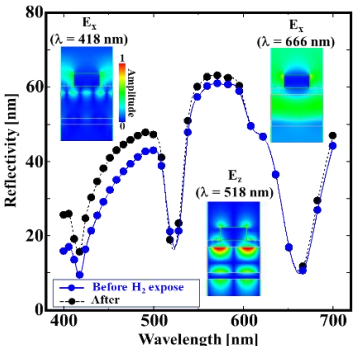


Fig. 2 Calculated reflection spectra before and after H_2 exposure

上記の指針に基づき、金属、誘電体膜として Ag、TiO_2 を用い、各層の膜厚は $t_m = 25$ nm、$t_d = 100$ nm とした。また、水素吸蔵金属として Pd を用い、格子周期 P = 200 nm、格子幅 w = 100 nm、格子高さ h = 50 nm とした。Figure 2 に有限差分時間領域法を用いて計算した水素吸蔵前後の反射スペクトルを示す。なお、Ag、Pd の誘電関数は、Drude モデルを用いて計算し、SiO_2 は無分散であるとした[3-5]。また、水素吸蔵は水素濃度 4%での Pd 誘電率の変化を想定した[6]。構造の反射スペクトルには、波長λ = 418 nm、518 nm、および 666 nm において反射率ディップが現れている。各共鳴波長における電界分布を Fig. 2 中に示しており、λ = 666 nm および 418 nm では、それぞれ誘電体内および Pd 格子表面に電界が局在していることから、これらのディップは、MDM 構造の FP モードおよび Pd 格子表面の SPP モード由来のものであると思われる。また、λ = 518 nm では Ag/TiO_2 界面に強い電界の z 成分が発生しており、Ag/TiO_2 界面における SPP モードが励起されている。さらに、Pd の水素吸蔵後では、λ = 418 nm のディップ付近の反射率が大きく変化(約 6%)しており、他の報告に比べ大きな反射率変化が得られた[7]。一方、λ = 518 nm、666 nm 付近の反射率は水素吸蔵の前後であまり変化しておらず、これにより RGB 成分割合を大きく変化させることが期待できる。

以上のように複数の光共鳴を利用し、反射スペクトルの特定波長成分の割合を変化させることができることが分かった。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費(JP2417311)および公益信託小澤・吉川記念エレクトロニクス研究助成金の支援を受けた。**参考文献**：[1] P. Ngene *et al.*, Adv. Funct. Mater. **24**, 2374 (2014). [2] M. Zarei *et al.*, Crystals **13**, 363 (2023). [3] P. B. Johnson and R. W. Christy, Phys. Rev. B **6**, 4370 (1972). [4] P. B. Johnson and R. W. Christy, Phys. Rev. B **9**, 5056 (1974). [5] S. Sarkar *et al.*, ACS Appl. Mater. Interfaces **11**, 13752 (2019). [6] K. Lin *et al.*, Opt. Express **16**, 18599 (2008). [7] S. Bagheri *et al.*, ACS Sens. **1**, 1148 (2016).

© 2025年 応用物理学会

金ナノ構造–WS_2 強結合系の電子状態評価

Electronic state characterization of strong coupling system based on Au nanostructures and WS_2

北大院総化 [1]，北大院理 [2]

○(M2)秋田壮吾 [1]，今枝佳祐 [2]，龍崎奏 [2]，上野貢生 [2]，

Grad. Sch. Chem. Sci. and Eng., Hokkaido Univ. [1], Dept. Chem., Fac. Sci., Hokkaido Univ. [2]

◦Sogo Akita[1], Keisuke Imaeda[2], Sou Ryuzaki[2], Kosei Ueno[2]

E-mail: ryuzaki@sci.hokudai.ac.jp

近年、ナノ構造や光キャビティにおける光学モードと物質の励起状態が強く結合することによって生じるポラリトンが注目を集めている。この強結合によって生じるポラリトンは、物質の光反応性や電荷輸送特性といった物性に変化をもたらすことが報告されており、新たな物性制御手法として期待されている [1]。しかしながら、ポラリトン形成に伴う物質の電子状態変化は未解明な点が多い [2]。具体的には、基底状態やフェルミ準位近傍の電子状態については直接的な報告は少なく、さらに電子状態密度（DOS）についても明らかになっていない [3]。これは、系の物質やスケール、さらに強結合の度合いによっても変化するため、その一般論については明確な結論に至っていない。また、計測技術の観点からも課題はあり、ポラリトン形成に伴う物質の電子状態変化を正しく計測するためには、系が環境に対して安定していることが必要であり、さらに Z 方向も含め高い空間分解能での計測が必要となる。そのため、安定した強結合系を形成すると同時に、ナノスケールにおける定量的な解析が求められている。

本研究では、安定性およびナノスケールの観点から、二次元材料である二硫化タングステン（WS_2）に着目し、「WS_2/Au ナノ構造」におけるプラズモン–励起子強結合系の電子状態評価を試みた。また、計測手法としてはナノ空間の電子状態計測の観点から、ケルビンプローブフォース顕微鏡（KPFM）などのプローブ顕微鏡を用いた。実験では、ガラス基板上に電子線リソグラフィおよびリフトオフ法によりプラズモン共鳴を示す Au ナノ構造を作製した。さらに、PDMS 転写法により多層 WS_2フレークを Au ナノ構造上に配置し、局在表面プラズモンと WS_2励起子による強結合系を構築した。結果の詳細については、当日の発表にて報告する。

参考文献

1. J. Garcia-Vidal, C. Ciuti, and T. W. Ebbesen, “Manipulating matter by strong coupling to vacuum fields,” *Science* **373**, eabd0336 (2021). https://doi.org/10.1126/science.abd0336
2. A. Thomas, L. Lethuillier-Karl, K. Nagarajan, *et al.*, “Tilting a ground-state reactivity landscape by vibrational strong coupling,” *Science* **363**, 615–619 (2019). https://doi.org/10.1126/science.aau7742
3. D. S. Wang, S. F. Yelin, and J. Flick, “Defect polaritons from first principles,” *ACS Nano* **15**, 15142–15152 (2021). https://doi.org/10.1021/acsnano.1c04090

© 2025年 応用物理学会

Cu_2Sb 金属間化合物ナノ粒子の局在表面プラズモン特性

Localized surface plasmon resonance properties of Cu_2Sb intermetallic nanoparticles

京大院理[1]，京大化研[2]
○（M2）福山 竜輝[1]，イ ヒョンジ[1]，竹熊 晴香[1,2]，佐藤 良太[2]，寺西 利治[1,2]
Graduate School of Science, Kyoto Univ.[1], ICR, Kyoto Univ.[2],
○Tatsuki Fukuyama[1], Hyunji Lee[1], Haruka Takekuma[1,2], Ryota Sato[2], Toshiharu Teranishi[1,2]
E-mail: tatsuki.fukuyama.78j@st.kyoto-u.ac.jp

局在表面プラズモン共鳴（LSPR）とは、ナノ粒子内の自由キャリアが入射光電場と共鳴して集団振動する光学現象であり、バイオセンサーや太陽電池などへ応用されている。可視領域における LSPR 研究は、等方性結晶構造である *fcc* 構造（Cu 型）の 11 族元素（Au、Ag、Cu）ナノ粒子を中心に行われてきた。一方、我々の研究室では、11 族金属を含まない等方性 *C*1（CaF_2 型）構造 $PtIn_2$ や $B8_1$ 型 PtSn 金属間化合物ナノ粒子が可視域に LSPR を示すことを報告した[1,2]。これらの Pt 基合金や従来材料の Au、Ag は高価であり、Cu は酸化されやすいという欠点を有している。我々は、Cu 基合金がこの欠点を解決できると考え、異方性結晶構造（*C*38 型）の Cu_2Sb ナノ粒子（図 a）に着目した。このような異方性結晶構造ナノ粒子の LSPR 特性は知られておらず、安価で酸化耐性の高い材料となることが期待される。

るつぼ内で Cu と Sb を融解させ、赤褐色の Cu とは全く異なる紫色の *C*38-Cu_2Sb バルク体を得た（図 b）。分光エリプソメトリを用いて誘電関数を測定し、有限差分時間領域（FDTD）法により空気中の粒径 50 nm のナノ粒子の電磁場解析を行うと、604 nm に LSPR 由来の吸収をもつことがわかった。

オレイルアミン溶媒中で Cu と Sb の前駆体を同時還元することで、目的の *C*38 構造の擬球状 Cu_2Sb ナノ粒子の合成に成功した（図 c）。SEM-EDX 測定によると、Cu : Sb = 65.7 : 34.3 （at%）であり、XRD 測定の結果と一致した。得られた粒径約 20 nm の Cu_2Sb ナノ粒子のトルエン分散液は、緑色（吸収極大波長：約 630 nm）を呈した（図 d）。この予想と異なる結果は *C*38-Cu_2Sb 構造の異方性に原因があると考えられる。

[1] H. Takekuma, R. Sato, T. Teranishi *et al*., *Adv. Sci.*, **2024**
[2] LEE HYUNJI など、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会（18p-A33-12）

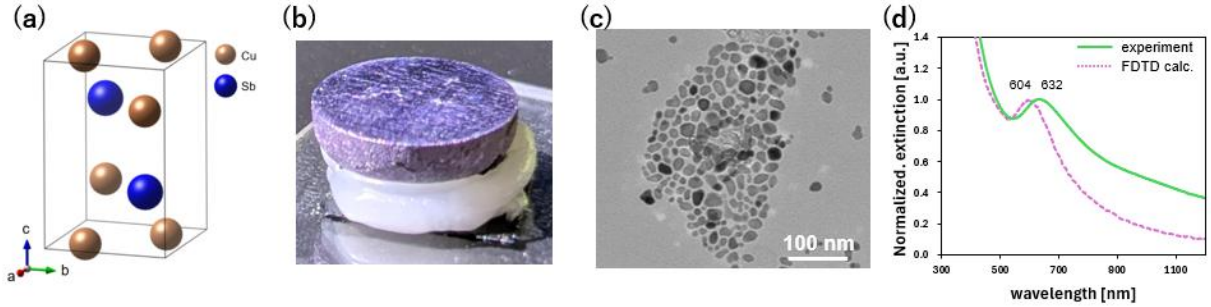


図 *C*38-Cu_2Sb の（a）結晶構造、（b）バルク体の写真および （c） Cu_2Sb ナノ粒子 （NPs）の TEM 像、（d） Cu_2Sb NPs の FDTD 法による電磁場計算結果と実測の消光スペクトル

© 2025年 応用物理学会

周期 Al ナノ構造を用いた表面増強ラマン散乱素子における誘電体カバー層検討

Study of dielectric cover layer for surface-enhanced Raman scattering device using periodic Al nanostructures

セイコーエプソン㈱，　○住山文香，渡辺果歩，伊藤嘉高，原田光明

Seiko Epson Corp., ○Fumika Sumiyama, Kaho Watanabe, Yoshitaka Itoh, Mitsuaki Harada

E-mail: Sumiyama.Fumika@exc.epson.co.jp

【研究背景】ラマン分光技術において課題となるラマン散乱信号の微弱性に対して、金属ナノ構造を用いた表面増強ラマン散乱(Surface-enhanced Raman Scattering : SERS)が利用されている。本研究では、周期 Al ナノ構造と誘電体カバー層からなる SERS 基板を作製し、回折により生じた光の伝搬モードと、金属ナノ構造による局在表面プラズモンとの相互作用により金属ナノ構造から離れた空気中に分布する増強場を生成し信号増強を行う。広く分布する増強場を利用することにより、表面増強ラマン分光の定量性、再現性、耐久性などの課題を克服した微量物質センシング技術を得ることを目的としている。先の報告で周期 Al 構造と Al_2O_3 カバー層からなる SERS 基板を作製し、ラマン分光実験で 10^2～10^3 の信号増強を確認した[1]。さらなる信号増強にむけて、誘電体カバー層の材料検討、表面凹凸・空隙対策を行った。

【実験・結果】図 1 に本研究で用いた SERS 基板の構成を示す。SERS 基板設計において、基板の安定性を考慮し金属ナノ構造の材料に Al を選択した。Al ナノ構造の局在表面プラズモンの共鳴中心波長は空気中で紫外域となるが、周囲に誘電体カバー層を成膜することにより長波長側へシフトさせることが可能となる。初期設計では、ラマン分光用に可視域において局在表面プラズモンが生じる屈折率(n=1.63)を持つ誘電体材料として Al_2O_3 を選択した。Si 基板上に EB パターニング、蒸着、リフトオフにより Al ナノ構造（直径 313nm、高さ 140nm）を作製し、カバー層を成膜した(厚さ 440nm)。図 2 に試作した SERS 基板の TEM 観察像を示す。ナノ構造上に誘電体成膜を行うため、Al 形状の影響を受け誘電体層の表面は最大 110nm 程度の凹凸およびナノ構造周辺に空隙の発生を確認した。この形状誤差を増強度低減の要因と考え、平坦化対策として誘電体材料を SiO_2 に変更しプロセス検討と試作を実施した。図 3 に試作断面図を示す。同等 Al ナノ構造高さ、誘電体膜厚に対して誘電体層の表面凹凸は 20nm 程度に抑えられさらに空隙のない構造を得ることができた。試作基板によるラマン実験を行った結果、増強信号は得られたが 10^2 オーダーであったことより、当日は誘電体層の構造と材料が信号増強に与える影響に関する考察を示す。

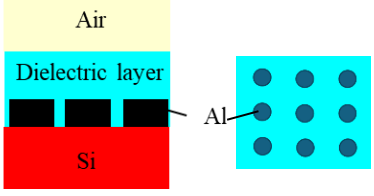


Fig1. SERS Substrate Configuration

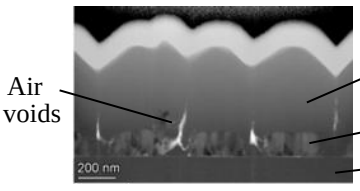


Fig2. Cross-sectional TEM (Al_2O_3)

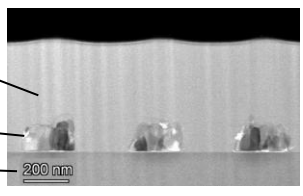


Fig3. Cross-sectional TEM(SiO_2)

【参考文献】[1] 2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会 16a-P07-3

© 2025年 応用物理学会

スパッタリング電流による金属ナノ構造の光学特性の調整

Tuning the optical properties of metallic nanostructures by sputtering current

宇大院[1]，宇大 CORE[2]，○(D1)ペレラ ドゥティカ[1,2]，藤村 隆史[1,2]

Utsunomiya Univ.[1], CORE[2]

○Duthika Perera[1,2], Ryushi Fujimura[1,2]

E-mail: dc257119@s.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

誘電体微小球に金属を部分被覆したセミシェル構造は、局在表面プラズモン共鳴（LSPR）を示す代表的ナノ構造として注目されており、金属膜の形成にはスパッタリング法が広く用いられてきた。従来は膜質の改善が主眼であったが[1]、本研究ではスパッタリング電流を制御因子と位置づけ、同一材料系から異なる光応答を持つ構造の創出を試みた（Fig. 1）。初期結果よりスパッタリング条件がセミシェル構造の光学特性に大きく影響することが示唆された。その要因を明らかにする目的で、まずは Ag 薄膜におけるスパッタリング電流の影響を基礎的に検討し、その結果を報告する。

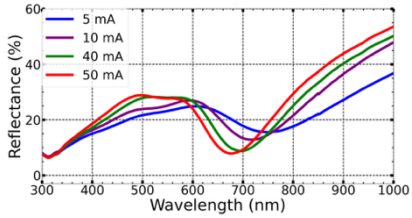


Fig. 1. Reflectance spectra of glass substrates with 20 nm-thick Ag semi-shell deposited at different sputtering currents.

2. 試料作製と実験方法

ガラス基板上において、スパッタリング電流（5、10、40、50、55、60 mA）を変化させて膜厚 30 nm の Ag 薄膜を成膜した。各試料に対し、反射・透過スペクトルの測定、アニール処理（150°C および 200°C）、およびクレッチマン配置による表面プラズモン共鳴の測定（5 mA および 50 mA 試料）を実施した。

3. 実験結果及び考察

150°C のアニール処理により、低電流（5, 10 mA）で成膜した試料はアイランド化したが、高電流試料では変化が見られなかった。200°C では高電流試料も同様に変化し、スパッタリング電流によって膜の熱安定性を制御できることが示された。クレッチマン配置による測定では、電流条件に応じて反射ディップや電場増強効果に差異が見られ、フィッティングから複素屈折率を導出した（Fig. 2）。以上より、スパッタリング電流は構造と光学応答の両面を制御可能な有効因子であることが示唆された。今後は他電流条件でもクレッチマン配置を用いた解析を進め、得られた知見を基に多様な光学応答を有するセミシェル構造の構築を目指す。

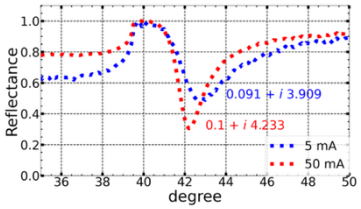


Fig. 2. Reflectance dips and fitted complex refractive indices under different sputtering currents measured by Kretschmann configuration.

参考文献

[1] S.Asgary *et al.*, *Appl. Phys.* A **127** (2021) 752.

© 2025年 応用物理学会

四重極子プラズモン共鳴に起因する光電流応答を示すプラズモニック光カソードの作製

Fabrication of Plasmonic Photocathode Showing Photocurrent Responses Derived from Quadrupolar Plasmon Resonance

富山大院理工[1]，富山大理[2] ○西 弘泰[1,2]，平野 孔基[1]，山本 望弥[2]

Graduate School of Science and Engineering, Univ. of Toyama,[1] School of Science, Univ. of Toyama[2]

E-mail: nishi@sci.u-toyama.ac.jp

【緒言】局在型表面プラズモン共鳴（LSPR）を示す金属ナノ粒子を n 型半導体と接触させ、LSPR 波長の光を照射すると、ナノ粒子中の電子が半導体の伝導帯に注入され、電荷分離が起こる[1]。TiO_2 電極に Au ナノ粒子を担持した光アノードに関する研究は、これまでに数多く報告されているが、Au ナノ粒子を担持した透明電極に TiO_2 を製膜した光カソード[2]に関する研究は少なく、電荷分離の効率も光アノードと比べて低いのが現状である。本研究では、Au ナノ粒子の代わりに Ag ナノ粒子を用いた光カソードで、四重極子 LSPR モードに起因する明瞭な光電流応答が観測され、高効率なプラズモニック光カソードを作製できる可能性が示唆されたため報告する。

【実験および結果と考察】$AgNO_3$ を含む電解液中で酸化インジウムスズ（ITO）電極上に Ag ナノ粒子を電解析出させた。N_2 バブリングによって溶存酸素を取り除いた電解液中で電解析出を行うことで、比較的球状に近く、380 nm 付近に明瞭な四重極子モードを示す Ag ナノ粒子が得られた（図 1a）。続いて、Ag ナノ粒子を電解析出させた電極上に、スプレーパイロリシス法によって TiO_2 を製膜したところ、550 nm 付近に四重極子モードに帰属される吸収ピークを示した（図 1b）。作製した電極を用いて Fe^{2+}と Fe^{3+}を含む電解液中で短絡光電流を測定したところ、カソード光電流が観測され、作用スペクトルに四重極モードに対応するピークが観測された（図 1b）。Au ナノ粒子を用いて同様に作製した光カソード[3]よりも外部量子収率（EQE）が高かったため、四重極子モードによって効率的な電荷分離が達成されている可能性がある。

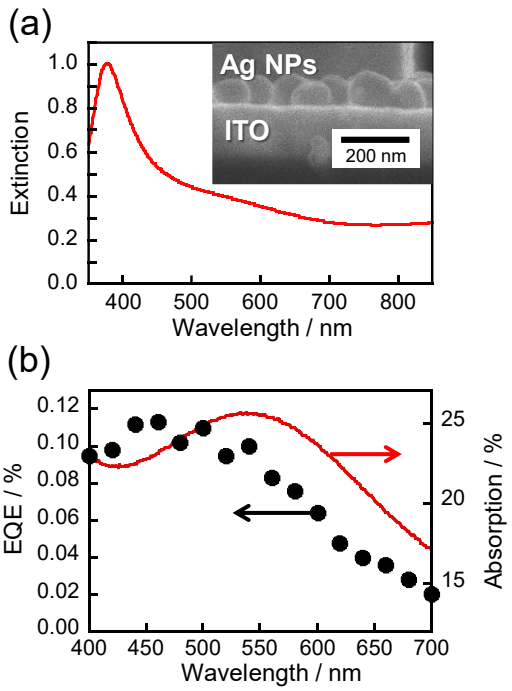


Figure 1. (a) Absorption spectrum and cross-sectional SEM image of Ag nanoparticles electrodeposited on an ITO electrode. (b) Absorption and short circuit photocurrent action spectra of the photocathode.

[1] T. Tatsuma, H. Nishi, and T. Ishida, *Chem. Sci.* **8**, 3325 (2017).

[2] N. Sakai, Y. Fujiwara, Y. Takahashi, and T. Tatsuma, *ChemPhysChem* **10**, 766 (2009).

[3] H. Nishi, K. Miyake, K.-C. Kao, and T. Tatsuma, *ChemNanoMat* **6**, 529 (2020).

© 2025年 応用物理学会

405 nm レーザー照射領域で成長する銀樹状構造

Silver Dendrites Grown in Irradiation Area with 405 nm Laser

岡山大院[1] ○(M1)河本 耕平[1], 武安 伸幸[1]

Okayama Univ.[1], ○Kohei Kawamoto[1], Nobuyuki Takeyasu[1]

E-mail: pecj61sr@s.okayama-u.ac.jp.

【緒言】 貴金属ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴(LSPR)は，現在，バイオセンサーや光熱治療など様々な分野で利用されている [1]. その LSPR 波長は，金属の種類だけでなく，ナノ構造の形状に依っても変わることが知られている．従来の球やロッド形状のナノ粒子とは異なり，様々なスケールを含む複雑な形状の銀フラクタル樹状構造は，可視～（少なくとも）近赤外という広帯域にわたって光学応答を示すことが報告されている [2-4]. 先の研究では，紫外線レーザーを照射することにより，銀樹状構造を成長させた．本研究では，その先端程度の銀ナノ粒子が～400 nm の光と強く相互作用することに着目し，シランカップリング剤で化学修飾したガラス基板に銀ナノ粒子を固定し，405 nm レーザーを照射しながら銀イオン溶液と還元剤溶液を混合することで，レーザー照射領域だけに銀樹状構造を広く成長させることを目指した.

【実験】 基板に付着させる銀ナノ粒子は，予め生成しておいた銀ナノシード溶液と硝酸銀水溶液と還元剤のクエン酸溶液を加え，オイルバス内で 1 時間かけてゆっくりと加熱することで，397 nm 付近に消光ピークを持つ銀ナノ粒子を生成した．この銀ナノ粒子をオゾン洗浄した ITO/ガラス基板にシランカップリング剤 APTMS((3-アミノプロピル)トリメトキシシラン)を使用して付着させた．アスコルビン酸溶液(20.0 mM)に本基板を浸し、405 nm レーザーを照射しながら硝酸銀溶液(12.5 mM)を滴下して銀樹状構造を成長させた（基板，溶液共に 0℃）．基板を洗浄・乾燥後，走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて調べた.

【結果と考察】図 1 に銀樹状構造の SEM 像を示す．高い出力(10-20 mW)のレーザーを用いると銀樹はレーザー痕から 0.5-1.5 ㎜ ほど離れた場所に生成され、低い出力(5 mW) の時はレーザー痕の内部に生成されていた．これは銀樹状構造の生成に適切な環境があり、高い出力では離れた場所で適切な環境が築かれていたと考えられる．今後，レーザーを用いてより精確に狙った位置に狙ったパターンで銀樹状構造を成長させることのできる技術を開発することにより，新奇光学材料・素子の作製へと発展させたいと考える.

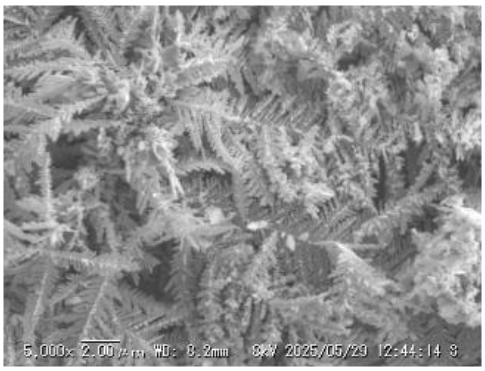


Fig. 1. SEM image of Silver dendritic structures grown under 405 nm irradiation.

【参考文献】

[1] C. Mirkin, et al., Nature **382**, 607 (1996). [2] N. Takeyasu, et al., APL Photon. **1**, 050801 (2016). [3] N. Taguchi, et al., Appl. Phys. Express **11**, 025201 (2018). [4] K. Nogami, et al., Appl. Phys. A **128**, 860 (2022).

© 2025年 応用物理学会

金ナノ粒子固定化基板の簡便な作製と粒子サイズ制御

Simple Fabrication of gold nanoparticle immobilized substrates and particle size control

上智大学，◦(M1)安雲 千南，内田 寛，横田 幸恵

Sophia Univ., ◦Chinami Akumo, Hiroshi Uchida, Yukie Yokota

E-mail: y_yokota@sophia.ac.jp

【はじめに】金ナノ粒子は局在表面プラズモン共鳴（LSPR）により強い電場増強を示し、表面増強ラマン散乱などの高感度分光分析基板に利用できる。特にサイズや形状の制御により、表面増強赤外分光として高感度 FT-IR 分析基板としての応用も注目される。しかし金ナノ粒子基板の従来の作製法は、微細加工や、化学合成でも粒子合成や固定化基板の表面処理など複数の工程が必要である。本研究ではそれらの工程と時間を削減し、ガラス基板上に金ナノ粒子を直接固定化する方法を検討した。さらに溶液量や濃度の調整により、固定化する金ナノ粒子のサイズ制御についても検討した。

【実験】金ナノ粒子の液相合成法として、従来の Seed-Mediated 法により Seed 溶液、Growth 溶液を調製した。本研究では異なる量の還元剤 $NaBH_4$ を含む Seed 溶液を調製した。まず Growth 溶液をカバーガラスに滴下し、次に Seed 溶液を滴下した。15 分反応させたのち、基板を超純水で洗浄して乾燥した。金ナノ粒子が固定化した基板は走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し、形状やサイズを観察した。

【結果と考察】還元剤として $NaBH_4$ を 150 μL, 300 μL 加えた Seed 溶液を用いた金ナノ粒子固定化基板の SEM 像と、SEM 像から計測した金ナノ粒子の粒径分布図を Fig. 1 にそれぞれ示す。$NaBH_4$ 量が 150 μL の時、粒子の形状は角があり、凹面立方体が多く観察された。粒径平均は 411 nm であった。$NaBH_4$ 量が 300 μL の時、粒子の形状は凹面立方体が多く観察され、平径平均は 175 nm であった。還元剤量の増加によって金イオンの還元反応がより迅速に進み、多数の核が形成された。その結果、固定化された粒子サイズは小さくなったと考えられる。また本作製手法により、表面修飾剤を用いずに金ナノ粒子がガラス基板上で直接固定化されたことを確認した。さらに還元剤 $NaBH_4$ 量を調節することで粒子のサイズや形状を制御できた。また前駆体や、還元剤の濃度が金ナノ粒子の合成と固定化に与える影響を調べる実験も行った。作製した基板について、プラズモン共鳴によるラマンシグナルの増強効果についても発表する。

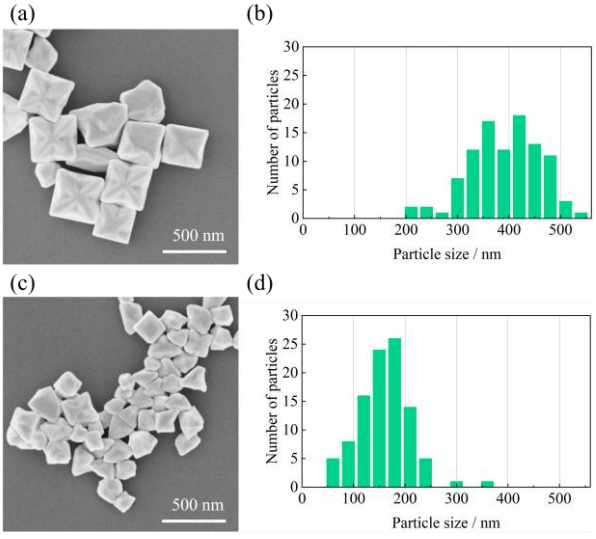


Fig. 1 SEM images and particle size distribution diagrams of gold nanoparticles immobilized on glass substrates. The volume of $NaBH_4$ was (a) and (b) 150 μL, and (c) and (d) 300 μL, respectively.

© 2025年 応用物理学会

ガルバニック交換反応による貴金属ハイブリッドナノ構造の作製とその光学特性評価

Optical Properties of Noble Metal Hybrid Nanostructures Fabricated by Galvanic Replacement Reaction

早大先進理工 [1] ○(M2)佐々木寛和 [1]，井村考平 [1]

Waseda Univ. [1], ○Hirokazu Sasaki[1], Kohei Imura[1]

E-mail: hihirorokakazuzu@toki.waseda.jp

貴金属ナノ構造に光を照射するとプラズモンが励起され，ナノ構造近傍に光増強場を形成する。この増強場は，高感度センシングや光触媒への応用が期待されている。特に，金属ハイブリッドナノ構造は，単体の金属ナノ構造に比べて特異な光学応答を示すことが期待される。ガルバニック交換反応（GRR）は，イオン化傾向の差にしたがい異種金属間で起こる酸化還元反応である。通常，GRR は金属表面において位置によらずランダムに進行するが，光照射下の金属ナノ構造上ではプラズンモン増強場の空間特性を反映し，位置選択的に反応を起こすことが期待される。本研究では, GRR を用いて金と銀のハイブリッドナノ構造を作製しその光学特性評価を目的とした。

本研究では, Ag ナノプレートをシード成長法により水溶液中に調製し反応前駆体とした。次に，Ag ナノプレート水溶液に塩化金酸水溶液を加え，波長 790 nm のレーザー光を照射しハイブリッド体を作製した。試料の形状は，走査型電子顕微鏡（SEM）と原子間力顕微鏡（AFM）により，また，その光学特性は暗視野散乱測定と非線形分光測定により評価した。さらに，エネルギー分散型 X 線分析（EDX）により元素の空間分布を評価した。

図 1（a, b）に，GRR 後の Ag ナノプレートの EDX 元素マッピング像を示す。金が Ag ナノプレート全体に分布し，ハイブリッド化していること，また位置選択的な GRR が達成されていないことがわかる。図 1（c）に，GRR 前後の Ag ナノプレートの非線形発光スペクトルを示す。励起光源に波長 800 nm のフェムト秒パルスレーザーを用いた。波長 400 nm 付近に第二次高調波が，430 nm より長波長側に多光子発光が観測される。GRR 前後の試料において観測される発光強度（波長 450~780 nm）を比較すると，GRR 後に約 4.6 倍の発光の増強が観測された。これは，反応後に生じたエッジやギャップにおいて，光電場が増強され，発光強度が増強したためと考えられる。

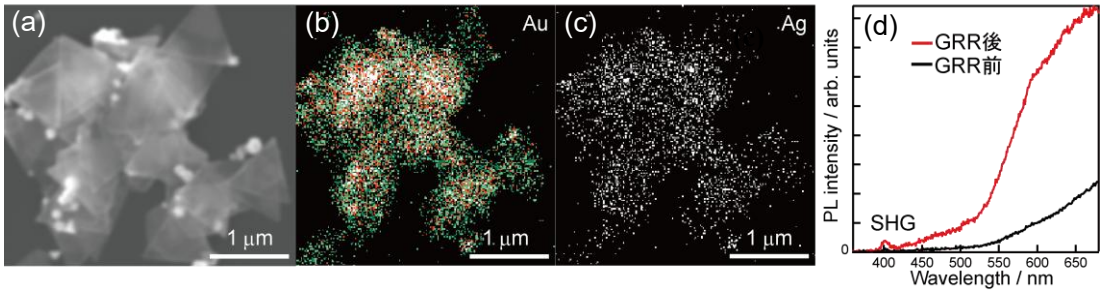


図 1. 作製したハイブリット Ag ナノプレートの SEM 像（a）と EDX マッピング像（(b) Au,（c) Ag)。(d) GRR 前後の銀ナノプレート二光子発光スペクトル（黒線：GRR 前，赤線：GRR 後)。

© 2025年 応用物理学会

NHoM 構造を用いたプラズモニックカラーセンサーの安定性と感度の改善

Improved stability and sensitivity of plasmonic color sensor using NHoM structure

阪公大工 [1], 阪公大研究推進 [2] ○(M1)豊田 幾仁 [1], (M2)山﨑 滉太 [1], (B)福冨 駿 [1],
松山 哲也 [1], 村井 俊介 [1], 和田 健司 [2], 岡本 晃一 [1]

Osaka Metro. Univ. [1], OMU-ESCARI [2], ○Ikuto Toyota[1], Kota Yamasaki[1], Shun Fukutomi[1],
Tetsuya Matsuyama[1], Shunsuke Murai[1], Kenji Wada[2], Koichi Okamoto[1]

E-mail: sr25675s@st.omu.ac.jp

1. はじめに

局在型表面プラズモン共鳴は、金属ナノ粒子の大きさや形状によって共鳴ピーク波長を制御できる。我々のグループはスペーサー層を介して、鏡面基板上に形成した Ag のランダムナノ半球(NHoM)構造を作製し、プラズモニックカラーの制御に利用できることを示した[1]。さらに NHoM 構造近傍の屈折率の変化によって共鳴ピーク波長がシフトし、視認できる色が変わることを利用し、カラーセンサーへの応用可能性を示した[2]。本研究では NHoM 構造をカラーセンサーとして応用する際の課題である構造の安定性とセンサー感度の向上に向けた取り組みについて報告する。

2. 実験方法

NHoM 構造は以下の方法で作製した。ガラス基板上に Ag を高真空抵抗加熱蒸着で 100 nm 成膜し、Al_2O_3 をスペーサー層として原子層堆積装置(ALD)で 15 nm 成膜した。その上に Ag を 7 nm 蒸着し、電気炉で窒素雰囲気下 300 ℃で 10 分間加熱した。さらに、保護膜として ALD で Al_2O_3 を数 nm 堆積した試料も作製し、水滴による屈折率変化に対する光学応答を調べた。滴下には主に純水を用いた。水の滴下直後の試料は顕微鏡下のハイパースペクトルカメラで、乾燥後は分光光度計で、それぞれの消光スペクトルを測定した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に NHoM 構造の(a)水の滴下直後と(b)乾燥後における消光スペクトルを示した。水の滴下によって共鳴ピーク波長は長波長シフトした。特に水道水を滴下した場合、乾燥後に構造が変形した。

Fig. 2 に構造変形防止のために Al_2O_3 保護膜を導入した結果を示した。保護膜の膜厚と共鳴ピーク波長との関係を(a)に、水の滴下による各試料の消光スペクトル変化を(b)に示した。保護膜の存在により、微粒子構造の安定性は向上するが、膜厚の増加に伴ってセンサー感度が低下することがわかった。詳細なメカニズムについては、当日に電磁場解析の結果と共に議論する。

[1] K. Okamoto, et al. *Nanophotonics* **9**, 3409 (2020)
[2] S. Maeda, et al. *Nanomaterials* **13**, 1650 (2023)

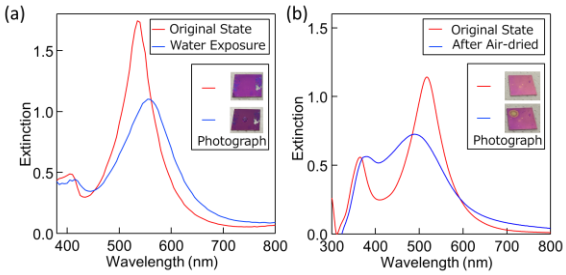


Fig. 1 Extinction spectra of the NHoM structure (a) immediately after exposure to water and (b) after drying, with corresponding photographs for each condition shown. Note that different measuring instruments were used for (a) and (b).

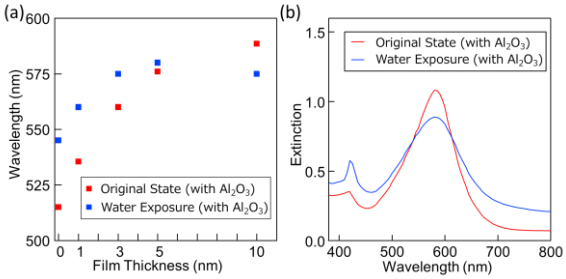


Fig. 2 Effect of an Al_2O_3 protective layer on the NHoM structure, before and after exposure to water. (a) Resonance peak wavelength as a function of layer thickness. (b) Extinction spectra of the 5 nm Al_2O_3-covered sample.

© 2025年 応用物理学会

Nano-Hemisphere on Mirror (NHoM) 構造を用いた波長選択性回折格子

Wavelength-selective diffraction gratings with Nano-Hemisphere on Mirror (NHoM) structures

阪公大院工[1], 阪公大研究推進[2]

○岩橋美花[1], 川田博昭[1], 松山哲也[1], 村井俊介[1], 和田健司[2], 岡本晃一[1]

Osaka Metro. Univ.[1], OMU-ESCARI[2]

○Mika Iwahashi[1], Hiroaki Kawata[1], Tetsuya Matsuyama[1], Shunsuke Murai[1], Kenji Wada[2], Koichi Okamoto[1]

E-mail: sp24844k@st.omu.ac.jp

1. はじめに

我々は銀ナノ半球をグレーティング状に配置した銀ナノ半球回折格子(Ag Nano-Hemisphere Diffraction Grating : Ag NHDG)を作製し, 局在型表面プラズモン共鳴によって回折格子に波長選択性を持たせることに成功した[1]. これを用いれば, 我々が開発したマスク転写型の非線形レーザー分光測定[2]に更なる高感度・高分解能をもたらすことが期待される. 今回はさらに強い光閉じ込め特性を持つ Nano-Hemisphere on Mirror (NHoM) 構造[3]を用いて, 高い波長選択性を保ちつつ, 回折効率を向上することができたので報告する.

2. 実験

高真空抵抗加熱蒸着によりガラス基板に銀を蒸着し, Al_2O_3 スペーサー層を原子層堆積装置で成膜した. その上にナノインプリント, リフトオフを用いて銀グレーティング構造を作製した. その後窒素雰囲気下において 300℃で加熱することで NHoM 構造がグレーティング状に配置した回折格子(Ag Nano-Hemisphere on Mirror Diffraction Grating : Ag NHoM DG)を作製した. 作製した回折格子の回折効率を計測した.

3. 結果

Fig. 1 は Ag NHoM DG の SEM 画像である. ランダム銀ナノ半球構造がグレーティング状に並んでいる. Ag NHoM DG と Ag NHDG の 1 次回折光の回折効率の測定結果を Fig. 2 に示す. Ag NHoM DG と Ag NHDG はそれぞれ 550 nm, 450 nm 付近で回折効率のピークが現れた. これは局在型表面プラズモン共鳴により特定の波長域の光を吸収し, 波長選択性回折格子として働くためであると考えられる. 最大回折効率において, Ag NHoM DG は Ag NHDG と比較して約 6 倍の増加を示した. 当日は Ag NHoM DG の光学特性についてさらに詳しく議論する.

[1] T. Kubota, S. Tokimori, K. Funato, H. Kawata, T. Matsuyama, K. Wada, K. Okamoto, *Nanomaterials*, **14**, 1605 (2024).
[2] K. Okamoto, Z. Zhang, A. Scherer, D. T. Wei, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 4842 (2004).
[3] K. Okamoto, K. Okura, P. Wang, S. Ryuzaki, K. Tamada, *Nanophotonics*, **9**, 3409 (2020).

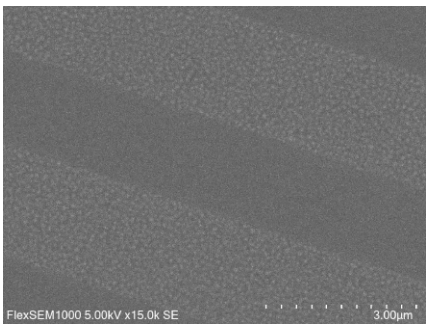


Fig. 1 SEM image of Ag NHoM DG.

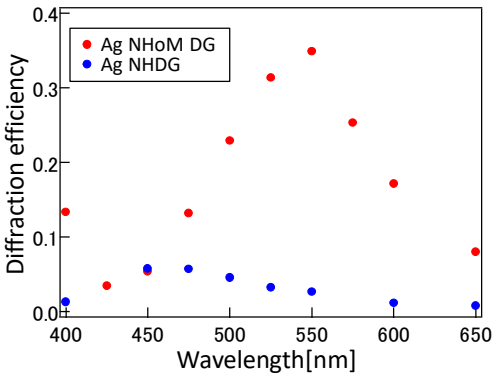


Fig. 2 Diffraction efficiency of Ag NHoM DG and Ag NHDG.

© 2025年 応用物理学会

高速 Fourier 変換および短時間 Fourier 変換に基づく Ag ランダムナノグレイン構造の空間周波数解析と量子ドット発光増強予測

Spatial Frequency Analysis of Ag Random Nanograin Structures and Prediction of Quantum Dot Emission Enhancement based on FFT and STFT

○岡田淳之[1]，丹羽智彦[1]，平内陽喜[1]，松山哲也[1]，村井俊介[1]，和田健司[2]，内藤裕義[1,3]，岡本晃一[1]

○A Okada[1], T. Niwa[1], H. Hirauchi[1], T. Matsuyama[1], S. Murai[1], K. Wada[2], H. Naito[1,3], K. Okamoto[1]

1. 阪公大，2. 阪公大 研究推進，3. 立命館大学

1. Osaka Metro. Univ., 2. OMU-ESCARI, 3. Ritsumeikan Univ.

E-mail: sw25945m@st.omu.ac.jp

1. はじめに 量子ドット（QD）は優れた色純度と発光波長の調整可能性、溶液プロセスが可能な点から、次世代大面積光デバイスへの応用が期待されている。デバイス実用化に向けた向上のアプローチとして金属ナノ構造上の表面プラズモン共鳴（SPR）による発光増強がある。SPR を誘起させるために、周期的ナノ構造の作製が可能である一方で高コストな EB/フォトリソグラフィではなく、我々はガラス基板上の銀薄膜を加熱処理して形成される「ランダムナノグレイン構造」を利用してきた[1]。この構造の評価においては、原子間力顕微鏡（AFM）像から算出される「平均グレインサイズ」が主要な指標として用いられてきた[2]。しかし、このような平均グレインサイズという単一の平均値では、構造に含まれる多様な空間周波数成分を十分に評価できないという課題があった。そこで本研究では、高速 Fourier 変換（FFT）による大域的な特徴量と、短時間 Fourier 変換（STFT）による局所的な特徴量からランダムナノグレイン構造の PL 増強比を予測する手法を提案する。

2. 試料作製、および、評価 Glass / Ag (100 nm) / Al_2O_3 (10 nm) / QD なる構造の素子を作製した。使用した QD は発光波長が 630 nm の CdSe/ZnS QD である。Ag 層は抵抗加熱蒸着後に加熱処理（150–300 °C）を行い、Al_2O_3層は原子層堆積法（ALD）、QD 層はスピンコート法を用いた。比較のため、ガラス基板上に直接 QD 層のみを成膜した試料を参照試料とした。各試料の光学特性を評価するため、フォトルミネッセンス（PL）測定を行った。水銀ランプ（励起波長：390–410 nm）を励起光源として用い、各試料の PL スペクトルを測定し、参照試料（Glass / QD）との比較により PL 増強比を算出した。

3. 解析 AFM で測定した Ag ランダムナノグレイン構造の表面形状画像（Fig. 1 (upper)）を用いて空間周波数領域解析を行った。QD の発光波長（630 nm）に対して、伝搬型 SPR により光取り出しが期待されるグレインサイズは約 214–669 nm であり[1, 2]、この領域を「PL 増強有効領域」と定義した。FFT により画像全体のパワースペクトルを算出し、PL 増強有効領域内の積分強度を Fig. 1 (middle)のように求めた。STFT を用いて構造の局所特徴（Fig. 1 (bottom)）を評価した。STFT では局所ウィンドウ内でパワースペクトルを計算し、PL 増強有効領域の積分強度をマッピングした。一定の閾値（積分強度の最大値の 50%）を超える領域の面積率（有効エリア率）を算出した。FFT による積分強度と STFT による有効エリア率の積（有効積分強度）を算出し、実測 PL 増強比との相関を評価した。有効積分強度と実験的に得られた PL 増強比は、Fig. 2 に示すように、良い相関を示した。

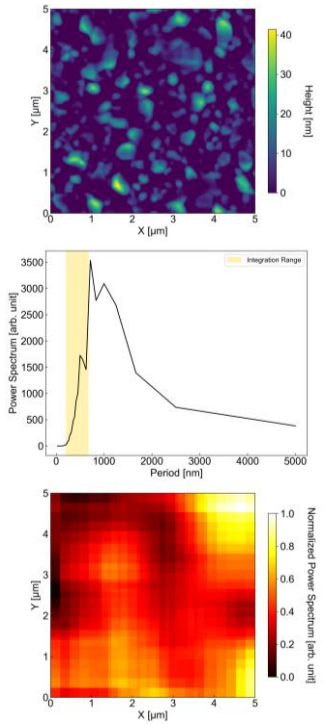


Fig. 1 (upper) AFM height map of Ag random nanograins annealed at 250 °C in N_2. (middle) power spectrum computed from the height map in the upper panel, with the 214–669 nm enhancement band shaded. (bottom) STFT-based spatial map of normalized power spectrum within the enhancement band, based on the same AFM data.

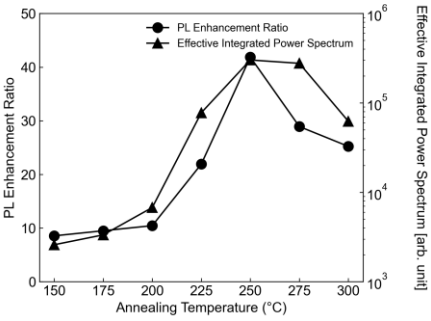


Fig. 2 PL enhancement ratio (●) and effective integrated FFT power within the 214–669 nm band (▲) plotted against Ag annealing temperature (150–300 °C).

参考文献 [1] 丹羽 智彦他，第 72 回応用物理学会春季学術講演会 14p-K506-2 (2025). [2] X. Xu et al., *Opt. Express* **21**, 3145-3151 (2013).

謝辞 本研究の一部は、科学研究費助成金（24H00433, 24K00931, 25K01501）の助成を受けたものであり、関係者各位に深く感謝をいたします。

© 2025年 応用物理学会

シリコンメタサーフェスのトロイダル双極子共鳴による発光指向性制御

Tailoring Emission Directionality with Toroidal Dipole Resonance in Silicon Metasurfaces

神戸大院工　○伊藤洋祐，Mojtaba Karimi Habil，杉本泰，藤井稔

Kobe Univ., Yosuke Ito, Mojtaba Karimi Habil, Hiroshi Sugimoto, Minoru Fujii

E-mail: sugimoto@eedept.kobe-u.ac.jp

ナノアンテナの２次元配列構造であるメタサーフェスは、メタレンズや偏光素子等への応用が期待されている。近年ではこれらの波面制御の機能に加え、アクティブメタサーフェスを用いた発光制御が注目されている。量子ドットや蛍光体のような発光体は、ナノアンテナ近傍に配置することで、励起増強やパーセル効果による発光増強、発光の指向性等を制御することが可能である。我々のグループでは、薄いシリコンナノディスクを六方格子配列させることで、可視域から近赤外域にかけて狭帯域なトロイダル双極子共鳴を示すことを見出している。本研究では、このシリコンメタサーフェスに誘起されるトロイダル双極子共鳴を用い、蛍光色素の発光指向性制御を実証する。

図 1a の SEM 像に示すシリコンナノディスクアレイメタサーフェスをコロイダルリソグラフィ法により作製した。ナノディスクの直径は 450 nm、高さは 21 nm、周期は 500 nm である。図 1b に作製したメタサーフェスの透過率スペクトルを示す。波長 680 nm 付近でトロイダル双極子共鳴に由来する急峻なディップが見られる。次に、メタサーフェス構造表面に蛍光色素をドロップコートし、発光の指向性を調査した。対物レンズの後方焦点面には、発光の角度分布が投影される。図 2 に、作製した Si メタサーフェスのトロイダル双極子モードの共鳴波長付近における、蛍光色素の発光の後方焦点面イメージング結果を示す。シリカ基板上に配置した蛍光色素の発光の輻射パターン(図 2a)は等方的であるのに対して、メタサーフェス上の場合(図 2b)では、6 回対称のコーンと面外方向への指向性(kx,y/k0~0)が確認できる。コーンの対称性は、メタサーフェスの対称性と一致しており、回折モードによるものである。一方で、面外方向への指向性は面内で結合したトロイダル双極子モードによるものであると考えられる。発表では、シミュレーションによる解析と併せて、シリコンタサーフェスの共鳴が発光指向性に与える影響について議論する。

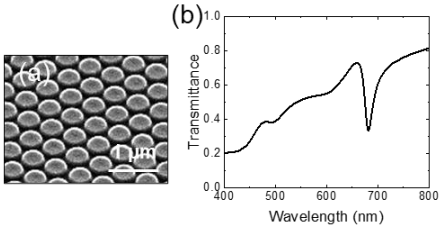


Figure 1. (a) SEM image of Si metasurface.
(b) Transmittance spectra of fabricated metasurface.

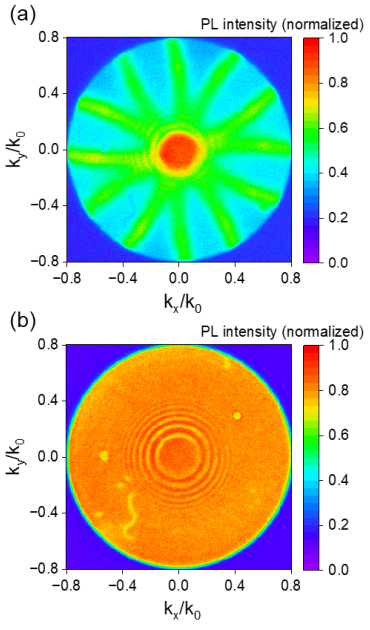


Figure 2. Measured Back focal plane images of the emission of fluorescent molecules (a) on the silica substrate (b) on the Si metasurface.

© 2025年 応用物理学会

Hexagonal Array of Silicon-Germanium Alloy Nanodisks for Narrow-band Near Infrared Absorption Enhancement

Kobe Univ. [1], ○(M2) Nguyen Quoc Chien [1], Keisuke Moriasa[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1].
E-mail: fujii@eedept.kobe-u.ac.jp

Expanding the detection wavelength range of Si-based photodetectors over 1400 nm is very important to effectively use near-infrared (NIR) light in the eye-safe wavelength range in various applications utilizing free-space light. We have shown that toroidal dipole resonances supported by hexagonal array of polycrystalline Si nanodisks (Figure 1(a)) strongly enhance the defect-related sub-bandgap light absorption and the photocurrent caused by the absorption [1]. Therefore, the metasurface may be used for Si-based photodetectors operating in the eye-safe wavelength range. Figure 1(b) show the calculated absorptance as a function of the extinction coefficient (κ) of polycrystalline Si for different resonance modes [1]. The absorptance depends strongly on the extinction coefficient and has the maximum at a specific value. Therefore, tuning the material parameters as well as the structural parameters are indispensable to maximize the absorption enhancement.

In this work, in order to control the extinction coefficient in a wide range, we replaced polycrystalline Si to polycrystalline $Si_{1-x}Ge_x$ alloy. In $Si_{1-x}Ge_x$ alloy, if the Ge content is increased from 0 to 37.5%, the extinction coefficient changes three orders of magnitude at 1500 nm, while the refractive index changes only slightly (approximately 1.12 times increase). Therefore, we can control the extinction coefficient of the metasurface in a wide range without strongly affecting the refractive index by controlling the composition. Figure 1(c) shows calculated absorptance spectra for the structure in Figure 1(a) produced from $Si_{1-x}Ge_x$ alloy with different Ge contents. The diameter (D) and height (h) of Si nanodisks are 700 nm and 40 nm, respectively, and the pitch (P) is 750 nm. The absorption peak is assigned to the toroidal resonance. We can see that the peak absorptance is modified by the composition, and there is an optimum composition that maximize the absorptance. Figure 1(d) shows the measured absorptance spectra. Although the peaks are broader and satellites appear, the composition dependence of the peak absorptance is similar to that of the simulation.

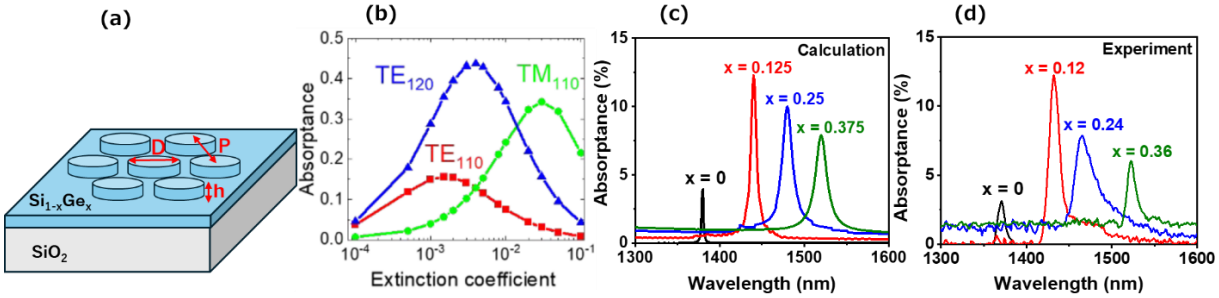


Figure 1 (a) Schematic illustration of Si or $Si_{1-x}Ge_x$ alloy nanodisks on silica structure. (b) Calculated peak absorptance of Si nanodisk array as a function of extinction coefficient for different resonance modes [1]. (c) Calculated absorptance spectra of $Si_{1-x}Ge_x$ alloy nanodisk array with different composition, x. (d) Measured absorptance spectra of $Si_{1-x}Ge_x$ nanodisk array with different composition, x.

[1] Hiroaki Hasebe, Keisuke Moriasa, Kaito Yamashita, Hiroshi Sugimoto, and Minoru Fujii, *ACS Photonics* 2022 ***9***, 3302

© 2025年 応用物理学会

ブラッグミラー上に形成したシリコンナノディスクアレーの Fabry-Pérot BIC による狭帯域近赤外吸収

Narrow-Band Near Infrared Absorption via Fabry-Pérot BICs in Silicon Nanodisk Array Fabricated on Bragg Reflector

神戸大院工 [1]，○(B)松浦 宇輝 [1]，森朝 啓介 [1]，杉本 泰 [1]，藤井 稔 [1]

Kobe Univ.[1], ○Takaaki Matsuura[1], Keisuke Moriasa[1], Hiroshi Sugimoto[1], Minoru Fujii[1]

E-mail: fujii@eedept.kobe-u.ac.jp

アイセーフ波長領域(波長 1.4 μm ~)の近赤外光は、空間光を使った様々なアプリケーションで利用されている。一方、この波長帯で動作する半導体受光素子は高価であるため、シリコン受光素子の感度帯をアイセーフ波長領域まで拡張する研究が行われている。我々のグループは多結晶シリコンの欠陥準位を介した微弱なサブバンドギャップ光吸収を光学共鳴により増強することによりアイセーフ波長領域で機能するシリコン受光素子を実現することを目的に研究を行っている。これまでに、シリコンナノディスクの六方格子アレイ構造のトロイダル双極子共鳴により狭帯域の光電流増強が可能であることを報告した[1]。さらに、ナノディスク下部に金属ミラーを設けることによりトロイダル双極子とその鏡像双極子の干渉による Fabry-Pérot Bound State in the Continuum(FP-BIC)を発現させると，臨界結合条件においてさらなる光吸収増強が可能であることを示した[2]。

今回は、金属ミラーをシリコン/シリカブラッグミラーに置き換え、全誘電体構造で FP-BIC による狭帯域近赤外光吸収増強を実現することを目的に研究を行った。図 1(a)に作製した構造の概略を示す。図 1(b)にスペーサ膜厚(*S*)を変化させた場合の吸収スペクトルの測定結果を、図 1(c)に *S* = 496 nm の場合の吸収スペクトルを示す。*S* = 496 nm において吸収率が 70 %に達する高い吸収増強が得られている。シミュレーションとの比較によりこの吸収増強が FP-BIC に関わる臨界結合条件で発生し、入射光の大部分がシリコンナノディスク領域で吸収されていることを確認した。このことは、この構造により高い光電流増強が期待できることを示している。

[1] Hasebe, H., et al., Advanced Optical Materials, vol. 8, Issue. 22, 2001148,2020.

[2] Moriasa, K., et al., ACS Photonics, Vol. 12, Issue. 3, 1658–1665,2025.

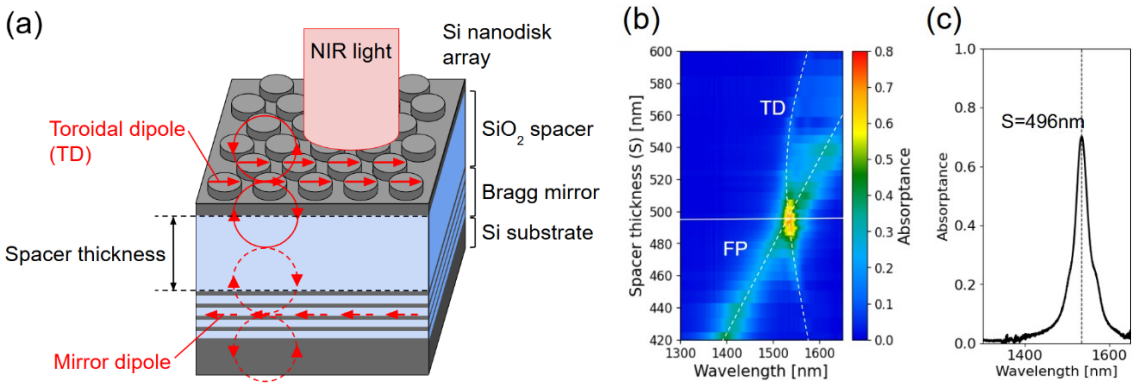


Fig 1. (a) Schematic of Si nanodisk array on Si/SiO_2 Bragg mirror structure. (b) Contour plot of measured absorption spectra. The spacer thickness (*S*) is changed from 420 to 600 nm. White dashed curves indicate resonant wavelengths of the toroidal dipole (TD) and Fabry-Pérot (FP) modes. (c) Absorptance spectrum at *S* = 496nm.

© 2025年 応用物理学会

ソーラーウィンドウのための横方向散乱を示すセミシェル構造の設計

Design of Semishell structure Exhibiting Transverse Scattering for solar window

宇大院[1]，宇大 CORE[2]　○(M1)小林 優希[1]，藤村 隆史[1,2]

Utsunomiya Univ.[1], CORE[2]

○(M1)Yuki Kobayashi[1], Ryushi Fujimura[1,2]

E-mail: mc256529@s.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

本研究の目的は集光ミラーやレンズを使用しない太陽光デバイスの開発であり散乱型ソーラーウィンドウに可能性を見出した。散乱体は誘電体ナノ微小球(コア)に金属薄膜(シェル)を被せたセミシェル構造を用いた(図 1)。

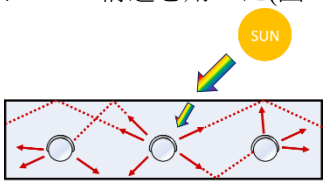


図 1　散乱型ソーラーウィンドウ

横方向に指向性を持つセミシェル構造を設計し導光の効率化を図った。横方向への指向性を実現するために、セミシェル構造に励起される双極子と四極子の大きさと位相差を制御し、前方後方散乱が 0 になる Transverse Kerker 効果[1]を狙うことが求められる(図 2)。

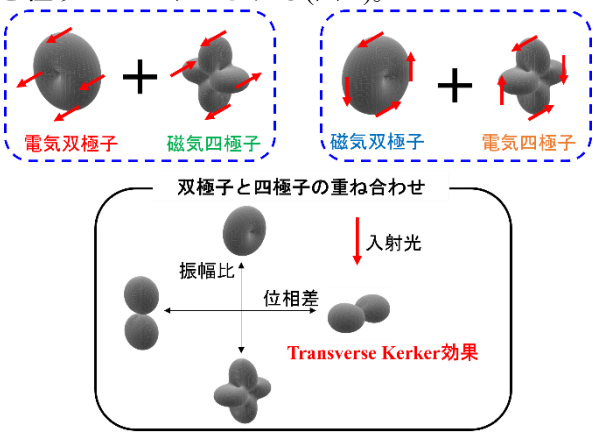


図 2　青枠内の双極子と四極子の重ね合わせ

2. 方法

有限要素法(Comsol Multiphysics)を用いて数値計算を行った。セミシェル構造では主に局在型プラズモン共鳴が生じるため、高次の電気多極子と低次の磁気多極子が励起される[2]。今回は、波長とセミシェル構造のサイズは同程度であるため、電気双極子(ED)、磁気双極子(MD)、電気四極子(EQ)が主に励起された。

散乱方向を制御するうえで、コア屈折率は非常に重要な要素である。コア屈折率を変化させることで、MD と EQ の振幅比や位相差の変化をほぼ一定に保ちつつ、ED のディップの位置を相対的にシフトできることが分かった。これによって、MD と EQ が Transverse Kerker 条件に近い波長帯に ED のディップの波長帯を合わせることで、横方向への強い指向性を持たせることができる。

ソーラーウィンドウに用いるセミシェル構造には、横方向への指向性と大きな散乱と低い吸収である。これらを評価する指標αを以下のように定義した。

$$\alpha = \gamma \times Q_{sca} \times \left(1 - \frac{Q_{sca}}{Q_{sca} + Q_{abs}}\right)$$

ただし、γは横方向散乱(入射光に対して 90 度の方向)の平均値を前方後方散乱の平均値で割った比、Q_{sca}は散乱効率、Q_{abs}は吸収効率である。この値が大きくなるようにセミシェル構造のコア屈折率を含む各パラメータを最適化した。

3. 結果

図 3 より、x 軸方向に散乱指向性があり、MD と EQ が Transverse Kekrer 条件に近く、かつ MD や EQ に比べて ED が小さいことがわかる。散乱効率は 1.33 となり、吸収効率は 0.23 となった。図 4 にパラメータを示す。コア屈折率 1.6 はポリスチレンの屈折率(1.59)に近く、実現可能性がある。

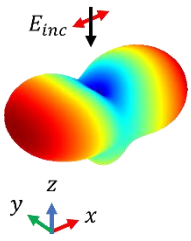


図 3　散乱パターン

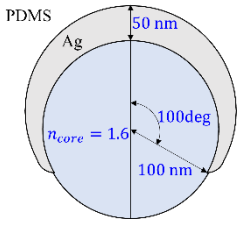


図 4　パラメータ

参考文献

[1]Bukharin et al., Sci. Rep. 12, 7997 (2022).

[2]Panmai et al., Opt. Express 26(10), 12344 (2018).

© 2025年 応用物理学会

磁気トロイダルメタ表面による偏波無依存な非相反透過

Polarization-independent nonreciprocal transmission by a magneto-toroidal metasurface

京都工繊大 ○(M1)春名 駿哉，黒澤 裕之，上田 哲也

Kyoto Institute of Technology, ○Shunya Haruna, Hiroyuki Kurosawa, and Tetsuya Ueda

E-mail: m25621021@edu.kit.ac.jp

時間および空間反転対称性の破れにより，多彩な物理現象が発現し，デバイスの高機能化も可能となる．例えば，強誘電性と強磁性が共存するマルチフェロイック物質においては，(光学的)電気磁気 (magnetoelectric: ME) 効果により無偏光に対する方向複屈折(2 色性)が存在し，光の入射方向に依存して屈折率が変化する．このような効果は極めて小さいと考えられてきたが，メタマテリアルなどの人工構造を用いることで，実用的な環境下で巨大な効果が発現可能である．ME 効果に必要となる時間反転対称性の破れは，ファラデー効果[1]や能動素子の利用[2]で実現できるが，偏波依存性や構造の複雑化などの課題もある．そこで，単純な系で ME 効果をメタ表面に導入し，実用的な環境下で巨大な非相反性の発現を試みる．本研究では，ME 効果を有するメタ表面によるマイクロ波の透過率差が約 0.6 となる事を数値的に示したので，それについて報告する．

図 1 に，メタ表面の単位セルの模式図を示す．金属板に穿かれた円形の空気孔中に自発磁化したフェライト・ディスク(Ferrite Disk: FD)が誘電体で固定されており，FD の磁化方向はトロイダル状になっている．+および-z軸方向に沿って平面波を入射したときの透過率(T_{z+}およびT_{z-})を数値計算によって求めた．

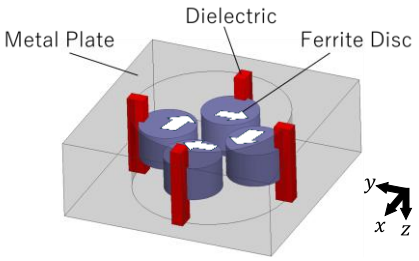


図 1:メタ表面の単位セル．磁化方向を矢印で示している．

図 2 に透過率の計算結果を示す．赤破線および青実線がそれぞれT_{z+}およびT_{z-}である．周波数 13 GHz から 14.5 GHz においてブロードな共鳴は空気孔の固有モードに起因している．一方で周波数 13.9 GHz 近傍においてT_{z-}のみにシャープな共鳴が強く発現しており，FD の Mie 共鳴に起因している．この周波数において，透過率の差分 $\Delta T = T_{z+} - T_{z-}$が約 0.6 となる巨大な非相反性を示した(緑点線)．この電磁応答は，Mie 共鳴の大きさが ME 効果により変調されたことに起因していると考えられる．

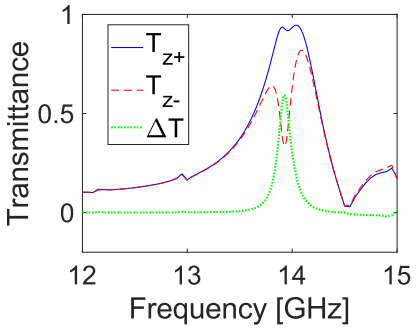


図 2:メタ表面の透過率とその差分の数値計算結果．

当日は，磁気トロイダルメタ表面により透過率差が発現するメカニズムについて詳細に議論する予定である．

[1] A. B. Khanikaev *et al.* Phys. Rev. Lett. **105**, 126804 (2010). [2] Z. Y. Wang *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **109**, 13194–13197 (2012).

© 2025年 応用物理学会

メタマテリアルの熱輻射吸収過程の可視化

Visualization of Thermal Extraction Process Achieved by Metamaterial

東京農工大学，◦(B) 渡邊周，久保若奈

Tokyo Univ. of Agri. Technol. (TUAT), ◦Shu Watanabe, Wakana Kubo

E-mail: w-kubo@cc.tuat.ac.jp

赤外吸収メタマテリアルは環境の熱輻射を吸収する．その性質を利用して我々は，均一な熱輻射環境においても発電可能なメタマテリアル熱電変換を提案，実現した［1］．この発電機構では，熱電素子一端に装着した赤外吸収メタマテリアル（Metamaterial Absorber: MA）が周囲環境の熱を吸収し，生成した局所的な熱を熱電素子に与える．これにより熱電素子上に温度勾配が形成され，既存の熱電素子では発電できない均一な熱輻射環境においても熱電発電を駆動することができる．従来，MA の熱輻射吸収は，遠方場における MA の吸収・放射スペクトル測定や局所的な熱発生の実測などで証明されてきた．また MA の熱吸収を介して，近傍の物質が冷却されることは，サーミスタを用いたメタマテリアル非放射冷却の研究からも確認している．［2］しかし，MA の熱吸収によって周囲物質の熱が奪われる様子を可視化した例はこれまでにない．そこで我々は赤外カメラを用いて，MA が周囲の物体から熱を奪い，物体の温度が低下する様子を可視化することを試みた．

熱電素子の片面に，Ag ディスク，フッ化カルシウム（CaF_2）層，Ag 層からなる MA を形成した MA 電極（Fig. 1(a)）を装着し，もう片面には Cu 電極を装着して，メタマテリアル熱電素子を作製した（Fig. 1(b)）．実験では，MA 熱電素子および，両端に Cu 電極のみを装着した比較素子を基板上に配置し，上部 Cu 電極上にポリイミドを接着させた Cu 板を密着させた．その後，上部に設置した Cu 板上面に 373.15 K に設定したヒーターを接触させて加熱し，1 分経過後，ヒーターを除去して上部 Cu 板が冷却される様子を観測した．Cu 基板上の温度変化は赤外カメラと，基板に接触させたサーミスタを用いて計測し，熱電素子の電圧及び電流も測定した．本実験では，MA は上部に配置した Cu 基板の熱を吸収し，その熱を熱電変換素子に与えることから，MA 素子上に配置された Cu 基板の温度低下は比較基板よりも早く，また MA 素子の出力は増加すると推測される．

MA 熱電素子と比較素子の出力電圧差と，各素子上の Cu 基板の温度差を比較したグラフを Fig. 1(c)に，また各時間における赤外線カメラ画像を Fig. 1(d)に示す．加熱停止後 10 s において MA 熱電素子と比較素子の出力電圧差は最大になり，また赤外線カメラ画像からは，MA 熱電素子上の Cu 基板温度は比較素子上のそれに比べ低くなったことが視覚的に確認できた．この結果から，MA が上部銅板の熱を吸収しその熱を熱電素子に与えたため，MA の出力電圧は比較素子のそれよりも高くなり，また上部に配置した Cu 基板の温度はより低下したと考察した．この結果より，MA が周囲の物体から熱を吸収し，物体が冷却される様子を画像によって可視化したことに成功したと結論した．

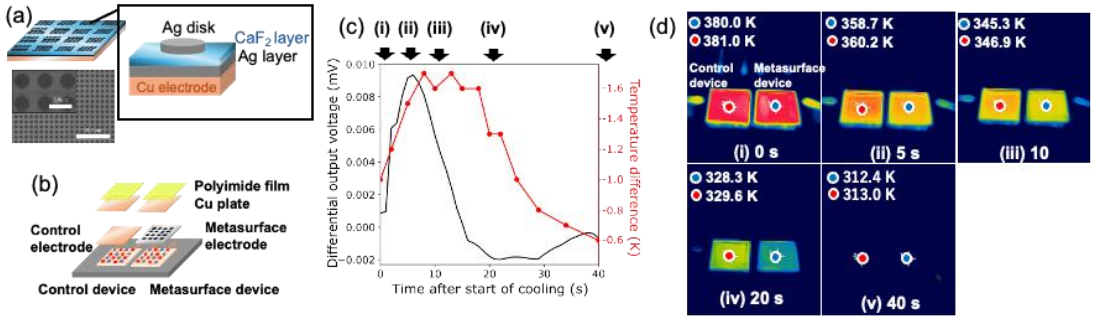


Fig. 1 Schematics of the (a) MA and (b) MA and control thermoelectric devices. (c) Comparison of the differential output voltage (left axis) and the differential temperature (right axis) of the Cu plates placed on the metamaterial and control devices. (d) Photographs of the Cu plates placed on the metamaterial and control devices at (i) 0 s, (ii) 5 s, (iii) 10 s, (iv) 20 s, and (v) 40 s, respectively.

[1] S. Katsumata, T. Tanaka, W. Kubo, *Optics Express,* 29, 16396 (2021).

[2] N. Kawamura, T. Tanaka, W. Kubo, ACS Photonics, 11, 1221 (2024).

© 2025年 応用物理学会

通信波長帯メタレンズの作製誤差を考慮した FDTD 法によるロバスト設計最適化

Robust Design Optimization of Telecommunication-Band Metalenses Using the FDTD Method Considering Fabrication Errors

早大先進理工[1]，早大総研機構[2]，（株）オプトラン[3]，早大ナノライフ[4]

○(D) 岡本 将樹[1]，長谷部 翔大[2]，山田 泰文[2]，

杉浦 健[3]，草島 子栄[3]，朝日 透[1,2,4]，中川 鉄馬[2]

Sc. Adv. Sci. & Eng, Waseda Univ.[1], Comp. Res. Org., Waseda Univ.[2],

OPTORUN Co.,Ltd.[3], Nano & Life, Waseda Univ.[4]

°(D)Masaki Okamoto[1], Shodai Hasebe[2], Yasufumi Yamada[2],

Takeshi Sugiura[3], Shiei Kusajima[3],Toru Asahi[1,2,4], Kenta Nakagawa[2]

E-mail: kenta.nakagawa@aoni.waseda.jp, yyamada@aoni.waseda.jp

背景と目的：近年、ネットワークを介して処理されるデータ量が爆発的に増加し、それに伴う IT 機器の消費電力も深刻な課題である。情報伝送のあらゆる階層にフォトニクスを導入する「オールフォトニック・ネットワーク」が注目され、チップレベルにおける光接続技術の革新が求められている。従来は、チップ間の光接続にはミラーやレンズなどのバルク光学素子が用いられてきたが、三次元的な構造や実装空間の制約から、パッケージの小型化や高密度化には限界がある。我々は、ナノスケールの構造体で光波面制御を可能にするメタサーフェス技術に着目し、マクロ光学素子を置き換えることで、実装面積を削減しながら機能維持を目指す。本研究では、通信波長帯において動作するメタレンズに対し、膜厚の変動や屈折率の誤差、数百ナノメートル程度のサブ波長スケールで設計されたナノピラー構造の形状の歪みや寸法のばらつきといった作製誤差が性能に与える影響を FDTD 法により定量評価[1]し、作製誤差の影響をあらかじめ設計段階で考慮することで、ロバストなメタレンズ設計手法の確立を目指す。

方法：近赤外の通信波長（1.5 μm）帯で動作するメタレンズの設計を目的として、FDTD 法による電磁場シミュレーションを通じて性能（透過率、焦点距離、焦点におけるビーム形状[2]）を評価した。作製誤差を想定した複数の構造パターンに対して解析を行い、性能変化を検討した。また、実際に作製したメタレンズの SEM 画像から構造寸法を測定し、反映したモデルで FDTD シミュレーションを行うことで、実構造における光学特性と最適設計との乖離を比較・評価した。

結果と考察：設計寸法に対する作製誤差を考慮したロバスト設計に基づくメタレンズの有効性を確認し、既存のマクロレンズと比較した。詳細は、当日発表する。

謝辞：本研究は、NEDO「官民による若手研究者発掘支援事業共同研究フェーズ」(課題番号：24001025-0) 及び公益財団法人天野工業技術研究所 2025 年度 (前期募集) 研究助成金の支援の下、実施された。また本研究に関してご協力いただいた NTT イノベーティブデバイス（株）の黒澤幹寛様・日比野善典様、に感謝の意を評する。

参考文献

[1] A. Li, et al.: *Nanomaterials* **13**, 440 (2023).

[2] S. Majumder & S. Ravindran: *Opt. Quant. Electron.* **56**, 1022 (2024).

© 2025年 応用物理学会

金ナノ粒子二量体を利用したシングルナノサイズプラスチックの検出

Detection and identification of single-digit nanoplastics using AuNP dimers

慶大理工，○(M1)袖山 力哉，江刺家 恵子，斎木 敏治

Keio Univ., ○Rikiya Sodeyama, Keiko Esashika, and Toshiharu Saiki

E-mail: rikiyasode@keio.jp

近年、ナノプラスチックが及ぼす健康被害への関心が高まっている。飲料水やプラスチック容器等から大量のプラスチック粒子が検出されていることから、経口摂取が主たる取り込み経路であると考えられている。また、プラスチック粒子は小さいほど体内に取り込まれやすく、特に 5 nm 以下の粒子は、細胞膜を通過し、さらに免疫によって検知されないため、危険性が高いと言える。したがって、経口摂取物中にどのような種類のシングルナノサイズプラスチック粒子が含まれているかを特定できることは極めて重要である。しかし、我々の知る限りでは、10 nm 以下のナノプラスチックの分光学的検出・同定を行っている研究はない。

本研究では、シングルナノサイズプラスチック粒子を検出・同定するために、金ナノ粒子（AuNP）二量体を利用したラマン測定法を確立した(図１)。使用した AuNP の表面はクエン酸が吸着しており、負に帯電している。そのため、物質によって異なる電荷を持つプラスチック粒子を AuNP と吸着、さらに二量体化させるには物質ごとに最適な条件を見出す必要がある。今回の実験では、ナイロン 6 とポリエチレン（PE）のティーバッグを用意し、それらからプラスチック粒子を抽出した。正電荷を帯びたナイロン 6 の場合、純水中で負電荷を帯びた AuNPs に容易に吸着し、AuNP 二量体が自然形成された。一方、負電荷を帯びた PE の場合は AuNP と静電反発を起こすため、NaCl 20mM を添加することにより吸着、さらに二量体化を促した。その後、アガロースゲル電気泳動を行い、プラスチック粒子が吸着した AuNP 二量体のみを分離・回収し、その懸濁液に対して表面増強ラマン分光（SERS）を実施した。ナイロン 6、PE に対するラマンスペクトルを図 2(a)、2(b)に示す。それぞれ物質固有のラマンピークが観測できており、検出・同定を実証した。AuNP 二量体を透過電子顕微鏡で観察したところ、Au NP 間の距離、すなわち検出したプラスチックのサイズはすべて 2 nm 以下であることが確認された。

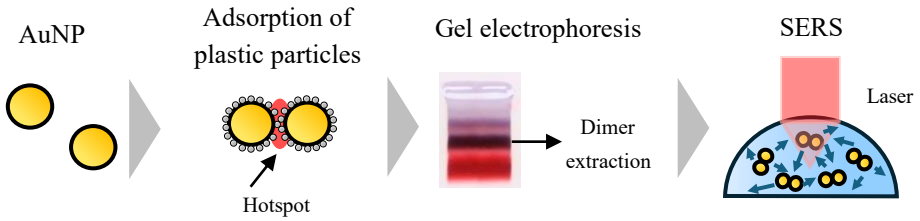


Figure 1: Protocol for detecting plastic particles using AuNP dimers

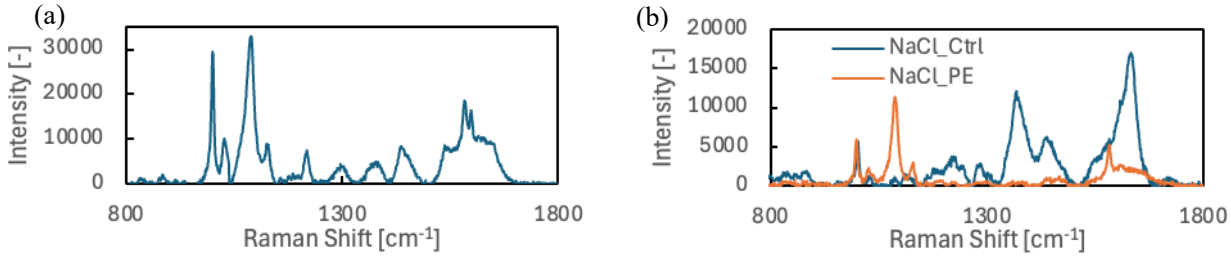


Figure 2: SERS spectra from AuNP dimers adsorbed with (a) Nylon 6 and (b) Polyethylene

© 2025年 応用物理学会

$TiO_2/Au/SiO_2$ 基板上の銀樹状構造を用いた表面増強ラマン散乱

SERS with silver dendrites on $TiO_2/Au/SiO_2$ substrate

岡山大 [1]，北大 [2] ○(M2)川原 知季 [1]，喬 琳 [1,2]，石 旭 [2]，三澤 弘明 [1,2], 武安 伸幸 [1]
Okayama Univ. [1], Hokkaido Univ. [2], ○Tomoki Kawahara[1], Lin Qiao [1,2], Xu Shi [2], Hiroaki Misawa[1,2], Nobuyuki Takeyasu[1]
E-mail: pequ9u9d@s.okayama-u.ac.jp

【背景】ラマン分光法は，煩雑な前処理を必要とせず，試料中の標的分子を非破壊的に測定できる手法である．しかし，ラマン散乱光強度が非常に弱いため，感度が低いことが課題である．そこで，貴金属ナノ構造表面に形成される局在表面プラズモン共鳴(LSPR)を利用する表面増強ラマン散乱(SERS)が研究されてきた．しかし，金属ナノ構造表面に形成される増強電場は表面形状に依存するため，標的分子が吸着する位置によってラマン信号強度に大きな空間的な不均一性が生じることが問題となる．この課題の解決策として，光ナノ共振器として作用する $TiO_2/Au/SiO_2$ 基板の利用が提案されている [1]．先行研究では，この基板上に金ナノ粒子アレイを配置し，金ナノ粒子の LSPR と光ナノ共振器とを強結合させることにより，基板全体にわたりラマン信号が増強され，かつ，強度分布の不均一性も抑制される SERS 測定が可能となった．一方，可視から（少なくとも）近赤外域にわたって広帯域な光学応答を示す銀樹状構造を用いた SERS 測定も報告されている[2,3]．銀樹状構造を用いた SERS マッピングでは，構造中の電場増強により得られるラマン信号強度に空間的変動が観測される（図 1）．本研究では，金ナノ粒子アレイの代わりに銀樹状構造を $TiO_2/Au/SiO_2$ 基板の上に配置することで，広帯域な光学応答を有しつつ，ラマン信号強度の増強と強度分布の空間的な不均一性の抑制を両立する SERS 測定を目指す．

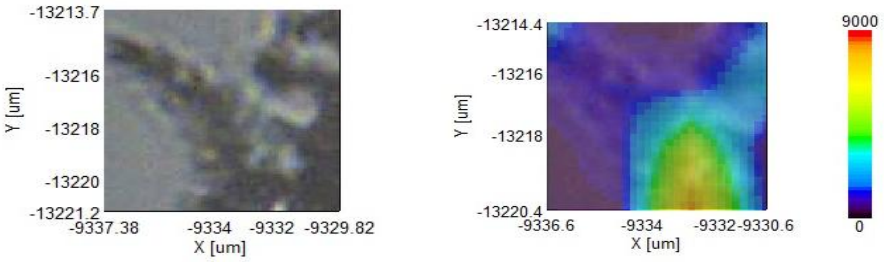


Fig.1 Optical micrograph of a silver dendrite deposited on a glass substrate (left), and the corresponding Raman intensity map (right).

【実験】SiO_2 の上に Au を蒸着させた後，原子層堆積法 (ALD: Atomic Layer Deposition) により TiO_2 層を堆積させ，$TiO_2/Au/SiO_2$ 基板を作製した．銀樹状構造は，硝酸銀溶液とアスコルビン酸溶液を混合し，溶媒の物性を制御することで，形状・サイズの異なる構造体として成長させた．これらの銀樹状構造を $TiO_2/Au/SiO_2$ 基板上に配置し，プローブ分子としてパラ-トルエンチオール (*p*-TT)を用いて，SERS マッピング測定を行った．

【結果と考察】 ガラス基板上に銀樹構造を配置した場合と比較し，$TiO_2/Au/SiO_2$ 基板上に配置した場合では，ラマン信号強度が約５倍程度増強した．さらに，先行研究における金ナノ粒子アレイを用いた場合との比較や銀樹状構造の形状・サイズを変化させたときの SERS 性能についても触れる．

【参考文献】

[1] Y. Suganami et al., ACS Nano, **18**, 4993-5002 (2024).
[2] N. Takeyasu et al., APL Photon., **1**, 050801 (2016).
[3] K. Nogami et al., Appl. Phys. A, **128**, 860 (2022).

© 2025年 応用物理学会

電子線描画ナノ光源の EELS 特性解析

EELS characterization of nano-light sources generated by electron beam irradiation

九大工[1]，九大総理工[2]，九大先導研[3]，バージニア工科大[4]，○(B)平井寛大[1]，(M2)藤丸朋泰[2]，(M2)稲又雅人[2]，(M2)田中宏武[2]，池内みどり[3]，山下英博[3]，井原史朗[3]，村山光宏[3,4]，斉藤光[3]

Kyushu Univ.[1], IGSES, Kyushu Univ.[2], IMCE, Kyushu Univ.[3], Virginia Tech.[4],

°Kanta Hirai[1], Tomoyasu Fujimaru[2], Masato Inamata[2], Hiromu Tanaka[2], Midori Ikeuchi[3], Hidehiro Yamashita[3], Shiro Ihara[3], Mitsuhiro Murayama[3,4], and Hikaru Saito[3]

E-mail: hirai.kanta.010@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

ハライドペロブスカイトは優れたオプトエレクトロニクス材料であり，太陽光発電などへの応用が期待されている．その中でも $CsPbBr_3$ は，高効率の緑色発光や短い発光寿命から発光デバイスへの応用が期待されている材料である．CL(Cathodoluminescence)により，Cs_4PbBr_6 母相中に $CsPbBr_3$ ナノ結晶が分散している試料に対して，大電流電子線による照射(強照射)を行うことで，その部分からの発光効率が上昇する現象が確認されている[1]．しかし，この実験では，電子線照射により Cs_4PbBr_6 母相中に分散していた $CsPbBr_3$ ナノ結晶が粒成長したか，Cs_4PbBr_6 母相中に $CsPbBr_3$ ナノ結晶が生成したかを区別することが難しい．そこで，250℃，30 分間の熱処理により $CsPbBr_3$ と Cs_4PbBr_6 を数 100 nm スケールで分相させ，Cs_4PbBr_6 結晶粒にのみ強照射を行い，その箇所を含む領域を低電流電子線による CL 分光，電子エネルギー損失分光(EELS)，エネルギー分散 X 線分光(EDS)で定量的に解析した．

2. 実験結果及び考察

熱処理された SiO_2 10 nm-$CsPbBr_3$/Cs_4PbBr_6 100 nm-SiO_2 5 nm-Si_3N_4 20 nm 多層膜試料中の Cs_4PbBr_6 結晶粒に加速電圧 300 kV，電流値 7.8 nA で 15 秒間強照射を行った．Fig.1(a)に，この領域と強照射を行っていない Cs_4PbBr_6 の母相の領域について，加速電圧 80 kV，電流値 18 pA で EELS スペクトルを取得した結果を示す．いずれにも Cs_4PbBr_6 特有の 4 eV, 5.5 eV のピークが観測されているが，強照射を行った領域にのみ $CsPbBr_3$ 特有の 2.3 eV の立ち上がりもみられることから，この領域では $CsPbBr_3$ と Cs_4PbBr_6 が厚さ方向に混在していることが分かる．この強照射領域を含む視野の EELS マッピングデータセットに対して，$CsPbBr_3$ と Cs_4PbBr_6 のスペクトルを基底ベクトルとして，非負制約付き最小二乗法によってフィッティングを行った．Fig.1(b)に $CsPbBr_3$ の割合を画像として出力した結果を示す．強照射を行った領域で，$CsPbBr_3$ の割合が高くなっていることが分かる．以上の結果は，光源が生成された原因が，Cs_4PbBr_6 の領域に $CsPbBr_3$ の結晶が生成されたためであることをより明瞭に示している．さらに，$CsPbBr_3$ の割合のラインプロファイルのピークから半値全幅を計算した結果，描画されたナノ光源の大きさが約 42 nm であるとわかった．また，生成された $CsPbBr_3$ ナノ結晶が緑色発光を起こすことは，CL 分光により，$CsPbBr_3$ ナノ結晶の生成が局所組成の変化を伴っていることは，EDS により確認されている．

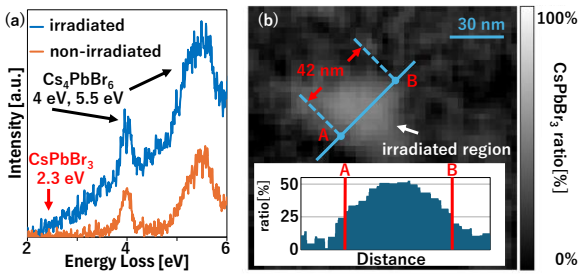


Fig.1 (a) Change in EELS spectrum by electron beam irradiation. (b) $CsPbBr_3$ ratio obtained by decomposing to spectra of $CsPbBr_3$ and Cs_4PbBr_6.

3. 結論

本研究では，熱処理により $CsPbBr_3$ と Cs_4PbBr_6 を数 100 nm スケールで分相させたサンプルに対して強照射を行い，EELS により解析した．その結果，Cs_4PbBr_6 への強照射により，Cs_4PbBr_6 の領域に $CsPbBr_3$ が生成されることが分かり，その大きさが約 42 nm であることが分かった．そのため，Cs_4PbBr_6 の領域であれば，数 10 nm スケールの光源を任意の場所に生成できることが分かった．

[1] M. Inamata et al., 13th Asia Pacific Microscopy Congress, Brisbane, Australia, February 2-7, 2025

© 2025年 応用物理学会

高空間分解能蛍光イメージング用 Cd フリー量子ドットの合成

Synthesis of Cd-free Quantum Dots for High-Resolution Fluorescence Imaging

静大　○細見 圭，山崎 峻平，益田 有，Maciej Kretkowski，居波 渉，川田 善正

Shizuoka Univ., °K. Hosomi, S. Yamazaki, Y. Masuda, M. Kretkowski, W. Inami, Y. Kawata

E-mail: hosomi.kei@shizuoka.ac.jp

光学顕微鏡は生体試料を生きたまま、あるいは生きた状態に近い状態で観察できるため、生体システムの解明の強力なツールとして利用されてきた。しかし、光学顕微鏡の空間分解能は光の回折限界により制限されるため、細胞内微細構造などの観察には十分な分解能を持たない。電子線励起アシスト光学顕微鏡（Electron-beam excitation assisted optical microscope: EXA 顕微鏡）は、電子線励起により微小光プローブを生成・走査し、光学顕微鏡の光源として利用してイメージングするため、光の回折限界を超えた分解能での観察が可能である[1]。本研究では、発光波長の調整が可能で、高い量子効率を示す量子ドットをプローブとして用いて、大気圧条件下での高空間分解能蛍光イメージングを試みた。生体適合性や RoHS 指令などの観点から、Cd や Pb を使用しない ZnInS/ZnS 量子ドットを採用した。

ZnInS 量子ドットは熱分解法によりワンポット合成した[2]。酢酸亜鉛 0.2 mmol、酢酸インジウム 0.2 mmol、粉末硫黄 0.8 mmol を 1-ドデカンチオール:オレイルアミン=4:6 mL と共に三口フラスコへ入れ、窒素ガスを 15 分間流し、窒素置換した。その後、220°C まで加熱し、10 分間保持することで、ZnInS コア量子ドットを作製した。ZnS シェル層作製のため、60°C まで冷却後、1-オクタデセン:オレイルアミン=4:1 mL 中に酢酸亜鉛 2 mmol を溶かした Zn 前駆体を 1 mL 加えた。室温まで冷却後、エタノールを加え遠心分離し、沈殿物をトルエン中に分散させた。Ag や Mn をドープした ZnInS:Ag や ZnInS:Mn は ZnInS コア量子ドット合成時それぞれ酢酸銀や酢酸マンガンを他の原料と共に加えることで合成した。

図に走査型電子顕微鏡内で取得した各量子ドットのカソードルミネッセンス（CL）スペクトルを示す。Ag および Mn をドープした ZnInS/ZnS 量子ドットではそれぞれ 520 および 630 nm 付近に発光ピークを有している。これらはドーピングしていない ZnInS 量子ドットからの発光波長とは異なっており、それぞれのドープ種に起因する発光と考えられる。

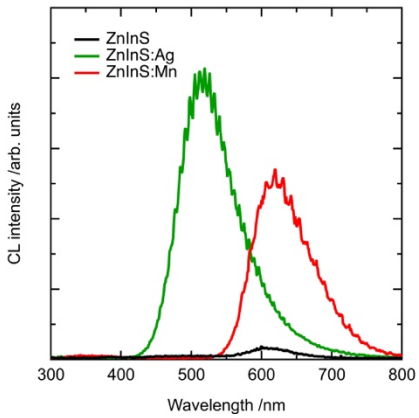


図. 合成した量子ドットの CL スペクトル

講演では作製条件やドープ種の違いによる発光特性とそれらを用いた EXA 顕微鏡での蛍光イメージングについて議論する。

[1] W. Inami et al., Opt. Express 18 (2010) 12897. [2] G. Huang et al., RSC Adv. 6 (2016) 58113.

© 2025年 応用物理学会

配向性有機結晶微小共振器における円二色性の発現

Circular dichroism in molecular-oriented organic crystal microcavities

京都工芸繊維大学　○(M1)西原　里奈、大倉　黎巳、岡田　大地、高橋　駿、山下　兼一
Kyoto Institute of Technology, ○Rina Nishihara, Reo Ohkura, Daichi Okada, Shun Takahashi, Kenichi Yamashita
E-mail : m25621048@edu.kit.ac.jp

【はじめに】共振器ポラリトンとは光子と励起子の強結合によって形成される準粒子状態で、比較的高温でポラリトン凝縮を起こすことから、室温で動作する量子デバイスへの応用が注目されている。実用化のためには効率的な強結合の形成が重要となっており、その手段の一つとして、強い分子配向性を示す BP1T-CN 単結晶の導入が提案されている。しかし、この強い分子配向性により、BP1T-CN 単結晶を用いた微小共振器において特殊な偏光固有状態が形成されることが報告されている[1]。そこで本研究では、BP1T-CN 単結晶単体の偏光変換作用を調査するとともに、同結晶を用いた微小共振器の偏光固有状態について調査した。

【実験・結果】昇華再結晶法を用いて BP1T-CN 単結晶を作製し、作製した結晶を石英基板および DBR 上にトランスファーした。DBR 上に載せた結晶には、上部 DBR として SiO_2 と HfO_2 の薄膜を堆積することで、VCSEL 構造の微小共振器を作製した。それぞれの試料に対して無偏光状態の白色光を入射させ、フーリエスペースイメージング法を用いて出力光のイメージを波数空間像に変換し、分光器と 2 次元 CCD カメラを用いて一次元波数空間における円偏光スペクトルを測定した。単結晶については透過光スペクトルを、微小共振器については反射光スペクトルを測定した。単結晶および微小共振器に無偏光光を入射した際の出力光の円二色性に関するストークスパラメータを図 1 に示す。図より、結晶自体には円二色性は見られない一方で、微小共振器にはラシュバードレッセルハウス型の光学的擬似スピン軌道相互作用に由来した明確な円二色性の発現が確認できる。当日の発表では、この円偏光性の発生メカニズムについて詳しく議論する。

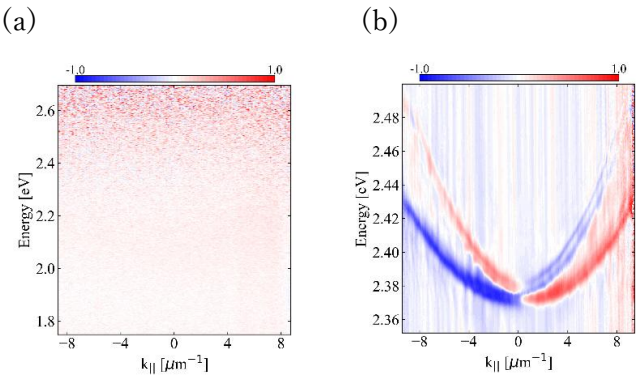


図 1 : (a)単結晶, (b)微小共振器における無偏光入射時の円二色性に関するストークスパラメータ

[1]Reo Ohkur et al., “Rashba-Dresselhaus spin-orbit coupling in an organic crystal microcavity”, The 11th International Conference on Molecular Electronics & Bioelectronics, Jun.19-21, 2024, Matue-city , Shimane, JAPAN

© 2025年 応用物理学会

トポロジカル構造型有機 VCSEL の作製とその評価
Fabrication and evaluation of topological organic VCSEL

京都工芸繊維大学 ○湯守俊太、中島昂大、岡田大地、高橋駿、山下兼一
Kyoto Inst. Technol., ○S. Yumori, K. Nakajima, D. Okada, S. Takahashi, and K. Yamashita
E-mail：m25621047@edu.kit.ac.jp

【はじめに】共振器ポラリトンは、光と物質の強結合により生成される準粒子である。活性層に有機半導体を用いることで室温でも生成可能となり、次世代の量子媒体として注目されている[1]。共振器ポラリトンモードのバンド構造を操作する手段として、微小共振器面内にフォトニック構造を組み込む方法がある。本研究では、トポロジカル構造である SSH (Su-Schrieffer-Heeger)構造をもつ有機 VCSEL を作製し、トポロジカル欠陥により発生する局在モードを観測した。

【実験・結果】本研究で作製した有機 VCSEL の構造を Fig. 1 に示す。作製方法として、まず Bottom DBR 上に電子線レジスト ZEP520A をスピンコートし、SSH 構造を描画する。そして o-キシレンにより現像を行い、その上に活性層をスピンコートにより製膜する。最後に Top DBR を重ね、UV 露光により硬化させることにより、SSH 構造をもつ有機 VCSEL を作製した。活性層には光硬化性樹脂#18247 に有機半導体 DADSB (1,4-Bis[4-(di-p-tolylamino)styryl]benzene) を 0.4 wt%ドープしたものを使用した。作製した VCSEL の SSH 構造部を波長 405 nm の CW レーザで励起し、フーリエイメージング法により分散測定を行った。SSH 構造では中心部がトポロジカル欠陥となり、ポラリトンが局在する。実際にハミルトニアンより求めた固有エネルギーをプロットしたものが Fig. 2 であり、バンドギャップ間に 1 つ固有エネルギーが存在していることはトポロジカル欠陥モードの存在を示唆している。Fig. 3 は分散特性であり、s バンド(2.319～2.333 eV)と p バンド(2.339～2.349 eV)の間に 6 meV のバンドギャップが確認される。また、そのバンドギャップ内に、SSH 構造によるトポロジカル欠陥モードによるフラットバンド(2.335 eV)を観測した。

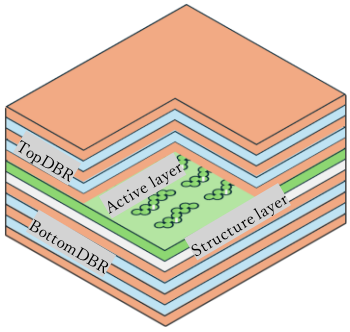


Fig. 1 Topologically structured organic VCSEL

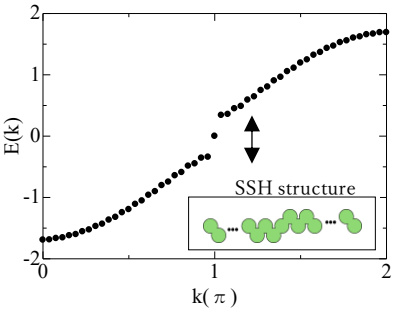


Fig. 2 Eigenvalue energy calculated from Hamiltonian

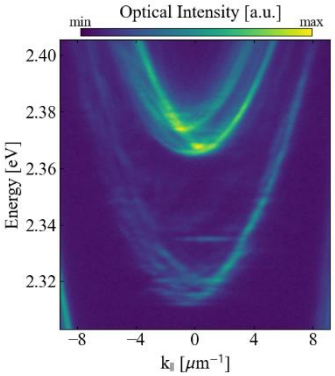


Fig. 3 Angle-resolved PL of SSH structure

[1] Cookson, T., Georgiou, K. et al. “A Yellow Polariton Condensate in a Dye Filled Microcavity”, Adv.Opt.Mater 5, 1700203, (2017)

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.11 Nanoscale optical science and near-field optics

[10p-N204-1~10] 3.11 Nanoscale optical science and near-field optics

[10p-N204-1]
What Causal Laws does the Internal Electromagnetic Field Follow?
○Itsuki Banno[1] (1.Univ. of Yamanashi)

[10p-N204-2]
Nonlinear and Non-adiabatic Effect of the Internal Vector Potential and Photon-Breeding Devices
○Itsuki Banno[1] (1.Univ. of Yamanashi)

[10p-N204-3]
Overview on the newly developed theory of dressed photon
○Hirofumi Sakuma[1] (1.RODreP)

[10p-N204-4]
Off-shell Sciences as Categorification of On-shell Sciences
○Hayato Saigo[1] (1.ZEN Univ.)

[10p-N204-5]
Bohr's complementarity and quantum measurement theory
○Kauzya Okamura[1] (1.Chubu Univ.)

[10p-N204-6]
The wave function of a quantum walk on the regular tree
○Seiken Saito[1] (1.Kogakuin Univ.)

[10p-N204-7]
Quantum walks and edge coloring of graphs by rotation
○(M1)Takumi Kakegawa[1], Etsuo Segawa[1] (1.Yokohama Univ.)

[10p-N204-8]
Scattering of Quantum Walk in Blowup Gragh
○(M1)Yoshiyuki Iida[1] (1.Yokokoku)

[10p-N204-9]
Correlation among channnels of dressed-photon-phonon transfer
○Motoichi Ohtsu[1], Etsuo Segawa[2], Kenta Yuki[3], Seiken Saito[4], Suguru Sangu[5] (1.Res. Dressed Ptn,, 2.Yokohama Ntl. Univ., 3.Middenii, 4.Kogakuin Univ, 5.Ricoh)

[10p-N204-10]
Visualization of Spatiotemporal Dynamics of Highly-Excited States of Dressed Photons
○Suguru Sangu[1] (1.Ricoh Co., Ltd.)

内在電磁場はどのような因果律に従うのか？

What Causal Laws does the Internal Electromagnetic Field Follow?

○ 坂野　斎　(山梨大院)

○**Itsuki Banno　(Univ. of Yamanashi)**

E-mail: banno@yamanashi.ac.jp

ミクロの世界で「原因の後に結果が現れる」という通常の因果律が有効なのか？[1] を議論したい．この疑問は量子電磁力学の作用積分を最適化する 2 つの方法の比較から生じた：

(a) 始めにマクスウェル方程式を解き電磁ポテンシャルを最適化した後，電子の場を最適化する，

(b) 始めにハイゼンベルグ方程式を解いて電子の場を最適化し，次に電磁ポテンシャルを最適化する．ここで，電子の場の最適化は感受率を求めることに対応する．

(a) の作用積分の最適化の最初の過程で，内在電磁場であるスカラーポテンシャルについて解き消去することで電荷密度間相互作用；クーロン相互作用となる．この電荷密度間相互作用の積分核は 2 箇所の電荷密度間の距離の逆数に比例し，時間遅れなくその影響が伝わり通常の因果律に従わない．同じ段取りで作用積分中の横ベクトルポテンシャル（横 VP）について解いて消去すると，横電流密度間相互作用となり，その積分核は波動方程式の遅延グリーン関数と先進グリーン関数の平均となる．この導出過程では，横 VP の発信側・受信側の電流密度が同じ系内にある（孤立系である）という条件を使っており，内在 VP を扱っていることになる．この結果も通常の因果律に従わない．

(a) についてまとめると，孤立系の作用積分中の内在電磁ポテンシャルをマクスウェル方程式を使って消去して得た電荷密度間相互作用，横電流密度間相互作用において，その積分核は因果律と逆因果律に関して中立な形になる．

一方，(b) の手続きでハイゼンベルグ方程式より感受率（応答関数）を求めるとき，通常，私たちはマクロ世界の日常経験から推認した「通常の因果律」をミクロの世界に適用する．ここにおいて，(a) の電磁場の扱いと (b) の電子の場の扱いに齟齬があるように思われる．この発表では以下の問題点を論じる：

- 非相対論系においての時間発展を記述する際，数学的には通常の因果律，逆因果律，または，それらの混合された因果律は対等であること．
- 因果律に無関係である作用積分と，特定の因果律を考慮したオイラー方程式の解；線形・非線形感受率の関係と整合性．
- 逆に，感受率（構成方程式）から互換な変分原理をつくれるが，その場合，感受率に考慮した特定の因果律の依存性は作用積分に残るのか？
- 内在電磁場に対するミクロな応答を記述する感受率に考慮されるべき相応しい「因果律」は何か？実験から判定することはできるか？

謝辞

大津元一博士が主宰されるドレスト光子研究起点 (RODreP) での研究会のメンバーの方々に感謝いたします. この研究の一部はドレスト光子研究起点からの援助を受けています.

参考文献

[1] 坂野　斎,「逆因果律と内在電磁場」オフシェル科学フォーラム（2024 年 10 月 28 日）https://rodrep.or.jp/img/series/Banno/%E2%85%A6-9%20Banno.pdf

© 2025年 応用物理学会

内在ベクトルポテンシャルの非線形非断熱効果とフォトンブリーディングデバイス

Nonlinear and Non-adiabatic Effect of the Internal Vector Potential and Photon-Breeding Devices

○ 坂野　斎　(山梨大院)

○**Itsuki Banno　(Univ. of Yamanashi)**

E-mail: banno@yamanashi.ac.jp

川添，大津らの開発したフォトンブリーディング（PB）[1] は直接遷移型．間接遷移型を問わず半導体から高効率発光デバイス作成を可能にする方法である．発光波長を決めるのはプロセス中の照射光波長であり，従前の物質のバンドギャップ選択ではなく，仕組みの詳細は未解明である．PB で作成されたデバイスは高効率発光だけでなく，巨大磁気光学効果 [2] や強磁性 [3] を発現し，光学フォノンの関与 [4] の実験的証拠がある．現象の強さとフォノンの関与は大きなコヒーレント長の振電系の存在を，磁気的現象は内在ベクトルポテンシャル（内在 VP）の関与を示唆する．

本理論研究は PB で作成されたデバイスの動作原理の探求である．前回 [5]，電子系をバートリーフォック（HF）近似をして，非相対論系に遍在する VP の非線形効果による光学応答の増強の記述を目指したが及ばなかった．今回は，さらに TO 格子振動（TO フォノン）に付随する VP の時間変化；横電場による HF 軌道の変形として非断熱効果：振電相互作用系を記述し，直接遷移型半導体の発光波長の変化，フォノンとの多重相互作用を論じる．

PB デバイスの動作状態は基底状態から遠いと想定され，量子電磁力学の作用積分の変分法による最適化が必要である．物理的近似と親和性の高いハイゼンベルグ描像で以下の段取りを取る：**(1)** 線形・非線形感受率を作用積分の電磁ポテンシャルによる汎関数微分としてハイゼンベルグ演算子の形で求める．これは４元誘導電流密度を結果，ゲージフリーの電磁ポテンシャルを原因とし，電荷保存則，ゲージ不変性を保証する．**(2)** 非断熱効果を内在 VP から導かれる横電場による HF 軌道の変形として考慮する．**(3)** 電磁ポテンシャルと非線形感受率の変換を導入することにより非線形応答の系統的な扱いを可能にし，非相対論系に遍在する電荷密度と VP の２次の結合を (2) の非断熱効果とともに系統的に誘導電流密度に取り込む．**(4)** 無限次まで (3) の非断熱非線形効果を考慮する．その際，電子系の励起・脱励起の演算子の空間に相応しい基底を導入し表現行列を用いる．**(5)** 構成方程式 (上記で構成された誘導電流密度) と整合する変分原理を電磁ポテンシャルの振幅のパラメータ積分によりつくる．**(6)** 相応しい電子状態で期待値をとり，作用積分を最適化し，最適化した電流密度演算子の振動数スペクトル：発光の振動数，格子振動によるサイドバンドを考察する．

謝辞

大津元一博士が主宰されるドレスト光子研究起点 (RODreP) での研究会のメンバーの方々に感謝いたします. この研究の一部はドレスト光子研究起点からの援助を受けています.

参考文献

[1] T. Kawazoe and M. A. Mueed and M. Ohtsu, Appl. Phys. B, **104** p.747–754(2011); M. A. Tran, T. Kawazoe, and M . Ohtsu. Appl. Phys. A, **115** p.105-111(2014); M. Ohtsu, "Silicon Light-Emitting Diodes and Lasers" (Springer International Publishing, Swit- sland, 2016).

[2] N. Tate, T. Kawazoe, W. Nomura, and M. Ohtsu, Scientific Reports **5** p.12762-1-7 (2015); M. Ohtsu,

[3] 門脇 拓也, 川添 忠, 大津 元一, 佐野 雅彦, 向井 孝志.「ドレスト光子による誘導放出を利用した波長 1.3~1.9 μ m 帯の非冷却型 Si 受光素子], 応用物理学会 2021 年春期学術講演会, 17p-Z14-8.

[4] N. Wada, M. A. Tran, T Kawazoe, M. Ohtsu, Appl Phys A**115** p.113-118(2014).

[5] 坂野　斎,「流れが誘導する平衡から遠い量子構造 V」2025 年春季学術講演会，16p-K508-1.

© 2025年 応用物理学会

ここ数年で構築されたドレスト光子新理論の振り返り

Overview on the newly developed theory of dressed photon

ドレスト光子研究起点、佐久間弘文
RODreP, Hirofumi Sakuma
E-mail: hsakuma1@gmail.com

ドレスト光子（以下 DP）は、光励起した半導体上で生成される（未解明の）特異な場で、当初は近接場光学の分野でその研究が開始され、20 世紀の末から 21 世紀の初頭において応用研究が大きく進展し、その後、数年前から先端的量子場理論に基づく新たな理論構築の試みが始まり、現在に至っている。本発表は、その新理論の概要と光学分野における意義を簡潔に説明するものである。

物性物理においては、その Bohr 半径が 10nm 程度である「励起子」と呼ばれる電子正孔対が重要な役割を果たすという事実は、例えば、電子正孔対は “物性物理の縮図” と言われる程の多様性を示すという指摘に裏打ちされている。DP の新理論によれば、DP の大きさは量子化されていて、その最大値は、大津 [1] の実験によれば (40 ~ 50)nm 程度である。これは、DP が物性物理において励起子と同様な重要な働きを担う事を示唆しているものである。

新理論の特徴は、これまでの発表で繰り返し説明して来た様に、小嶋のミクロ・マクロ双対理論 (MMD)[2]、公理論的量子場理論の帰結である Greenberg-Robinson 定理、及び宇宙を生み出した “始原の光の場”[3] の共形不変性の破れから導かれる対称空間 [4] の出現という複数の理論を結び付け、物理的時空の創発とそれに伴う、ダークエネルギー場、ダークマター場及び DP 場を総括的に説明するというものである。特に DP 場について一言付け加えると、量子化された DP の最大長は、MMD が取り扱う量子的領域と古典的領域を距離的に分離する Heisenberg cut を与えていると同時に、それは、電磁場と重力場が同時に関与する量子的領域と古典的領域との相互作用に深く関わる事も示される。

DP の重要性という事に関して、本発表の導入部分では「励起子」を例に挙げたが、それは負電荷を持つ電子と hole として正電荷と見做される正孔との「対」としての存在である。DP の新理論では、DP の最大長の逆数で定義される波数 ($\pm\kappa_0$) を用いて導入される (+) timelike 及び (-) spacelike Klein Gordon 方程式

$$[\nabla^\nu\nabla_\nu \pm (\kappa_0)^2]\phi = 0 \qquad (1)$$

で記述さる二つの場の存在が重要になり、その場を基にして二つの時空領域 [+, -] のハミルトニアン (H) 構造が導かれる。

通常の光の場が二つの時空領域の境界に存在する様に、重力相互作用に付随すると想像されているスピン量子数 2 を持つ “gauge graviton” (gg) に対応する存在も新モデルの中で定義可能である。特に重要な点は、gg は二つの時空領域 [+] と [-] との相互作用に関与できる形で定義されているという事である。この事は、多分に比喩的ではあるが、正負の電荷の “結合体” として定義される「励起子」の構造と類似する特性を持っていると言えよう。物性物理における励起子の重要性については既に触れたが、 量子場理論における二つの時空領域 [+] と [-] との相互作用は、公理論的量子場理論における Greenberg-Robinson (GR) 定理 [2] により正当化されているものであるが、その表現の数学的抽象性の為に、物理の分野では殆ど省みられる事がなったと言える。DP 研究が nanophotonics を超えて、物理学全体に少なからぬ影響を及ぼしたとすれば、それは、GR 定理が示す内容を具体的に “応用物理光学” の分野で示す事ができたという事ではないかと、ここ数年の研究を総括している。

参考文献

[1]H. Sakuma et al. *Symmetry* **2020**, 12(8), 1244.
[2] ここからはじまる量子場、大津元一、小嶋泉（編著）朝倉書店、**2020**。
[3] R. Penrose, *Proceeding of EPAC*, **2006**.
[4] S. Helgason, *Differential Geometry, Lie Groups, and symmetric spaces*, **1978**, Acad. Press,

© 2025年 応用物理学会

オンシェル科学の圏化としてのオフシェル科学

Off-shell Sciences as Categorification of On-shell Sciences

○ 西郷 甲矢人 (ZEN 大学)
○Hayato Saigo (ZEN University)
E-mail: h_saigoh@nagahama-i-bio.ac.jp

「圏化」とは、数学において近年用いられる（明確な定義を持たない）用語であるが、簡単に言えば、「集合」について定義されているような諸概念を「圏」（およびその高次の一般化）に拡張することをいう。圏は、対象とよばれるものたちとそれをつなぐ射とよばれるものたちからなるシステムであって、いくつかの公理をみたすものであるが、直感的には「（ある条件をみたす）可能な過程の全体」のようなものと思うとよい。そこでは、対象は「恒等射」という特殊な射（「何もしない射」）と同一視され、射の合成可能性の担い手という重要な役割を果たすものの、主人公の座はむしろ一般の射に譲られる。集合は対象／恒等射のみからなる圏（離散圏）と考えることができるので、圏は集合の一般化であるとといえる。圏化とは、この特殊な圏について定義された概念を一般の圏について意味のあるように拡張しようという営みなのである。

さて、以上は数学の話であるが、実はこの数年間の応用物理学会での講演において取り上げたすべてのことが、一言でいえば「オフシェル科学はオンシェル科学の圏化である」とまとめられるのである。具体的には、[2, 3] に基づき、量子場とその状態を「（部分的な）対合構造をもつ圏上の圏代数とその上の状態」として定義することにより、圏構造としての相対論的構造と非可換確率構造としての量子論的構造を直接に統合できることを示し、代数的量子場理論や位相的量子場理論などの先行するアプローチとの概念的関係についても論じた。またこれらを踏まえてオンシェル・オフシェルの概念を見直し、時空を「（構造づけられた）点集合」としてではなく「圏」—より詳細にいえば「（部分的な）対合構造を持つ因果的圏」[3]—として見直すことが、ドレスト光子研究 [1] に端を発するオフシェル科学にとって核心的であるという見方を提示した。さらに、2025年春の講演においては、この「因果的圏」として物理学的にどのようなものを考えるべきか明らかにした。

本講演においては、これまでのオフシェル科学の基礎に関する研究を「圏化」という観点からまとめあげ、「オフシェル科学とは何か」についてのひとつの回答を与え、今後のオフシェル科学の進展の方向性を展望したい。

参考文献

[1] M. Ohtsu: *Dressed Photons* (Springer, Berlin Heidelberg 2014)

[2] Saigo, H. Category Algebras and States on Categories. *Symmetry* **2021**, *13* 7, 1172. https://doi.org/10.3390/sym13071172

[3] Saigo, H. Quantum Fields as Category Algebras. *Symmetry* **2021**, *13* 9, 1727. https://doi.org/10.3390/sym13091727

© 2025年 応用物理学会

ボーアの相補性と量子測定理論

Bohr's complementarity and quantum measurement theory

中部大工[1], ○ 岡村 和弥[1]

Chubu Univ.[1], ○Kauzya Okamura[1]

E-mail: k.okamura.renormalizable@gmail.com

本講演では，ボーアの相補性原理と量子測定理論の相互への貢献について数理的な観点から発表を行う。特に，前回の講演（第 72 回春季学術講演会 16p-K508-4）の時点より明確になった点について詳しく議論する。

ボーアの**相補性原理**（complementarity principle）[1] とは，革新的な「科学的な分析と綜合のあり方」のことであり，分析パートと綜合パートからなる：

分析パート 物理系である量子系に対する実験結果の分析および説明における「制約」を認めなければならない。加えて，現象という言葉の使用を改めなければならない。

綜合パート 分析パートを前提として，量子系とは，異なる実験設定相互の排他関係があっても諸現象の全体が互いに補い合う対象のことである。特に，対象の振る舞いと，その現象の発生で関わる測定装置との相互作用の明確な分離は不可能である。

ボーアは 1920 年代後半に相補性原理を提唱し，アインシュタインとの論争の中で洗練していった経緯があるが，提唱から洗練の過程でもボーアの主張は一貫している。

相補性原理の分析パートと綜合パートがともに数理的表現をもつことを示す。このために必要な概念を，**代数的量子論**の枠組みと，**量子インストルメント**に基づく量子測定理論 [2, 3] が供給する。綜合パートは量子論の公理的アプローチと整合的であり，代数的量子論の概念が数理的表現と対応する。一方の分析パートでは，代数的量子論を前提として，量子インストルメントをもちいて「量子現象」が定義される。

代数的量子論とは，ある $*$-代数（行列の随伴の一般化にあたる対合 $A \mapsto A^*$ をもつ代数）$\mathcal{X}$ の自己共役元を物理量とし，$\mathcal{X}$ 上の期待値汎函数 $\omega : \mathcal{X} \to \mathbb{C}$ として状態を定め，これらに基づいて量子系を記述する体系である。また，量子測定理論の中心概念である量子インストルメントは物理的に実現可能な測定に対応しており，測定装置の出力のなす確率分布および出力に応じた系の状態変化を記述するために用いられる。

科学哲学的な観点からハルボソンとクリフトンにより定義された**存在可能量代数**（beable subalgebra）[4] は，考察する測定状況において値をもつ物理量の集まりに対応する。講演者は存在可能量代数を量子インストルメントを用いる状況に定義を改良し，アインシュタインとボーアの論争での論点を明確にする。

参考文献

[1] 山本 義隆 編,『ニールス・ボーア論文集 1 因果性と相補性』,（岩波書店，1999）.

[2] M. Ozawa, J. Math. Phys. **25** (1984), 79–87.

[3] K. Okamura and M. Ozawa, J. Math. Phys. **57** (2016), 015209.

[4] H. Halvorson and R. Clifton, Int. J. Theor. Phys. **38** (1999), 2441–2484.

© 2025年 応用物理学会

正則木上の量子ウォークの波動関数

The wave function of a quantum walk on the regular tree

工学院大学
○ 齋藤正顕
Kogakuin University
○Seiken Saito

ドレスト光子（DP）を説明するモデルとして, 大津–瀬川 [3] によって 3 状態の量子ウォーク (QW) モデル（ドレスト光子の量子ウォークモデル）が提案され, その挙動の数値的あるいは理論的な解析が進められている [4]. 関連する 1 次元 3 状態の量子ウォークモデルの研究として [6] がある. 本研究では, 昨年の発表 [7] に続いて, グラフ上の量子ウォークを扱う. 具体的には, グラフ $G = (V, E)$ の隣接行列を A とするとき, 時間発展行列を $U(t) = e^{itA/2}$ とし, 初期状態を $\Psi(0) \in \mathbf{C}(V)$ とするとき, 時刻 $t \geq 0$ における状態が

$$\Psi(t) = U(t)\Psi(0)$$

によって定められる連続時間量子ウォークについて考察する. このような量子ウォークモデルについての先行研究として, グラフ G が 1 次元格子 $\mathbf{Z}$, サイクルグラフ C_N, 正則木 T_{q+1} の場合については, [2] などがある. 詳しくは,[1], [2], [5], [8] 等を参照のこと. 本研究では, 正則木の時間発展行列の幾何的な量による具体的表示を用いて, 波動関数, 密度行列, 関連する特殊関数の性質等について考察する.

謝辞 この研究の一部はドレスト光子研究起点の支援を受けています.

参考文献

[1] C. Godsil and H. Zhan, Hanmeng Discrete quantum walks on graphs and digraphs, London Math. Soc. Lecture Note Ser., 484 Cambridge University Press, Cambridge, 2023, xii+138 pp.

[2] 今野紀雄, 量子ウォークの数理, 産業図書, 2008.

[3] M. Ohtsu, A Quantum Walk Model for Describing the Energy Transfer of a Dressed Photon, Preprint, 2021, Offshell: 10.14939/2109R.001.v1.

[4] 大津元一, 瀬川悦生, 結城謙太, 量子ウォークモデルによるドレスト光子エネルギー移動のシミュレーション, 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 (講演番号 22a-A101-6).

[5] R. Portugal, Quantum walks and search algorithms, Quantum Sci. Technol., Springer, New York, 2013, xii+222 pp.

[6] 齋藤正顕, ドレスト光子の量子ウォークモデル: 1 次元の場合, 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 (講演番号 22a-A101-4).

[7] 齋藤正顕, 正則グラフ上の量子ウォークの波動関数について, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (講演番号 18p-A33-16).

[8] S. E. Venegas-Andraca, Quantum walks: a comprehensive review, Quantum Inf. Process.11(2012), no.5, 1015–1106.

© 2025年 応用物理学会

量子ウォークとローテーションによるグラフの辺彩色

Quantum walks and edge coloring of graphs by rotation

横浜国大 [1]，○ 掛川 拓巳 [1], 瀬川 悦生 [1]

Yokohama ntnl. Univ.[1], ○Takumi Kakegawa[1], Etsuo Segawa[1]

E-mail: kakegawa-takumi-bc@ynu.jp

【はじめに】 エネルギーの蓄積効率と量子ウォークの快適度には関連性が見いだされている [1], [2]. 本研究では量子ウォークの快適度と, グラフの辺彩色の問題の関係を探る. グラフの辺彩色問題を考えるにあたり, ローテーションを用いるのが有効である. 特に 3 正則グラフにおいては, 辺の彩色と各頂点周りのローテーションとの間に自然な対応が生じる. そのため今回は, 簡単な 3 正則グラフとして, 同じ大きさのサイクルグラフ C_n を 2 つ用意し, それぞれの対応する頂点を 1 本の辺で結ぶことで得られるグラフ, R_n を考察の対象とする (図 1). さらに, R_n に対して図 1 から図 3 に示すような操作を行い, [3] で与えられている時間発展で考察する.

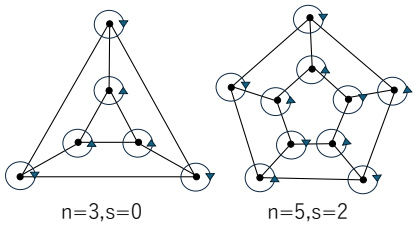


図 1: グラフ R_n

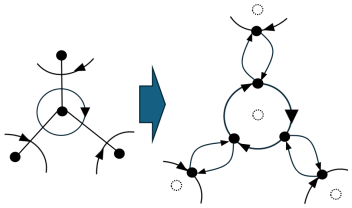


図 2: 頂点の膨張

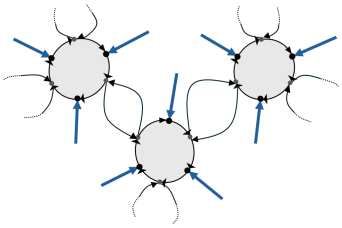


図 3: テールの接続

【主結果】 R_n を球面上に埋め込んだとき, 外周に現れる頂点の周囲における反時計回りのローテーションの総数を s と定義する. このとき, ローテーションとグラフとの彩色に関する以下の命題が導かれる.

命題 1. R_n が彩色可能であることと, n と s が以下の合同式を満たすことは同値である：$n \equiv 2s \ (mod\ 3)$

さらに, [3] による一般的な快適度の公式を今回のローテーショングラフの族に当てはめると次の命題のように, (n, s) が決まれば量子ウォークの快適度が埋め込み方によらず一意に定まることが分かった. ここで快適度は定常状態 Ψ_∞ に対し, $\mathcal{E} = \frac{1}{2}\sum_{a\in G}|\Psi_\infty(a)|^2$ とする.

命題 2. $a > 0, \omega = 1$ を仮定すると, 量子ウォークの快適度の期待値は以下のようになる.

$$E(\mathcal{E}) = \begin{cases} \frac{2+|b|^2}{6n|b|^2}\left(2(n+s)\frac{1+a^{2(n+s)}}{1-a^{2(n+s)}} + 2(2n-s)\frac{1+a^{2(2n-s)}}{1-a^{2(2n-s)}}\right) - \frac{2a}{3n|b|^2}\left(\frac{sa^{n+s}}{1-a^{n+s}} + \frac{(n-s)a^{2n-s}}{1-a^{2n-s}}\right) & : n \equiv 1, n-s \equiv 1 (mod\ 2) \\ \frac{2+|b|^2}{6n|b|^2}\left(2(n+s)\frac{1+a^{2(n+s)}}{1-a^{2(n+s)}} + 2(2n-s)\frac{1+a^{2n-s}}{1-a^{2n-s}}\right) - \frac{2a}{3n|b|^2}\left(\frac{sa^{n+s}}{1-a^{n+s}}\right) & : n \equiv 1, n-s \equiv 0 (mod\ 2) \\ \frac{2+|b|^2}{6n|b|^2}\left(2(n+s)\frac{1+a^{n+s}}{1-a^{n+s}} + 2(2n-s)\frac{1+a^{2(2n-s)}}{1-a^{2(2n-s)}}\right) - \frac{2a}{3n|b|^2}\left(\frac{(n-s)a^{2n-s}}{1-a^{2n-s}}\right) & : n \equiv 0, n-s \equiv 1 (mod\ 2) \\ \frac{2+|b|^2}{6n|b|^2}\left(2(n+s)\frac{1+a^{n+s}}{1-a^{n+s}} + 2(2n-s)\frac{1+a^{2n-s}}{1-a^{2n-s}}\right) & : n \equiv 0, n-s \equiv 0 (mod\ 2) \end{cases}$$

【今後の展望】 命題 1 と命題 2 を組み合わせて, R_n の彩色可能性と量子ウォークの快適度に関する, より明確な関係性を見出すことが期待できる.

【参考文献】

[1] M. Naruse et al., Nano Communication Networks 2 189–195 (2011).

[2] M. Ohtsu et al., Off -shell archive: 2304O.001.v1 (2023).

[3] Yu. Higuchi and E. Segawa, arXiv:2501.06765 (2025).

© 2025年 応用物理学会

膨張グラフ上の量子ウォークと散乱

Scattering of Quantum Walk in Blowup Graph

横国 [1] ○(M1) 飯田佳之 [1], 瀬川悦生 [1]

Yokohama National Univ.[1] ○Yoshiyuki Iida[1], Etsuo Segawa[1]

E-mail: iida-yoshiyuki-fj@ynu.jp

【はじめに】入出力のある量子ウォークとドレスト光子のエネルギー輸送問題との関係が研究されている. ローテーション付きグラフ上の量子ウォークはこの物理現象の数理モデルとしての活用が期待できる. [1, 2] ローテーション付きグラフに対して膨張と呼ぶ変形を施した. 変形後のグラフの頂点に量子コインとして 2×2 のユニタリ行列 C を割り当てることで, 自然にユニタリな時間発展を構成することができる. このグラフに外部からの入出力を与える半無限パス tail を挿入する. グラフ上のある tail から出力を得るために, これ以外の tail から毎時刻 1 の入力を与えることを考える. このときの時刻無限大での出力, その散乱を考察する. また与えられた条件下で出力が大きくなるグラフを構成したい.

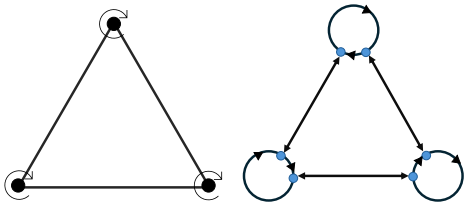


図 1: 膨張変形: 膨張は次のような変形である
頂点 v を v に接続する辺で置き換え新たな頂点とする. 置き換えた頂点同士をローテーションに従って有向辺で接続する. もとのグラフの隣接関係が保たれるように頂点を対称有向辺で結ぶ

【方法】先行研究 [3] によって散乱行列 S の具体的な表示が与えられている. S はローテーション付きグラフの沿側閉歩道に依存する行列であり, 量子ウォーカーは与えられた入力が接続する沿側閉歩道内にしか存在しない. したがってグラフ構造のうち, 沿側閉歩道内の構造について考察する.

【結果】量子ウォークの出力 τ を沿側閉歩道 f, 量子コイン C の関数で表した.

Proposition 1. 沿側閉歩道上で出力 *tail* 以外の *tail* から時刻毎に 1 を入力する. 時刻無限大で出力 τ は, 行列 C の 1,1 成分 a, C の行列式に -1 をかけた ω, f の長さ $|f|$, *tail* の数 k, 沿側閉歩道上での *tail* 同士の距離 *dist* を用いて以下のように表すことができる.

$$\tau = \frac{(1-|a|^2)^2}{|1-a^k\omega^{|f|}|^2}\left|\sum_{l=0}^{k-1} a^l w^{dist\{-(l+1),0\}}\right|^2$$

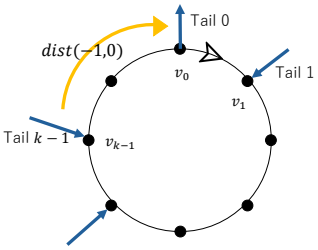


図 2: 沿側閉歩道 f の構造: dist$(-l, 0)$ は v_{k-l} から v_0 の f に沿った距離を表し, dist$(0, 0) = |f|$ と定義する

【考察とまとめ】この表示によって, 量子コイン C と沿側閉歩道 f が出力に与える影響が分かった. 量子コイン C が与えられたとき, 出力を最大にするような f の構造を考える. あるいは C と f の組み合わせによって, 達成可能な出力最大値を考える, といったことができる. 現在 k を固定したときの具体的な例について研究を進めている.

参考文献

[1] M. Naruse et al. Nano communication networks 2. p. 189–195, 2011.

[2] M. Ohtsu et al. *Offshell archive: 2304O.001.v1*, 2013.

[3] Yu. Higuchi and E. Segawa. Quantum walks on graphs embedded in orientable surfaces. *arXiv:2402.00360*, 2024.

© 2025年 応用物理学会

ドレスト光子フォノンの移動チャンネル間の相関

Correlation among channels of dressed-photon-phonon transfer

ドレスト光子[1]，横浜国大[2]，Middenii[3]，工学院大[4]，（株）リコー[5]

○大津元一[1]，瀬川悦生[2]，結城謙太[3,4]，齋藤正顕[4]，三宮俊[5]

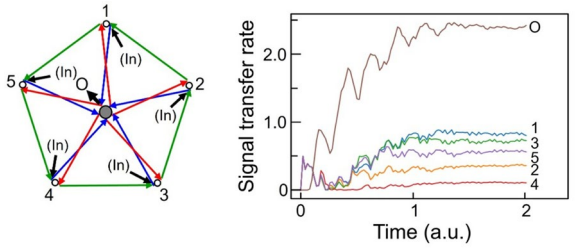
Res. Origin Dressed Photon[1], Yokohama Ntnl. Univ[2], Middenii[3], Kogakuin Univ.[4], Ricoh Co., Ltd.[5]

°Motoichi Ohtsu[1], Etsuo Segawa[2], Kenta Yuki[3,4], Seiken Saito[4], Suguru Sangu[5]

E-mail: ohtsu@rodrep.or.jp

【まえがき】ドレスト光子フォノン（DPP）が入力端子としての複数の小型ナノ寸法粒子（NP:NP_I）から、その中心の出力端子としての大型 NP（NP_O）へと移動する際（図 1a）、移動経路には明歩道と暗歩道があることをこれ迄に量子ウォーク（QW）モデルにより指摘した[1,2]。今回はその時間変化の動特性から DPP 移動経路チャンネル（Ch）間の相関を評価した。

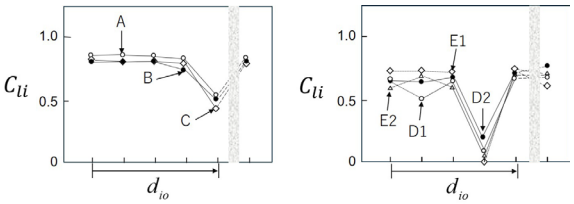
【方法】上記の明歩道、暗歩道は定常状態の特性を議論するための分類であり、動特性では両者は混在する。これに留意して DPP の移動流量の時間変化を数値計算し（図 1b）、次の値を求めた：(1) 各入力 Ch の DPP 移動流量の間の相関。(2) 各入力 Ch の DPP 移動流量と出力 Ch からの流出流量の間の相関。



(a) (b)

図 1　配置と時間変化の例

【結果】図 2（a）、（b）は各々連結スポーク数 n_{con} が奇数、偶数の場合、入力 Ch *1* とそれ以外の 4 つの入力 Ch *i*（=1-5, ≠ *1*）の間の相互相関の平均値 C_{1i} である。この横軸は入出力 Ch 間の距離 d_{io} である。



(a) (b)

図 2　入力 Ch 間の相関の平均値 C_{1i}。

（a）n_{con}=5（A）、3（B）、1（C）。（b）n_{con}=4（D）、2（E）。

右端：入出力 Ch 間の相関。d_{io} は入出力間距離。

【考察】出口から遠い入力 Ch は他の入力 Ch との相関が小さい。これは図 2a、b に共通する。図 2b 中の E1、E2 では入力 Ch4 は他の Ch との相関が小さい。これは暗歩道に含まれる入力信号が 4 つに達していることによる。図 2b は暗歩道を含むが、それに含まれる入力 Ch は明歩道に含まれる入力 Ch とも DPP 信号を授受し、相関を生じる。即ちこれらの歩道は混在して動特性を決め、自律性を発揮すると考えられる。

【まとめ】DPP 移動の動特性に関するチャンネル間の相関を解析し、複雑系システムとしての DPP の流れの特性と出力信号値を提示した。

【文献】1) M.Ohtsu, et al, in *Off—shell Archive* Offshell: 2501O.001.v1 (January 2025).

DOI 10.14939/2501O.001.v1

2）大津他,「ドレスト光子フォノンの移動の明歩道と暗歩道」、第 72 回応物講演会（2025 年 3 月）講演番号 16p-K508-5

© 2025年 応用物理学会

ドレスト光子高励起状態の時空間ダイナミクスの可視化

Visualization of Spatiotemporal Dynamics of Highly-Excited States of Dressed Photons

(株) リコー[1]　○三宮 俊[1]

Ricoh Co., Ltd.[1]

E-mail: suguru.sangu@jp.ricoh.com

1. はじめに

ドレスト光子を介在した幾つかの興味深い物理現象が報告されている。間接型半導体であるシリコンによる発光素子の作製では，アニール処理を光照射下で行うことによりドーパントであるボロンの自律的な構造形成が実験的に観測されている[1]。この自律性に代表される特異な物理現象では，ドレスト光子の物質系内への閉じ込め機構と外部への散逸機構が重要な役割を担っている。著者らは複数のドレスト光子を物質系内にもつ高励起状態が外部とのエネルギーのやり取りを活性化させる起源ではないかとの予測のもと，散逸過程を顕わに表現し得る方法を探求し，最近は特にドレスト光子の過渡応答特性に注目し解析を進めている。本発表では，ドレスト光子の個数で分類した基底状態[2]について，空間分布の動的挙動を可視化する方法を検討した結果について報告する。

2. ドレスト光子空間分布の可視化

量子密度行列を用いた数値シミュレーションにより，離散ノード間のドレスト光子の過渡応答を算出し，各ノードにおけるドレスト光子個数すなわち生成・消滅演算子の行列積の動的変化を可視化した。計算結果の一例として，Fig. 1 に 6 個のノードを直線的に配置した系におけるドレスト光子個数をカラーマップとして表示した。Fig. 1(a)および(b)はドレスト光子個数の立上りのある瞬間の状態であり，エネルギーの差異により表現した不純物（中央の一対のノード）の位置において 4 つのドレスト光子を有する基底状態が強く励起されている様子を確認できる。Fig. 1(c)は左から 4 つ目のノードにおけるドレスト光子個数の時間発展をグラフ化したものであり，ドレスト光子の個数を変える，すなわち散逸をともなう遷移が幾つかのノードにおいて相関をもって発言していることが推察される。講演では，高励起状態の空間分布と散逸過程の関係性について解析を深め，エネルギー散逸を担う基底状態の顕在化を試みるとともに，不純物の自律的構造形成との因果について言及したい。

参考文献

[1] M. Ohtsu, *Silicon Light-Emitting Diodes and Lasers: Photon Breeding Devices Using Dressed Photons (Nano-Optics and Nanophotonics)* (Springer, 2016).
[2] M. Gross and S. Haroche, Phys. Rep. 93 (1982) 301.

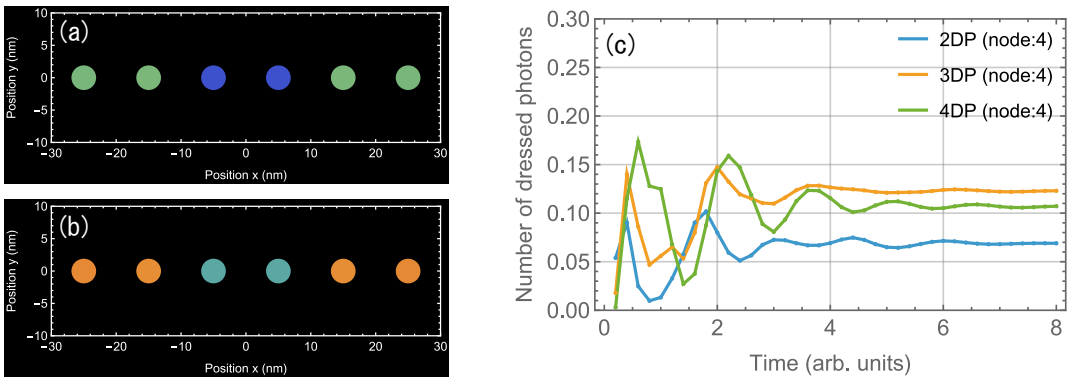


Fig. 1: ドレスト光子個数の空間分布：(a)DP2 個の状態，(b)DP3 個の状態、および時間発展（4 番目のノード）

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.12 Semiconductor optical devices

[8p-N206-1~15] 3.12 Semiconductor optical devices

[8p-N206-1]
Effect of polygonal approximation of a circular microcavity on the resonance modes

○Takehiro Fukushima[1] (1.Okayama Pref. Univ.)

[8p-N206-2]
Effect of Shielding Substituents on Performance of Blue Thermally Activated Delayed Fluorescent Molecules

○(D)Gerardus Iswara Lestanto[1], Debasish Barman[1], Hajime Nakanotani[2], Chin-Yiu Chan[3], Chihaya Adachi[1] (1.Kyushu University, 2.Hokkaido University, 3.City University of Hong Kong)

[8p-N206-3]
Fourfold Repetition Frequency in Multi-Stacked Quantum Dots Mode-Locked Laser Diode Using Saturable Absorbers

○Satoshi Yanase[1,2], Kouichi Akahane[2], Atsushi Matsumoto[2], Toshimasa Umezawa[2], Naokatsu Yamamoto[2], Tomohiro Maeda[1,2], Hideyuki Sotobayashi[1] (1.Aogaku Univ., 2.NICT)

[8p-N206-4]
MEMS Tunable 795 nm VCSEL for Chip Scale Atomic Clock

○ISLAM MOHAMMAD SHAFIQUL[1], Mohammed Saad Khan[2], Yoshitaka Oiso[1], Keiji Isamoto[2], Hiroshi Toshiyoshi[3], Nobuhiko Nishiyama[1] (1.Institute of Science Tokyo, 2.santec OIS Corporation, 3.The University of Tokyo)

[8p-N206-5]
Optical coupling between InP-based membrane lasers and Si waveguides using coupled crossover waveguides

○(D)Yoshiho Maeda[1,2], Hironobu Yoshimi[1], Yuma Tachizaki[1], Shinji Matsuo[2], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.NTT corp.)

[8p-N206-6]
Characterization of surface-illuminated pin photodetectors with Ge epitaxial layer on Si

○(M2)Ryoya Ogura[1], Naoki Hamada[1], Soki Matsushita[1], Jose A. Piedra- Lorenzana[1], Takeshi Hizawa[1], Toshimasa Umezawa[2], Naokatsu Yamamoto[2], Kouichi Akahane[2], Yasuhiko Ishikawa[1] (1.Toyohashi Univ. Tech., 2.NICT)

[8p-N206-7]
High-power tolerance of InGaAs/InP photodiode for 200 GBaud applications.

○Yuki Yamada[1], Ikue Hiraoka[1], Fumito Nakajima[1] (1.NTT Device Technology Labs.)

[8p-N206-8]
Optimization of the Multiplication Layer Thickness in ZnSe-Based Organic-Inorganic Hybrid UV APDs

○Yuta Sakaguchi[1], Yamato Furukawa[1], Arisa Hirata[1], Shou Asai[1], Tomomi Wakahata[1], Tomoki Abe[1], Kazuaki Akaiwa[1], Kunio Ichino[1] (1.Tottori Univ.)

[8p-N206-9]
Investigation of optical wireless power transfer using InGaP module

○(M1)Gin Hirano[1], Haruto Sato[1], Junichi Suzuki[1], Moeka Chiba[1], Reo Aoyama[1], Yuto Kaneko[1], Ryoga Kakiuchi[1], Shion Kosugi[1], Ryusei Takahashi[1], Riku Maeno[1], Masaki Ayukawa[2], Masaki Maeda[2], Kazuyuki Iizuka[2], Toshihiko Fukamachi[2], Koichi Naniwae[2], Kouichi Akahane[3], Shiro Uchida[1] (1.Chiba Tech., 2.Ushio Inc., 3.NICT)

[8p-N206-10]

Effect of water flow in underwater optical wireless power transmission

○(M2C)JIKUN LI[1], Shunsuke Kawamura[1], Hayuma Yatsugi[1], Shuhei Takahashi[1], Gin Hirano[1], Ryusei Takahashi[1], Shiro Uchida[1] (1.Chiba Tech)

[8p-N206-11]

Search for Efficient Hole Transport Layer for Sputter-Deposited $BaSi_2$ Solar Cells

○(D)Md Ariful Islam[1], Yuka Fukaya[1], koki Hayashi[1], Mizuki Hirai[1], Yoichiro Koda[2], Masami Mesuda[2], Kaoru Toko[1], Takashi Suemasu[1] (1.University of Tsukuba, 2.Tosoh Corp.)

[8p-N206-12]

Investigation of hybrid integration technique with transfer printing assisted by atmospheric plasma treatment

○(M2)Yuma Tachizaki[1], Akinari Fujita[1], Takahiro Ito[1], Shuma Ito[1], Takeru Yambe[1], Yasuhiko Arakawa[2], Yasutomo Ota[1] (1.Keio Univ., 2.Nanoquine, The Univ. of Tokyo)

[8p-N206-13]

Design of Optical Frequency Comb Device based on TFLN Waveguides

○Ryosei Kitahara[1], Shoji Hachuda[1], Shunsuke Sakamoto[1], Toshihiko Baba[1] (1.Yokohama Nat'l Univ.)

[8p-N206-14]

Optical Control of Valley-Selective Dynamics in Tin Sulfide Monolayer

○(PC)Arqum Hashmi[1], M. Umar Farooq[2], Mizuki Tani[3], Kazuhiro Yabana[4], Tomohito Otobe[3], Kenichi L. Ishikawa[1] (1.UTokyo, 2.SUSTech, 3.KPSI, QST, 4.Univ. of Tsukuba)

[8p-N206-15]

A Dual-Robot OWPT System with Obstacle Avoidance Based on Depth Sensing

○(DC)SHAOPU ZHOU[1], WENLONG YI[1], ZHAOYANG XING[1], TAKEO MARUYAMA[1] (1.Kanazawa Univ.)

円形微小共振器の多角形近似が共振器モードに与える影響

Effect of polygonal approximation of a circular microcavity on the resonance modes

岡山県立大　○福嶋 丈浩

Okayama Pref. Univ., ○Takehiro Fukushima

E-mail: fuku@c.oka-pu.ac.jp

【はじめに】半導体プロセス技術の進歩により，様々な形状を有する二次元微小共振器半導体レーザが製作され，発振モードが調べられている [1-3]．製作のコストを抑えるには，共振器の曲面形状を少ない点数で多角形近似することが有効であると考えられる．本研究では，円形共振器に対して多角形近似が共振器モードに及ぼす影響を数値計算により調べた．
【解析モデル】モード解析には有限要素法に基づく解析ソフトウエア COMSOL Multiphysics® を用いた．まず，半径 2.5 μm の円形共振器の形状を正 N 角形の内接多角形で近似した．共振器内部の屈折率は半導体レーザを想定して 3.3 とし，共振器外部の屈折率は真空を想定して 1.0 に設定した．共振器材料による損失はゼロとした．解析対象とするモードは 350 THz（GaAs 半導体レーザの発振周波数）付近のウイスパリングギャラリーモード（WG モード）とした．
【解析結果】多角形の頂点数 N と WG モードの共振周波数実部 f_r の関係を図 1 に示す．なお，赤線は円形共振器の f_r の値を示しており，挿入図は N=100 における共振器モードの電場ノルムの分布を表している．頂点数 N が小さくなると共振周波数が急激に高くなる様子がわかる．これは頂点数 N が小さくなることで内接多角形の外周長が短くなり，共振器の外周付近に形成される WG モードの定在波の波長が短くなるためであると考えられる．次に，頂点数 N と WG モードの共振周波数虚部（モード損失）f_i の関係を図 2 に示す．赤線は円形共振器の f_i の値を示しており，挿入図はそれぞれ N=10 と N=34 における共振器モードの電場ノルムの分布を表している．頂点数 N が小さくなると不規則な増減を繰り返しながらモード損失が増大することが明らかになった．損失が大きい共振器モードの電場分布を見ると，共振器の内側に放射型モードの分布が現れている．このことから，WG モードが放射型モードと結合することにより損失が生じていると考えられる．また，頂点数 N によって異なった放射型モードと結合が生じていることが確認できる．結合を起こす放射型モードはそれぞれ異なったモード損失を持っており，WG モードとの結合の強さも異なる．その結果，N に対して損失が不規則に変化すると考えられる．今回解析を行った円形共振器に対しては，頂点数 N がおよそ 70 を下回るとモード損失の増加が顕著になることが示された．

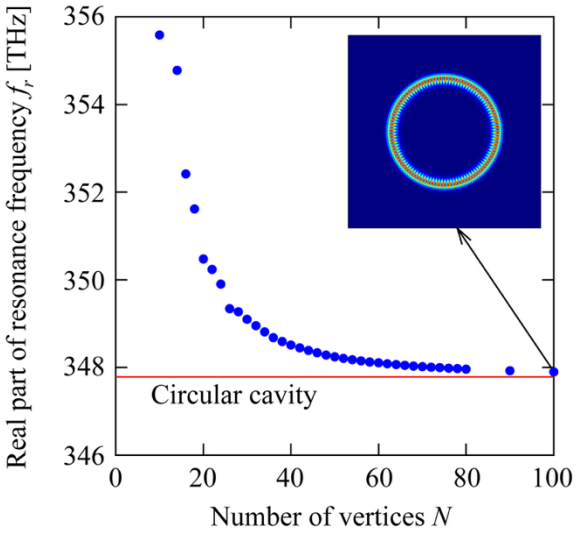


Fig. 1 Number of vertices N versus real part of resonance frequency f_r.

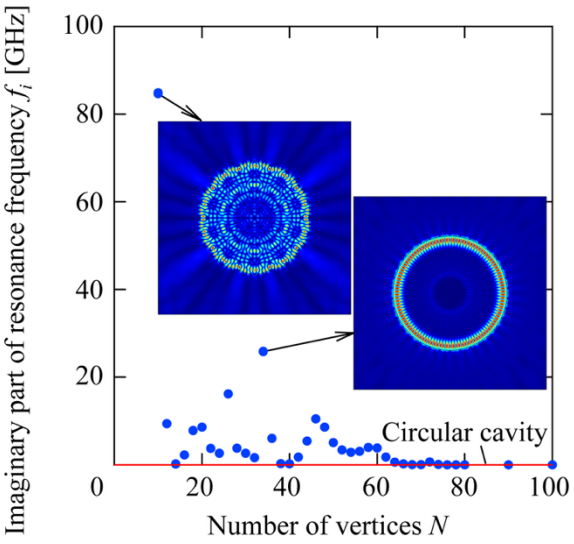


Fig. 2 Number of vertices N versus imaginary part of resonance frequency f_i.

【参考文献】　[1] T. Fukushima *et al*., “Stadium and quasi-stadium laser diodes (invited paper),” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. **10**, pp. 1039-1051, 2004. [2] 福嶋丈浩, ”解説　二次元共振器半導体レーザ”, 電子情報通信学会誌, vol. **94**, no. 4, pp. 323-328, 2011. [3] T. Harayama *et al.*, “Two-dimensional microcavity lasers,” *Laser & Photonics Reviews*, vol. **5**, pp. 247-271, 2011.

© 2025年 応用物理学会

Effect of Shielding Substituents on Performance of Blue Thermally Activated Delayed Fluorescent Molecules

Gerardus Iswara Lestanto[1], Debasish Barman[1], Hajime Nakanotani[2,*], Chin-Yiu Chan[3,*], and Chihaya Adachi[1,*]

[1]Center for Organic Photonics and Electronics Research (OPERA), Kyushu University, Japan, [2]Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University, N20W10, Kita, Sapporo 001-0020, Japan,[3]Department of Materials Science and Engineering, City University of Hong Kong, China,

E-mail: iswara.lestanto@adachilab.com

＜Introduction＞

In designing efficient and stable blue thermally activated delayed fluorescence (TADF) molecules aimed for high-performance organic light-emitting diodes (OLEDs), accelerating the reverse intersystem crossing rate constant (k_{RISC}) is the primary factor in reducing triplet population during OLED operation. However, despite significant efforts to improve k_{RISC}, the device operational lifetimes of blue TADF-OLEDs remain insufficient for commercial viability. On the other hand, another critical issue originates from intermolecular interactions during electrical excitation, leading to unwarranted degradation events such as exciton-polaron annihilation. Thus, “shielding” substituents are incorporated to protect the emitter molecules from unwarranted intermolecular interactions. To address this issue, we designed six TADF emitters having progressively bulkier shielding substituents: 1Ph, 2Ph, 3Ph, 4Ph, CzPh, and m2PhCz (Fig.1). In this work, we selected 1Ph as a reference compound to evaluate the shielding effect on optical and electrical properties. Notably, this approach proved effective, as device lifetimes significantly improved from 3Ph to 4Ph, CzPh, and m2PhCz while maintaining nearly the same k_{RISC}.

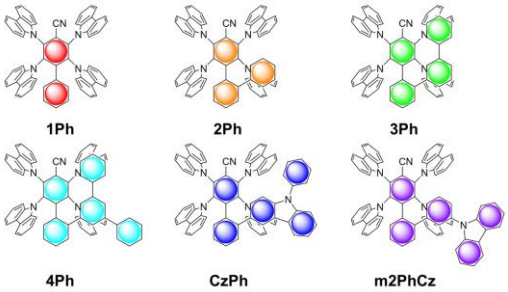


Fig. 1 The molecular structures of **1Ph**, **2Ph**, **3Ph**, **4Ph**, **CzPh**, and **m2PhCz**.

＜Result and Discussion＞

The 4CzBN derivatives were doped into an mCBP matrix (5 mol%) to study their solid-state photophysical properties. The fundamental PL properties are summarized in Table 1. The emission peaks at 300 K and 77 K resulted in minor S_1-T_1 energy gap (ΔE_{ST}) variations (0.07–0.15 eV). Among the emitters, 3Ph showed the highest Φ_{PL} (91%), followed by 2Ph (86%), m2PhCz (85%), 4Ph (78%), CzPh (73%), and 1Ph (70%). The enhancement of Φ_{PL} in other emitters compared to 1Ph is attributed to smaller ΔE_{ST}, higher oscillator strength, better triplet exciton confinement, and reduced concentration quenching. The 1Ph and 2Ph films exhibited the highest k_{RISC} values (1.88×10^5 s^{-1} and 1.64×10^5 s^{-1}, respectively), with minor variations among other derivatives (1.35×10^5 s^{-1}, 1.25×10^5 s^{-1}, 1.45×10^5 s^{-1} for 3Ph, 4Ph, and m2PhCz, respectively) except for CzPh4CzBN (0.69×10^5 s^{-1}). Overall, substituent expansion effectively enhances photophysical properties.

Next, we evaluated the OLED performances of the OLEDs based on 4CzBN derivatives. The EL spectra followed PL trends, with Ph4CzBN exhibiting the most blueshifted emission peak (477 nm). The OLED using m2PhCz showed the highest EQE (16.9%), followed by 2Ph (16.1%), 3Ph (14.5%), 4Ph (13.6%), CzPh (12.9%), and 1Ph (12.2%). The EQE rolloff at 1,000 cd m^{-2} roughly aligned to the k_{RISC} values in the doped films. However, interestingly, the operational lifetimes were not directly proportional to their k_{RISC}. The CzPh-based OLEDs exhibited the longest operational lifetime (100 h) despite having the lowest k_{RISC}, while the 2Ph-based OLED showed the shortest (17 h). X-ray analysis revealed that larger substituents correlated with longer operational lifetimes, starting from 3Ph (65 h), m2PhCz (80 h), 4Ph (91 h), and CzPh (100 h) due to enhanced shielding effects.

<Conclusion>

In summary, we found that the OLED stability showed a significant improvement starting from 3Ph into m2PhCz, 4Ph, and CzPh, while these molecules possess comparable k_{RISC} values. We demonstrated that the enhanced device stability was closely related to the shielding effect of the substituent groups in the 4CzBN derivatives. These findings highlight the impact of substituent size on OLED efficiency and stability.

© 2025年 応用物理学会

複数可飽和吸収体を用いた 4 逓倍多重積層量子ドットモードロックレーザ

Fourfold Repetition Frequency in Multi-Stacked Quantum Dots Mode-Locked Laser Diode Using Saturable Absorbers

青学大理工 [1], NICT[2], ○簗瀬 智史 [1,2], 赤羽 浩一 [2], 松本 敦 [2], 梅沢 俊匡 [2], 山本 直克 [2], 前田 智弘 [1,2], 外林 秀之 [1]

Aogaku Univ.[1], NICT [2], ○Satoshi Yanase[1,2], Kouichi Akahane[2], Atsushi Matsumoto[2], Toshimasa Umezawa[2], Naokatsu Yamamoto[2], Tomohiro Maeda[1,2], Hideyuki Sotobayashi[1]

E-mail: d5624008@aoyama.jp

【はじめに】 モードロックレーザダイオード(MLLD)は、光導波路に可飽和吸収体(SA)を設けて縦モードを同期させることで、短パルスを生成することができる。光スペクトルは安定な周波数特性を示すコム形状となることから、測距やイメージングなどの応用研究が行われている[1]。近年では通信分野への応用も期待されており、ビート信号を生成する際に光周波数コムデバイスである MLLD を用いることで、位相ノイズや周波数ドリフトの低減が実現されている[2]。本研究では、SA を導波路に等間隔に 3 つ配置した MLLD を作製し、特性評価を行った。

【実験】 試料の成長は分子線エピタキシー装置を用いて InP(311)B 上で行った。InP(311)B 上に 100 nm の n-InP バッファー層、50 nm の InGaAlAs 光導波路層を成長後、歪補償技術を用いて InAs 量子ドットを 15 層積層させた。その後、50 nm の InGaAlAs 光導波路層、1600 nm の p-InP、150 nm の p-InGaAs コンタクト層を成長させてレーザ構造を形成した。MLLD 構造の作製には紫外線露光装置と $SiCl_4$ ガスによる ICP-RIE 装置を用い、リフトオフプロセスにより、幅 4 μm の電極を形成した。このとき、導波路に長さ 10 μm の SA 領域を利得部とのギャップを 5 μm として等間隔に 3 つ設けた。レーザ共振器はへき開により共振器長を 600 μm とし、低屈折率材料 SiO_2 と高屈折率材料 TiO_2 による高反射コーティングを施した。作製したデバイスは室温において SA 領域への印加電圧に対する I-L 特性と、SA 領域に 0.5 V を印加して利得部に 110 mA の連続波電流を注入したときのスペクトル特性を評価した。

【結果】 図 1 に SA 領域への電圧を変化させたときの I-L 特性、図 2 に Gain 領域への注入電流を 110 mA、SA への印加電圧を 0.5 V とした時のスペクトル特性を示す。図 1 より SA への印加電圧が増加するほどしきい値電流が低下した。ただし、SA への印加電圧が 0 V の時のしきい値電流が 91 mA と大きな値となっており、低電流動作のためにより大きな利得を持つ材料が必要である。また、図 2 のスペクトル特性の縦モード間隔は 2.24 nm（279 GHz に対応）であった。SA を持たない共振器長 600 μm の縦モード間隔の理論値は 5.6 nm（70 GHz に対応）であるため、4 倍の値になったことがわかる。今後は通信応用を目指して、光パルス形状や線幅の評価を行っていく。

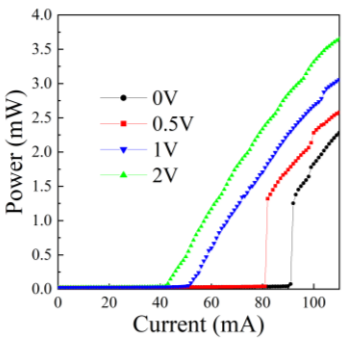


Fig. 1 I-L characteristics for each SA voltage.

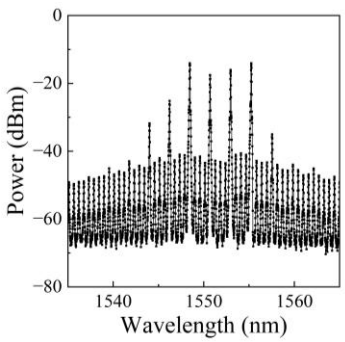


Fig. 2 Output spectrum of MLLD with three equally spaced SAs.

参考文献[1] T. Fortier *et al*., Commun. Phys. 2, 153 (2019) [2] J. Xiao *et al*., Adv. Condens. Matter Phys. (2020)

© 2025年 応用物理学会

MEMS Tunable 795 nm VCSEL for Chip Scale Atomic Clock

Institute of Science Tokyo [1], santec OIS Corporation [2], The University of Tokyo [3]

◦Islam Mohammad Shafiqul [1], Mohammed Saad Khan [2], Yoshitaka Oiso [1], Keiji Isamoto [2], Hiroshi Toshiyoshi [3], Nobuhiko Nishiyama [1] **E-mail: shafiqul.i.aa@m.titech.ac.jp**

1.Introduction

Compact laser sources have become an indispensable and ideal component to incorporate a coherent population tapping (CPT) based chip scale atomic clock (CSAC) [1,2]. The implementation of CPT resonance is effective to generate a signal as a frequency reference, as the emission wavelength of the laser should be same as the characteristic absorption wavelength of alkali atoms. Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) is used mostly in the atomic clock for CPT excitation as an optical source due to various advantages such as reliability, cost effectiveness, and wide tunability [3]. However, limited wavelength tuning range and fixed resonance of optical cavity in VCSEL are not effective for developing CSAC applications. To place a movable reflector in VCSEL, it is possible to mitigate the limitation of wavelength tuning. In this work, we established a 795 nm wavelength range tunable VCSEL utilizing micro electro-mechanical system (MEMS) as a movable reflector, which can be dramatically tuned as desired [4].

2. MEMS tunable 795 nm VCSEL

Fig.1 shows a schematic view of the introduced MEMS-tunable VCSEL which is based on previously reported structure [5] and designed for rubidium (Rb) D_1 (around 795 nm) absorption line in CSAC applications. The fabrication of tunable VCSEL consists of a half VCSEL chip with AlGaAs-based quantum wells and Distributed Bragg Reflector

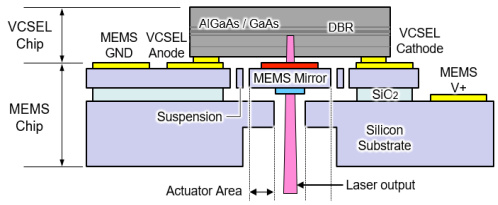


Fig.1. Schematic view of MEMS tunable VCSEL

(DBR) and bonded with a MEMS mirror chip to create an optical cavity path for stimulating emissions. The half VCSEL chip has an active region with strained multi-quantum wells gain medium. The dielectric multilayer MEMS mirror chip is mounted on a mechanical suspension that can be displaced through electrostatic force of a DC voltage applied to the silicon membrane. The movable reflector changes the length of lasing resonant cavity to adjust the wavelength of emission spectrum. The technique ensures that the wavelength of VCSEL can be tuned by applying voltage to the MEMS.

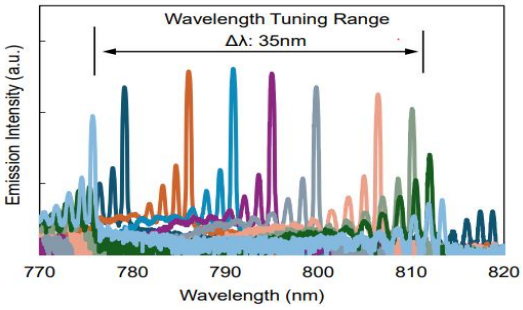


Fig.2. Emission spectrum of MEMS tunable VCSEL.

Fig.2 shows the MEMS-tunable VCSEL emission spectrum for several applied DC voltage. The overall wavelength tuning range of the device around 35 nm is achieved. To meet the requirement wavelength for Rb D_1 line transition, it can be adjusted single mode wavelength at 795 nm.

3. Conclusion

We demonstrated the MEMS tunable VCSEL, which confirmed the emission wavelength at 795 nm and wavelength tuning range of 35 nm. The results indicate that 795 nm VCSEL is suitable for Rb transition and CPT resonance effect in CSAC applications.

Acknowledgment

This work supported by R&D for expansion of radio wave resources (project-JPJ000254) from the ministry of internal affairs and communication, and ARIM (25IT0015) from the ministry of education, culture, sport, science and technology, Japan.

Reference

[1] E. Arimondo, Progress in Optics, 35, Elsevier, 1996, 257–354.

[2] S. Knappe, Microsystems, Elsevier, 2008, 571-612.

[3] K. Iga, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, 08PA01, July 2018.

[4] V. A. Menon et al., 2024 IEEE 37th Int. Conf. MEMS,

[5] M. S. Khan et al., J. Opt. Microsystems, 1, 034503, 2021

© 2025年 応用物理学会

結合交差導波路構造を用いた InP 系薄膜レーザと Si 導波路の光結合

Optical coupling between InP-based membrane lasers and Si waveguides using coupled crossover waveguides

慶応理工 [1]，日本電信電話株式会社 [2] ○前田 圭穂 [1,2]，吉見 拓展 [1]，立崎 裕真 [1]，松尾 慎治 [2]，太田 泰友 [1]

Keio Univ. [1], NTT Corporation [2]

○Yoshiho Maeda [1,2], Hironobu Yoshimi [1], Yuma Tachizaki [1], Shinji Matsuo[2], and Yasutomo Ota[1]

E-mail: yoshiho.maeda@keio.jp, yoshiho.maeda@ntt.com

はじめに　AI 需要の爆発的な増大を背景に、光インターコネクト技術への期待と要求が急速に高まっている。その中で我々は、これまで柔軟かつ高品質な異種材料集積を可能にする転写プリント法 [1] に注目し、小型・高速、低消費電力な光送受信器へと応用できる Si 基板上 InP 系薄膜光デバイス [2] を実現してきた [3]。転写プリント法では、転写時に位置ずれを伴うことが多く、高い位置ずれ耐性を有する光結合構造の活用が求められる。先行研究では、実効屈折率が同じ 1 対の直線導波路を特定の角度で立体交差させた、高い位置ずれ耐性を有する方向性結合器が論じられているが [4-6] 、実験的な実証はあまり進んでいない。今回、我々は転写プリント法を用いて InP 系薄膜レーザを Si 導波路上に転写することで交差導波路構造を作製した。その結果、レーザ出射光の Si 導波路への光結合を観測することに成功したので、これを報告する。

実験結果　作製したデバイスの光学顕微鏡像を Fig.1 (a) に示す。Si 導波路（厚さ 220 nm, 幅 440 nm）の直線部分と薄膜レーザの出力 InP 導波路部（厚さ 340 nm, 幅 500 nm）が$\theta = 10.5^\circ$ で交差するように転写集積されている。SiO2 クラッドは化学機械研磨によって厚さ 70 nm 程度に薄層化されている。Fig. 1 (b) は各θに対する光結合効率を有限差分時間領域法によって計算した結果である（波長 $\lambda = 1290$ nm）。今回の構造では、θ = 9-10° 周辺で強い光結合が得られることが分かる。Fig. 1 (c), (d) は作製した薄膜レーザにバイアス電流を印加したときの赤外線カメラ像および Si 導波路からの出射光のスペクトル測定結果である。発振波長 1293 nm のシングルモード発振スペクトルが、Si 導波路からの出射光として確認された。詳細については当日報告する。

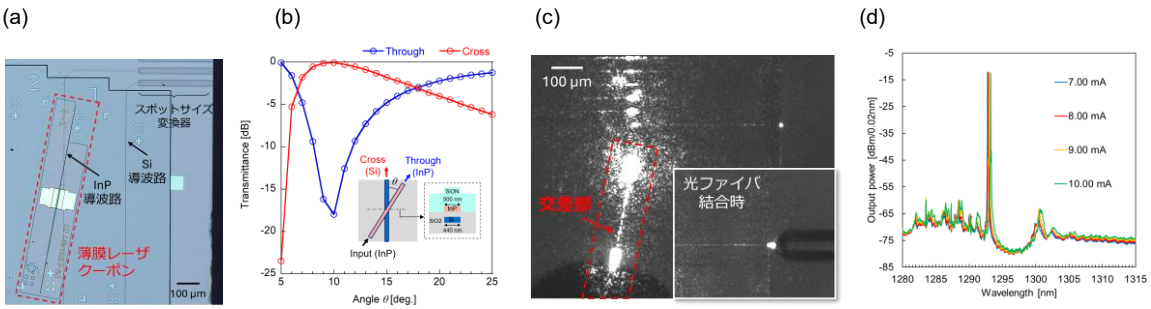


Fig.1 (a) Microscope image of a membrane laser transfer-printed on a crossing Si waveguide. (b) Simulated transmittance of the investigated crossed waveguide coupler. (c) IR camera image of laser output light. (d) Measured spectra from the Si waveguide.

参考文献 [1] G. Roelkens, et. al., *IEEE JSTQE* 29.3 1-14 (2022). [2] S. Matsuo, et al., Opt. Exp., 22, 12139, (2014). [3] Y. Maeda, et al., JLT., 41, pp. 3866-3873, (2023). [4] S. Bandyopadhyay, et al., arXiv:2110.12851 (2021). [5] 岡山 秀彰他、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 17p-K305-7 (2025). [6] K. Takada, et al., Opt. Exp., 33, 22769-22779 (2025).

© 2025年 応用物理学会

Si 上 Ge エピタキシャル層を用いた表面入射型 pin 受光器の評価

Characterization of surface-illuminated pin photodetectors with Ge epitaxial layer on Si

豊橋技科大[1]，NICT[2] ○(M2)小椋 亮弥[1]，(M1)濵田 直希[1]，(M1)松下 宗暉[1]，Jose A. Piedra-Lorenzana[1]，飛沢 健[1]，梅沢 俊匡[2]，山本 直克[2]，赤羽 浩一[2]，石川 靖彦[1]

[1]Toyohashi Univ. Tech., [2]NICT ○Ryoya Ogura[1], Naoki Hamada[1], Soki Matsushita[1], Jose A. Piedra-Lorenzana[1], Takeshi Hizawa[1], Toshimasa Umezawa[2], Naokatsu Yamamoto[2], Kouichi Akahane[2], Yasuhiko Ishikawa[1]

E-mail: ogura.ryoya.oz@tut.jp, ishikawa@ee.tut.ac.jp

1. はじめに

シリコンフォトニクスにおいて、Si 上 Ge エピタキシャル層を光吸収層とする近赤外受光器 (PD) が利用されている。導波路集積型の PD が光通信用に開発されてきたが、自由空間光を受光する表面入射型 PD は通信用途に加え、LiDAR 等の計測技術やセンシング／イメージングにも応用できる。PD の性能として、受光効率、低暗電流、高周波応答が重要である。前回、Si-on-quartz (SOQ) 基板上のひずみ増強 Ge 層をメサ加工した表面入射型 Ge pin PD において、高受光効率と低暗電流を両立できることを報告した[1]。今回は周波数応答の評価を行ったので報告する。

2. サンプル作製

初期基板として貼り合わせ SOQ 基板を用いた。P イオン注入により SOQ 基板の上部 Si(001)層を高濃度 n 型とした後、化学気相成長法により膜厚 500 nm の i-Ge 層 (光吸収層) を 600°C でエピタキシャル成長した。引き続き、Ge 層上に膜厚 120 nm の Si キャップ層を成長した。次に Si キャップ層と Ge 層の上部に B イオンを注入し、縦方向 pin 接合を形成した。反応性イオンエッチングにより、i-Ge 層をメサ構造 (正方形：一辺 10～500 μm) とした。メサ構造を SiO_2 層で埋め込んだ後、Al/Ti 電極の形成を行い、PD とした。参照用に n^+-Si 基板上にも PD を作製した。

3. 結果と考察

波長 1.55 μm、逆バイアス 1V における Ge PD (20 μm 角) の典型的な周波数応答特性を Fig. 1 に示す。3-dB 遮断周波数は、n^+-SOQ 上 PD では約 0.5 GHz、n^+-Si 上 PD では約 0.8 GHz であった。i 層のキャリア輸送に要する遅延時間で決まる 3-dB 周波数の理論値は約 25 GHz であり、測定値は 1 桁以上小さい。RC 遅延が支配的と考えられる。Fig. 2 に n^+-SOQ 上 PD における寄生成分を模式的に示す。電極の接触抵抗 R_c を低減するため、熱処理 (400°C、5 min) を行った。順方向電流から見積った電気抵抗は、n^+-SOQ 上 PD (n^+-Si 上 PD) でおおよそ 2400 (940) Ω から 420 (380) Ω 程度に減少した。しかし、3-dB 周波数の向上は少なく、1 GHz を下回った。応答速度の向上には電極パッド部の電気容量 C_{SiO2} 等の低減が必要と考えられる。

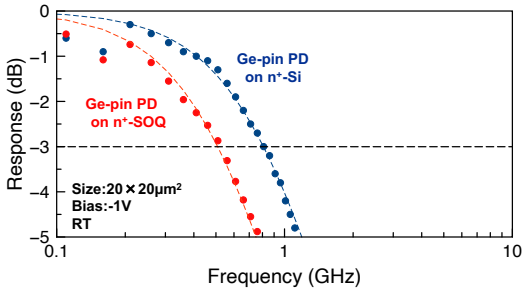


Fig. 1. n+-SOQ および n+-Si 上 Ge PD の典型的な周波数特性

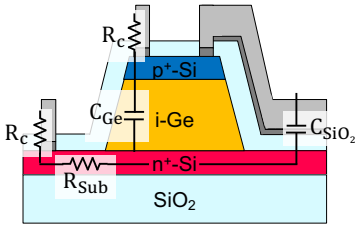


Fig. 2. n^+-SOQ 上 Ge PD の寄生成分の模式図

4. まとめ

作製した Ge PD の 3-dB 遮断周波数は 0.1 GHz 台であった。RC 遅延が支配的と考えられ、寄生容量の低減が必要と考えられる。

謝辞

SOQ 基板は信越化学工業の秋山昌次博士に提供頂いた。本研究の一部は、JSPS 科研費（25H00738 および 25K01289）ならびに村田学術振興・教育財団の助成を受けて実施した。

参考文献

[1] 阿部 他、2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会、16p-K309-4.

© 2025年 応用物理学会

200 GBaud 級 InGaAs/InP 高速フォトダイオードの光強度耐性

High-power tolerance of InGaAs/InP photodiode for 200 GBaud applications.

日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所 [1] ○山田 友輝 [1], 平岡 郁恵 [1], 中島 史人 [1]

NTT Device Technology Labs., NTT Corporation[1], ○Yuki Yamada[1], Ikue Hiraoka[1], Fumito Nakajima[1]

E-mail: yukimv.yamada@ntt.com

1. 背景

高速フォトダイオード(PD)は光通信の高速化に不可欠な技術であり、我々は 200 Gbaud 級通信に向けた PD を報告してきた[1]。デジタルコヒーレントや IMDD 方式において、PD には数 mW 級の入射光強度耐性が求められる。高速化を目的とした PD は素子体積の縮小によって動作帯域を拡張するが、電流密度の上昇により光強度耐性が劣化する課題がある。本研究では、導波路型よりも高い光強度耐性を持つ垂直入射型高速 PD の特性を評価した。

2. 素子構造と高周波特性

図 1 に提案構造の断面図と高周波特性を示す。InP 基板上にエピタキシャル成長した InGaAs 吸収層、InP 走行層、N コンタクト層に三段メサ構造を形成した。300 nm の薄い吸収層と 8 μm の小型の素子径を採用し、165 GHz の動作帯域を実現している[1]。

3. 実験

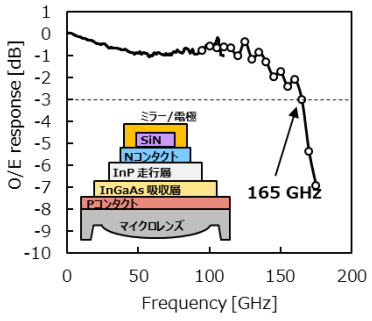
図 2 は、波長 1550 nm における入射光強度と光電流の関係を示す。最大 48 mW の高強度光下でも飽和や故障は見られず、測定結果は受光感度 0.53 A/W に相当する直線と概ね一致した。図 3 は、ヘテロダイン測定で評価した、動作帯域 100 GHz での RF 出力（O/E 応答の絶対値）の電流依存性を示す。高光強度下では一般的に線形性が劣化するが、1 dB 圧縮点は 11 mA で、約 20 mW まで線形性が保たれた。製品化された 200 GBaud 級の InGaAs/InP 導波路型 PD [2]では約 6 mA の 1 dB 圧縮点が報告されているが、本素子の方が優れた光強度耐性を示す。また、本結果は本素子がシステム要求（数 mW）を満たす十分な光強度耐性を備えていることを示す。

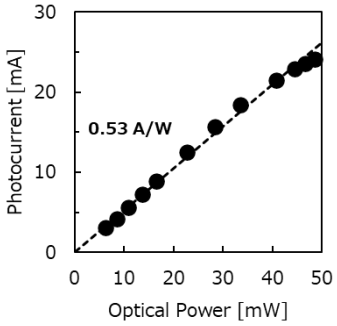
4. 結論

200 GBaud 級の垂直入射型 PD を提案し、実用的な光強度耐性を実証した。本技術は将来の高速光通信実現に有望な技術である。

[1] Y. Yamada, et al., ECOC 2024.

[2] P. Runge, et al., OFC 2021





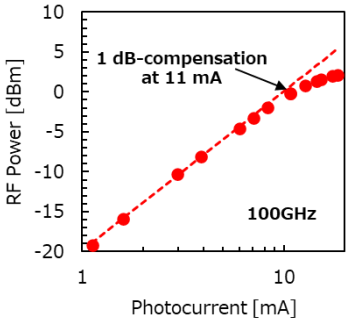


図 1：素子構造と高周波特性　図 2：DC 電流の光強度依存性　図 3：RF パワーの電流依存性

© 2025年 応用物理学会

ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型紫外 APD における増倍層膜厚の最適化

Optimization of the Multiplication Layer Thickness in ZnSe-Based Organic–Inorganic Hybrid UV APDs

鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科
Graduate School of Sustainability Science, Tottori University
○坂口悠太, 古川大和, 平田安里紗, 浅井翔, 若畑朋珠, 阿部友紀, 赤岩和明, 市野邦男
○Y. Sakaguchi, Y. Furukawa, A. Hirata, S. Asai, T. Wakahata, T. Abe, K. Akaiwa, and K. Ichino
E-mail: m24j4028a@edu.tottori-u.ac.jp

[背景]

近年, 紫外光検出器は医療, 天文学などの多くの分野で応用が期待されている. 現在, 紫外光検出器として広く利用されている光電子増倍管は主流であるが応答速度が遅い, 大型で集積化が困難であるという欠点がある. これらの問題を解決するために光電子増倍管に変わる紫外光検出器として紫外アバランシェフォトダイオード(APD)の開発が進められている. 本研究で作製している APD は MBE 装置により成長させた ZnSSe 層に正孔輸送材料である PEDOT：PSS を窓層とした有機無機ハイブリッド型構造であり, 他材料を用いた紫外 APD と比べ, 動作電圧が約 30V と低くブレークダウン直前の暗電流が~1pA/mm^2 と低暗電流である.

本研究では, 先行研究にて増倍層膜厚 0.3μm, 0.5μm で暗電流の低減と増倍率の向上が確認できた窓層エッジ保護プロセス[1]を施した APD の素子を, 増倍層膜厚 0.4μm, 0.6μm, 0.7μm, 0.9μm でそれぞれ作製し, 素子特性を評価することで最適な増倍層膜厚の決定を目指す.

[窓層エッジ保護構造の素子特性評価]

SU-8 による窓層保護膜を有する APD の素子構造を図 1 の挿入図に示す. n-GaAs 基板上に MBE 法を用いて i-ZnSSe/n-ZnSSe/n-ZnSe 層を成長させ, フォトリソグラフィ及びスピンコート法により有機窓層構造を形成した.

図 1 に今回作製した増倍層膜厚 0.6μm の APD 素子の暗電流特性を示す. また図 2(a)に各膜厚ごとの暗電流の比較を示す. 増倍層膜厚 0.6μm の窓層エッジ保護構造 APD 素子のブレークダウン直前の平均暗電流が 6.24×10^{-11}A となり, 他の膜厚と比較しても最も低い値を確認できた.

図 2(b)に各膜厚ごとの増倍率の比較を示す. 増倍層膜厚 0.6μm の窓層エッジ保護構造 APD 素子の最大増倍率は 4112 倍, 平均増倍率は 1750 倍と増倍層膜厚 0.5μm の APD 素子の最大増倍率には及ばないものの, 平均増倍率はいずれの膜厚と比較しても最も良い値を示すことを確認できた.

これらより暗電流特性, 平均増倍率特性の 2 つの特性において最も良い値を示す増倍層膜厚 0.6μm が最適であると決定した.

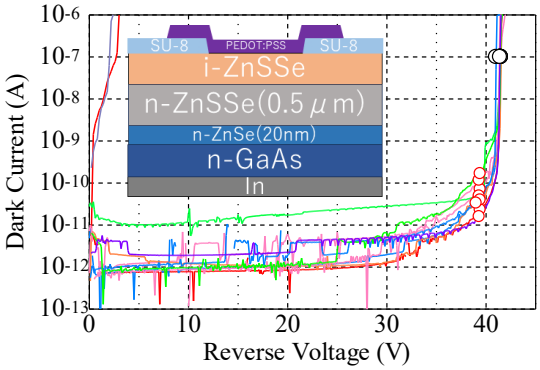


図 1:増倍層膜厚 0.6μm の暗電流特性
窓層エッジ保護構造(挿入図)

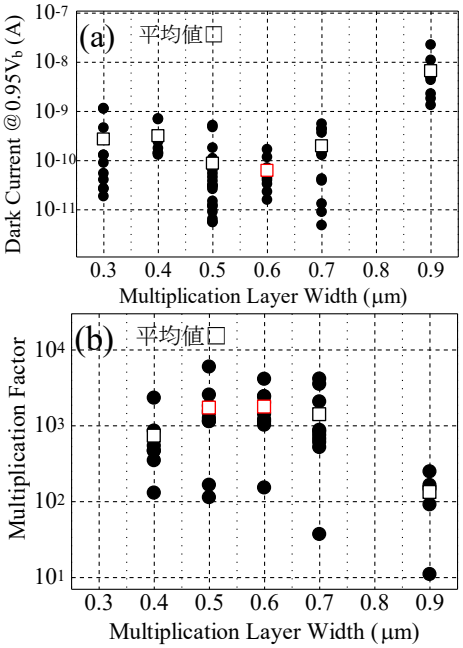


図 2(a):各膜厚ごとの暗電流の比較
(b):各膜厚ごとの増倍率の比較

[謝辞]

本研究は鳥取大学ベンチャービジネスラボラトリーの協力のもとで行った.

本研究は日本板硝子材料工学助成会の助成を受けたものである.

[参考文献]

[1] **坂口悠太, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会**, 19a-A35-4 (2024)

© 2025年 応用物理学会

InGaP モジュールを用いた光無線給電の検討

Investigation of optical wireless power transfer using InGaP module

千葉工業大学[1], ウシオ電機[2], 情報通信研究機構[3] ○(M1)平野 吟[1], 佐藤 温大[1], 鈴木 淳一[1], 千葉 萌翔[1], 青山 怜央[1], 金子 優翔[1], 垣内 凌雅[1], 小杉 汐音[1], 髙橋 龍成[1], 前野 陸[1], 鮎川 将希[2], 前田 正樹[2], 飯塚 和幸[2], 深町 俊彦[2], 難波江 宏一[2] 赤羽 浩一[3], 内田 史朗[1]

Chiba Institute of Technology.[1], Ushio Inc.[2], National Institute of Information and Communications Technology.[3], ○ Gin Hirano[1], Haruto Sato[1], Junichi Suzuki[1], Moeka Chiba[1], Reo Aoyama[1], Yuto Kaneko[1], Ryoga Kakiuchi[1], Shion Kosugi[1], Ryusei Takahashi[1], Riku Maeno[1], Masaki Ayukawa[2], Masaki Maeda[2], Kazuyuki Iizuka[2], Toshihiko Fukamachi[2], Koichi Naniwae[2], Kouichi Akahane[3], Shiro Uchida[1]

E-mail: s21a3120uo@s.chibakoudai.jp

1. 背景

レーザと受光デバイスを用いる光無線給電(Optical Wireless Power Transmission; OWPT)は、従来の電磁誘導方式よりも長距離に電力を給電することが出来る。そのため、家電製品や自動車、水中探査機などへの応用が期待されている。実用化する際、InGaP 単一セルでは 1 W 以上のレーザを照射すると、変換効率が減少すると報告されている[1]。本研究では、実用化の必要性を考慮し、InGaP 太陽電池モジュールを作製し、その光電変換効率を調査したので報告する。

2. 実験方法

図 1 に実験概要図を示す。635 nm のレーザ光を可変 ND フィルタ、フライアイレンズ、15×15 mm のメタルマスク、集光レンズ、フレネルレンズを通過して、3 mm×3 mm の InGaP セルを 9 個搭載した InGaP モジュールに照射した。この時、照射強度 P_{in} と太陽電池最大出力 P_{out} を測定することで、光電変換効率 $\eta_{pv}=P_{out}/P_{in}$ を算出した。

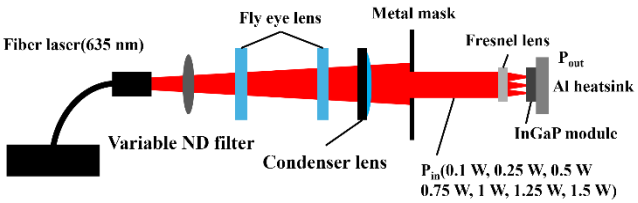


Fig.1. Experimental configuration

3. 結果と考察

図 2 に光電変換効率の結果を示す。0.25 W 照射で、30.3%の光電変換効率が得られた。単一セルと同様に高出力のレーザを照射すると、変換効率が低下していくことが分かった。実用化する際には、高出力時での高い変換効率を維持することが必要である。

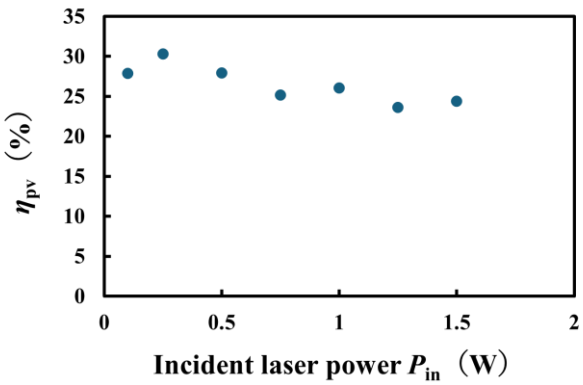


Fig.2. η_{pv} vs Incident laser power P_{in}

参考文献

[1] Y.L. Wong et al., Energies 2022, 15(10), 3690

© 2025年 応用物理学会

水中光無線給電における水流の影響

Effect of water flow in underwater optical wireless power transmission

千葉工業大学◦(M2) 李 紀コン, 川村 駿介, 八次 隼雅, 高橋 周平, 平野 吟, 髙橋 龍成, 内田 史朗
Chiba Institute of Technology.[1]◦Li Jikun, Shunsuke Kawamura, Hayuma Yatsugi,
Shuhei Takahashi, Gin Hirano, Ryusei Takahashi, Shiro Uchida
E-mail: s20a3123gb@s.chibakoudai.jp

1. 背景

現状では、水中探査機などへの電力供給は主に有線ケーブルによって行われている。しかし、電源がバッテリーに依存している場合、持続的な運用が困難になることもある。そこで、水中における光無線給電技術が新たな選択肢として注目されている[1]。光無線給電の伝送効率には、海水の光学特性のみならず、水流の影響も関与する可能性がある。例えば、日本海における観測では、流速が季節変動に伴って変化し、水深が深くなるにつれて流速が上昇することが報告されている。このような環境下では、水流の変化により、探査機に到達する光のエネルギー、すなわちレーザ光到達率に影響を及ぼす可能性がある。

2. 実験方法

図.1.に実験概要図を示す。本実験では、波長 532 nm のレーザ光を用い、長さ 90 cm のガラス製水槽内に水道水を満たして透過させた。レーザ光は平凸レンズによって集光され、水槽入射前の光強度 P_{in}および通過後の光強度 P_{out}をパワーメータで測定して、レーザ光の到達率 η_{op}を算出した。また、水流の影響を評価するため、ポンプを用いて流速を 0、2、4、6、8 cm/s の 5 段階に調整し、各条件下で同様の測定を行った。

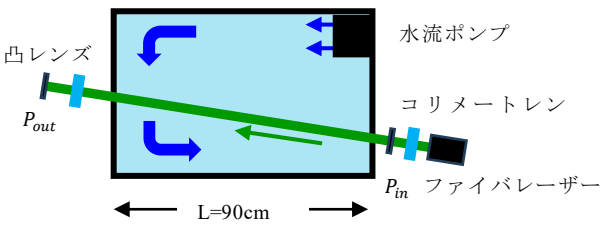


図.1. 実験概要図 (上方図)

3. 結果と考察

図.2.にレーザ光到達率と水流速度の関係を示す。その結果、流速が大きくなるにつれて、到達率が低下する傾向が確認された。これは、水流速度が高まることで水分子による散乱が増加し、レーザ光の進行方向が乱されたことが原因と考えられる。また、水流とレーザ光の向きが同方向および逆方向である場合の到達率についても比較を行った。実験の結果、いずれの条件においても、流速の増加に伴いレーザ光の到達率は約 3.9%低下することが明らかとなった。

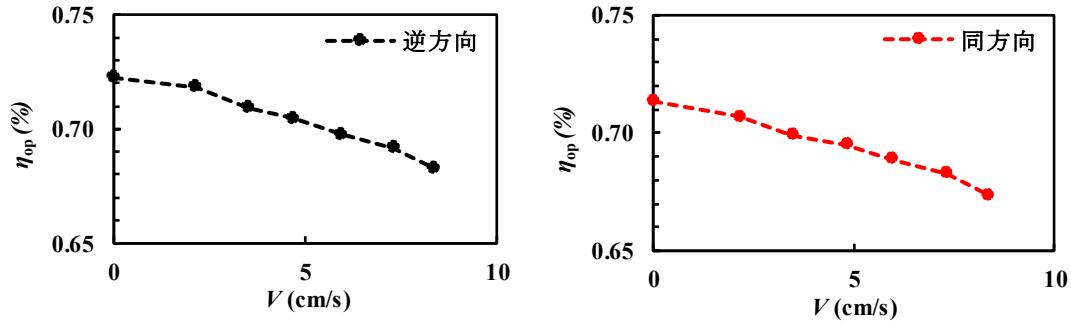


図 2. レーザ光到達率と水流速度の関係

4 参考文献

[1] Takahashi, R.; Hayashi, S.; Watanabe, K.; Jikun, L.; Iida, T.; Suzuki, J.; Uchida, S, “Optical Wireless Power Transmission under Deep Seawater Using GaInP Solar Cells”, Energies 2024, 17, 1572.

© 2025年 応用物理学会

Search for Efficient Hole Transport Layer for Sputter-Deposited $BaSi_2$ Solar Cells

University of Tsukuba. [1], Tosoh Corp.[2], Md. Ariful Islam[1], Yuka Fukaya[1], Koki Hayashi[1], Mizuki Hirai[1], Yoichiro Koda[2], Masami Mesuda[2], Kaoru Toko[1], Takashi Suemasu[1]
E-mail: s2530115@u.tsukuba.ac.jp

1. Introduction

$BaSi_2$ is a promising candidate for thin film solar cells (SCs) comprised of readily available nontoxic elements Ba and Si. It offers a suitable band gap (E_g) of 1.3 eV, a high absorption coefficient (α) of 3×10^4 cm^{-1} at 1.5 eV and impressive minority carrier properties [1]. Despite the significant efforts using molecular beam epitaxy (MBE) and sputtering methods, the fabrication of efficient $BaSi_2$ SCs remains challenging. MBE-grown $BaSi_2$ homojunction solar cells require a lower growth temperature on the surface side to prevent dopant diffusion, which otherwise leads to surface defects and parasitic absorption [2,3]. In the case of sputtering, n/p control in $BaSi_2$ film by impurity doping is hindered by excessive oxygen and requires a high post-annealing temperature (1000 °C) to mitigate it [4]. To overcome these limitations, our current research focuses on the development of an undoped $BaSi_2$ absorber layer sandwiched between the electron and hole transport layers (ETL and HTL). Since the electron affinity (*EA*) and ionization potential (*IP*) of $BaSi_2$ is 3.2 eV and 4.5 eV, respectively, it is not easy to find. Figure 1 shows the band alignment of $BaSi_2$, crystalline Si, and various HTL materials used for crystalline Si solar cells. In this context, p-type amorphous Si (a-Si) can be used as a promising HTL, as our previous study demonstrated that the hole barrier height between a-Si and n-type $BaSi_2$ is approximately −0.2 eV, allowing efficient hole transport across the interface [5]. In this study, our initial objective is to assess the potential of p-type a-Si as an HTL for sputter-deposited $BaSi_2$ SC. For this purpose, we first examine the band structure of p-type a-Si layers by ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS) and spectroscopic ellipsometry.

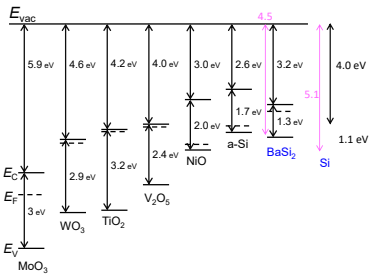


Fig. 1 Band alignment of $BaSi_2$ and various HTL

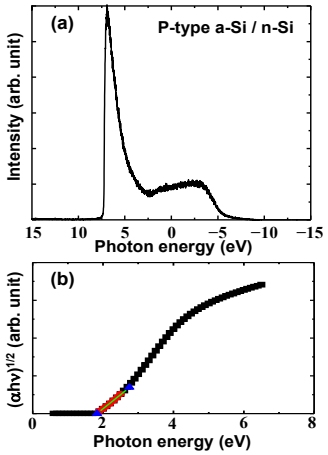


Fig 2. (a) UPS and (b) Optical absorption Spectra of p-type a-Si deposited on n-Si(111) substrate

2. Experiment

10-nm-thick B-doped p-Type a-Si layers were formed by chemical vapor deposition at AIST on four different kinds of substrates such as n-Si(111), n^+-Si(111), a-Si:H (3 nm)/n^+-Si(111), and a-Si:H (3 nm)/$BaSi_2$(0.3 μm)/n^+-Si(111). The *IP* and E_F were measured by UPS (ULVAC PHI VersaProbe 4) using photons with an energy of 21.22 eV at a sample bias voltage of −10.0 V. The *EA* was measured by low-energy inverse photoemission spectroscopy (LEIPS) (ULVAC PHI VersaProbe 4). Spectroscopic ellipsometry (UVISEL PLUS, HORIBA) was used to measure absorption edges of the four samples.

3. Results and Discussion

From the UPS spectrum, it is calculated that p-type a-Si layers deposited on the following four substrates such as n-Si(111), n^+-Si(111), a-Si:H (3 nm)/n^+-Si(111) and a-Si:H (3 nm)/$BaSi_2$(0.3 μm)/n^+-Si(111) shows the *IP* and E_F values of 4.58 eV and 4.29 eV; 4.64 eV and 4.32 eV; 4.45 eV and 4.23 eV; and 4.80 eV and 4.07 eV respectively, which is effective for efficient hole transport across the p-a-Si/$BaSi_2$ interface. However, it is noticeable that p-type a-Si layers deposited on a-Si:H (3 nm)/H/$BaSi_2$(0.3 μm)/n^+-Si(111) substrates show a minor deviation, with a slightly increased *IP* and a lower E_F value. This change may result from oxygen diffusion from the sputter-deposited $BaSi_2$ layer. To further investigate, the optical absorption spectrum is also measured, showing that the p-type a-Si on all the substrates exhibit almost similar indirect absorption edges of ~1.8 eV (Fig. 2). This value was almost the same as the *IP* obtained from the UPS minus the *EA* obtained from the LEIPS for each sample.

4. Conclusion

This experiment indicates that p-type a-Si could serve as a promising HTL for $BaSi_2$ solar cells. However, further investigations are necessary to make HTL/$BaSi_2$/ETL solar cells real.

References 1.S. Yachi *et al*., *Appl. Phys. Lett.* **109**, 072103 (2016); 2. K. Kodama *et al*., *Appl. Phys. Express* **12**, 041005 (2019); 3. Y. Yamashita *et al*., *Sol. Energy Mater. Sol. Cell*. **230**, 11118 (2021); 4. H. Hasebe *et al*., *Jpn. J. Appl. Phys*. **62**, SD1010 (2023); 5. R.Takabe *et al*., *J. Appl. Phys.* **119**, 165304 (2016)

Acknowledgment
We thank Dr. H. Sai and Dr. T. Matsui of AIST (Tsukuba, Japan) for providing the p-type a-Si layers.

© 2025年 応用物理学会

大気圧プラズマ処理を援用した転写プリントによるハイブリッド集積技術の検討

Investigation of hybrid integration technique with transfer printing assisted by atmospheric plasma treatment

慶應理工[1], 東大ナノ量子[2] ○(M2)立崎 裕真[1], 藤田 晃成[1], 伊藤 貴裕[1], 伊藤 秀真[1], 山家 健[1], 荒川 泰彦[2], 太田 泰友[1]

Keio Univ.[1], Nanoquine, The Univ. of Tokyo[2]

○Yuma Tachizaki[1], Akinari Fujita[1], Takahiro Ito[1], Shuma Ito[1], Takeru Yambe[1], Yasuhiko Arakawa[2] and Yasutomo Ota[1]

E-mail: yuma130411@keio.jp, ota@appi.keio.ac.jp

はじめに 転写プリント法は、簡素なピックアンドプレース集積で自在かつ高度な異種材料光集積を可能とする技術として注目されている[1]。しかし、転写先のレシーバー基板と転写対象のデバイスとの間の接着についての深い検討は進んでおらず、ポストプロセス耐性についての議論も少ない。先行研究では強い接着を得る方法としてプラズマ表面処理の活用が検討されているが、その詳細はほとんど明らかになっていない[2]。以前の報告で我々は、低圧プラズマ処理が半導体薄膜の接着を改善しうることを報告した[3]。今回、より実用性に優れた大気圧プラズマ処理装置を用い、半導体薄膜の転写プリント集積を行ったので報告する。

実験結果 転写ターゲットとして GaAs 薄膜(5×10×0.13 μm)、レシーバー基板として熱酸化膜付き Si 基板を使用し、転写スタンプには PDMS を用いた。事前処理としてレシーバー基板には低圧空気プラズマ処理を施した。図 1(a)に実験プロセスの概要を示す。GaAs 薄膜をピックアップした後、その裏面に窒素または乾燥空気から生成した大気圧プラズマを照射した。図 1(b)に実際にプラズマ照射を行っている様子を示す。その後、レシーバー基板上へ GaAs 薄膜を転写プリントし、同基板に対して 30 秒間の超音波洗浄を行った。最後に薄膜の残存数を光学顕微鏡により調査し基板との接着状態を評価した。図 1(c-d)に超音波洗浄後の転写薄膜の様子を示す。大気圧プラズマを照射しなかった場合では薄膜が残存しなかったが、照射した場合では多くのサンプルが残存した。詳細は当日報告する。

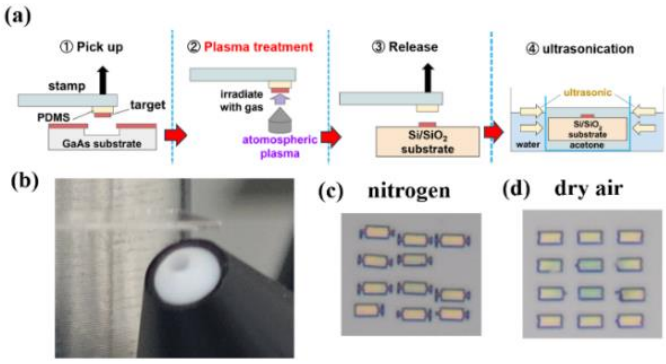


Fig. 1 (a) Schematic of the experimental procedure. (b) Picture of atmospheric plasma irradiation. (c-d) Optical microscope images of transferred targets recorded after sonication. The targets were respectively treated with atmospheric plasma generated with nitrogen and dry air.

参考文献 [1] G.Roelkens *et al.*, IEEE J Quantum Electron, 29, 3 (2023). [2] K. Anand *et al.*, Thin Sol. Fi., **799**, 140399 (2024). [3] 立崎他, 第 85 回応物秋季講演会, 20p-A35-9 (2024).

© 2025年 応用物理学会

光周波数コム生成のための TFLN 導波路用デバイスの設計

Design of Optical Frequency Comb Device based on TFLN Waveguides

横国大院工　○北原凌成，羽中田祥司，坂本駿介，馬場俊彦
Yokohama Nat'l Univ., ○R. Kitahara, S. Hachuda, S. Sakamoto, and T. Baba
E-mail: kitahara-ryosei-gd@ynu.jp

近年，高速な通信や高度のセンシング技術において，高機能で集積可能な薄膜ニオブ酸リチウム（TFLN）導波路デバイスが注目されている [1, 2]．TFLN は強い電気光学効果や非線形光学効果，強い光閉じ込め，広い透明波長帯域を併せもち，変調器やリング共振器などへの応用が研究されている．前回までに我々は，TFLN 導波路のドライエッチングプロセスを確立した [3]．そこで現在，図 1(a)に示す Kerr 効果を利用した光周波数コム生成を目指している．今回はいくつかの LN 層の厚さ，導波路幅，エッチング深さに対して，光コム生成の条件を求め，それに対して不規則なグレーティングカプラ（GC）[4]の最適化を行った．

光周波数コム生成において重要な群速度分散を Lumerical FDE を用いて計算した．LN 層厚 600 nm，導波路幅 800 nm としたときの結果を図 1(b)に示す．光 Kerr 効果とバランスする小さめの異常分散（$\beta_2 < 0$）[5]が求められるが，LN 層が 400 nm または 800 nm では β_2 が負の大きな値となった．これを 600 nm にすると，エッチング深さ $d = 300$ nm のとき，実線で表される単一モード，かつ適切な β_2 を示すことがわかった．そこで LN 層厚 600 nm，$d = 300$ nm に対応する不規則 GC を設計した．波長 1550 nm において導波路の鉛直方向から 8°傾けた単一モード光ファイバとの結合効率を最大化するよう，Lumerical FDTD と共分散行列適応進化戦略（CMA-ES）の組み合わせ [6, 7]により構造を最適化した．図 2(a)には最適化後の構造，図 2(b)には結合効率スペクトルを示す．この非周期 GC は，通常の周期的な GC と比較してファイバモードとの整合性が高く，波長 1550 nm において効率は 52%となった．また，これに関する実験も進めている [8]．

参考文献 [1] D. Renaud, et al., Nat. Commun., **14**, 1496 (2023). [2] A. Boes, et al., Science, **379**, 6627 (2023). [3] 羽中田ら，応物春季, 16p-K305-14 (2025). [4] 北原ら，応物春季, 16p-K309-1 (2025). [5] C. Wang, et al., Nat. Commun., **10**, 978 (2019). [6] K. Takahashi, et al., IEEE Photon. J., **14**, 8624505 (2022). [7] N. Tahara, et al., Opt. Express, **32**, 34024 (2024). [8] 羽中田ら，本講演会.

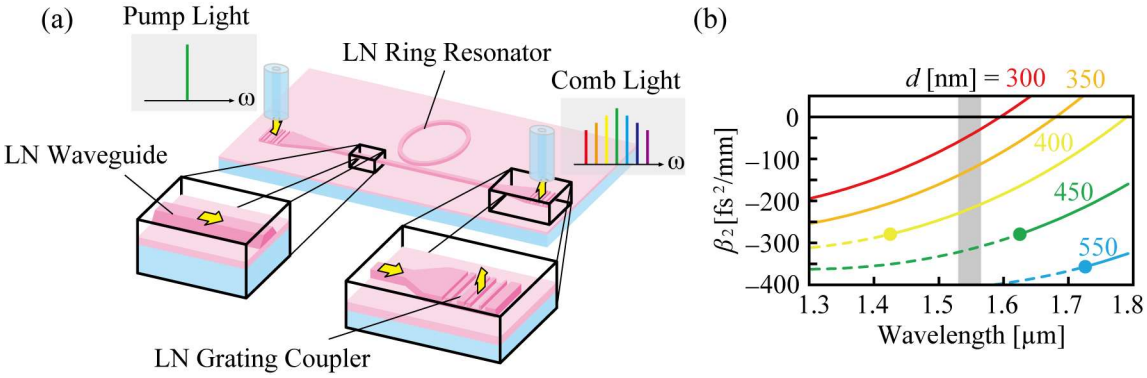


図 1 (a) TFLN を用いた光コム生成器の概念．(b) エッチング深さ d を変えたときの群速度分散．

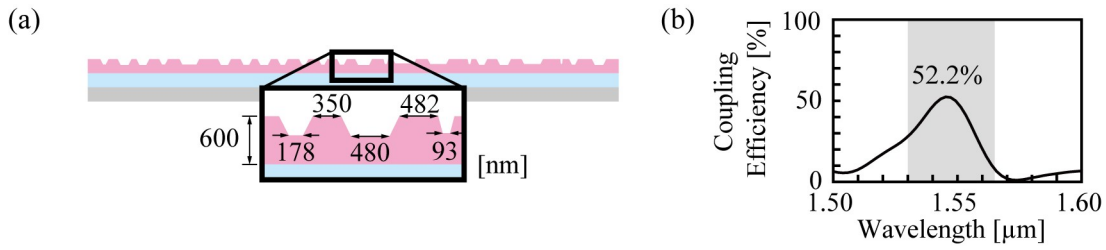


図 2 計算結果．(a) 最適化した構造例．(b)単一モードファイバへの結合効率スペクトル．

© 2025年 応用物理学会

Optical Control of Valley-Selective Dynamics in Tin Sulfide Monolayer

◦*A Hashmi[1], M. U. Farooq[2], M Tani[3], K Yabana[4], T Otobe[3], and K. L. Ishikawa[1]*,*

[1]UTokyo, Graduate School of Engineering, [2]SUSTech, [3]KPSI, QST, Kyoto, [4]Univ. of Tsukuba

*Author e-mail address: ◦hashmi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp * ishiken@n.t.u-tokyo.ac.jp*

Bulk monochalcogenides (MC) have layered structures, featuring D_{2h}^{16} space group with puckered layers. Experimental findings have demonstrated valley-selective linear dichroism, revealing unique valley-specific optical transition rules [1]. The transition from bulk to monolayer results in the non-centrosymmetric C^{7}_{2v} space group. This raises the intriguing question: can monolayers of MCs exhibit spin(s)-valley(τ) coupling (s·τ) physics, where the helicity of light controls both spin and valley characteristics [2]? To address this question, we study optical valley control in 2D SnS monolayers using the time-dependent density functional theory [3].

For a laser pulse with a wavelength of 1127 nm and a foot-to-foot pulse length of 8 optical cycles, the maximum valley polarization is achieved along the X-Γ-X' ($\theta = 0°$, *x*-polarization) and Y-Γ-Y' ($\theta = 90°$, *y*-polarization) directions, indicating strong valley selectivity in high-symmetry directions. *x*/*y*-polarized light primarily excites the corresponding V_X/V_Y valley [Fig. 1(a)].

The combination of inversion symmetry breaking and spin-orbit coupling in 2D SnS yields Berry curvatures of opposite signs at the X and X' points. As a result, circularly polarized light with the same wavelength and pulse duration as stated in the last paragraph can drive s·τ to simultaneously manipulate spin and valley at X/X' points [Fig. 1(b)].

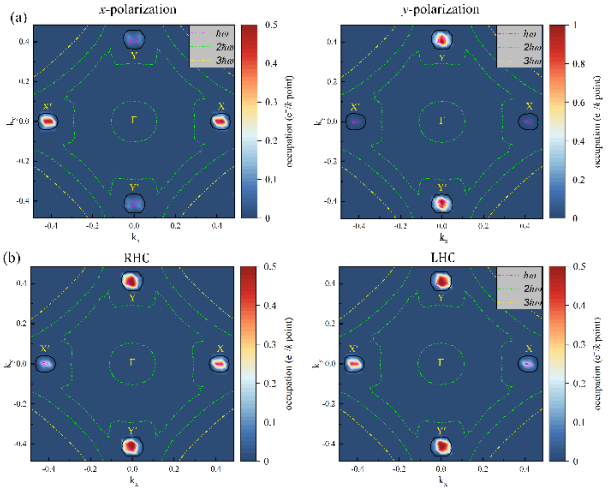


Figure 1. Excited electron populations at the end of a pulse with the field strength of 10^{10} W·cm^{-2} (a) linearly polarized pulse (b) circularly polarized pulse.

We propose a method for rapidly switching between multiple valley states. This involves utilizing ultrashort (3-cycles) carrier-envelope phase controlled linearly polarized pulses with wavelength of 3100 nm. Bragg scattering results in a clear valley asymmetry between X-X' and at Y-Y' valley points (not shown). Thus, precise CEP control enables the selective excitation of multiple valley states, opening new possibilities for ultrafast valley-based technologies.

References

[1] S. Lin et al., Nat. Commun. **9**, 1455 (2018).

[2] D. Xiao, G.-B. Liu, W. Feng, X. Xu, and W. Yao, Phys. Rev. Lett. **108**, 196802 (2012).

[3] A. Hashmi, M. U. Farooq, M. Tani, K. Yabana, T. Otobe, and K. L. Ishikawa, arXiv:2503.09092.

© 2025年 応用物理学会

A Dual-Robot OWPT System with Obstacle Avoidance Based on Depth Sensing

Kanazawa Univ., Zhou Shaopu, Yi Wenlong, Xing Zhaoyang, and Takeo Maruyama
E-mail: maruyama@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

Introduction

Optical Wireless Power Transmission (OWPT) enables contactless power delivery using laser beams and is suitable for space, industrial, and dynamic environments. However, OWPT systems are highly sensitive to obstacles blocking the laser path, which can significantly reduce power efficiency. To solve this problem, we propose a dual-robot OWPT system that integrates depth sensing and coordinated motion control. By combining real-time obstacle detection[1] and dual-arm alignment, the system maintains effective energy transfer even in the presence of obstructions [2].

Experiment Setup

The system consists of two 6-DOF robotic arms with their base positions placed 40 cm apart on a horizontal surface. Robot Arm 1 is equipped with a laser and a ToF-camera, while Robot Arm 2 carries a position aligner for receiving and monitoring the laser alignment. A central PC controls both arms via TCP communication. As shown in Fig. 1, depth images from the ToF-camera are processed using OpenCV to detect objects located within 40 cm from the ToF-camera. If an object enters a predefined circular detection zone within this range, it is identified as an obstacle, and a warning is triggered on the visual interface. Upon detection, the laser arm is automatically reoriented to maintain alignment with the receiver. The system is calibrated using a pose transformation matrix to ensure precise coordination between the two arms.

Results and Discussions

The system was evaluated with a focus on both robotic accuracy and obstacle detection performance. In terms of robotic precision, tests conducted at four key positions (top, bottom, left, right) showed a maximum laser alignment offset of approximately ±1.5 mm, which serves as a baseline for mechanical error compensation in future iterations. As shown in Fig. 2, regarding obstacle detection, the depth camera effectively recognized objects located within 40 cm of the laser path. The system responded by adjusting the laser-emitting arm within 300–500 ms.

References

[1] C. Zuo and T. Miyamoto, IEEE Photonics, **11** (2024) 500.
[2] A. W. S. Putra et al. IEEE Photonics. Technol. Lett. **31** (2019) 157.

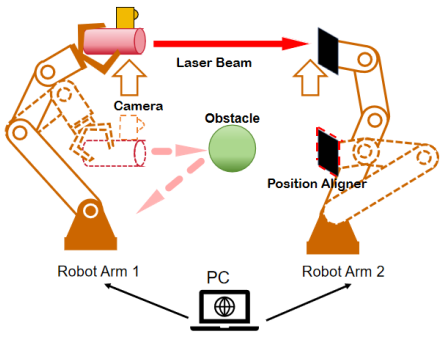


Fig. 1 Dual-Arm Robotic Systems of OWPT.

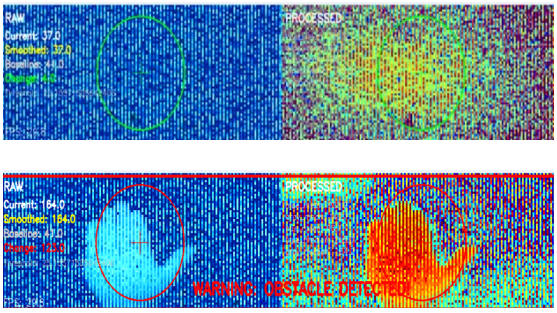


Fig. 2 Obstacle Detection Results in OWPT System.

3 Optics and Photonics | Poster presentation : 3.12 Semiconductor optical devices

[9p-P05-1~4] 3.12 Semiconductor optical devices

[9p-P05-1]

Impact of Voids on Threshold Current Density in Lasers Grown on InP/Si Substrates

○(M1)Mizuki Holt[1], Mizuki Kuroi[1], Liang Zhao[1], Kazuhiko Shimomura[1] (1.Sophia Univ.)

[9p-P05-2]

Annealing Time Dependence of Voids at InP/Si Hydrophilic Bonding Interface

○(M2)Chaoke Ban[1], Liang Zhao[1], Kazuhiko Shimomura[1] (1.Sophia University)

[9p-P05-3]

Investigation of recess structure for operating wavelength control of Ge wire photodetector on Si

○(M2)Miyasaka Taichi[1], Joshua Chombo[1], Jose A. Piedra-Lorenzana[1], Takeshi Hizawa[1], Junichi Fujikata[2], Yasuhiko Ishikawa[1] (1.Toyohasshi Univ. Tech., 2.Tokushima Univ.)

[9p-P05-4]

Broadband Quantum Cascade Detectors with the Anti-crossed Dual-upper-state Design

○Shohei Hayashi[1], Kazuki Horita[1], Tatsuo Dougakiuchi[1], Joel Perez Urquizo[1], Kazuue Fujita[1] (1.HPK CRL)

InP/Si 基板上レーザのボイドと閾値電流密度の関係

Impact of Voids on Threshold Current Density in Lasers Grown on InP/Si Substrates

上智大学院 理工学専攻，ホルト瑞樹，黒井瑞生，趙 亮，下村和彦
Sophia University, Mizuki Holt, Mizuki Kuroi, Liang Zhao and Kazuhiko Shimomura
E-mail: kshimom@sophia.ac.jp

はじめに

人工知能の進展により DNN の効率化が求められ、光伝送技術が高速・低消費電力通信の解決策として注目されている。中でもシリコンフォトニクスは有望だが、発光素子の集積に課題がある。そこで我々は、InP 薄膜を Si 基板に直接貼付してレーザ作製に取り組み、量子井戸レーザの閾値電流密度とボイドの関係を検討した。

実験方法

親水性直接貼付法によって作製した InP/Si 基板上に MOVPE 法を用いて Fig. 1に示すような MQW ブロード LD を結晶成長させた。量子井戸は5層とし、井戸層は6, 8, 18nm と変化させ、障壁層は15nm とした。比較対象として、InP 基板も同時に成長している。成長後の基板表面状態を、ノマルスキー顕微鏡を用いて観察し、ボイド占有率と密度の計算を行った。さらに IL 測定によって光出力とその時の閾値電流密度を測定し、ボイド依存性を検討した。

実験結果

Fig. 2に、InP 基板、InP/Si 基板上 MQW ブロード LD のボイド密度と閾値電流密度の関係を示す。これより、各基板の最低閾値電流密度は、ボイド密度が低いほど低下していることがわかる。また、Fig. 3には、ボイド占有率と閾値電流密度の関係を示している。ここからも、ボイド占有率が低い範囲での InP/Si 基板ほど、閾値電流密度が低下する傾向にあることが確認できる。しかし、基板毎にボイド占有率にばらつきがあるため、Fig. 2ほど明瞭な傾向は見られない。

まとめ

InP/Si 基板上レーザにおいて、ボイド密度が低いほど閾値電流密度化に成功し、InP 基板上 LD と同等の閾値電流密度を得た。閾値電流密度の低減のためには、各ボイドパラメータの改善が特に重要であることがわかった。

参考文献

K. Matsumoto *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 55, 112201 (2016).
K. Matsumoto *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 53, 116502 (2014).

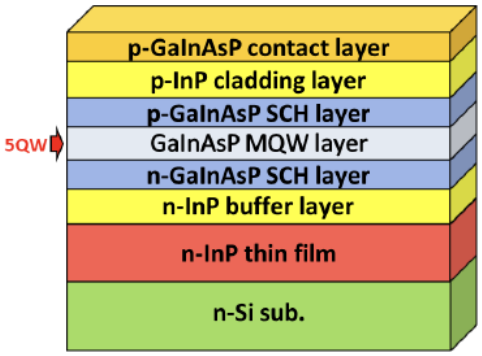


Fig. 1　InP/Si 基板上 GaInAsP/GaInAsP SCH-MQW レーザの構造図

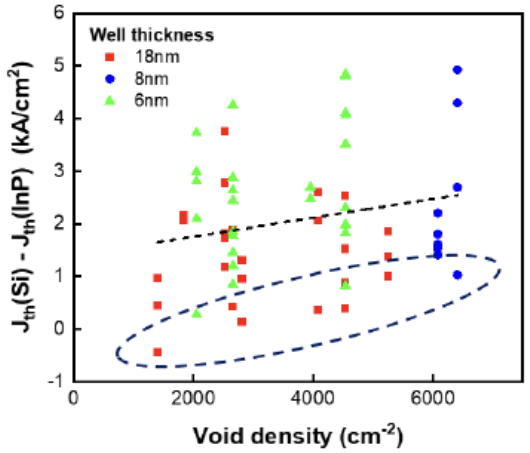


Fig. 2　ボイド密度と閾値電流密度の関係

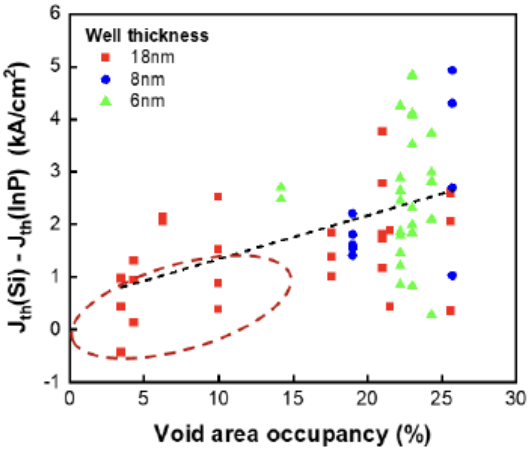


Fig.3　ボイド占有率と閾値電流密度の関係

© 2025年 応用物理学会

InP/Si 親水性貼付け界面における Void のアニーリング時間依存性評価

Annealing Time Dependence of Voids at InP/Si Hydrophilic Bonding Interface

上智大学 理工学部，BANCHAOKE，趙亮，下村和彦
Sophia University, Ban Chaoke, Liang Zhao, Kazuhiko Shimomura
E-mail: kshimom@sophia.ac.jp

はじめに

大規模集積回路の高速・大容量通信を低消費電力で実現するため、Si 基板上への InP 系光デバイスの異種集積が注目されている。Si は CMOS 技術との親和性やコスト面で優れる一方、間接遷移型であるため発光素子には不向きである。これに対し、直接遷移型の InP 系材料との接合は、高効率な光源実現に有効な手段である。

今回、親水性直接貼付法により作製した InP/Si 基板において、貼り付け時に形成されるボイドに着目し、アニール処理時間とボイド特性の関係を検討したので報告する[1]。

実験方法

Fig.1 に示すように、MOVPE 法により InP(001)基板上に GaInAs/InP/GaInAs の三層構造を成長させた。GaInAs 層はエッチングストップ層として機能し、貼付け対象となる InP 層の厚さは 1.5 μm である。成長後、HCl 溶液で元の InP 基板を除去し、Si 基板には BHF および RCA1 溶液による表面処理を行った。続いて、InP 薄膜と Si 基板に H_2SO_4を用いた親水化処理を施し、十分な OH 基を生成したのち、室温下で加圧して貼付けを行った。接合後、N_2雰囲気下でアニール処理を実施し、脱水縮合反応によって Si–O–InP 結合を形成させた。その後、室温から 400℃まで加熱し、400℃で 1 時間保持した後に冷却するアニールプロセスを行い、昇温時間を変化させて、接合界面におけるボイド特性を評価した。

結果

Fig.2、3 に示すように、、アニール時間 8 時間、12 時間、45 時間におけるボイド占有率の平均値は 10.31%、8.36%、5.59%、ボイド密度の平均値は 4856 cm^{-2}、3134 cm^{-2}、2923 cm^{-2}であった。アニール時間の延長に伴う明確な低下傾向が認められ、特に 8 時間から 45 時間の間で、ボイド占有率は約 46%、ボイド密度は約 40%の低減が得られた。この結果は、200℃付近で進行する脱水縮合反応により生成された H_2O が、短時間のアニールでは界面に残留しやすいのに対し、長時間の加熱処理によって排出されることで、界面におけるボイドの形成が抑制された。アニール条件の最適化は、InP/Si 接合界面のボイド低減および貼付け品質の向上に有効であることが示された。今後は、ボイド抑制における主因を明らかにするため、200℃以下の脱水縮合と 200～400℃のガス排出の寄与を検討する。

参考文献

[1] Zhao, L., Sato, M., Yada, R., Kuroi, M. and Shimomura, K. (2025),. Phys. Status Solidi A 2400865.

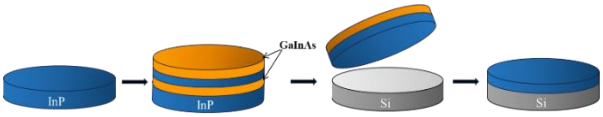


Fig.1 Hydrophilic Direct Bonding Process for InP/Si

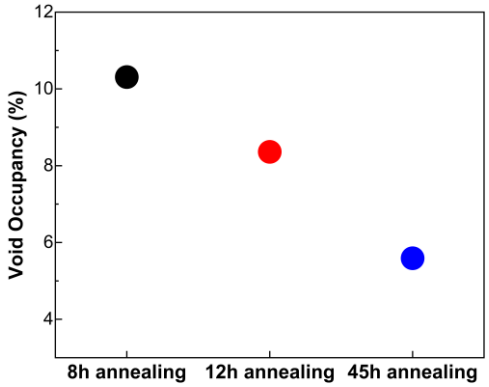


Fig.2 Effect of annealing time on void occupancy

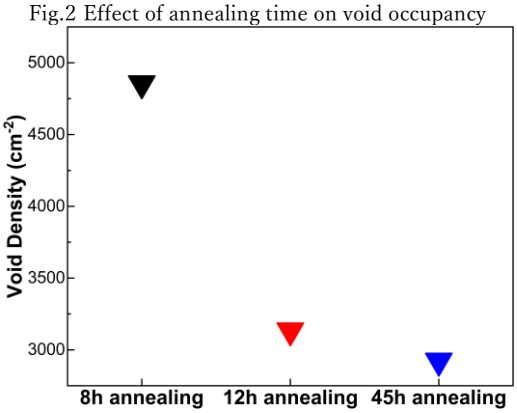


Fig.3 Effect of annealing time on void density

© 2025年 応用物理学会

Si 上 Ge 細線受光器の動作波長制御に向けたリセス構造の検討

Investigation of recess structure for operating wavelength control of Ge wire photodetector on Si

豊橋技科大[1]，徳島大[2]　○(M2)宮坂 泰地[1]，Joshua Chombo[1]，Jose A. Piedra-Lorenzana[1]，飛沢 健[1]，藤方 潤一[2]，石川 靖彦[1]

Toyohashi Univ. Tech.[1], Tokushima Univ.[2]　°Taichi Miyasaka[1], Joshua Chombo[1], Jose A. Piedra-Lorenzana[1], Takeshi Hizawa[1], Junichi Fujikata[2], Yasuhiko Ishikawa[1]

E-mail: miyasaka.taichi.hu@tut.jp, ishikawa@ee.tut.ac.jp

1. はじめに

シリコンフォトニクスにおける通信波長帯（1.3-1.6 μm）の光電変換デバイスとして Ge 受光器が利用されている。Si 上にエピタキシャル成長した Ge 層を用いることで，Si 導波路とモノリシック集積した Ge 受光器を作製できる。Ge 層には，Si との熱膨張係数差による引張格子ひずみ（約 0.2%）が存在する。直接遷移バンドギャップの縮小により，光吸収端が 1550 nm から約 1610 nm まで長波長化する。C 帯（1530-1565 nm）および L 帯（1565-1625 nm）での受光効率向上に寄与している。一方，高周波応答に適しているサブミクロン Ge 細線受光器では，Ge 細線の弾性変形による格子ひずみの緩和が起こり，受光効率が低下する[1]。今回は格子ひずみの緩和を防ぐ Ge 細線構造の検討を行ったので報告する。

2. リセス構造を用いた格子ひずみ制御

Ge 細線を下地の Si 基板中に埋め込んだ構造においてひずみ緩和を抑制できることを最近報告した[2]。しかし，シリコンフォトニクス用の SOI 基板では上部 Si 層（膜厚 ～0.2 μm）が消失することになり適用できない。そこで下地 Si 中に部分的に Ge 層を埋め込んだリセス構造を検討した。Fig. 1 に底辺の幅 1.0 μm，膜厚 0.2 μm の Ge 細線構造の格子ひずみ分布（幅方向）のシミュレーション結果を示す。Ge 細線は SiO_2 をマスクとする選択化学気相成長により Si(001)面上に形成することを想定し，側壁は傾斜した{113}ファセット面で構成されるとした。700°C の成長温度から室温 27°C に冷却した際の熱膨張係数差によるひずみを計算した。リセスのないメサ構造（Fig. 1(a)）では格子ひずみが Ge 細線中央で 0.06%程度に緩和する（平坦膜では 0.23%）。リセス深さ 0.1 μm の構造（Fig. 1(b)）にすると、引張ひずみは 0.09%となり，緩和を抑制できた。しかし，平坦膜の場合の 0.23%と比較すると半分以下であった。Fig. 1(c)に示したように，Ge 細線の表面に Si 保護膜を形成することにより，引張ひずみを 0.14%まで高められることがわかった。Ge の底面や側壁だけでなく，上面も Si に束縛することにより，Ge の弾性変形を抑制でき，ひずみ緩和を抑制できると解釈できる。今後は実験により効果を実証する予定である。

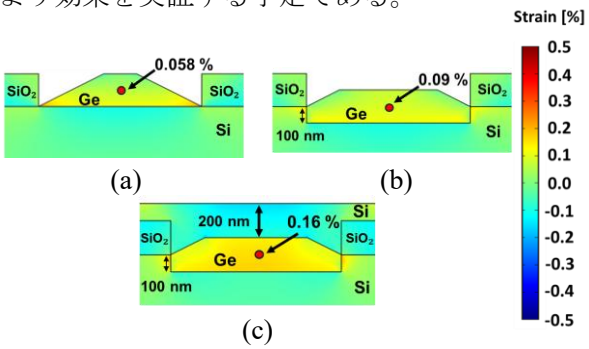


Fig. 1. Simulated distributions of lattice strain in the width direction for non-recessed and recessed Ge wire structures (0.2 μm in thickness and 1.0 μm in bottom width) on Si.

3. まとめ

Ge 細線構造の格子ひずみ緩和において，リセス構造および Si 保護膜形成が有効であることを示した。

謝辞

本研究の一部は，JSPS 科研費（25H00738 および 25K01289），ならびに村田学術振興・教育財団の助成を受けて実施した。

参考文献

[1] S. Sonoi et al., IEEE J. Quantum Electron. 58, 8400209 (2022).
[2] J. Chombo et al., Jpn. J. Appl. Phys. 63, 03SP32 (2024).

© 2025年 応用物理学会

結合二重上位準位構造に基づいた広帯域量子カスケード検出器

Broadband Quantum Cascade Detectors with the Anti-crossed Dual-upper-state design

浜松ホトニクス(株) ○林 昌平，堀田 和希，道垣内 龍男，Joel Pérez Urquizo，藤田 和上

Hamamatsu Photonics K.K.

○Shohei Hayashi, Kazuki Horita, Tatsuo Dougakiuchi Joel Pérez Urquizo, and Kazuue Fujita

E-mail: shohei.hayashi@crl.hpk.co.jp

量子カスケード検出器（Quantum Cascade Detector; QCD）は，サブバンド間(ISB)遷移を利用した光起電型検出器である．QCD において光励起された電子が伝導体内に形成された非対称なバンドポテンシャルにより一方向に輸送され、これにより光電流が生成される．また量子カスケードレーザ(Quantum Cascade Laser; QCL)と同様に多重量子井戸で構成される活性層構造設計により検出波長の選択が可能である．しかしながら，光吸収に ISB 遷移を用いる特性上，従来の活性層設計では広帯域な応答性を得ることが困難であるという課題があった．本発表では，QCL において非常に広い利得帯域を実現した結合二重上位準位（DuAl-Upper-state; DAU）活性層[1]を QCD に適用し広帯域化を実現したので報告する．

図 1 に設計した DAU 構造のバンド図(1 周期分)を示す．基底準位である 1 から上位準位である 8 および 9 へ電子が光励起され，輸送のための準位(2~7)を経由し次周期の基底準位へと移動することで光電流が生成される．本活性層構造において準位 8，9 を準位反交差する 2 本の上位準位として設計し、両準位の波動関数が空間的に重なり合うよう最適化した。これにより基底準位からの遷移強度がほぼ均等になり広帯域な光吸収が可能となる．素子の結晶構造は InP 基板上に有機金属気相成長法にて成長され，材料系には InGaAs/InAlAs を用いた．素子の活性層は□200 μm のメサ構造を形成した．図 2 に室温での本素子の感度スペクトル（実線）を示す．素子の感度帯域は中心波長に対して約 21%のスペクトル幅を有し，この値は従来の 5 μm 帯 QCD [2]（図 2 破線）の約 2 倍に相当する．さらにピーク感度は波長 5.1 μm において 7.4 mA/W の感度を示し，これは Ref. [2] よりもやや高い値である．これらの結果から DAU 構造の導入により感度向上と帯域拡張が同時に可能であることが明らかとなり，QCD の性能向上に寄与することが実証された．

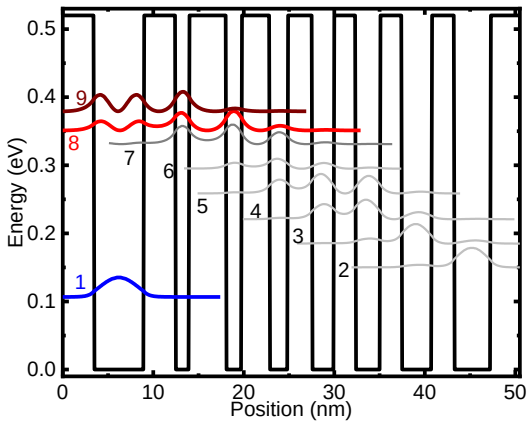


Figure 1 Energy band diagram of the DAU design

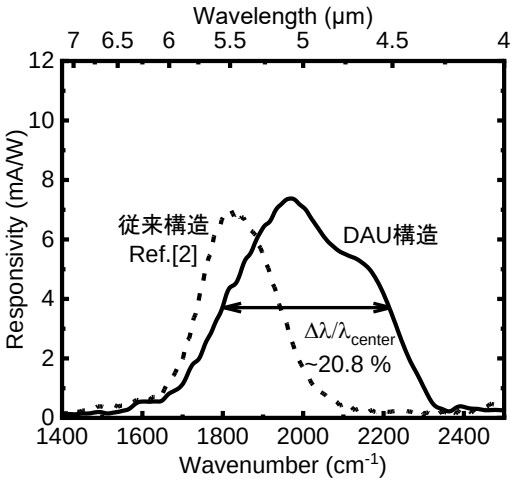


Figure 2 Photoresponse spectra of the device

[1] K. Fujita, T. Edamura, S. Furuta, and M. Yamanishi, Appl. Phys. Lett. 96, 241107 (2010)

[2] T. Dougakiuchi, K. Fujita, T. Hirohata, A. Ito, M. Hitaka, and T. Edamura, Appl. Phys. Lett. 109, 261107 (2016)

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Poster presentation : 3.13 Silicon photonics, Photonics-electronics convergence, Optical control

[8a-P04-1~8] 3.13 Silicon photonics, Photonics-electronics convergence, Optical control

[8a-P04-1]

Raman Spectroscopic Analysis of Super microplastics Using Optical Waveguides

○(M2)Akinobu Komiyama[1], Hideki Yokoi[1,2] (1.Shibaura Inst. of Technol., 2.Center for Next Generation Semiconductor Human Resources)

[8a-P04-2]

Propagation Characteristics of Multi-Mode Interference Couplers for Polarization Independent Optical Triplexer

○(M2)Hiroto Shiraishi[1], Chisato Akimoto[1], Hideki Yokoi[1,2] (1.Shibaura Inst. of Technol., 2.Center for Next Generation Semiconductor Human Resources)

[8a-P04-3]

Design of Optical Isolator Employing Nonreciprocal Phase Shift with Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer

○(M2)Hiroki Ikeda[1], Kohaku Maruyama[1], Hideki Yokoi[1,2] (1.Shibaura Inst. of Technol., 2.Center for Next Generation Semiconductor Human Resources)

[8a-P04-4]

High-Efficiency Device Structure of n-type InP/Electro-Optic Polymer Hybrid Optical Modulator

○Kensuke Ikai[1], Fujikata Junichi[1,2] (1.Tokushima Univ., 2.Tokushima Univ pLED)

[8a-P04-5]

Comparison of SiN_x Film Properties for Silicon Photonics Applications

○(M1)Kazusa Kubo[1], So Okagaki[1], Jose A. Piedra-Lorenzana[1], Yasuhiko Ishikawa[1] (1.Toyohashi Univ. Tech.)

[8a-P04-6]

Low-Temperature Green Synthesis of Sand-Derived Silica and Its Composites Toward Industrial Dye Removal Applications

Chaity Ghosh[1], ○(PC)Abdul A Kuddus[2], Shinichiro Mouri[2], Abu Bakar Md. Ismail[1] (1.Univ. of Rajshahi, 2.Ritsumeikan Univ.)

[8a-P04-7]

Synthesis and Characterization of Silicon-Rich Silica Nanoparticles from Padma River Sand

Md. Sakib Ahmed[1], Md. Suman Islam[1], ○(PC)Abdul A Kuddus[2], Shinichiro Mouri[2], Abu Bakar Md. Ismail[1] (1.Univ. of Rajshahi, 2.Ritsumeikan Univ.)

[8a-P04-8]

Green Synthesis Silica-based Copper Oxide Composite (CuO-SiO2) from Sugarcane Bagasse Ash for Photocatalytic Degradation of Toxic Dye in Industrial Wastewater

Md. Suman Islam[1], Md. Sakib Ahmed[1], ○(PC)Abdul A Kuddus[2], Shinichiro Mouri[2], Samia Tabassum[3], Abu Bakar Md. Ismail[1] (1.Univ. of Rajshahi, 2.Ritsumeikan Univ., 3.BCSIR, Bangladesh)

光導波路を用いたスーパーマイクロプラスチックのラマン分光分析

Raman Spectroscopic Analysis of Super microplastics Using Optical Waveguides

芝浦工大院理工[1]，次世代半導体人材育成センター[2]
○(M2)小宮山 晃伸[1]，横井 秀樹[1, 2]
Shibaura Inst. of Technol.[1], Center for Next Generation Semiconductor Human Resources.[2],
○Akinobu Komiyama[1], Hideki Yokoi[1,2]
E-mail: ag20088@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

近年マイクロプラスチックによる海洋汚染が国際的な問題となっている. この問題を解決するために，多くの国の機関，自治体により多くのプロジェクトが立ち上がっている．しかし，粒径 350μm 以下のスーパーマイクロプラスチック(super-microplastics: SMPs)と呼ばれるプラスチック微粒子の海洋での分布は，ほとんど明らかにされておらず，海洋に浮遊する SMPs をその場計測することが可能な方法が求められている. 本論文では，海洋に浮遊する SMPs 及び微粒子のその場分析が可能な検出方法及び観測機の実現のため，光導波路を用いた小型な光学デバイスの製作を目標とした基礎研究を行った. 小型な実験系と少量のポリスチレン溶液を用いたラマン分光分析並びに線形回帰分析の結果について報告する.

2. 測定原理と実験系

SMPs 分析の原理にはラマン分光法を用いる. 液体でのラマン散乱強度は溶液濃度に対して線形的に変化する[1]．ラマンスペクトルを比較することで，海水などに含まれるプラスチックの種類を特定し，線形回帰したラマン散乱強度を比較することで，プラスチックの量(濃度)を得ることができる. この方法を光導波路に応用することで SMPs の種類と量の特定が可能な光学デバイスを製作できる. 光学デバイスの構造を Fig.1 に示す. この光学デバイスは，試料流路そのものを導波層とし，導波光と SMPs が干渉する構造をとる．導波層となる液体試料は少量であるため，少量の液体試料でのラマンスペクトルを測定する必要がある．実験系には，プローブラマン分光装置を使用し，20~30μL の基板にポリスチレン溶液を直接滴下して測定した.

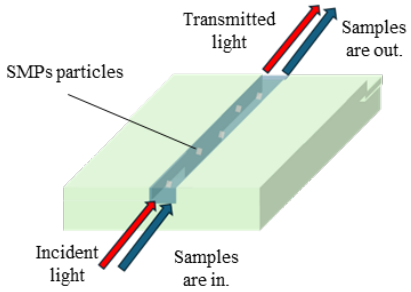


Fig.1 Example of optical devices

3. 実験結果

プローブラマン分光装置を用いた実験系で，以下の Fig.2 に示すようなラマン散乱強度の濃度依存性を確認した．また線形回帰分析を行い，ラマン分光法で検出可能な最小濃度を得ることができた．さらに，基板に用いる材料を変更させることで検出限界値を著しく下げることに成功した.

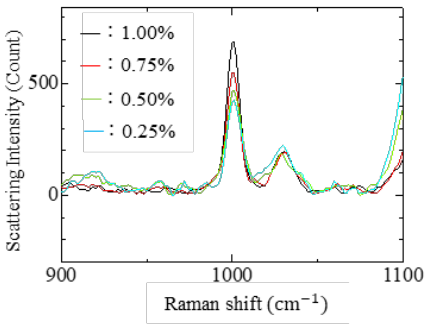


Fig.2 Raman spectra from PS solution.

謝辞

本研究は，次世代半導体人材育成センターの助成を受けていることを記して，謝意を表します.

参考文献

[1] G. Persichetti, G. Testa, and R. Bernini: Sensors and Actuators B, vol.207, pp.732-739, February 2015.

© 2025年 応用物理学会

偏波無依存性光トリプレクサを構成する多モード干渉カプラの伝搬特性

Propagation Characteristics of Multi-Mode Interference Couplers for Polarization Independent Optical Triplexer

芝浦工大院理工[1]，次世代半導体人材育成センター[2]

○(M2)白石 寛人[1]，(M1)秋本 千智[1]，横井 秀樹[1,2]

Shibaura Inst. of Technol.[1], Center for Next Generation Semiconductor Human Resources[2]

○Hiroto Shiraishi[1], Chisato Akimoto[1], Hideki Yokoi[1,2]

E-mail: ag20031@shibaura-it.ac.jp

1. 背景

大容量高速通信の需要に伴い、光ファイバ通信は低損失で遠距離通信が可能であるものとして発展してきた。光通信において複数の光信号を 1 つの装置に集約すると共に、上り伝送と下り伝送を 1 本の光ファイバを用いて双方向伝送する技術が用いられる。これを波長分割多重技術(WDM:Wavelength Division Multiplexing)といい、この技術を用いた合分波器として光トリプレクサが必要となる。本研究では偏波無依存性の光トリプレクサを構成する多モード干渉 (MMI: Multi Mode Interference)カプラの設計を行い、素子の小型化、低損失化を目的とする。

2. 素子構造及び解析結果

光トリプレクサとは波長の異なる 3 つの光を合分波するための 6 つの MMI カプラと交差導波路からなる素子である。コア導波層は Si、クラッド層は SiO_2 から構成される。

本研究で解析を行った MMI カプラの構造を Fig.1 に示す。1 本の入力導波路に 1490 nm, 1550 nm の TE モードが入射され、それぞれの光波が 2 本の出力導波路へ出射されるように設計した[1]。MMI カプラの挿入損失が 1 dB 以下、クロストークが－10 dB 以下を目標に解析を行った。

Fig.2 に入出力導波路 0.4 μm における解析結果を示す。カプラ幅 1.6 μm、カプラ長 85.3 μm の時、両モードがスルーポートに出射される光強度が高く、挿入損失が Output1:0.76 dB、Output2:0.81 dB となった。またクロストークは Output1:－12.9 dB、Output2:－13.4 dB となり、高性能化に繋がった。

3. 結論

偏波無依存光トリプレクサを構成する MMI カプラの構造を検討した。入出力導波路を MMI カプラの両端に設計することで低損失、低クロストークを実現する素子を設計することができた。また、先行研究と比較して小型化に成功した。

4. 謝辞

本研究の一部は次世代半導体人材育成センターの助成を受けていることを記して、敬意を表します。

参考文献

[1] Yaocheng Shi, Srinivasan Anand, and Sailing He: JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 27, NO. 11, JUNE 1, 2009

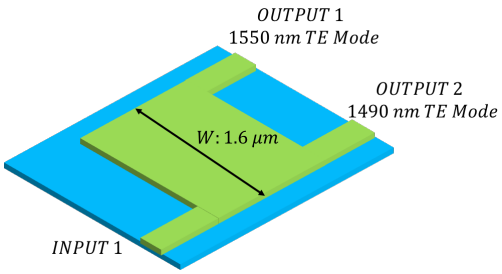


Fig.1 Structure of MMI Couplers

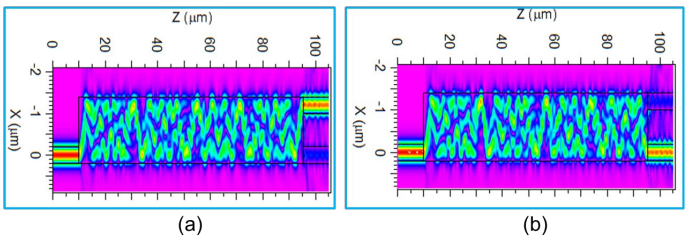


Fig.2 Propagation characteristics of TE modes at (a) 1550 nm and (b) 1490 nm

© 2025年 応用物理学会

非対称マッハツェンダ干渉計を利用した非相反移相型光アイソレータの設計

Design of Optical Isolator Employing Nonreciprocal Phase Shift with Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer

芝浦工大院理工[1]，次世代半導体人材育成センター[2]
○(M2)池田 拓暉[1]，(M1)丸山 虎伯[1]，横井 秀樹[1,2]
Shibaura Inst. of Technol.[1], Center for Next Generation Semiconductor Human Resources[2]
○Hiroki Ikeda[1], Kohaku Maruyama[1], Hideki Yokoi[1,2]
E-mail: ag20035@shibaura-it.ac.jp

１．はじめに

光通信システムにおいて、半導体レーザの発振を安定させるためには、反射光によるノイズを抑制する必要がある。そこで一方向にのみ光を伝搬させる光アイソレータが不可欠である。シリコンフォトニクスへの導入に向けた、光アイソレータの実現方法の一つとして、非相反移相効果を利用した導波路型光アイソレータがある。Si などの高屈折率材料を導波層とする磁気光学導波路では、伝搬する光波に大きな非相反移相量が生じることが報告されている[1]。本研究では、非相反移相型光アイソレータとして動作する、非相反移相器の光路長について、パラメータの検討を行ったため報告する。

２．素子構造

Si 導波層を有する非相反移相型光アイソレータを Fig.1 に示す。非相反移相器がマッハツェンダ干渉計に挿入された導波路型光アイソレータである。干渉計の一方の導波路は空気/Si/SiO_2 構造であり、もう一方は磁性ガーネット/Si/SiO_2 構造となっている。磁界印加による非相反移相効果の影響により、順方向では干渉計を伝搬する光が同位相で出力端に結合される。逆方向では干渉計を伝搬する光が逆位相で打ち消しあうため、出力端に結合されない。

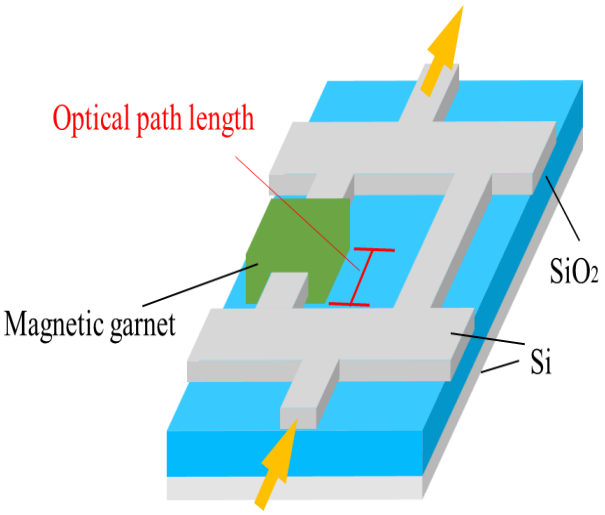


Fig. 1 Nonreciprocal phase shift optical isolator with Si waveguide layer

３．結果

非相反移相型光アイソレータとして動作する光路長のパラメータの検討を行った。Si 導波層のコア幅が 0.5[μm]、光路長が 663.7[μm]のときに、順方向で同位相、逆方向で逆位相となることが分かった。

謝辞

本研究は、次世代半導体人材育成センターの助成を受けていることを記して、謝意を表します。

参考文献

[1] H. Yokoi, T. Mizumoto and Y. Shoji: Appl. Opt., Vol. 42, no. 33, pp. 6605-6612, November 2003.

© 2025年 応用物理学会

n 型 InP/電気光学ポリマー光変調器の高効率デバイス構造の検討

High-Efficiency Device Structure of n-type InP/Electro-Optic Polymer Hybrid Optical Modulator

徳島大・大学院[1]、ポスト LED フォトニクス研[2]　(M1)猪飼建介[1]、藤方潤一[2]
Tokushima Univ.[1], Institute of Post-LED Photonics Lab.[2], Kensuke Ikai[1], Junichi Fujikata[2]
E-mail: c6125360125@tokushima-u.ac.jp

1. はじめに

近年、通信容量の顕著な増加に伴い、低電力・高性能な光変調器の開発が重要となっている。

本研究では、ラダー電極構造を用いた n 型 InP/電気光学ポリマー・ハイブリッド光変調器[1]に関して、構造最適化を行った。さらに、金属電極による光損失を抑制するため、フォトニック結晶(PC)構造による光閉込め効果を活用した位相変調器を解析した。

2. シミュレーションモデル

図 1(a)は、n 型 InP ラダー導波路を構造の概略図、図 1(b)はその上面図を示している。本研究では、金属電極による光透過率への影響を FDTD 法により解析した。InP のラダー導波路厚 h は 250nm、スロット幅 l_s とラダー幅 l_w ラダー周期 l_p は、それぞれ 100 nm、20 nm、480 nm とした。

さらに本検討では、ラダー導波路に PC 構造を付与したデバイス構造を解析した。図 1(c)はラダー導波路構造に三角格子型 PC 構造を付与した導波路、図 1(d)はその上面図である。今回付与した PC 構造の周期 a は 450 nm、ホール半径 r は 147.5 nm である。また、今回は金属電極として、厚さ 250 nm、幅 1 μm の Au 電極を隣接して配置した。

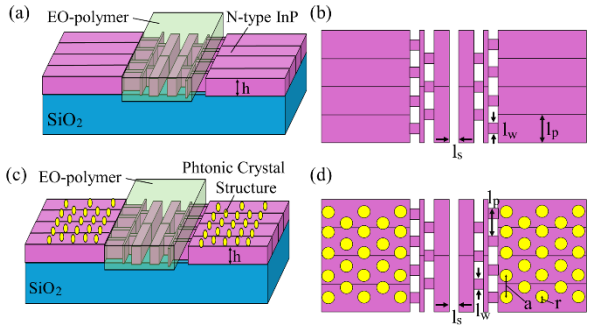


図 1 (a) n 型 InP ラダー導波路の斜視図、(b)上面図、(c) n 型 InP のラダー導波路に三角格子 PC 構造を付与した導波路の斜視図、(d)上面図.

3. 結果と考察

ラダー周期 l_p を 350 nm から 550 nm まで変えて透過率の変化を評価した。図 2(a)はラダー周期に対する 1 mm 当たりの透過率を示したものである。図よりラダー周期が 480 nm の時に高い透過率を示すことが分かった。これより以下の計算はすべて l_p=480 nm で行った。次にラダー導波路に PC 構造を付与した導波路の PC 構造の列数と金属電極による吸収率の関係について調べた。PC 構造の列数 (0～9 列) と金属電極による光透過率の関係を図 2(b)示す。列数が増えるほど光透過率は低下し、5 列で約-2 dB となり飽和することが確認された。また、0 列と 5 列の時での光電界強度分布図とスロット部断面の電界強度図を図 2(c)~(f)に示す。PC 構造を 5 列付与した場合、スロット部の電界強度が最大となり、光の広がりも抑制されることが確認された。これにより、金属電極による光損失が低減され、高い光閉じ込め効果が得られることが示された。

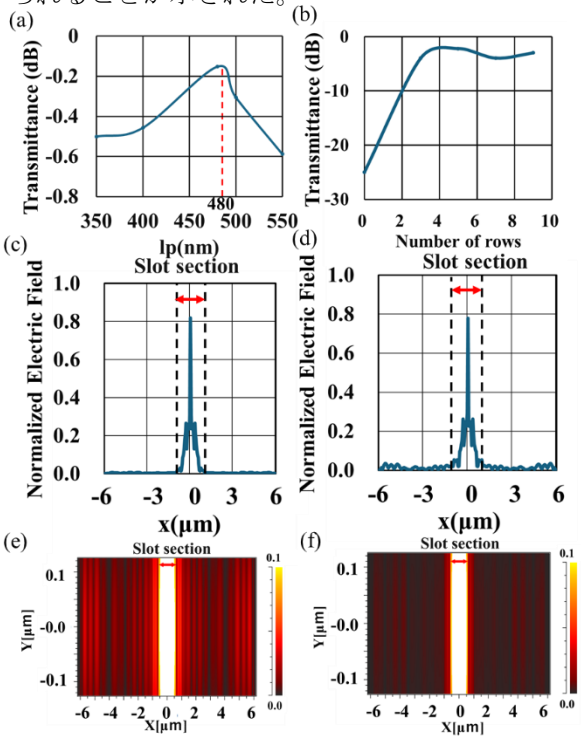


図 2 (a) ラダー周期 l_p と光透過率の相関図、(b)PC 構造の列数による金属電極による吸収率依存性、(c) PC 構造なしの電界強度分布と (d) 5 列の PC 構造を用いた場合の電界強度分布. (e) PC 構造のない導波路の断面電界分布、(f) 5 列の PC 構造を付与した場合の断面電界分布.

4. まとめ

本研究では、ラダー電極を用いた n 型 InP/EO ポリマー光変調器と PC 構造を組み合わせた導波路の光損失と電界強度を評価した。PC 構造を付与することにより、光閉じ込め効果によるスロット部の電界強度の増加と金属電極による光損失抑制が実現されることが明らかとなった。

謝辞
本研究成果の一部は，国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究（JPJ012368C02101）により得られたものです。また、本研究の一部は科研費（JP22H01555、JP23H00274、JP25K01289）、SCAT の助成を受けた。

参考文献

[1] N. Sekine et al., Opt. Express, vol. **28**(20), 29730 (2020).

© 2025年 応用物理学会

シリコンフォトニクス応用に向けた SiN_x 堆積膜の物性比較

Comparison of SiN_x Film Properties for Silicon Photonics Applications

豊橋技科大 °(M1)久保主瑳，(M2)岡垣 颯，Jose A. Piedra-Lorenzana，石川靖彦
Toyohashi Univ. Tech. °(M1)Kazusa Kubo, (M2)So Okagaki, Jose A. Piedra-Lorenzana, Yasuhiko Ishikawa
E-mail: kubo.kazusa.dg@tut.jp, ishikawa@ee.tut.ac.jp

1. はじめに　シリコンフォトニクスにおいて、光通信波長（1.31/1.55 μm）帯の光導波路材料として Si と SiN_x が挙げられる。Si 導波路ではキャリア増減による屈折率変化（キャリアプラズマ効果）を利用することで光変調器が作製できる。一方、高強度光では二格子吸収による損失が発生する課題がある。SiN_x 導波路は二格子吸収が発生しないため、高強度光が必要となる非線形光学デバイスへ展開されている。熱光学係数が Si よりも一桁小さく、共振デバイスが温度変化に対して堅牢に動作する利点もある。しかし、SiN_x 膜は絶縁体であるためキャリアプラズマ効果を利用できない。堆積膜は非晶質であるが、外部電界による対称性の破れによって 2 次非線形性である電気光学（EO/Pockels）効果が現れるという報告がある[1,2]。ひずみ[3,4]による対称性の破れによって EO 効果が発生する可能性もある。SiN_x 膜は堆積条件によって、線形屈折率、密度、内蔵応力といった物性が変化する。EO 効果の最大化を試みる第一ステップとして、本研究では堆積手法や堆積条件の異なる SiN_x 膜に対する物性比較を行った。

2. 実験方法　低圧化学気相堆積（LP-CVD）、プラズマ CVD（PE-CVD）、反応性スパッタリングを用い、4 インチ Si(001)ウェーハ上に 100 nm の SiN_x 膜を堆積した。LP-CVD では、原料ガスに SiH_2Cl_2 および NH_3 を用い、温度 820℃、堆積圧力 70 Pa で堆積を行った。PE-CVD では、原料ガスに 10%-SiH_4/N_2、NH_3、および N_2 を用い、温度 300℃で堆積を行った。堆積圧力として 50 および 200 Pa の二種類を用いた。反応性スパッタリングでは、ターゲットに Si、ガスに Ar および N_2 を用い、堆積圧力 0.5 Pa、温度 200℃で堆積を行った[5]。屈折率、内蔵応力、密度、微視的構造の評価を行った。

3. 結果と考察　Table 1 に SiN_x 堆積膜の屈折率（波長 633 nm）と内蔵応力をまとめた。LP-CVD 法による SiN_x 膜は屈折率が理想値に近い。緻密で化学量論的組成（$x = 4/3$）に近い膜が形成された。反応性スパッタによる SiN_x 膜も LP-CVD と同様な屈折率を示したが、内蔵応力の極性が異なり、LP-CVD では引張応力、反応性スパッタでは圧縮応力となった。一方、PE-CVD 法による SiN_x 膜では屈折率が低下した。また、堆積圧力によって内蔵応力の極性が変化した。X 線反射測定による密度評価、および X 線回折による構造評価を進めており、これらの関係性を明確化するとともに、対称性・非対称性に対する影響を調査する予定である。

Table. 1　SiN_x 膜の特性比較

		Deposition rate (nm/min)	Refractive Index at 633 nm	Film Stress (GPa)
Ideal Si_3N_4		–	2.04 [6]	–
LP-CVD		6.6	1.96	+0.43
PE-CVD	50 Pa	24.0	1.94	-0.21
	200 Pa	57.5	1.90	+0.53
Reactive Sputtering		7.0	1.96	-0.31

4. まとめ　SiN_x の堆積方法や堆積条件によって、屈折率や内蔵応力が変化した。密度や微視的構造の評価を進め、対称性の破れに対する影響を調査する予定である。

謝辞　本研究の一部は、JSPS 科研費（23K03941、25H00738）、日本板硝子材料工学助成会、電子回路基板技術振興財団の支援により実施した。

参考文献

[1] Zabelich et al., ACS Photon. 9, 3374 (2022).
[2] Zyang et al., Opt. Mater. Express 13, 237 (2023).
[3] Jacobsen et al, Nature 441, 199 (2006).
[4] Chmielak et al., Opt. Express 19, 17212 (2011).
[5] Tsuchiya et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 28, 4400109 (2022).
[6] Luke et al., Opt. Lett. 40, 4823 (2015).

© 2025年 応用物理学会

Low-Temperature Green Synthesis of Sand-Derived Silica and Its Composites Toward Industrial Dye Removal Applications

Chaity Ghosh[1], Abdul Kuddus[2*], Shinichiro Mouri[2,3] and Abu Bakar Md. Ismail[1*]

[1]*Solar Energy Lab, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Rajshahi, Rajshahi 6205, Bangladesh*

[2]*Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University, Shiga 525-8577, Japan*

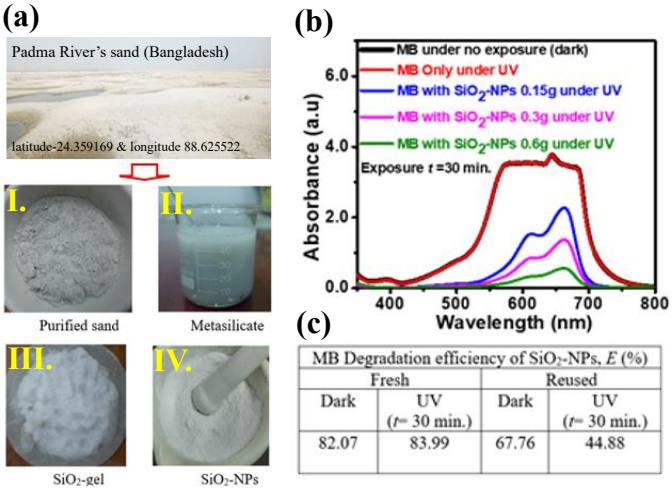
[3]*Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan*

**E-mail: kuddus37@fc.ritsumei.ac.jp, ismail@ru.ac.bd*

Silica nanoparticles (SiO_2 NPs) have emerged as highly effective adsorbents for wastewater treatment due to their large surface area, tunable porosity, and chemical stability. Among various industrial dyes, methylene blue (MB) is particularly persistent and toxic, posing serious environmental and public health risks. Utilizing abundant natural resources such as (Padma) river sand for silica extraction offers a sustainable and cost-effective pathway aligned with green chemistry principles for removing such contaminants [1, 2]. This study presents a dual-purpose, eco-friendly approach: converting river sand from Bangladesh into silica nanoparticles (SiO_2 NPs) and applying them as efficient adsorbents for dye removal.

Herein, silica nanoparticles (SiO_2-NPs) were synthesized from Padma River's sand, Bangladesh via a microwave-assisted method. The sand was first purified using deionized water, acetone, and diluted HCl. It was then fused with NaOH under microwave heating at 250 °C for 30 minutes to form sodium silicate (Na_2SiO_3). This was acidified (pH < 10) with HCl and further treated under microwave heating at 400 °C for 30 minutes to produce silica gel. The gel was dried and calcined at 400 °C for 30 minutes, followed by grinding and ball milling to obtain fine SiO_2 nanoparticles.

Figure 1 shows the extraction steps SiO_2-NPs including absorbance and dye removal efficiency. The synthesized SiO_2 NPs achieved around 84% MB removal from a 50-ppm solution using 60 mg of adsorbent under UV light for 30 minutes, exhibiting potential to be used in dye removal efficiently from wastewater trough greenery strategies. In this study we will present granary extraction of SiO_2-NPs, and composites, their processing and practical applications, specially contributing toward environmental conservation.



MB Degradation efficiency of SiO_2-NPs, E (%)			
Fresh		Reused	
Dark	UV (t= 30 min.)	Dark	UV (t= 30 min.)
82.07	83.99	67.76	44.88

Figure 1.

(a) SiO_2-NPs extraction steps.

(b) The absorbance spectra of SiO_2 NPs mixed MB dye under UV exposure and

(c) a summary of dye removal efficiency of fresh and reused SiO_2-NPs under dark and UV exposure.

References: 1. N E Villarreal et al. *Coatings*, 14(7), 919 (2024) 2. M S Islam et al., J. Mater. Environ. Sci. 16(3) 451-471 (2025)

© 2025年 応用物理学会

Synthesis and Characterization of Silicon-Rich Silica Nanoparticles from Padma River Sand

Md. Sakib Ahmed[1], Md. Suman Islam[1], Abdul Kuddus[2*], Shinichiro Mouri[2,3], Abu Bakar Md. Ismail[1*]

[1]*Solar Energy Lab, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Rajshahi, Rajshahi 6205, Bangladesh*
[2]*Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University, Shiga 525-8577, Japan*
[3]*Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan*

**E-mail: ismail@ru.ac.bd, kuddus37@fc.ritsumei.ac.jp*

Silicon-rich silica, containing nanoscale silicon crystallites within a silica matrix, exhibits unique optical, electronic, and semiconducting properties, along with biocompatibility making it valuable for nanotechnology and optoelectronics [1, 2]. Importantly, the conventional synthesis processes are expensive, involving techniques like chemical vapor deposition, sputtering, or thermal annealing as well as high power consumption [3]. In present study, a sustainable, economic process is utilized to produce silicon-rich silica-nanoparticles (Si-rich SiO_2-NPs) from the naturally abundant sand of the Padma River, Bangladesh (collection point: latitude-24.359169 and longitude 88.625522). A sequential two-step alkali fusion process, specifically magnesiothermic reduction at varying silica gel-to-magnesium ratios (1:0.75, 1:0.5, and 1:0.25) were executed to obtain the highest amount of silicon containing SiO_2 yield. The XRD, FTIR, Raman spectroscopy, photoluminescence (PL), SEM, BET, XRF, TGA-DTA, DLS, and zeta potential analysis were executed to characterize the extracted silicon containing SiO_2 yield.

In **Figure 1a** XRD patterns revealed the presence of polycrystalline silicon with distinct peaks corresponding to (111), (220), (311), (400), and (331) planes embedded in an amorphous silica matrix. Further, Raman spectra confirmed the reduction of Si–O–Si bonds with gradually quenched its intensity, on the other hand, the domination of Si–Si vibrational modes. An obvious Raman 520 cm^{-1} peak shifts toward original position from 517 cm^{-1} with varying metal of Mg revealed the role of metal element for achieving Si-rich SiO_2 having (**Fig.1b**). Further, PL spectra exhibited aligned shift as of Raman observations exhibiting strong emissions at 548 nm (**Fig.1c).** Importantly, BET analysis revealed a Type IV isotherm with a surface area of 59.88 m^2/g and an average pore size of 11.9 nm, while TGA-DTA analysis demonstrated enhanced thermal stability with significant endothermic transitions, even temperature ~600 °C. DLS and zeta potential measurements indicated a uniform particle Si-rich SiO_2 size distribution and good colloidal stability (–32.6 mV). In the presentation, we will present the detailed overview of growth process, distinct characteristics of extracted yield and their subsequent potential for applications in energy storage, optoelectronics, and agricultural nanotechnology.

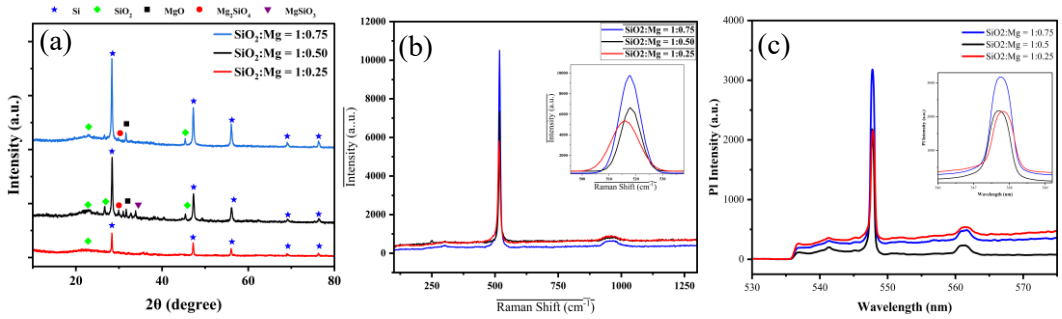


Figure 1. (a) X-ray diffraction (XRD), (b) Raman, and (c) respective PL spectra of extracted Si-rich SiO_2 using two-steps magnesiothermic reaction at varying metal (Mg) ratio.

References: 1. Buckwell et al., (2015) 2. Kenyon et al., (2017) 3. Kenyon et al., (1994)

© 2025年 応用物理学会

Green Synthesis Silica-based Copper Oxide Composite (CuO-SiO_2) from Sugarcane Bagasse Ash for Photocatalytic Degradation of Toxic Dye in Industrial Wastewater

Md. Suman Islam[1], Md. Sakib Ahmed[1], Abdul Kuddus[2*], Shinichiro Mouri[2], Samia Tabassum[3], Abu Bakar Md. Ismail[1*]

[1]*Solar Energy Lab, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Rajshahi, Rajshahi 6205, Bangladesh*
[2]*Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University, Shiga 525-8577, Japan.*
[3]*Institute of Energy Research and Development (IERD), Bangladesh Council of Scientific and Industrial Research (BCSIR), Dhaka, 1205, Bangladesh*

**E-mail: ismail@ru.ac.bd, kuddus37@fc.ritsumei.ac.jp*

Nano-sized mesoporous silica is widely regarded as an effective adsorbent for textile wastewater treatment and an ideal support material for metal oxide-based photocatalysts in the degradation of industrial dye pollutants. Conventional synthesis methods typically depend on expensive surfactants and selective precursors like tetraethyl orthosilicate (TEOS), limiting scalability and sustainability. Additionally, synthesized silica exhibited a partial crystalline structure with index of ~57.83% and an average crystallite size of ~27.12 nm [1]. In this study, we present a surfactant-free, microwave-assisted alkali fusion method to synthesize high-purity silica nanoparticles (92.44 wt%) and a CuO-SiO_2 composite from sugarcane bagasse ash (SCBA), a renewable and low-cost agricultural waste.

As demonstrated in **Figure 1**, the extracted silica (SiO_2) showed a high surface area of ~365.93 m^2/g, mesoporous structure with a pore diameter of ~71.95 Å, pore volume of ~0.6582 cm^3/g, and a Si:O atomic ratio of ~0.50, which is consistent with previous report [2]. Further, FTIR analysis confirmed the presence of key silica functional groups showing peaks at 461, 970, 1092, and 1640 cm^{-1}. In case of CuO-SiO_2 composite, FTIR spectra formation of Cu–O bonds confirmed exhibiting peak at 460-461 cm^{-1} [3]. A highly irregular, rough surface morphology with sheet-like and flaky structures also observed in SEM, indicating well-dispersion of CuO nanoparticles on the silica matrix which further confirmed by EDAX analysis. In preliminary study, photocatalytic testing with Methylene Blue (MB) dye showed removal efficiencies of 36.48% (dark) and 51.5% under UV light for 30 minutes exposure, indicating considerable photocatalytic potential. In this study we explore the scalable simple growth strategies, post growth processing and practical applications of silica nanoparticles (92.44 wt%) from sugarcane bagasse ash (SCBA) and its composite for Photocatalytic Degradation of Toxic Dye in Industrial Wastewater.

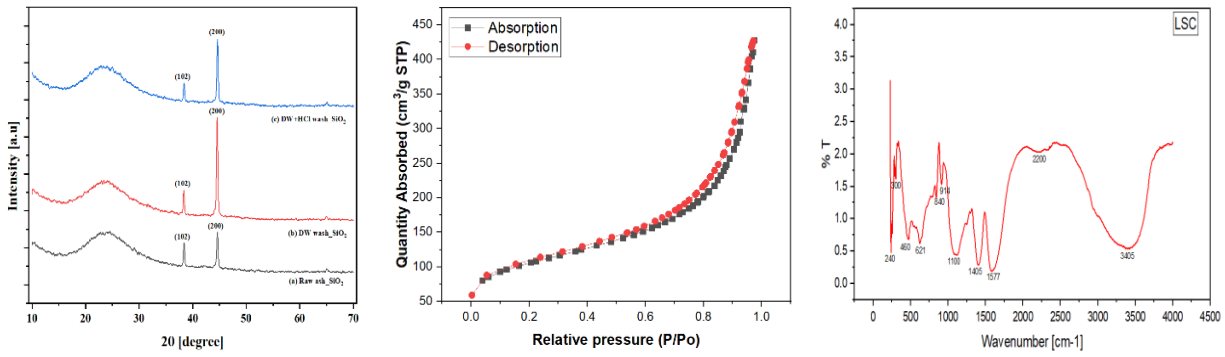


Figure 1. (a) X-ray diffraction (XRD) spectra of extracted SiO_2, (b) respective BET spectra, and (c) FTIR spectra of CuO-SiO_2 composite.

References: 1. A. Oufakir et al., (2019) 2. Pingarrón et al., (2020) 3. A. P. Batista et al., (2010)

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.13 Silicon photonics, Photonics-electronics convergence, Optical control

[8p-N202-1~18] 3.13 Silicon photonics, Photonics-electronics convergence, Optical control

[8p-N202-1]

High-Power Tolerance of PFAS-Free Single-Mode Polymer Optical Waveguides

○Satoshi Suda[1], Akihiro Noriki[1], Haruhiko Kuwatsuka[1], Fumi Nakamura[1], Takeru Amano[1] (1.AIST)

[8p-N202-2]

Light-Induced Self-Written Optical Waveguide Using 2 μm Laser Light: Toward Fiber-to-Chip Self-Coupling

○(M2)Mizuki Shiba[1], Hidetaka Terasawa[2], Keisuke Kondo[1,2], Okihiro Sugihara[1,2] (1.Utsunomiya Univ., 2.Udai Eng.)

[8p-N202-3]

Self-written optical waveguide with self-healing

○Tomoya Takizawa[1], Makiko Ichioka[1], Hidetaka Terasawa[1], Keisuke Kondo[1], Okihiro Sugihara[1] (1.Utsunomiya Univ)

[8p-N202-4]

Photonic wire bonding using developed high-refractive-index polymer material fabricated by dip-in laser 3D lithography

○Lixin Xiang[1], Sho Okada[2], Katsunori Nishiura[3], Takuo Shikama[3], Shu Nagamatsu[1], Towa Maekawa[1], Kensuke Otsuka[3], Tomohiro Amemiya[1] (1.Science Tokyo, 2.NICT, 3.Mitsui Chemicals, Inc)

[8p-N202-5]

SiN-rib InP membrane waveguide with a low-loss taper structure

○Jinchi Pan[1], Hiroya Sakumoto[1], Tomohiro Akazawa[1], Kasidit Toprasertpong[1], Shinichi Takagi[1], Mitsuru Takenaka[1] (1.The Univ. of Tokyo)

[8p-N202-6]

High misalignment tolerant compound semiconductor on dielectric or Si waveguide direct bonding structure based on taper waveguide

○Hideaki Okayama[1], Hiroyuki Takahashi[1], Hideaki Ono[1], Daisuke Shimura[1], Tanigawa Kenichi[1], Takahito Suzuki[1], Hironori Huruta[1], Nobuhiko Nishiyama[2] (1.OKI, 2.Science Univ. Tokyo)

[8p-N202-7]

Characteristics Comparison of Interlayer Couplers Between Silicon Oxynitride and Silicon Waveguide Layers

○(D)Kaibin Yao[1], Moataz Eissa[1], Tsuyoshi Horikawa[1], Nobuhiko Nishiyama[1,2,3] (1.Science Tokyo Inst., 2.IIR, 3.PETRA)

[8p-N202-8]

Evaluation of Optical Power Density Dependency of Photoinduced Effective Refractive Index Change in PLC

○Yuji Fujiwara[1], Junji Sakamoto[1], Satomi Katayose[1], Takeshi Umeki[1], Toshikazu Hashimoto[1] (1.NTT Device Technology Labs.)

[8p-N202-9]

A design of Er-doped CeO_2 split waveguide structure with high tolerance to structural fluctuations.

○Tomohiro Inaba[1], Xu Xuejun[1], Takehiko Tawara[2], Hiroo Omi[3], Hideki Yamamoto[1], Haruki Sanada[1] (1.NTT BRL, 2.Nihon Univ., 3.Yamato Univ.)

[8p-N202-10]

Examination of selective quantum well intermixing on III-V on insulator wafer

○(M2)Sheng Fu[1], Kasidit Toprasertpong[1], Shinichi Takagi[1], Mitsuru Takenaka[1] (1.Univ. Tokyo)

[8p-N202-11]

Investigation of Etching Conditions for Thin Film LN Mach-Zehnder Interferometers

○Takeru Einaga[1], Masahiro Uemukai[1], Tomoyuki Tanikawa[1], Ryuji Katayama[1] (1.Univ. of Osaka)

[8p-N202-12]

Amorphous-Si Strip-Loaded Thin Film Lithium Niobate on Insulator Waveguides with Low Propagation Loss and Reduced Bending Radius

○Moataz Eissa[1], Yoshitaka Ohiso[1], Kensuke Ogawa[1], Yuki Nemoto[2], Shoichiro Yamaguchi[2], Masahiko Namerikawa[2], Nobuhiko Nishiyama[1] (1.Science Tokyo, 2.NGK Insulators)

[8p-N202-13]

Evaluation of electro-optic coefficient of micro-transfer-printed thin-film lithium niobate by using birefringent field-modulation imaging technique

○Toshiya Murai[1], Keishi Sunami[2], Rai Kou[1] (1.AIST PEIRC, 2.AIST CETRI)

[8p-N202-14]

Light Propagation through Waveguide with Grating Couplers Fabricated on Thin-Film Lithium Niobate (II)

○Shoji Hachuda[1], Ryosei Kitahara[1], Shunsuke Sakamoto[1], Toshihiko Baba[1] (1.Yokohama Nat'l Univ.)

[8p-N202-15]

Experimental Demonstration of Directionality Improvement of Grating Coupler by Reflective Layer Cladding

○Yuka Mima[1], Keisuke Ozawa[1], Junichi Inoue[1], Kenji Kintaka[2], Shogo Ura[1] (1.Kyoto Inst. Tech., 2.AIST)

[8p-N202-16]

Optimization of Highly Efficient Broadband Grating Coupler and Investigation of High Efficiency

○Naoki Tahara[1], Shota Nawa[1], Mikiya Kamata[1], Toshihiko Baba[1] (1.Yokohama Natl Univ)

[8p-N202-17]

NIL process using resist master mold fabricated by grayscale lithography

○Shu Nagamatsu[1], Towa Maekawa[1], Lixin Xiang[1], Jooyeon Lee[2], Kensuke Otsuka[2], Hiroshi Miyao[2], Kenji Iida[2], Tomohiro Amemiya[1] (1.Science Tokyo, 2.Mitsui Chemicals)

[8p-N202-18]

Wafer-level characterization of integrated optical devices using OFDR (2)
- Formulation of waveguide multiple reflections in transmission and reflection profiles–

○Tsuyoshi Horikawa[1], Nobuhiko Nishiyama[1,2] (1.Science Tokyo, 2.PETRA)

PFAS フリーなポリマー光導波路のハイパワー光耐性

High-Power Tolerance of PFAS-Free Single-Mode Polymer Optical Waveguides

産総研[1] ○須田 悟史[1], 乗木 暁博[1], 鍬塚 治彦[1], 中村 文[1], 天野 建[1]

AIST[1], ○Satoshi Suda[1], Akihiro Noriki[1], Haruhiko Kuwatsuka[1], Fumi Nakamura[1], Takeru Amano[1]

E-mail: s-suda@aist.go.jp

近年、ポリマー光導波路は、低コストかつ柔軟な製造プロセスを有することから、光通信、LiDAR、光センサ光電融合技術等の多様な分野で注目を集めている[1-4]。特に C バンド（1550 nm 帯）では、化学的安定性に優れたフルオロポリマー材料による光導波路が広く用いられ、極低損失（<0.07 dB/cm）および高出力耐性（30 dBm 入力で 160 時間動作）の実績が報告されている [2]。一方、近年の PFAS（ペルフルオロアルキル物質）規制の強化に伴い、環境負荷の低い代替材料の開発が急務となっている。しかし、PFAS フリー材料を用いた光導波路は一般的に材料吸収が高く（～0.5 dB/cm） [5]、高い光パワー入力時の熱劣化や熱吸収による発熱が懸念される。本研究では、日産化学製 PFAS フリー材料 SUNCONNECT®を用い、ダイレクトレーザ描画法により作製したシングルモードポリマー光導波路の高出力耐性について初期評価を実施した。作製した導波路は長さ 11 mm、コアサイズ 9 ×7 μm で、光ファイバとのモード整合性も良好であった。挿入損失測定の結果、1550 nm における平均伝搬損失は 0.8 dB/cm±0.1 dB と高い加工均一性が得られた。高出力入力試験では、1550 nm の連続波(CW)レーザ光を EDFA で増幅し、最大+26.0 dBm まで入力した。その結果、入出力特性は線形性を維持し、過剰損失は観測されなかった。なお、シリコン導波路では数十 mW 程度の入力で非線形損失や端面損傷が生じることが文献[6]で知られており、ポリマー光導波路はこれに比して高い耐性を持っていることが分かった。さらに、+19.6, +23.5, +26.0 dBm の入力条件下で 6 時間の高出力信頼性試験を行ったところ、出力変動は±0.3 dB 以内であることが観測された。本成果は、PFAS 代替材料のハイパワーフォトニクスアプリケーション用途への適用可能性を示唆するものである

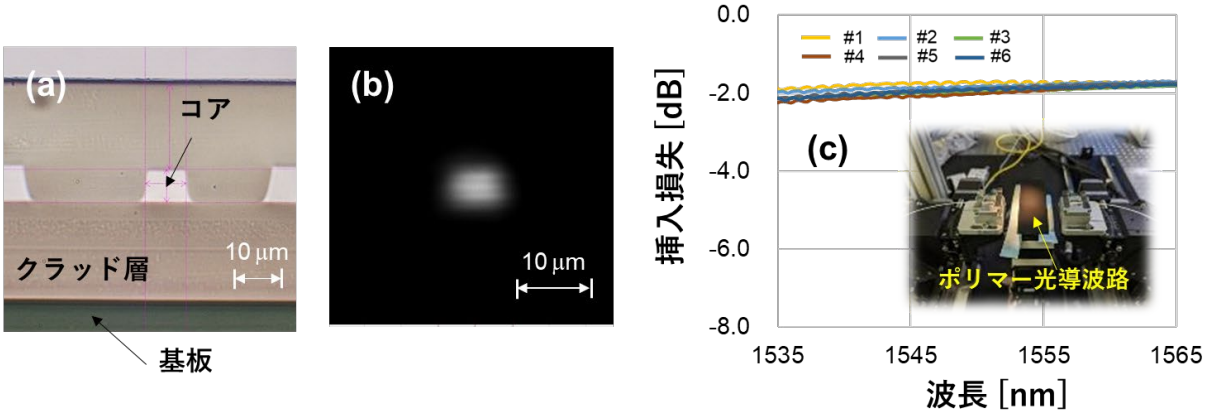


図 1 : 作製したポリマー光導波路のサンプルの(a)断面図及び(b)その近接場パターン. (c) C バンド（1535～1565 nm）における 6 つのポリマー光導波路（#1～#6）の挿入損失.

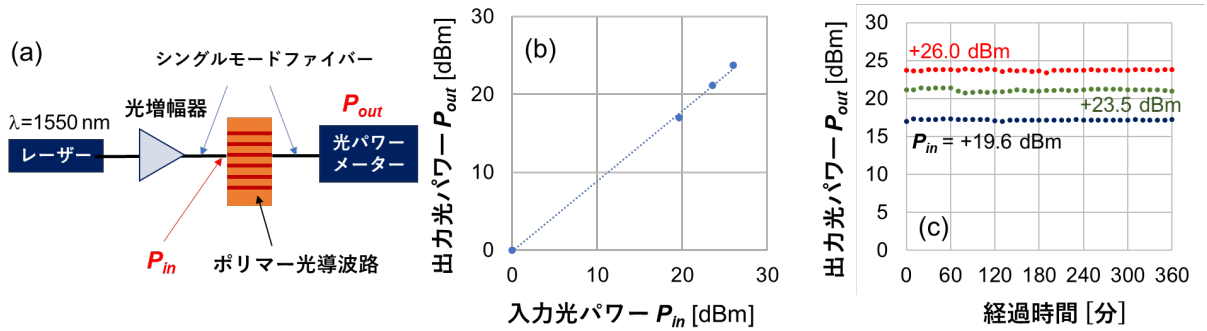


図 2 : (a) ポリマー導波路の高出力耐性試験の実験系 (b) 入出力光パワーの線形性 (c) 高出力安定性試験結果

謝辞 : この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP21029）の結果得られたものである。

参考文献 : [1] A. Yeniay, *et. al*., OFC2003, PD34 [2] S. Ken, *et. al*., Nature, 11, 2021 [3] Z. Zhang, *et. al*., Sensors, 24(4), 2024
[4] R. Dangel., *et. al*., Opt. Express, 23(4), 2015 [5] T. Ishigure, et. al., ECTC2015 [6] S. Singer, et. al., CLEO2022, SF3O.4, 2022

© 2025年 応用物理学会

波長 2 μm での自己形成光導波路：シリコンフォトニクス自動光接続に向けた検討

Light-Induced Self-Written Optical Waveguide Using 2 μm Laser Light: Toward Fiber-to-Chip Self-Coupling

宇大院 [1]，宇大工 [2]，○(M2) 柴 瑞輝 [1]，寺澤 英孝 [2]，近藤 圭祐 [1,2]，杉原 興浩 [1,2]
Utsunomiya Univ. [1], Utsunomiya Univ. Eng. [2],
○Mizuki Shiba[1], Hidetaka Terasawa[2], Keisuke Kondo[1,2], and Okihiro Sugihara[1,2]
E-mail: mc246511@s.utsunomiya-u.ac.jp

二酸化炭素のセンシングが可能な小型シリコン（Si）フォトニクス光センサの開発を目的として、自己形成（LISW）光接続技術を用いて、波長 2 μm 光を用いた LISW 光導波路の作製・光接続を行ってきた[1]。本研究では、波長 2 μm 帯の LISW 光導波路を用いた光ファイバと Si チップ間の細線の光接続を目指すべく、シングルモードで伝搬する Si チップ設計を行った。Fig. 1 に設計する Si チップの断面図を示す。コア材料を Si（n = 3.449）、クラッド材料を SiO_2（n = 1.438）とし、この Si チップが波長 2 μm でシングルモードとなるコア幅 w の最大値をシミュレーションした。Fig. 2 にそのシミュレーション結果のグラフを 0 次光（m = 0）と 1 次光（m = 1）の場合で示す。これより w = 0.66 μm が、シングルモード条件を満たす Si チップの最大コア幅になり、サブミクロンサイズでの困難な光接続に自己形成光導波路技術は有効である。さらに、波長 2 μm 光で低損失な LISW 光導波路の作製を目指すべく、アクリル系モノマー・光重合開始剤・近赤外吸収色素で構成される光硬化性樹脂を調製し、波長 2004 nm の光を用いた LISW 光導波路の作製・双方向接続を二本のシングルモード光ファイバ間で行った（コア径 11 μm、間隙幅 100 μm）。Fig. 3 にその顕微鏡画像を示す。波長 2 μm の光による光重合が実現でき、LISW 光接続で空気間隙と比較して損失を 1.5 ~ 3 dB 改善することができた。

Reference
[1] 柴瑞輝他、第 72 回応用物理学会春季学術講演会、16p-K305-1、2025.

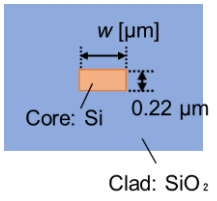


Fig. 1 Cross section of Si waveguide.

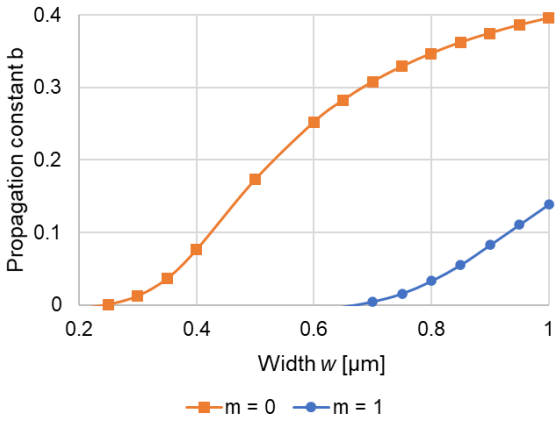


Fig. 2 Dispersion curve of Si waveguide for 2 μm.

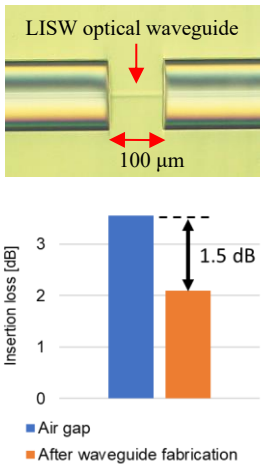


Fig. 3 Microscope image and loss measurement result.

© 2025年 応用物理学会

自己修復機能をもつ自己形成光導波路

Self-written optical waveguide with self-healing

宇大院[1]，○(M1)瀧澤 知也[1]，市岡 麻希子[1]，寺澤 英孝[1]，近藤 圭祐[1]，杉原 興浩[1]

Utsunomiya Univ.[1],

○Tomoya Takizawa[1], Makiko Ichioka[1], Hidetaka Terasawa[1], Keisuke Kondo[1], Okihiro Sugihara[1]

E-mail: mc256506@s.utsunomiya-u.ac.jp

高速光データ伝送を行う上で、光ファイバーや光導波路などの光部品を接続する技術には精密な位置合わせが要求されるため、その簡便な接続技術が要求される。光ファイバー同士の簡易接続方法の一つに自己形成光導波路がある。自己形成光導波路は光強度が高い場所から光重合していくため、多少の軸ずれを許容して光ファイバー同士を接続できる。従来の自己形成光導波路は破断すると修復は不可能であった。本研究では、将来の着脱可能なコネクタ用途展開を目指して、光硬化性樹脂に自己修復材料を混合させ、自己修復機能をもつ自己形成光導波路を作製し、着脱性付与を試みた。

ラジカル光硬化樹脂、重合開始剤、近赤外吸収色素に自己修復材料または、比較材料アクリル酸ブチルを混合し、自己修復機能有と自己修復機能無の 2 種類の材料を調製した。どちらの材料も 100℃、500 rpm で 10 分撹拌した後、1.0 kPa、5 分自転公転ミキサーで攪拌した。コア径 50 μm のマルチモードファイバー間に約 50 μm の間隙を作り、樹脂材料を間隙に注入して、波長 850 nm の光を片側 20 μW で 1 分間双方向照射し自己形成光導波路を作製した。着脱プロセス画像を図 1 に示した。それぞれの材料で作製した自己形成光導波路を光軸方向へ引き延ばし破断後、1 分間再接触させ、損失を測定した。着脱過程を 10 回行い、再接続時の挿入損失を自己修復機能有無で比較し、その測定結果を図 2 に示した。導波路作製直後を便宜上再接続 0 回目とした。再接続後も挿入損失は自己修復材料の方が小さく、増大もわずかであった。今後は着脱性のメカニズムについて確認を試みる。

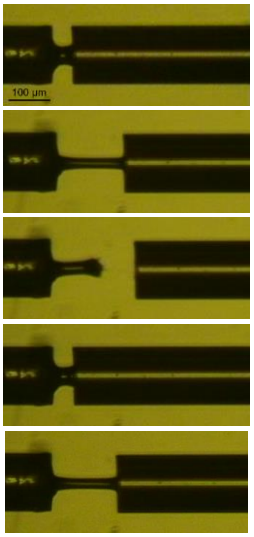


図 1 再接続方法

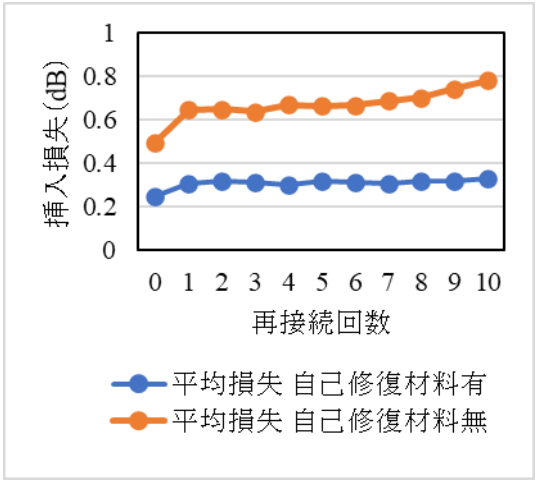


図 2 損失測定結果比較

© 2025年 応用物理学会

ディップイン式レーザー3D リソグラフィーを用いた 高屈折率ポリマーによるフォトニックワイヤーボンディング

Photonic wire bonding using developed high-refractive-index polymer material fabricated by dip-in laser 3D lithography

○向 立昕[1], 岡田 祥[2], 西浦 克典[3], 四釜 拓生[3], 永松 周[1], 前川 永遠[1], 大塚 健祐[3], 雨宮 智宏[1]

東京科学大学[1] 情報通信研究機構[2] 三井化学株式会社[3]

Lixin Xiang[1], Sho Okada[2], Katsunori Nishiura[3], Takuo Shikama[3], Shu Nagamatsu[1], Towa Maekawa[1], Kensuke Otsuka[3], Tomohiro Amemiya[1]

[1]Department of Electrical and Electronic Engineering, Institute of Science Tokyo, Tokyo 152-8552, Japan.

[2]Photonic ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Tokyo 184-8795, Japan.

[3]Innovative Solutions Center for Information & Communication Technology, R&D Center, Mitsui Chemicals, Inc., Chiba 299-0265, Japan

E-mail: xiang.l.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

フェムト秒レーザーによる 3 次元光造形を基盤とするフォトニックワイヤボンディング（PWB）技術は、後工程でデバイスの任意の箇所に三次元の樹脂細線を形成できることから、各種光デバイスを高精細なアラインメントなしに接続可能にする[1]。光デバイス間の集積性を高めるために、形成されたポリマー細線での強い光閉じ込めには高性能な光硬化性樹脂が不可欠である。本研究では、光通信帯域に適した高屈折率・低損失の 3 次元レーザー描画用樹脂を開発した[2]。この材料による PWB 技術を用いてマルチコアファイバ（MCF）とシリコン光チップを接続することで次世代 Co-Packaged Optics (CPO) (Fig.1) の実現が期待される。その可能性を検証するため、本材料の光伝搬特性を評価する必要がある。以下、詳細を述べる。

2. 開発したポリマー材料で作製した PWB の光伝搬特性

開発したポリマー材料は、ディップインレーザー描画（DiLL）用途としては世界最高の屈折率 1.65, アッベ数 31（波長λ = 587.6nm）を有する材料を開発することに成功した。Yb:KGW フェムト秒レーザー（75 MHz, 515 nm）を用いたショットテストにおいて、解像度は 200 nm 程度になることを確認した。

次に、ポリマー材料を用いた PWB が光回路における光学特性を評価するためには、作製された三次元樹脂細線中で光がシングルモードで伝搬することと機械的強度を保証することで、クラッド材として SU-8 を採用することとした。Fig.2 に示すように、波長 1550nm において、本材料で作製された円形光導波路が SU-8 クラッドの中でシングルモード伝搬を実現するために、直径 2.8μm の必要がある。この直径の 3 次元光導波路を用いることで、本材料の光伝搬特性を把握できる。

試作テストの結果，長さ 300-500 μm，高さ約 100 μm のブリッジ型 PWB 接続構造の作製に成功した(Fig.3(a))。この構造は直径 2.8 μm の円形導波路を 100 μm 以上にわたり重力によるたわみなく保持できることを確認した(Fig.3(b))。このブリッジ構造を用いて 2 つのグレーティングカプラ（GC）を接続し，開発した材料の光伝搬損失が評価できる。

謝辞 本研究は、JST CREST (JPMJCR24R1), JST ASPIRE (23837157), ARIM (JPMXP1222IT0025)の援助で行われた。

参考文献

[1] S. J. Chowdhury *et al.*, *Opt. Express* **32**, 3085 (2024).
[2] K. Otsuka, T. Urakami, T. Amemiya, *Japanese Patent Application* No. 2024-056442 & No. 2024-056451 (2024).

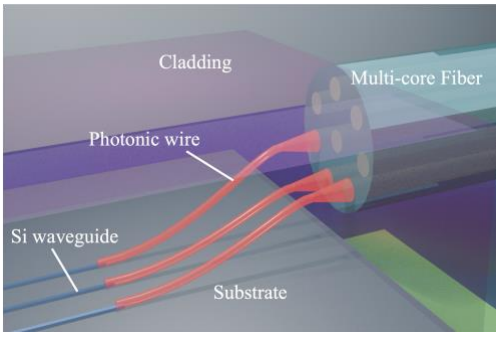


Fig.1 Next-generation CPO model connecting multi-core fibers and silicon photonic circuits by PWB technology.

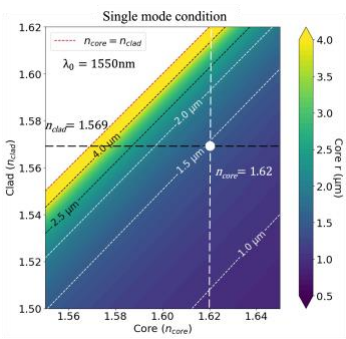
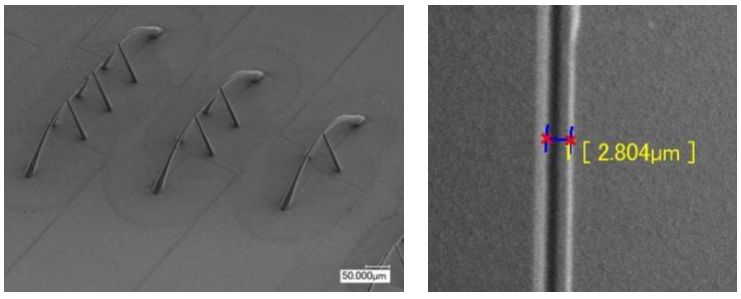


Fig.2 Radius of PWB that enables single-mode transmission in SU-8 cladding.



(a) (b)

Fig.3 (a) Bridge-type PWB fabricated for measurement. (b) PWB with diameter of 2.8 μm can be successfully fabricated

© 2025年 応用物理学会

SiN-rib InP membrane waveguide with a low-loss taper structure

Jinchi Pan, Hiroya Sakumoto, Tomohiro Akazawa, Kasidit Toprasertpong, Shinichi Takagi, and Mitsuru Takenaka

(The University of Tokyo)

Email: panjinchi@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

Background III-V membrane photonic integrated circuits (PICs) have emerged as a promising technology to meet the demands of future communication systems [1]. To fully realize their potential, it is essential to integrate both active and passive components within the PICs. For active-passive integration, we have investigated quantum well intermixing (QWI) on a III-V-on-insulator (III-V-OI) wafer using P_2^+ implantation [2]. However, we found a degradation in the active device performance after dry etching, attributed to crystal damage. In this research, we propose a III-V membrane waveguide structure with a SiN rib, which eliminates the need for dry etching of the InP layer.

Device design and fabrication Fig. 1 shows a schematic of a SiN-rib InP membrane waveguide. To achieve the smooth transition from an InP strip waveguide to a SiN-rib InP membrane waveguide, we performed the design optimization of a SiN taper structure using numerical simulation. The simulation results indicated the insertion loss of the taper could be reduced to less than 0.2 dB. Then, we fabricated the designed device following the procedure below. A 250-nm-thick InP layer was epitaxially grown on an InP substrate and bonded onto a Si substrate with a 2-μm-thick SiO_2 layer using an 8-nm-thick Al_2O_3 bonding layer to form the III-V-on-insulator (III-V-OI) substrate. After removing the InP substrate and the etch-stop layers by wet etching, a 45-nm-thick SiO_2 mask was deposited via ECR sputtering and patterned by EB lithography. The mask and InP waveguide were etched using ICP-RIE and RIE, respectively, followed by SiO_2 mask removal with BHF. A 100-nm-thick SiN layer was then deposited and patterned through EB lithography and ICP-RIE.

Results We measured the insertion loss of the taper by comparing the transmission of two waveguides—one with 2 tapers and the another with 12 while maintaining identical lengths for the InP strip and SiN-rib InP membrane waveguides. As shown in Fig. 2a and 2b, the measured transmission spectra and loss at a 1.51 μm wavelength indicate a taper loss of approximately 0.34 dB, confirming the feasibility of the proposed waveguide design.

Conclusion We experimentally demonstrated a SiN-rib InP membrane waveguide which is a fundamental structure for monolithic active-passive integration. The optimized SiN taper enabled the loss transition loss of 0.34 dB.

Acknowledgements This work was partly supported by JST-Mirai Program (JPMJMI20A1), JST, CREST (JPMJCR2004), JSPS KAKENHI (JP23H00172), and “Advanced Research Infrastructure for Materials and Nanotechnology in Japan” of MEXT Grant Number JPMXP1224UT1028, and partly based on results from project (JPNP16007) commissioned by NEDO.

References [1] M. Takenaka and Y. Nakano, “InP photonic wire waveguide using InAlAs oxide cladding layer,” Opt. Express, vol. 15, no. 13, p. 8422, 2007. [2] N. Sekine, K. Sumita, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka, "Monolithic integration of electro-absorption modulators and photodetectors on III-V CMOS photonics platform by quantum well intermixing," Opt. Express 30, 23318–23329 (2022).

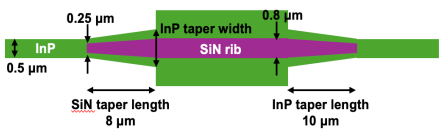


Fig.1 Schematic of SiN-rib InP membrane waveguide.

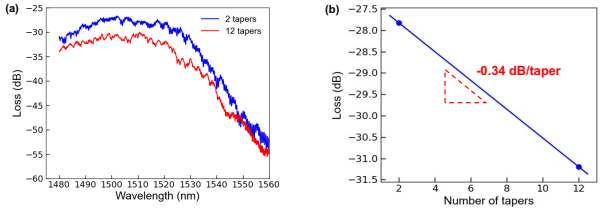


Fig. 2 (a) Transmission spectra of waveguide with 2 tapers and 12 tapers. (b) Taper loss measurement result.

© 2025年 応用物理学会

テーパ構造による高位置ずれ耐性を有する化合物半導体と誘電体・Si 導波路直接接合

High misalignment tolerant compound semiconductor on dielectric or Si waveguide direct bonding structure based on taper waveguide

○[1]岡山 秀彰, [1]高橋 博之, [1]小野 英輝, [1]志村大輔, [1]谷川 兼一, [1]鈴木 貴人, [1]古田 裕典, [2]西山伸彦

([1]沖電気工業株式会社、[2]東京科学大学)

○[1]Hideaki Okayama, [1]Hiroyuki Takahashi, [1]Hideki Ono, [1]Daisuke Shimura, [1]Kenichi Tanigawa, [1]Takahito Suzuki, [1]Hironori Furuta, [2]Nobuhiko Nishiyama

([1]Oki Electric Industry Co., Ltd., [2]Institute of Science Tokyo)

E-mail: okayama575@oki.com

誘電体あるいは Si 光導波路素子への化合物半導体の接合技術が開発されている[1][2]。前回我々の発表では、両者間に SiO_2 によるギャップを挟んでいたが[3]、ここでは、両者を直接接合したうえで、これらの位置ずれ許容度に関して 3 μm 以上を達成する方法を提案する。

図 1 に示すテーパ導波路をベースとした構造を採用する。幅広い Si 光導波路あるいは誘電体光導波路の上部に、テーパ構造の III-V 族の InP 光導波路を接合したものである。下部導波路の幅は 3 μm の位置ずれを許容するために 7.5 μm とした。Si 導波路の場合には、厚みが 100 nm 前後よりも薄い必要があることがシミュレーションで示された。低損失な透過帯域を 50 nm 以上とするためにはテーパ長は 200 μm 以上であれば良いが、長いほど使用可能な波長範囲が広くなる。テーパ長 400 μm で、300 nm 以上の波長範囲で使用可能となる。厚み・寸法誤差に対する耐性も 10%以上となる。誘電体導波路の場合には、屈折率が 1.6 よりも高いものが有利である。誘電体材料として、ダイアモンドなどの熱伝導率が高いものを採用すれば、LD の排熱に有利と考えられる。

次に図 2 には立体導波路をベースとした構造を示す。ここでは、InP テーパ導波路の周囲に同じ材料によるより薄いスラブ部を設けている。スラブ部があると接合がやり易く、光の移行効率も高いものが得やすい。下部の誘電体導波路から Si 導波路へ光を移行するためには、Si 導波路テーパをさらに下部に配置する。

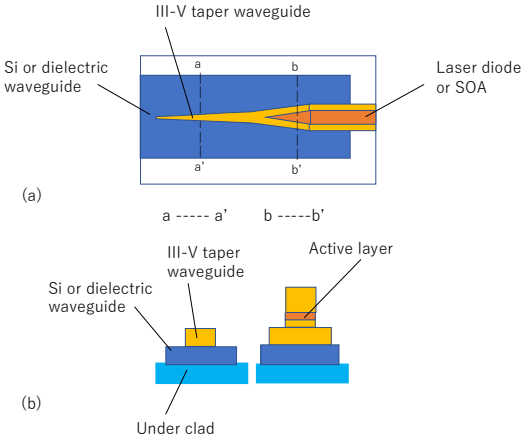


図 1　テーパ導波路構造 (a) 上面 (b) 断面構造

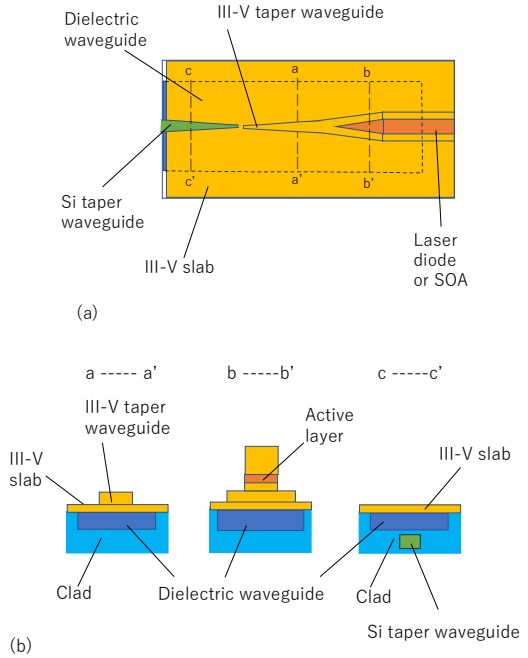


図 2　スラブ付きの立体導波路構造

参考文献　[1] T. Kikuchi et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol. 61, p. 052002, 2022. [2] C. Xiang et al., IEEE Select. Topics Quantum Electron. vol. 28, p. 820515, 2022. [3] 岡山ほか、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 17p-K305-7、2025 年 3 月

© 2025年 応用物理学会

Characteristics Comparison of Interlayer Couplers Between Silicon Oxynitride and Silicon Waveguide Layers

○(D)Kaibin Yao[1], Moataz Eissa[1], Tsuyoshi Horikawa[1] and Nobuhiko Nishiyama[1,2,3]

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Institute of Science Tokyo, Japan[1], Inst. of Integrated Research (IIR), Institute of Science Tokyo, Japan[2], Photonics Electronics Technology Research Association (PETRA)[3]

E-mail: yao.k.ae@m.titech.ac.jp

1. Introduction

Increasing complexity in Silicon-on-insulator (SOI) Photonic Integrated Circuits (PICs) demands three-dimensional circuit design with integrated materials[1]. Silicon oxynitride (SiON) is promising for multilayer SOI structures due to its broad spectral transparency, CMOS compatibility, and tunable refractive index (lower than SiN), which improves fabrication tolerance. Achieving efficient low-loss optical coupling between SiON and Si layers is crucial[2]. We designed and fabricated two types of interlayer couplers, which contain the directional coupler and inverse taper coupler. Experimentally, both coupler structures were confirmed to exhibit over 80% coupling efficiency.

2. Structure Design

The SSC and interlayer couplers were designed based on coupled-mode theory and modified using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The values of parameters of directional couplers and inverse taper couplers are shown in Figure 1, respectively. The simulated coupling efficiency of the directional coupler reached 88.9% while that of an inverse taper coupler reached 95% at a wavelength of 1550 nm for the transverse electric (TE) polarization.

Si waveguides were fabricated on 0.22-μm SOI using EBL and inductively coupled plasma reactive ion etching (ICP-RIE). Then, a 0.4-μm SiO2 layer was formed using SiO2 deposition and a planarization process. After that, SiON was deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition. Next, EBL and ICP-RIE were used again with alignment lithography.

The measured coupling efficiencies of the directional coupler and the inverse taper coupler were 0.79 dB (83.4%) and 0.73 dB (84.5%) as shown in Figure 2. This fabrication results validate the applicability of both couplers to three-dimensional PIC. Combining the two design strategies may realize further improvement of coupling efficiency.

3. Summary

Optimized interlayer couplers for SiON/Si platforms demonstrate a key design tradeoff between an ultra-compact 7-μm directional coupler achieved 83.4% efficiency (simulated: 88.9%) and a 150-μm inverse taper coupler reached 84.5% efficiency (simulated: 95%).

By tailoring these designs to specific system requirements, such as space constraints or loss tolerance, the SiON/Si platform gains critical flexibility for diverse photonic integration scenarios.

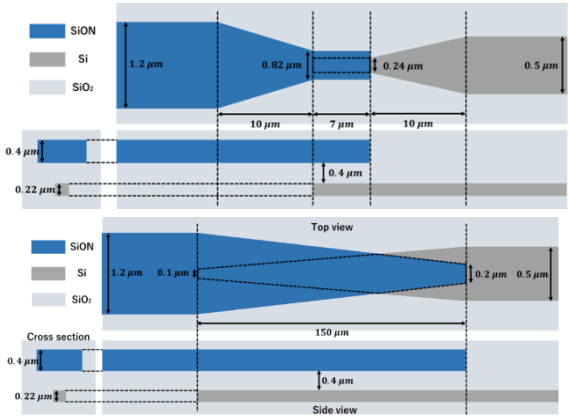


Figure 1 Plan and cross-sectional views of directional interlayer couplers (top), and inverse taper interlayer couplers (bottom).

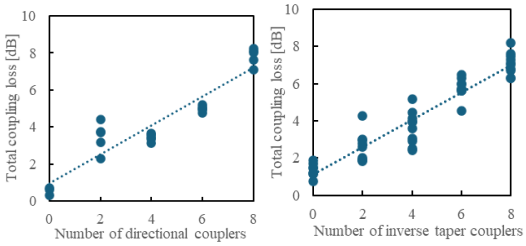


Figure 2 Dependence of transmission loss on the number of the directional interlayer couplers (left) and inverse taper interlayer couplers (right)

Acknowledgments

This study was supported by NEDO [JPNP16007] and ARIM [JPMXP1224IT001].

References

[1] N. Nishiyama *et al.*, IEICE Transactions on Electronics, vol. 101, pp. 501-508, Jul. 2018 (2021).
[2] D. Li *et al.*, Optik, vol. 274, p. 170572, Mar. 2023.

© 2025年 応用物理学会

石英系 PLC の青色光入力による実効屈折率変化のモデル化と検証

Evaluation of Optical Power Density Dependency of Photoinduced Effective Refractive Index Change in PLC

NTT 先端集積デバイス研究所 [1]，○藤原 裕士 [1]，阪本 隼志 [1]，片寄 里美 [1]，梅木 毅伺 [1]，橋本 俊和 [1]

NTT Device Technology Labs. [1] ○Yuji Fujiwara[1], Junji Sakamoto[1], Satomi Katayose[1], Takeshi Umeki[1] and Toshikazu Hashimoto[1]

E-mail: yuji.fujiwara@ntt.com

1. はじめに

従来，石英系ガラスからなる平面光波回路(Planar Lightwave Circuit: PLC)は，高機能・小型・低損失な光学系として，近赤外光を用いる光通信に用いられてきた．さらに，近年，紫外から近赤外の広範な波長域での高い透過率を生かして可視光デバイスへの石英系 PLC 応用が検討されている．現在検討が進められているものとしては，超小型プロジェクタ向けの RGB 合波器や，ラボオンチップ分析器向けのマイクロ流路を集積した分光器，3D 形状計測器向けの位相変調器などがある [1-3].

これらの可視光デバイスへの石英系 PLC 応用においては，青色光の入力による光導波路の実効屈折率変化 Δn_{eff} を抑制することが課題であった．これまで我々は，高い青色光耐性を持つノンドープ SiO_2 で Zr ドープ SiO_2 コアを覆ったキャップ付 Zr-PLC を提案し，Ge ドープ SiO_2 をコアに用いる従来の石英系 PLC と比較して，Δn_{eff} が 400 分の 1 に低減されることを確認した [4]．しかし，それらはあるコア幅や比屈折率差を持つ特定の光導波路構造に対して評価されたものであり，様々なコア幅の光導波路の特性変化を予測する汎用的なモデル構築がなされていなかった．

今回，我々は屈折率変化が青色光の光パワー密度の 2 乗に比例する[5]というモデルに基づき Δn_{eff} の予測式を構築した．また光パワーとモードフィールド径に対する Δn_{eff} を測定し，その測定結果から式の妥当性を検証したので報告する．

2. Δn_{eff} 予測式の構築と検証

Figure 1 に今回構築した 1 時間当たりの Δn_{eff} を予測する式を示す．この式は，近軸波動方程式に基づき、導波路の屈折率分布および導波路の幅から得られるガウスビームのフィールド径で規定される光のパワー密度に対して、2 光子吸収を想定して 2 乗に比例する屈折率変化を導入することで導かれる．詳細な導出過程は発表にて紹介する．式中の P は導波光のパワー (mW)，D_x と D_y はそれぞれコアの幅方向と厚み方向のモードフィールド径 (μm)である．$B(\lambda)$は導波光の波長に応じた屈折率変化のし易さを示す係数である．予測式より，Δn_{eff} はパワーP の 2 乗に比例し，モードフィールド径 D_x と D_y の積の-2 乗に比例する．

次にキャップ付 Zr-PLC の Δn_{eff} のパワーP 依存性とモードフィールド径 D_x 依存性を評価し式の妥当性を検証した．Figure 2 にそれぞれの評価結果を示す．Δn_{eff} は既報告[4]で述べた方法を用いて測定した．入力した青色光の波長は 445 nm である．同図より，Δn_{eff} は予測式と同様に P の 2 乗に，D_x の-2 乗に比例する．Fig.2(a)(b)の傾きから算出した $B(\lambda)$は，いずれも 1.3×10^{-11} ($\mu m^4/mW^2$) であった．このことから，パワーP とモードフィールド径 D_x に応じた Δn_{eff} は提案した式から予測可能であることを確認した．

3. まとめ

青色光入力による Δn_{eff} を光パワーとモードフィールド径から予測可能であることを確認した．今後はこの式を用いて干渉計などの回路特性の劣化を予測可能か検証する．

$$\Delta n_{eff} = \frac{64}{3\pi^2} B(\lambda) \frac{P^2}{D_x^2 D_y^2}$$

Δn_{eff}	：1時間当たりの実効屈折率変化
$B(\lambda)$	：屈折率の変化しやすさを示す係数
P	：導波光のパワー (mW)
D_x, Dy	：モードフィールド径 (μm)

Figure 1. Proposal equation between effective refractive index change and optical power density

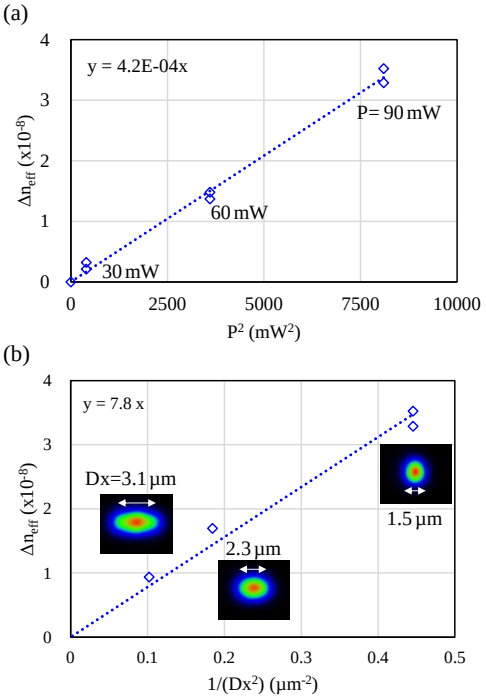


Figure 2. Effective refractive index change in PLC
(a) Dependency of optical power P
(b) Dependency of mode field diameter D_x

参考文献

[1] J. Sakamoto, *et al.*, in Proc. SPIE 10126, p.101260M-7, 2017.
[2] R. M. Vazquez, *et al.*, Anal. Bioanal. Chem., 393, p. 1209, 2009.
[3] S. Katayose, *et al.*, 2020 Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 59 SOOD01, 2020.
[4] 藤原裕士，第 72 回応用物理学会春季学術講演, 16a-K305-4, 2025.
[5] K. D. Simmons, *et al.*, Opt. Lett. 16, pp. 141-143 1991.

© 2025年 応用物理学会

構造揺らぎに対し高いトレランスを有する Er 添加 CeO_2 スプリット導波路構造の設計

A design of Er-doped CeO_2 split waveguide structure with high tolerance to structural fluctuations.

1. NTT 物性科学基礎研究所, 2. 日本大学, 3. 大和大学

○稲葉智宏 [1], 徐学俊 [1], 俵毅彦 [2], 尾身博雄 [3], 山本秀樹 [1], 眞田治樹 [1]

1. NTT Basic Research Labs., 2. Nihon Univ., 3. Yamato Univ.

T. Inaba[1], X. Xu[1], T. Tawara[2], H. Omi[3], H. Yamamoto[1], and H. Sanada[1]

E-mail: tomohiro.inaba@ntt.com

我々は通信波長帯で動作する Si 基板上オンチップ光量子メモリの実現をめざし、SOI 基板上に成長した Er 添加 CeO_2(Er:CeO_2)の研究を行ってきた[1]。量子メモリ動作を実現するためには、Er の発光・光吸収量を十分に確保する必要があり、導波路デバイスに加工し光と相互作用する Er イオンの総量を増加させることが一つの解決策となる。我々は SOI/希土類酸化物層(REO)/SiN スロット型導波路を作製し REO 層での伝搬に成功しているが、その光伝搬損失は 4.70 dB/cm であり一般的な Si フォトニクス導波路と比べて大きく、さらなる改善の余地がある[2]。従来の導波路デバイスの課題は、十分に低い伝搬損失を得るための導波路幅の許容範囲が狭く、最適な構造を再現性良く加工することが困難な点にある。今回、広い構造パラメーター範囲で小さな伝搬損失を有するスプリット型導波路構造[3-5] を SOI/ REO /SiN に対して適用することで、構造揺らぎが生じても小さな伝搬損失を有することを数値計算により確かめた。

Fig. 1 に計算に用いる構造断面図を示す。SOI 基板上に Gd_2O_3 層、無添加 CeO_2 層を介し Er:CeO_2 層を結晶成長し、SiN を堆積した構造とした。この構造に対し、SiN コア間距離 d (nm)と SiN コア幅 w (nm)を変化させ、TM-like モードに対する伝搬損失を有限要素法(FEM)で計算した。

Fig. 2 に d = 0 (従来構造), 300, 350, 400 nm(スプリット構造)に対する伝搬損失の w 依存性を示す。d = 0 nm では w = 4.80 μm で伝搬損失が最小となったが、これは BIC (Bound state in the continuum) [6] によりマイノリティな Ex 電界成分が導波路内に強く閉じ込められたためである。d = 400 nm では w = 5.54, 5.81 μm で伝搬損失が最小となった。これは、左右の導波路内から漏れ出た Ex 電界成分が干渉し打ち消しあい、漏れ損失が抑制されたためである [4]。また、従来構造に比べてスプリット構造では、伝搬損失が一定の値以下となる SiN 幅 w の許容範囲がより広がることが確認できた。仮に所定の閾値を 0.01 dB/cm (Fig. 2 の破線) 以下と定義するならば、w の範囲は d = 0 nm の場合は 0.12 μm であるが、d = 400 nm の場合は 0.8 μm まで大きくなった。今回の結果は、最適化されたスプリット導波路構造は、構造パラメーターに揺らぎが発生しても低伝搬損失を実現可能なことを示唆しており、Er:CeO_2 を用いた高効率オンチップ光量子メモリ実現の必須技術となると考えられる。他の構造パラメーターが揺らいだ場合の伝搬損失については、講演にて報告する。

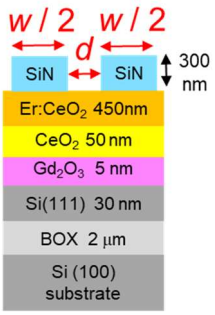


Fig. 1 Schematic of the SOI/REO/SiN split waveguide structure.

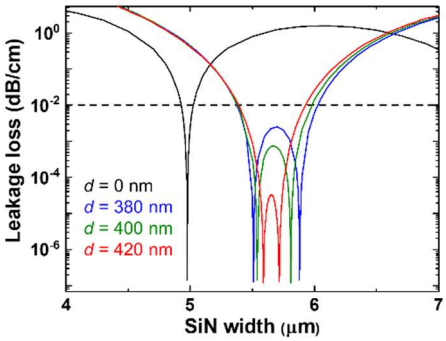


Fig. 2 SiN width (w) dependence of the leakage losses of the TM-like mode obtained from FEM.

参考文献：[1] T. Inaba *et al*., Opt. Mater. Exp. **8**, 2843 (2018). [2] X. Xu *et al*., Opt. Express **29**, 41132 (2021). [3]F. Dell'Olio *et al*., Opt. Exp. **15**, 4977 (2007). [4] M. Koshiba *et al*., Opt. Lett. **33**, 2008 (2008). [5] Y. Shi *et al*., Sensors **16**, 324 (2016). [6] C.-L. Zou *et al*., Laser Photonics Rev. **9**, 114 (2015).

© 2025年 応用物理学会

Examination of selective quantum well intermixing on III-V on insulator wafer

◦Sheng Fu[1], Kasidit Toprasertpong[1], Shinichi Takagi[1], and Mitsuru Takenaka[1] (1.Univ. Tokyo)
E-mail: sfu@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

Introduction

A III-V membrane platform [1] holds great promise for photonic integrated circuits, as III-V materials have a direct bandgap that is well-suited for active devices such as lasers, modulators, and photodetectors. We have investigated quantum well intermixing (QWI) on a III-V membrane to achieve multiple bandgap energies for the monolithic integration of active and passive components [2]. Although we have demonstrated the integration of two bandgap energies using a single QWI process with P_2 ion implantation, additional bandgap energies are required for further integration of active devices. Multiple ion implantations with different doses may be a way to achieve multiple bandgap energies, although using a single implantation is preferable for a simpler fabrication process. Modulating QWI with fine patterning on a bulk substrate is another approach to achieving multiple bandgap energies [3], but it has not yet been investigated on a III-V membrane. In this paper, we examined selective QWI on a III-V membrane with varied pattern sizes to clarify the effect of pattern size on QWI.

Experiment setup

First, an InP epitaxial wafer containing multi-quantum wells (MQWs) with InP cladding layers, was bonded to a 2-μm-thick SiO_2 buried oxide (BOX) layer on a Si substrate via an 10-nm Al_2O_3 bonding interface. The MQW structure consisted of 7×6.5-nm-thick $In_{0.735}Ga_{0.265}As_{0.835}P_{0.165}$ wells, 8-nm-thick $In_{0.735}Ga_{0.265}As_{0.513}P_{0.487}$ barriers, and 25-nm-thick $In_{0.735}Ga_{0.265}As_{0.513}P_{0.487}$ separate-confinement heterostructure (SCH) layers. After bonding, the substrate and etch stop layers were etched with HCl and H_3PO_4. Then, the upper InP cladding layer was thinned down to 25 nm using inductively coupled plasma (ICP) etching. After capping the surface with a 2.5-nm-thick Al_2O_3 passivation layer deposited by atomic layer deposition (ALD), the pattern for selective ion implantation (Fig. 1a) was defined using laser lithography. The width and length of the implanted regions were 1 μm and 150 μm, respectively. To examine selective QWI, the gap between the implanted regions was varied from 1 μm to 9 μm. With resist covering un-implanted regions, P_2^+ implantation was carried out at 200 °C. The implantation energy and dose were 10 keV and 5×10^{14} cm^{-2}, respectively (Fig. 1b). Then, the remained resist was removed by O_2 plasma, and the Al_2O_3 passivation layer was stripped by buffered hydrofluoric acid (BHF). Before rapid thermal annealing (RTA) at 650 °C under a N_2 atmosphere for QWI, another 10-nm-thick Al_2O_3 layer was deposited to protect the III-V layer. The chip was annealed for a total of 25 min., and photoluminescence (PL) measurements were carried out.

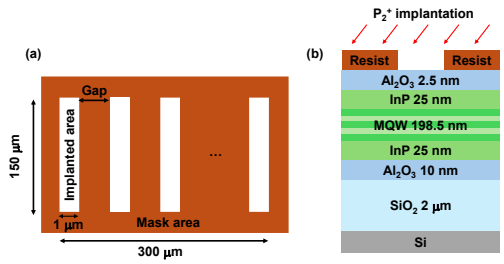


Fig. 1 (a) Pattern for selective QWI. (b) Cross-sectional schematic of the III-V-OI wafer for selective QWI.

Result and Discussion

Fig. 2 shows the PL spectra at the center of the masked regions of implanted pattern with gaps of 1 μm and 9 μm, after 25 min RTA. When the gap was 1 μm, it was found that phosphorus vacancies, which are related to QWI, diffused between the implanted regions, resulting in a larger PL shift. Fig. 3 shows the PL shift and the full width at half maximum (FWHM) of the PL peak as functions of the gap. It was found that the PL shift increased when the gap was less than approximately 2 μm. The FWHM exhibited a similar trend, suggesting that the diffusion length of phosphorus vacancies is on the order of 1 μm. The results obtained in this study suggest that submicron-scale patterning can be used to control the PL shift induced by QWI. Therefore, selective QWI is considered to be a promising approach for fabricating III-V-OI substrates with multiple bandgap energies.

Acknowledgment

This work was partly supported by JST-Mirai Program (JPMJMI20A1), JST, CREST (JPMJCR2004) and JSPS (23H00172), and partly based on results from a project (JPNP16007) commissioned by NEDO.

Reference

[1] M. Takenaka et al., Opt. Express **15**(13), 8422 (2007).
[2] N. Sekine et al., Opt. Express **30**(13), 23318 (2022).
[3] Boon Siew Ooi et al., IEEE J. Quantum Electron. **33**(10), 1784–1793 (1997).

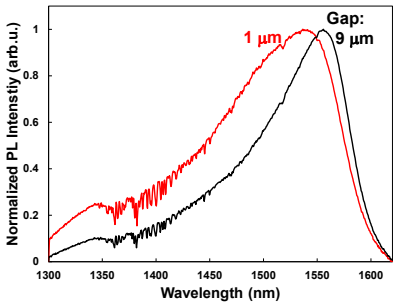


Fig. 2 PL spectra with gaps of 1 μm and 9 μm after 25 min RTA.

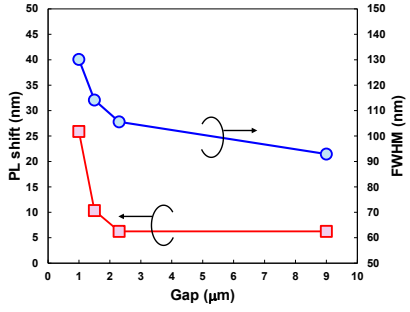


Fig. 3 PL shift and full width at half maximum (FWHM) of PL spectrum as a function of gap.

薄膜 $LiNbO_3$ マッハツェンダ干渉計に向けたエッチング条件探索

Investigation of Etching Conditions for Thin Film LN Mach-Zehnder Interferometers

阪大院工　○永長 武留，上向井 正裕，谷川 智之，片山 竜二

The Univ. of Osaka　°Takeru Einaga, Masahiro Uemukai, Tomoyuki Tanikawa and Ryuji Katayama

E-mail: einaga.t@qoe.eei.eng.osaka-u.ac.jp

近年、薄膜 $LiNbO_3$（LN）は成膜技術の発展に伴い、波長変換素子やマッハツェンダ干渉計（MZI）を用いた光集積デバイスへの応用が注目されている[1]。しかし、LN はその化学的安定性と硬度から難エッチング材料とされ、エッチング時に副生成物が再堆積し導波路側壁が荒れるなどの問題があり[2]、低損失導波路形成技術の確立が重要である。本研究では低ダメージ加工に有利とされる磁気中性線放電反応性イオンエッチング（NLD-RIE）を用い、*Z*-cut バルク LN のエッチング条件を探索したので報告する。

これまで薄膜 LN-MZI の多くは *X*-cut LN を用い導波路の両脇に電極を配置した水平電界印加型であったが[3]、集積密度の向上には *Z*-cut LN を用い導波路の上下に電極を配置する垂直電界印加型が望ましい。金属電極による吸収を防ぐため、リブ型薄膜 LN 導波路の上下に SiO_2 クラッド層を挿入する。Fig. 1 のような導波路断面構造において、印加電界強度と吸収損失（波長 920 nm、TM_{00} モード）を考慮して、薄膜 LN 厚さを 500 nm、SiO_2 層厚さを上下とも 700 nm と決定した。印加電圧 15 V のとき、位相シフタ長は 1.8 mm、吸収損失は 0.02%と見積もられた。

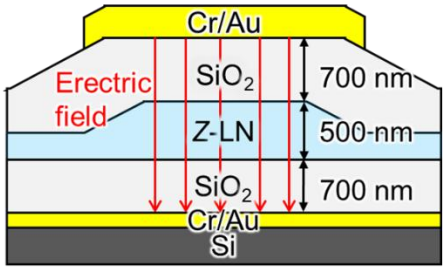


Fig. 1　Schematic cross-section of phase shifter.

バルク LN 上に幅 7 μm 程度の Cr または SiO_2 のストライプマスクを形成し、Ar ガス圧力 0.5 Pa、アンテナ電力 400 W、バイアス電力 400 W で 10 分間と NLD-RIE を行った。エッチング深さは約 0.9 μm であった。選択比の高い Cr マスクを用いた試料では、側壁傾斜角は約 85°で、側壁も平坦ではなく、側壁で反射したイオンによるものと考えられるトレンチも観察された。Cr マスクを除去後、再堆積物除去のための SC-1 洗浄を行ったところ、トレンチがさらに顕著になった（Fig. 2）。

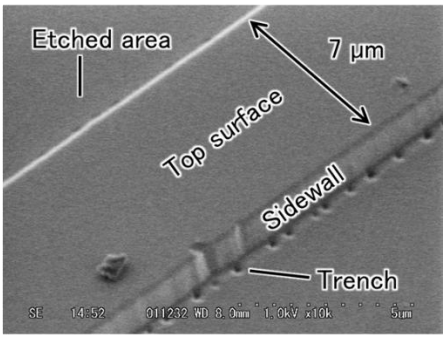


Fig. 2　SEM image of LN sample fabricated using Cr mask.

また選択比の低い SiO_2 マスクを用いた試料では、傾斜角約 35°の平坦な側壁が得られた。SiO_2 マスク除去後に SC-1 洗浄を行っても、トレンチは観察されなかった（Fig.3）。以上のことから、選択比の低い SiO_2 マスクを用いることで、再堆積物の付着やトレンチの形成が抑制されることが分かった。側壁傾斜角 35°、高さ 300 nm のリブ型薄膜 LN 導波路でも横方向光閉じ込めが得られることを計算により確認したが、今後傾斜角 45°を目指してエッチング条件の探索を続ける。

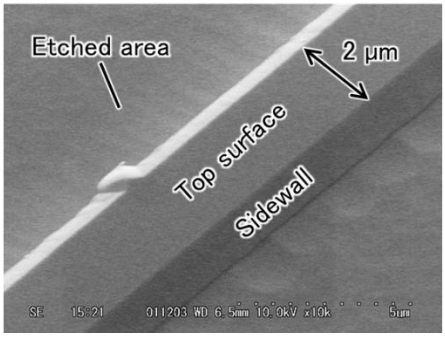


Fig. 3　SEM image of LN sample fabricated using SiO_2 mask.

[1] Y. Qi and Y. Li, *Nanophotonics* **9**, 1287 (2020).
[2] B. Shen *et al*., *nanomaterials* **13**, 20 (2023).
[3] C. Wang *et al*., *Nature* **562**, 101 (2018).

© 2025年 応用物理学会

Amorphous-Si Strip-Loaded Thin Film Lithium Niobate on Insulator Waveguides with Low Propagation Loss and Reduced Bending Radius

◦ Moataz Eissa[1], Yoshitaka Ohiso[1], Kensuke Ogawa[1], Yuki Nomoto[2], Tsuyoshi Horikawa[1], Shoichiro Yamaguchi[2], Masahiko Namerikawa[2], and Nobuhiko Nishiyama[1]

Electrical and Electronic Engineering Department, Institute of Science Tokyo [1], NGK Insulators, Ltd. [2],

E-mail: eissa@opto.ee.eng.isct.ac.jp

1. Introduction

Thin-film lithium-niobate-on-insulator (TFLN) combines large electro-optic, nonlinear, and acousto-optic coefficients with wafer-scale processing, enabling compact, high-performance photonic devices [1]. Light guiding in TFLN circuits is commonly achieved by strip-loading, conventionally using SiN; however, SiN requires ~1150 °C annealing to remove Si–H bonds while offering limited index contrast that yields large bend radii [2]. We instead employ amorphous silicon (a-Si) as the loading strip. Finite-element analysis and loss measurements confirm that a-Si strip-loaded waveguides achieve low propagation loss while reducing bend-loss-limited radii, demonstrating the advantages of a-Si as a strip-loading material for compact, low-loss photonic circuits.

2. Structure Design

Figure 1 shows a cross-sectional schematic of the TFLN wafer used in our experiments. It comprises a 500 nm-thick lithium niobate layer bonded to a 3 µm SiO_2 buffer on a silicon substrate, with air cladding to enhance vertical confinement. To evaluate the suitability of amorphous silicon (a-Si) as a strip-loading material, we conducted numerical simulations and fabrication of waveguides optimized for single-mode operation. The a-Si strip, with dimensions of 0.1 × 0.6 µm², achieved ~63% optical confinement in the LN layer.

Fabrication involved PECVD deposition of a 100 nm a-Si layer on TFLN, followed by electron beam lithography and selective ICP-RIE etching. Grating couplers designed via inverse design enabled vertical light coupling. Waveguides with varying lengths and bend radii were characterized using a fully automated wafer prober with tunable laser and photodetector across the C-band.

Propagation losses were measured to be ~2 dB/cm, with bending losses of 0.084 dB and <0.001 dB per 90° turn at radii of 20 µm and 50 µm, respectively. Figure 2 shows both simulation and measurement results of the bending loss. The deviation at 50 µm from simulation is attributed to measurement limits, as the absolute loss approached the system accuracy.

3. Summary

This work confirms the advantages of amorphous-silicon strip-loaded TFLN waveguides as a compact photonic solution, exhibiting ~2 dB cm^{-1} propagation loss and bend losses of 0.084 dB and <0.001 dB, which is lower than the measurement accuracy, per 90° bend for 20 µm and 50 µm radii, respectively.

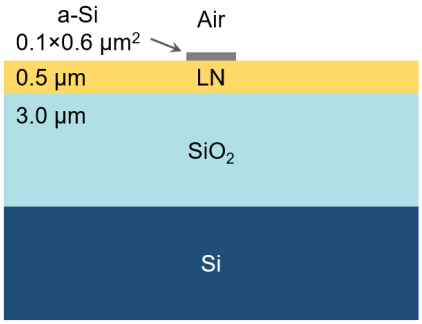


Figure 1 Cross-sectional schematic of the TFLN wafer used in our experiments

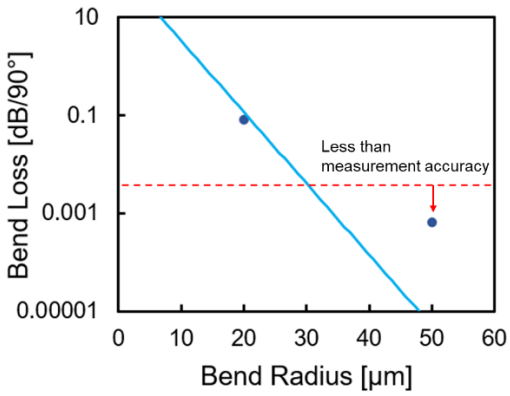


Figure 2 Bending loss of a-Si strip-loaded TFLN waveguide (solid line: simulation, dots: measurement)

Acknowledgments

This study was supported by MEXT Advanced Research Infrastructure for Materials and Nanotechnology (ARIM) [JPMXP1224IT0013].

References

[1] D. Zhu *et al.*, Adv. Opt. Photon., 13, 242-352 (2021).

[2] X. Ji *et al.*, APL Photonics, 6, 071101 (2021).

© 2025年 応用物理学会

複屈折変調イメージング法による μ-Transfer Printing 集積 ニオブ酸リチウム薄膜の電気光学係数評価

Evaluation of electro-optic coefficient of micro-transfer-printed thin-film lithium niobate by using birefringent field-modulation imaging technique

産総研 光電融合センター[1], 産総研 エレクトロニクス基盤技術研究部門[2]
○村井 俊哉[1], 須波 圭史[2], 高 磊[1]
AIST PEIRC[1], AIST CETRI[2]
○Toshiya Murai[1], Keishi Sunami[2], Rai Kou[1]
E-mail: murai.t@aist.go.jp

はじめに

広い波長範囲で優れた電気光学(EO)特性をもつニオブ酸リチウム $LiNbO_3$(LN)は光変調器に広く適用され, 薄膜化した LN(TFLN)の光閉じ込め増強効果は変調器性能の大幅な改善を可能にする。我々は PDMS スタンプにより薄膜を基板から剥離し,そのまま任意基板に転写する μ-トランスファープリンティング(μ-TP)法による,シリコンフォトニクスプラットフォーム上 TFLN 集積技術を開発してきた[1]。

強誘電薄膜は下地基板から受ける歪みにより EO 特性が変化するため,基板からの剥離時,応力解放による EO 特性変化が懸念される。今回 μ-TP により石英基板上へ TFLN クーポンを転写し,複屈折変調イメージング法を用いて薄膜のまま EO 係数を評価した結果を報告する。

実験結果

図 1(a)に示す手順を用いて石英基板上に厚さ約 600nm の TFLN を転写した(図 2(b))。複屈折変調イメージング法では,試料前後に偏光子を配置し透過イメージ像を CMOS カメラで撮影する。電界印加前後で EO 効果による複屈折変化と偏波回転が生じるために透過光強度に差分が生じ,可変波長板により複屈折量を変化させながら複数の差分イメージを取得し,透過光強度変化を表式と比較・解析することで EO 係数の評価が可能になる[2]。

転写した TFLN 上に電極を形成(図 2(a))し,波長 810nm の光源を用いて電界印加前後の差分

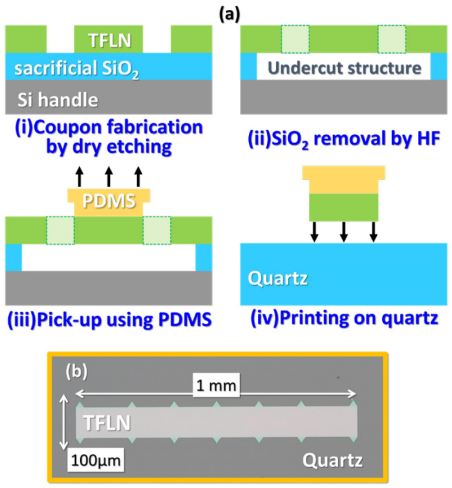


Fig.1. (a) Flow of printing process of TFLN. (b) Microscopic image of micro-transfer-printed TFLN on quartz substrate.

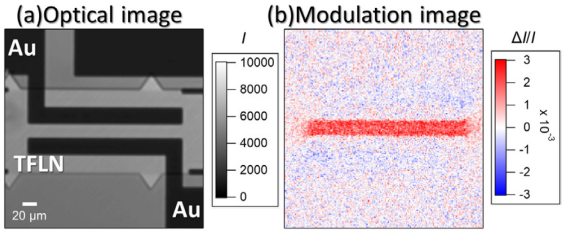


Fig.2. (a) Optical image and (b) modulation image of micro-transfer-printed TFLN obtained by CMOS camera

イメージを取得した結果を図 2(b)に示す。差分イメージを解析することで EO 係数 r_{33}=32-35pm/V が得られた。この値は LN バルクの文献値 r_{33}=30-33pm/V とおおむね一致する。

謝辞
この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP 21029)の結果得られたものです。共同で TFLN 集積技術開発を行った古河ファイテルオプティカルコンポーネンツ株式会社に感謝の意を表します。

参考文献

[1] R. Kou et al., CLEO 2025 (2025).
[2] Sunami et al., Adv. Electron. Mater. 10, 2400346 (2024)

© 2025年 応用物理学会

薄膜ニオブ酸リチウム上に製作した グレーティングカプラ付き導波路での光伝搬(II)

Light Propagation through Waveguide with Grating Couplers Fabricated on Thin-Film Lithium Niobate (II)

横国大院工 ○羽中田祥司，北原凌成，坂本駿介，馬場俊彦
Yokohama Nat'l Univ. ○S. Hachuda, R. Kitahara, S. Sakamoto and T. Baba
E-mail：hachuda-shoji-dc@ynu.ac.jp

$LiNbO_3$ (LN) は大きな電気光学効果，非線形効果，圧電効果，広帯域での光学透明性などの特長を有する．薄膜LN（Thin film LN: TFLN）を利用すると，高い光閉じ込めによる効果の増大とデバイスの小型化が可能になるため，高性能な変調器や光周波数コムデバイスなどが研究されている[1]．ただし，LNはドライエッチングが難しく，端面形成技術も十分には確立されていない．我々は当面，SSCファイバカプラの利用が困難と考え，グレーティングカプラ (GC) によるファイバ結合を検討してきた[2]．前回はGC付きリブ型導波路を製作した．今回は同一チップ上に一括製作した異なる導波路長のGC付きリブ型導波路の光伝搬を評価した[3]．

電子ビーム描画とAr-ICPエッチングにより製作したデバイスをFig. 1に示す．TFLNの厚さは800 nmであり，リブ型導波路のエッチング深さは300 nm，幅は0.8 μm，長さは1～5 mmである．両端には長さ300 μmのテーパを介して幅15 μmの不均一ピッチのGC[4]を配置した．Fig. 2はGC周囲の光伝搬とGCからの出射光の様子を示している．Fig. 3 は単一モードファイバとGCの組み合わせで入出力した異なる長さのTFLN導波路の伝搬スペクトルを表している．側壁粗さなどによる損失が見られ，現在，その低減のための条件を探索している．

参考文献

1) M. Zhang, et al, Optica, **8** (2021) 652, 2) 北原ら，応物秋季 (2024) 20a-A37-4, 3) 羽中田ら，応物春季 (2025) 16p-K305-14, 4) 北原ら，応物春季 (2025) 16p-K309-1.

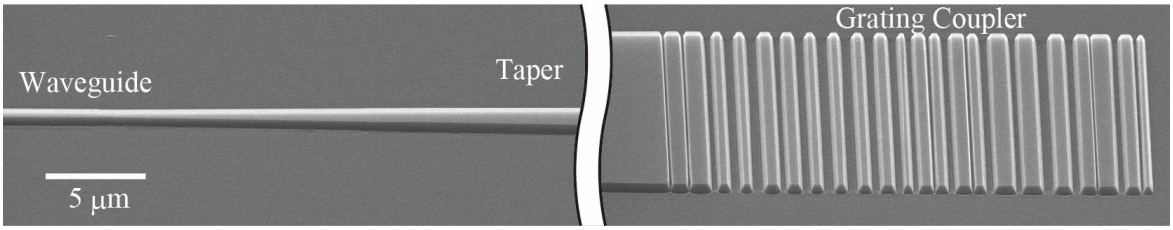


Fig. 1 SEM image of fabricated TFLN waveguide with non-periodic grating coupler

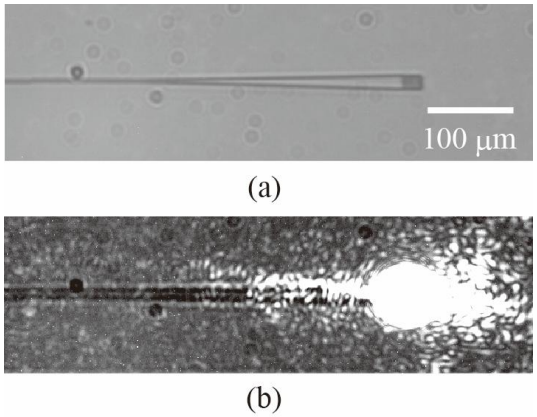


Fig. 2 Near-field images of grating coupler. (a) Micrograph, (b) Light propagation and upward emission.

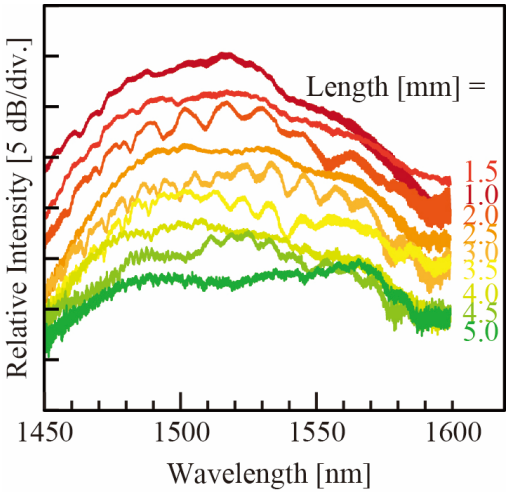


Fig. 3 Light propagations for each length

© 2025年 応用物理学会

反射層装荷によるグレーティングカップラの指向性改善

Directionality Improvement of Grating Coupler by Reflective Layer Cladding

京都工繊大[1]，産総研[2] ○美馬 由佳[1]，小澤 桂介[1]，井上 純一[1]，金高 健二[2]，裏 升吾[1]

Kyoto Inst. Tech.[1], AIST[2], ○Yuka Mima[1], Keisuke Ozawa[1], Junichi Inoue[1],

Kenji Kintaka[2], Shogo Ura[1]

E-mail: yuka140511@outlook.jp

グレーティングカップラ（GC）は導波光と空間光を結合させる素子であり、プレーナプロセスを用いて表面加工により作製できるため、光回路の入出力素子として利用される。しかし、一般的なGCからは導波路の上下両方に放射が生じるため、高効率結合器として利用するには上方放射を抑制して下方放射を増大させる、指向性改善が必要である。我々はGC上部への反射層装荷による指向性改善を検討している[1]。今回、Silicon on Insulator （SOI）基板を用いた素子を試作し、反射層を装荷したものと装荷していないものを比較することで、指向性改善を評価したので報告する。

反射層を装荷したGCの基本構成と動作原理をFig. 1に示す。導波路上にグレーティングを形成し、その上に位相調整層及び反射層を積層する。導波光はGCにより上方、下方に回折放射される。上方放射光の一部は反射層により反射され、下方放射光と干渉し相殺する。これによって上方指向性の向上が期待される。

Fig. 2に作製したGCの断面構造を示す。設計波長は1550 nmとした。SOI基板の上部Si層（厚さ220 nm、屈折率3.476）に、電子ビーム直接描画とドライエッチングにより深さ10 nmのグレーティングを形成した。その上にSi-N位相調整層（厚さ200 nm、屈折率1.967）、SiO_2層（厚さ269 nm、屈折率1.455）とSi-N層（厚さ197 nm、屈折率1.967）からなる反射層を積層した。Si-NとSiO_2の成膜にはそれぞれ直流反応性スパッタリング法とプラズマ化学気相成長法を用いた。今回、同一基板上に複数のGCを作製し、放射角が10°、20°、30°、40°、50°となるようにGC周期Λをそれぞれ576 nm、614 nm、655 nm、697 nm、738 nmとした。比較のために、Fig. 2で示した構造から位相調整層と反射層を装荷しない、同じ周期のGCも作製した。

指向性は下方並びに上方放射光パワーの和に対する上方放射光パワーの割合で求められる。しかしSOI基板では下方放射光パワーの測定は困難であるため、GCの挿入損失および放射損失を測定し、無装荷GCと比較することにより相対的指向性を見積もった。Fig. 3に反射層装荷の場合と無装荷の場合の指向性のΛ依存性の理論予測を示す。両者の比で見積もった相対的指向性の理論予測と測定結果も合わせて示す。指向性の改善を示す結果が得られた。

[1] 美馬　由佳　他, 第72回応用物理学会春季学術講演会, 16p-K305-12(2025).

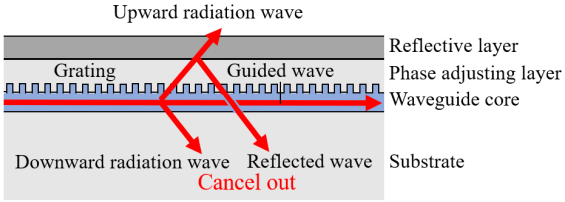


Fig. 1 Basic structure of GC with cladding layers.

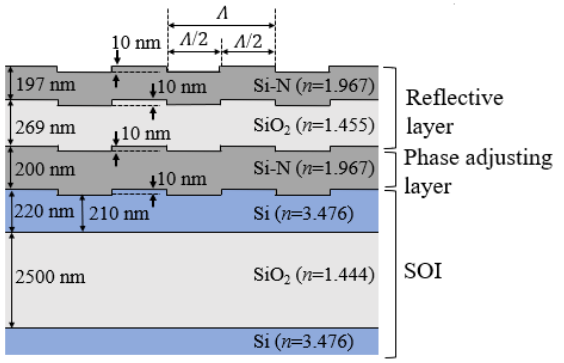


Fig. 2 Cross-sectional structure of fabricated GC.

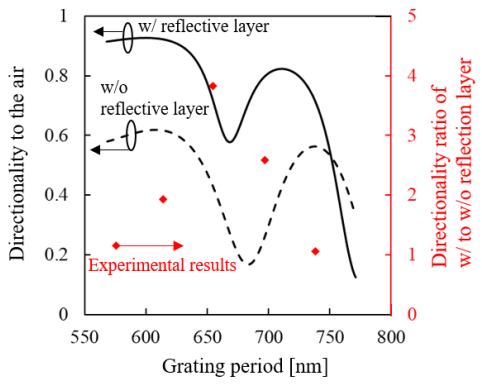


Fig. 3 Theoretical predictions of directionality to the air and experimental results of ratio of with to without reflection layer.

© 2025年 応用物理学会

高効率広帯域グレーティングカプラの最適化と原理の探求

Optimization of Highly Efficient Broadband Grating Coupler and Investigation of High Efficiency

横国大理工，°田原直樹，名和翔太，鎌田幹也，馬場俊彦
Yokohama Nat'l Univ., °N. Tahara, S. Nawa, M. Kamata, T. Baba
E-mail: tahara-naoki-dg@ynu.jp

Si フォトニクスグレーティングカプラ(GC)による Si 導波路と単一モードファイバとの高効率結合は，コパッケージドオプティクス(CPO)におけるファイバの高密度実装のために重要度を増している．単純な GC では上下放射のために結合効率は–3 dB 以下である．上方向選択放射や高結合効率を報告する構造は様々ある[1–3]．我々は，一般的な Si フォトニクスファウンダリで製作可能な構造や最小寸法 150 nm 以上を初めて満たす GC として中彫り回折格子と台形貫通孔アレイの組み合わせを提案，最大効率–0.65 dB を計算し，2 段エッチングを含む産総研 300 mm ウエハプロセスを用いてこれを製作，垂直ファイバで効率–1.1 dB を評価した [4]．また，斜めファイバで–1.0 dB も評価している[5]．

前回より高効率と広帯域を同時に示す設計を検討しており，図 1 には最大効率 GC と今回設計の高効率・広帯域 GC の結果を示す．新設計では最大効率が–0.84 dB，C バンド平均結合効率が–1.0 dB である．また，図 2 には設計した GC の示すような構造の簡略化により，放射原理を考察した．2 段エッチング構造をブレーズド構造と想定してブレーズ角とその出射角を，一方でブラッグ条件からも出射角を計算したのが矢印である．詳しい考察結果は当日報告する

本研究は科研費基盤研究(A) (25H00852) と立石科学技術振興財団 (研究助成 S) の援助を得ている．

参考文献 [1] A. Michaels, et al., Opt. Express **26**, 4766 (2018). [2] D. Benedikovic, et al., Opt. Express **27**, 26239 (2019). [3] V. Vitali, et al., Photon. Res. **11**(7), 1275 (2023). [4] N. Tahara, et al., Opt. Express **32**, 34024 (2024). [5] 田原ら，応物春季, 16p-K305-13 (2025).

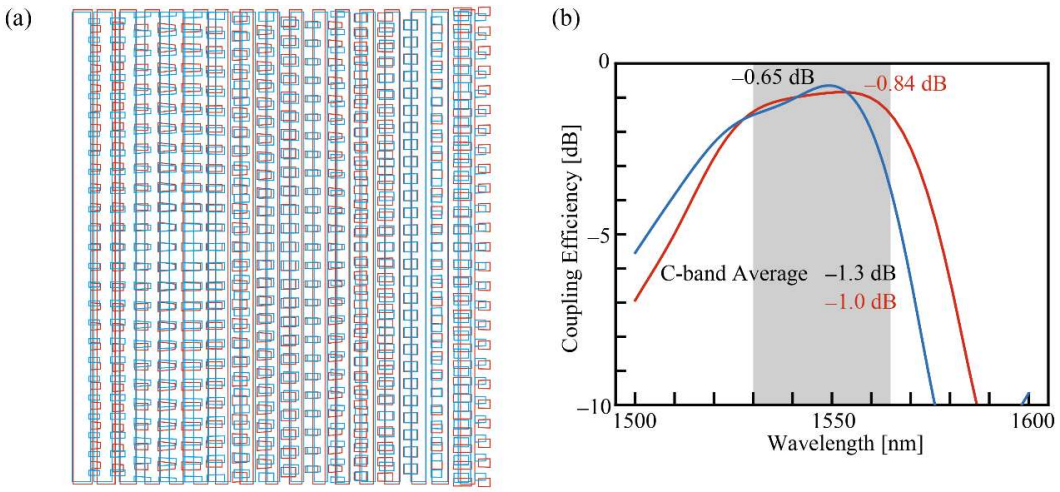


図 1 (a) 最適化した GC の平面構造．青線は最大効率 GC，赤線は今回の高効率・広帯域 GC．(b) 結合スペクトル．

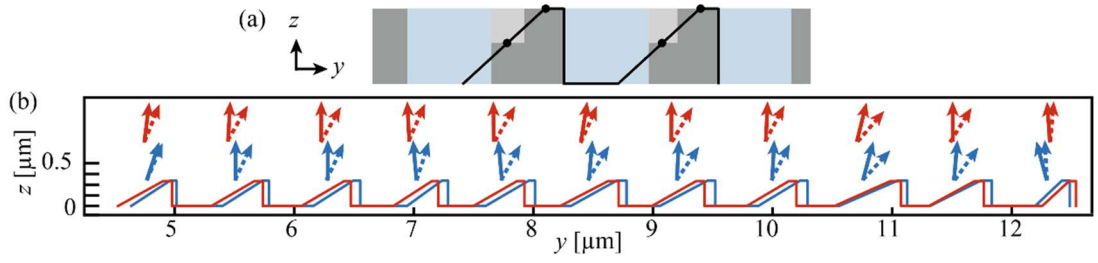


図 2 (a) 最適構造のブレーズ角の定義．(b) ブレーズによる光放射角（点線）とブラッグ条件による出射角（実線）

© 2025年 応用物理学会

グレースケール露光を用いたレジストマスターモールドによる NIL プロセス

NIL process using resist master mold fabricated by grayscale lithography

永松 周[1], 前川 永遠[1], 向 立昕[1], 李 周妍[2], 大塚 健祐[2], 宮尾 宙[2], 飯田 健二[2], 雨宮 智宏[1]

1 東京科学大学, 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

2 三井化学株式会社, 〒104-0028 東京都中央区八重洲 2-2-1

E-mail: nagamatus.s.7792@m.isct.ac.jp

1. はじめに

近年、マイクロ・ナノスケールの三次元構造は、バイオセンサー、マイクロ流体デバイスなど多岐にわたる分野でその重要性を増している。特に光学分野においては、拡張現実(AR)グラスやヘッドアップディスプレイの導光板で用いられるブレーズド構造をはじめとする高性能な光学素子[1][2]への要求が高まっている。これらの三次元構造を効率的に作製する技術として、高スループットかつ低コストで微細構造を複製できるナノインプリントリソグラフィ(NIL)が注目されている。しかし、NIL プロセスにおいては、高品質なマスターモールドの作製が極めて重要となり、従来、このような精密な三次元マスターモールドの作製は、多段のフォトリソグラフィや複雑なエッチングプロセスを必要とし、時間とコストがかかるという課題があった。そこで本研究では、グレースケール露光[3]を用いてフォトポリマーから直接、三次元マスターモールドを作製し、これをナノインプリントプロセスに適用することでガラス基板上に高屈折率レジストを用いた三次元ナノ構造の転写を行った。

2. 作製プロセス

本研究で作製したマスターモールドの作製フローを Fig. 1-a に示す。まず、適切な前処理を施したシリコン基板上にフォトレジストを塗布した。その後、電子線描画装置を用いてグレースケール露光を行い、現像することでパターンを形成した。この際、露光ドーズ量を空間的に変化させることにより、現像後のフォトレジストの残膜厚を制御し、三次元的な構造を形成した。

次に、ナノインプリントによるパターン転写フローを Fig. 1-b に示す。マスターモールドに UV 硬化樹脂である UV/AS5(EV Group, オーストリア)を塗布し、ナノインプリント装置を用いて、レプリカモールドを作製した。ナノインプリント装置は EVG®620 NT を用いた。転写先となるガラス基板上に、高屈折率レジストを塗布し、作製したレプリカモールドを用いて、ガラス基板上にパターンを転写した。高屈折率レジストは本研究用に開発したレジストを用いた。

3. まとめ

Fig. 2 に作製したマスターモールドのパターンと転写後のパターンの SEM 画像を示す。マスターモールドのパターンを概ね転写できていることが確認された。本研究では、電子線グレースケール露光技術を用いてフォトレジスト上に三次元構造を作製し、これを用いたナノインプリントプロセスによりガラス基板上に微細構造を転写する手法を開発した。本手法は、従来の複雑なプロセスを必要とせずに三次元ナノ構造を作製できる可能性を示しており、簡便かつ効率的に三次元ナノ構造を作製することができると考えられる。

謝辞 本研究は、JST CREST (JPMJCR24R1), JST ASPIRE (23837157), ARIM (JPMXP1224IT0021)の援助により行われた。

参考文献

1) Q. Liu *et al*., "Fabrication of blazed grating by native substrate grating mask." *Optical Engineering* 52.9 (2013): 091706-091706.

2) T. Shiono *et al*., "High-efficiency blazed diffractive optical elements for the violet wavelength fabricated by electron-beam lithography." *Applied optics* 41.13 (2002): 2390-2393.

3) T. Shiono et al., "High-efficiency blazed diffractive optical elements for the violet wavelength fabricated by electron-beam lithography." Applied optics 41.13 (2002): 2390-2393.

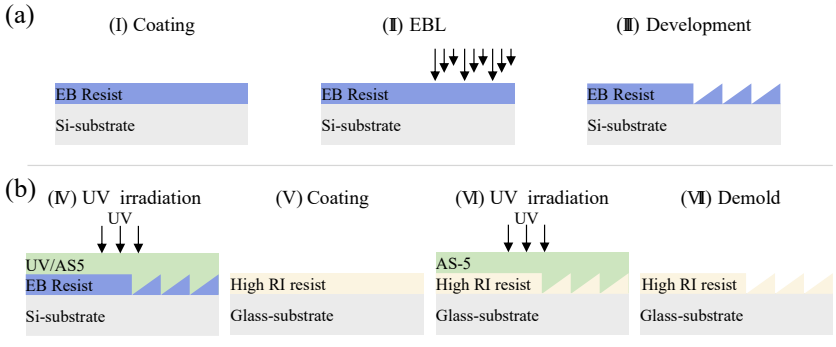


Fig. 1 Process diagram of (a) Fabrication of master mold, (b)Nanoimprinting.

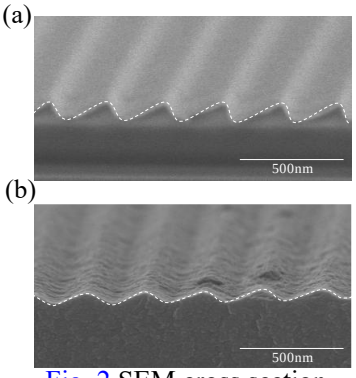


Fig. 2 SEM cross section images of (a)Master mold, (b)After nanoimprinting.

© 2025年 応用物理学会

OFDR 法を用いたウェーハレベル光集積デバイス特性検査(2)
- 透過及び反射プロファイルに見られる導波路多重反射の定式化 -

Wafer-level characterization of integrated optical devices using OFDR (2)
- Formulation of waveguide multiple reflections in transmission and reflection profiles–

東京科学大 [1], PETRA[2] ○堀川 剛 [1], 西山 伸彦 [1,2]
Science Tokyo[1], PETRA[2], Tsuyoshi Horikawa[1], Nobuhiko Nishiyama[1,2],
E-mail: horikawa@opto.ee.e.titech.ac.jp

1. はじめに

OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)により観測される光回路のインデプスプロファイルには、回路内の反射点間の干渉や分布反射による多重反射の信号が重畳する[1]。本研究では、多重反射の定式化を行った後、シリコン細線導波路の OFDR 透過及び反射プロファイルの解析に適用し、導波路の基本特性である分布反射係数の抽出を行った。

2. 分布反射による反射シグナルの定式化

OFDR では、評価するデバイスを含む経路の一端から光を入射し、出力される光の強度を経過時間から求めた伝搬距離$z\ (= c\Delta t/n)$の関数として計測する。例えば、反射プロファイルにおける主信号は 1 回反射によるものであり、伝搬距離zの反射光強度比$R_1(z)$は、単位経路長当たりの反射係数r、伝搬損失αと測定系の空間分解能ρを用いて次のように表される。

$$R_1(z) = r\rho \exp(-\alpha z) \quad (1)$$

n回の反射に対しての出力光強度比$R_n(z)$は、下式の様に反射点位置$z_i (i = 1, 2, \cdots n-1)$についての逐次積分により表現される。

$$R_n(z) = r^n \rho \exp(-\alpha z) \int \cdots \int dz_1 \cdots dz_{n-1} \quad (2)$$

反射点が全長Dの導波路内に存在するという制約下で(2)式を解き、反射回数 3 回までの各反射成分の解析表現を導いた(表 1)。

3. OFDR プロファイル観測結果との比較

シリコン細線導波路(高さ 220 nm, 幅 480 nm, 長さ 6.45 cm)の両端にグレーティングカプラを形成した素子を用い、ウェーハレベル OFDR システム[2-3]により反射及び透過プロファイルの測定を行った(図 1)。OFDR プロファイルはいずれも解析式によるフィッティング(伝搬損失 0.95 dB/cm、分布反射係数-26.9 dB/cm)により再現できることが確認された。

謝辞 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (JPNP16007) および ARIM (JPMXP1225IT0013)の支援を受けて行われた。santec LIS(株) 北村敦、八谷将典 両氏の OFDR 技術についての貴重なご助言に感謝します。

表 1 多重反射光強度の伝搬距離依存性

反射回数	出力方向	出力光強度の伝搬距離依存性	観測される伝搬距離範囲
0	透過	$e^{-\alpha D}$	$z = D$
1	反射	$r\rho e^{-\alpha z}$	$[0, 2D]$
2	透過	$\frac{1}{2}r^2\rho(3D - z)e^{-\alpha z}$	$[D, 3D]$
3	反射	$\frac{1}{8}r^3\rho z^2 e^{-\alpha z}$	$[0, 2D]$
		$\frac{1}{8}r^3\rho(4D - z)^2 e^{-\alpha z}$	$[2D, 4D]$

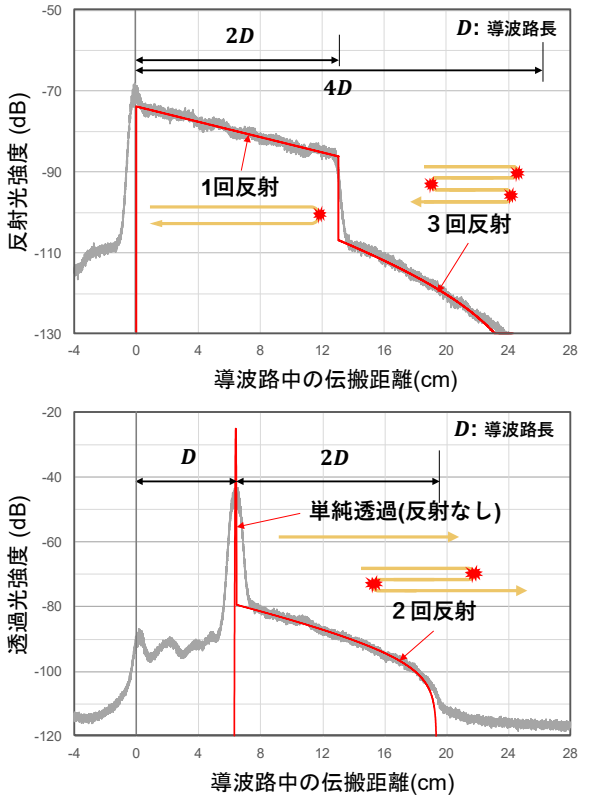


図 1 シリコン細線導波路の OFDR (a) 反射プロファイルと (b) 透過プロファイル。表 1 の解析式によるフィッティングを合わせて示す(図中の赤線)。

文献 [1] T. Horikawa et al., 2024 IEEE Photonics Conference. [2] 堀川他, 2023 秋応用物理学会, 20a-A201-7. [3] T. Horikawa et al., 2024 IEEE SiPhotonics.

© 2025年 応用物理学会

3 Optics and Photonics | Oral presentation：3.13 Silicon photonics, Photonics-electronics convergence, Optical control

[9p-N202-1~17] 3.13 Silicon photonics, Photonics-electronics convergence, Optical control

[9p-N202-1]

[The 58th Young Scientist Presentation Award Speech] III-V membrane MOSCAP microring optical modulator

○Hiroya Sakumoto[1], Tipat Piyapatarakul[1], Kasidit Toprasertpong[1], Shinichi Takagi[1], Mitsuru Takenaka[1] (1.The Univ. of Tokyo)

[9p-N202-2]

Electro-optic polymer modulator based on thin-film silicon core

○Hiromu Sato[1], Shiyoshi Yokoyama[1] (1.Kyushu Univ.)

[9p-N202-3]

Demonstration of Visible-light Coherent Optical Communication Using Silicon-nitride Integrated 90-degree Optical Hybrid

○Shota Ishimura[1], Abdulaziz Elfiqi[1], Takashi Kan[1], Hidenori Takahashi[1], Takehiro Tsuritani[1] (1.KDDI Research)

[9p-N202-4]

High saturation current and high speed Ge-on-Si photodetector with 4-port evanescently coupled waveguides

○(D)CHAO ZHANG[1], Rui Tang[1], Makoto Okano[2], Kasidit Toprasertpong[1], Shinichi Takagi[1], Mitsuru Takenaka[1] (1.The Univ. of Tokyo, 2.National Inst. of Advanced Indus. Sci. and Tech)

[9p-N202-5]

Integration of InGaAs MSM Photodetector with Narrow Metal Electrode Gap onto Si Waveguide

○Kentaro Komatsu[1], Tomohiro Akazawa[1], Stephane Monfray[2], Frederic Boeuf[2], Toprasertpong Kasidit[1], Mitsuru Takenaka[1] (1.The Univ. of Tokyo, 2.STMicroelectronics)

[9p-N202-6]

Influences of Well Layer Thickness on EL Properties for SiGe/Ge Multi Quantum Well LEDs

○Mayu Aikawa[1], Shuya Kikuoka[1], Michihiro Yamada[1], Hamaya Kohei[2,3,4], Sawano Kentarou[1] (1.Tokyo City Univ., 2.Grad. Sch. Eng. Sci., The Univ. of Osaka., 3.CSRN, The Univ. of Osaka., 4.OTRI, The Univ. of Osaka.)

[9p-N202-7]

Non-Volatile Phase Shift Using Silicon Nitride Waveguide-Based Mach-Zehnder Interferometer

○Yuriko Maegami[1], Guangwei Cong[1], Rai Kou[1], Noritsugu Yamamoto[1], Toshihiro Narushima[1], Tai Tsuchizawa[1], Hitoshi Kawashima[1], Koji Yamada[1] (1.AIST)

[9p-N202-8]

Operating Characteristics of Point-Symmetrically Cascaded Mach-Zehnder Interferometer Optical Switch

○(M1)Hirokazu Nakamura[1], Toshio Watanabe[1], Tsutomu Nagayama[1], Seiji Fukushima[1] (1.Kagoshima Univ.)

[9p-N202-9]

Phase error correction of a 4×4 programmable photonic integrated circuit enabled by Si PIN phase shifter with built-in optical power monitor

○Tomohiro Akazawa[1], Rui Tang[1], Yuto Miyatake[1], Makoto Okano[2], Kasidit Toprasertpong[1], Shinichi Takagi[1], Mitsuru Takenaka[1] (1.The Univ. of Tokyo, 2.AIST)

[9p-N202-10]

Comparative Analysis of Random Unitary Matrix Generators based on Programmable Photonic Circuits

○(D)Chun Ren[1], Ryota Tanomura[1], Takuo Tanemura[1] (1.The Univ. of Tokyo)

[9p-N202-11]

Machine Learning Prediction of Photonic Processor Parameters for General-Purpose Digital Twin

○Kohei Ikeda[1,2], Shota Kita[1,2], Kazuo Aoyama[3], Keijiro Suzuki[4], Yuriko Maegami[4], Guanwei Cong[4], Noritsugu Yamamoto[4], Koji Yamada[4], Akihiko Shinya[1,2], Hiroshi Sawada[3], Masaya Notomi[1,2] (1.NTT NPC, 2.NTT BRL, 3.NTT CSL, 4.AIST)

[9p-N202-12]

Generation of THz-Modulated Waves
Using a Heterogeneous Dual-Wavelength Tunable Laser diod

○(B)Soma Kawano[1], Kiyoharu Tujishita[1], Tomohiro Kita[1] (1.waseda univ.)

[9p-N202-13]

Resolution Enhancement of Passive Optical Phased Arrays Using Star Couplers

○(B)Risa Taniguchi[1], Momoka Komoda[1], Tomohiro Kita[1] (1.Waseda Univ.)

[9p-N202-14]

Demonstration of the crosstalk mitigation in self-similar waveguide arrays

○Kota Toyama[1,2], Ryo Kikuchi[2], Nobuyuki Matsuda[1,2] (1.RIEC, Tohoku Univ., 2.Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ.)

[9p-N202-15]

SLG FPA Beam Scanner using Telecentric Lens Optics

○Mikiya Kamata[1], Takemasa Tamanuki[1], Keisuke Hirotani[1], Toshihiko Baba[1] (1.Yokohama Nat'l Univ.)

[9p-N202-16]

SLG beam scanner integrated with SiN microring wavelength selective switches

○Yoshiki Komatsu[1], Takemasa Tamanuki[1], Mikiya Kamata[1], Toshihiko Baba[1] (1.Yokohama Nat'l Univ)

[9p-N202-17]

Realtime Si photonics nonmechanical FMCW LiDAR with SLG beam scanner and interpolation k-clock sampling (IV) - - - Application to 4 sub array SLG

○Shumpei Yamazaki[1], Takemasa Tamanuki[1], Mikiya Kamata[1], Toshihiko Baba[1] (1.Yokohama Nat'l Univ.)

III-V 族半導体薄膜導波路を用いた MOSCAP 型マイクロリング光変調器

III-V membrane MOSCAP microring optical modulator

東大院工，○作本　宙彌，ピヤパッタラクン ティパット，トープラサートポン カシディット，
高木　信一，竹中　充

The Univ. of Tokyo, ○Hiroya Sakumoto, Tipat Piyapatarakul, Kasidit Toprasertpong,
Shinichi Takagi, Mitsuru Takenaka
E-mail: sakumoto@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【背景・目的】III-V 族半導体薄膜光集積回路は、光源、光変調器、受光器、トランジスタ等を一体集積可能な光プラットフォームとして期待されている[1, 2]。III-V 族半導体中の電子は有効質量が小さく移動度が大きいため、Si と比較して自由キャリアによる屈折率変化が大きい一方で自由キャリア吸収による光損失が少ない [3]。この特徴を活かして、我々は III-V 族半導体薄膜導波路上に形成した金属-酸化膜-半導体キャパシタ(MOSCAP)構造を用いた光位相シフタの研究を進めている。III-V 族半導体中の電子による大きな屈折率変化を利用することで、金属電極による光損失が無視できる厚さ 750 nm のゲート絶縁層を介しても、III-V 族半導体薄膜導波路表面に蓄積する電子で Si 空乏型位相シフタと同程度の位相変調効率を低光損失で実現できる。厚いゲート絶縁膜層はリーク電流を抑制し、低消費電力での光位相シフタの実現を可能にすることから、大規模な光集積回路に適した光位相シフタとしての活用が期待されている[4]。さらに、このような厚いゲート絶縁膜層を有する MOSCAP 構造は寄生容量が小さく、高速変調器への応用も期待できる。これまでに、InGaAsP 薄膜導波路を用いた MOSCAP 型光位相変調器の動作実証に成功している。
【作製】提案素子の断面構造を Fig. 1(a)に示す。不純物濃度$1 \times 10^{17}\ cm^{-3}$, 厚さ 200 nm の n 型 InGaAsP 薄膜を Al_2O_3 層を介して SiO_2/Si 基板に貼り合わせた。電子線描画とドライエッチングを用いて InGaAsP 導波路をパターニング後、良好な MOS 界面を形成するため、10 nm の Al_2O_3 層を原子層堆積装置で堆積した。その後、750 nm の SiO_2 上部クラッドをスパッタで堆積し、最後に Ni/Au 電極をリフトオフプロセスで形成した。作製した素子の顕微鏡写真を Fig. 1(b)に示す。リング共振器と非対称マッハツェンダ干渉計(AMZI)に MOSCAP 型光変調器を集積した。
【測定結果】InGaAsP 薄膜導波路 MOSCAP 型光変調器に電圧を印加した際の AMZI の共振波長変化から位相シフト量を測定した。Fig. 2 に印加電圧と位相シフト量の関係を示す。グラフの傾きから位相変調効率は 0.89 V·cm と得られた。InGaAsP 中の電子誘起屈折率が大きいことから、750 nm と厚いゲート絶縁膜を用いても、キャリア空乏型 Si 変調器と同程度の変調効率が得られた。続いて TLM 法を用いて InGaAsP 薄膜のシート抵抗を測定したところ 170 Ω/□が得られた。平行平板モデルを用いて計算した MOSCAP 構造の寄生容量は 1.81 fF/cm であり、RC 時定数で律速される素子の動作帯域は 120 GHz 以上となる。最後にリング共振器上に集積した InGaAsP 薄膜導波路 MOSCAP 型光変調器のアイパターンを測定した。32 Gbps のアイパターンの測定結果を Fig. 3 に示す。厚いゲート絶縁膜による低寄生容量により、32 Gbps で良好なアイの開口を確認した。現状の素子の動作帯域はリング共振器の光子寿命によって律速されているため、リング共振器の Q 値の最適化により一層の高速動作も見込める。
【謝辞】本研究の一部は JST CREST（JPMJCR2004）、 JST 未来社会創造事業（JPMJMI20A1）、JSPS 科研費（JP23H00172）、ARIM（JPMXP1225UT1021）および NEDO 委託事業（JPNP16007）の助成を受けて実施した。【参考文献】[1] M. Takenaka and Y. Nakano, Opt. Express 15, 8422 (2007) [2] N. Sekine et al., Opt. Express, 30, 23318–23329 (2022). [3] J. Han et al., Nat. Photonics 11, 486-490 (2017). [4] 作本宙彌他,第 58 回応用物理学会春季学術講演会, 16p-K305-2, 2025 年 3 月.

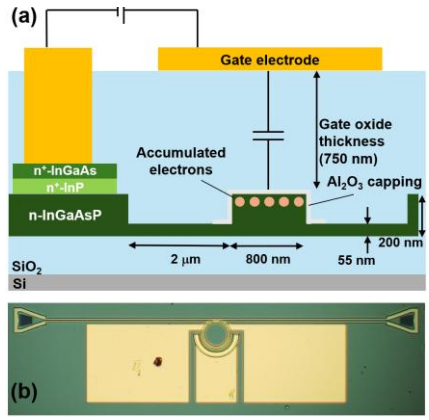


Fig. 1(a) Cross-sectional view and (b) microscopic view of InGaAsP MOSCAP phase shifter.

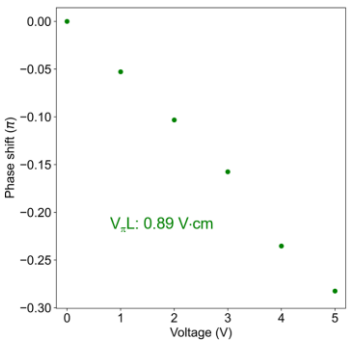


Fig. 2 Relationship of applied voltage and optical phase shift.

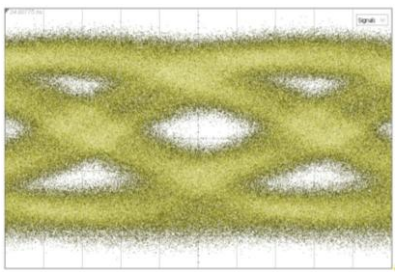


Fig. 3 Eye pattern of InGaAsP MOSCAP phase shifter at 32 Gbps.

© 2025年 応用物理学会

薄膜シリコンコアを用いた電気光学ポリマー光変調器

九大先導研 [1]　○佐藤 洸 [1]，横山 士吉 [1]

IMCE, Kyushu Univ. [1], ○Hiromu Sato[1], Shiyoshi Yokoyama[1]

E-mail: h_sato@jsap.or.jp

1. はじめに

光通信デバイスの低消費電力化は、データ通信量の増加に伴う電力需要の高まりに対応するため、重要な課題となっている。シリコンと電気光学（EO）ポリマーを組み合わせた光変調器は、高集積性と低電圧駆動が可能であることから、次世代の光変調器として注目されている。当研究室ではこれまでに、薄膜シリコン導波路と EO ポリマーを融合したハイブリッド変調器を開発し、1 V 以下の半波長電圧および 200 Gbit/s の高速応答を実証してきた[1-3]。しかし、従来構造では電極間距離のさらなる短縮が困難であり、デバイス構造による駆動電圧低減に限界があった。本稿では、n 型ドープされた SOI（silicon-on-insulator）基板を用い、シリコン層が導波路と下部電極の両方の役割を果たすことで電極間距離を短縮し、さらなる低電圧駆動を可能とする EO 変調器の設計・試作・評価を行った。

2. 実験・結果

リブ型導波路構造を有する光変調器を SOI 基板上に電子線描画およびドライエッチングすることで作製した。図 1(a)に変調部における導波路の断面構造、(b)に電磁界シミュレーションの結果を示す。リブおよびスラブの厚さはそれぞれ 50 nm である。シミュレーション結果から、光電場が EO ポリマー中に良好に閉じ込められていることが確認され、その光電場のポリマー中への閉込め率は 79 %が得られた。また、n 型ドープされた SOI 基板を導入することで、シリコン導波路を下部電極としても利用できる構造にした。これにより 2 μm の電極間距離（g）を実現し、これは従来構造の半分以下である。この結果、電極長 2 mm における半波長電圧 V_πは 4.2 V となり、電極単位長さあたりの半波長電圧 $V_\pi L$ は 0.84 V cm と算出された。これは従来デバイスの $V_\pi L$（1.4 V cm）と比較して大きく低減されており、提案デバイスの有効性が確認された。

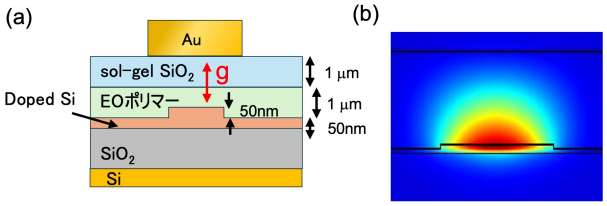


Fig. 1. Schematic of the EO modulator. (a) Cross-sectional structure. (b) Simulated optical electric field distribution.

3. 結言

本稿では、n 型ドープされた SOI 基板を用いた薄膜シリコン導波路基盤としたポリマー光変調器の設計および試作を行い、電極間距離の短縮による低電圧駆動を実現した。得られた半波長電圧 4.2 V（電極長 2 mm）は、従来デバイスと比較して $V_\pi L$ を約 2/3 に低減しており、省電力化と高集積化に向けた有望なプラットフォームとなる可能性が示された。

参考文献

[1] H. Sato et al., Opt. Express 25, 768 (2017)
[2] Lu, G. W. et al., Nat. Commun. 11, 4224 (2020)
[3] H. Sato et al., IEEE Photonics Technol. Lett. 33, 1507 (2022)

© 2025年 応用物理学会

シリコンナイトライド集積 90 度光ハイブリッドを用いた可視光帯コヒーレント光通信の実証

Demonstration of Visible-light Coherent Optical Communication Using Silicon-nitride Integrated 90-degree Optical Hybrid

KDDI 総合研　石村昇太，Abdulaziz E. Elfiqi，管 貴志，高橋英憲，釣谷剛宏

KDDI Research. , Shota Ishimura, Abdulaziz E. Elfiqi, Takashi Kan, Hidenori Takahashi, Takehiro Tsuritani

E-mail: sh-ishimura@kddi.com

【はじめに】近年、可視光帯における光通信が盛んに研究されている。しかしながら、コヒーレント検波を可視光帯で適用している報告はあまりない。そこで今回我々は、シリコンナイトライド（SiN）プラットフォーム上に集積された 90 度光ハイブリッドを用いて、780 nm 帯のコヒーレント光通信システムの実証に成功した [1]。これによって、可視光帯においても集積フォトニクスを用いて、コヒーレント受信の特徴である高感度化や多値化を実現できる可能性が示された。

【実験結果】図 1(a)に実験構成と開発した SiN チップの外観を示す。図 1(b)にはチップの断面構造を示しており、厚さが 800 nm の SiN 層が SiO_2 のクラッドに囲われている。90 度光ハイブリッドは 4x4 MMI によって実現され、その動作帯域としては 780 nm を中心として、約 13 THz 程度であることを数値計算及び実験的にも確認した [1]。MMI の 1 番目と 3 番目のポートに信号光とローカル（LO）光を入力することで、位相ダイバーシティホモダイン受信が実現される。図 1(c)に MMI を含むチップの上部からの写真を示す。780 nm 帯の送信光源としては、ゲインチップと回折格子及びミラーを組み合わせた、Littman 型の外部共振器を有する外部共振レーザ（ECL）を採用した。その出力光を 2 分岐し、片側をマッハツェンダー変調器（MZM）によって 10 Gbaud の BPSK 変調した後、2.2 m の自由空間を伝搬させ、もう片側はホモダイン受信のための LO 光源とした。両者はファイバアレイを介して SiN チップへと入力され、ファイバアレイと SiN チップは両側からバットカップリングによって接続された。SiN チップ上の MMI にて信号光と LO 光をミキシングした後、I+, I-, Q+, Q-の 4 成分をフォトダイオードで検出し、出力電気信号をデジタルオシロスコープで取得して、オフライン信号処理で BPSK 信号を復調した。図 1(d)に復調結果を示す。ECL 内の回折格子の角度を変えて、測定波長を 762 nm から 790 nm まで 2 nm ごとに掃引しながら測定した。何れの波長においても、オーバーヘッド 20%の軟判定誤り訂正符号の閾値以下の品質で、BPSK 信号が復調できていることを確認した。

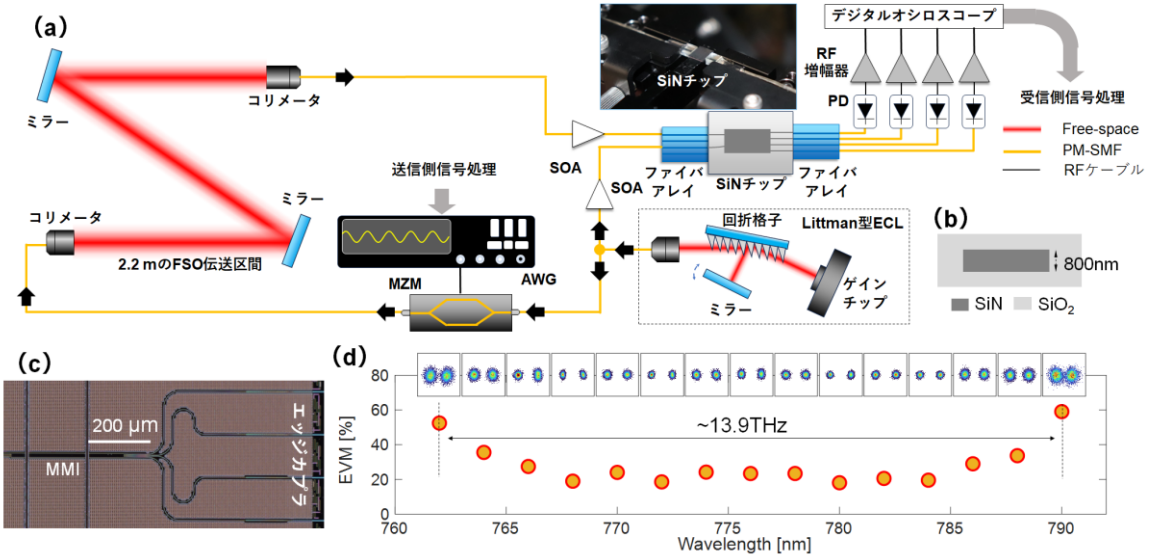


Fig. 1: (a) Experimental setup; (b) cross-section of the SiN waveguide; (c) optical microscopic image of the fabricated device; and (d) measured EVM performance.

【謝辞】本研究は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究（課題番号 08801: JPJ012368C08801）において実施された。

【参考文献】1) S. Ishimura *et al.*, “Coherent Demodulation using Silicon-nitride Integrated Photonics for Visible and Short Near-infrared Optical Communications” *APL photonics*, under review.

© 2025年 応用物理学会

High saturation current and high speed Ge-on-Si photodetector with 4-port evanescently coupled waveguides

Chao Zhang[1], Rui Tang[1], Makoto Okano[2], Kasidit Toprasertpong[1], Shinichi Takagi[1], Mitsuru Takenaka[1]
[1] The University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan
[2] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Ibaraki 305-8569, Japan
*E-mail: zhangchao@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Radio-frequency (RF) photonics—often referred to as microwave photonics—support a broad range of applications, including fiber-optic communication, photonic radar systems, RF signal detection, and distributed antenna networks [1]. These applications demand photodetectors (PDs) that can sustain both high saturation current and high-frequency operation. Among the various PD architectures that have been investigated [2–4], PIN PDs offer an optimal compromise between performance metrics and integration potential [5–9]. Nevertheless, standard Ge PIN photodiodes continue to encounter limitations such as photocurrent saturation and reduced bandwidth under strong optical illumination due to space-charge effects. To address these challenges, we introduce a new Ge-on-Si PIN photodiode structure based on evanescent coupling. This design achieves high responsivity, elevated saturation current, and broad bandwidth, making it highly suited for advanced RF photonic applications.

2. Device Structure

The proposed PD is illustrated in Fig. 1(a). Light is injected through a grating coupler and split into four waveguides via MMI couplers. These waveguides taper toward the central Si p^+-region to achieve evanescent coupling into the Ge layer above. The Ge layer is 30 μm × 4.5 μm and 500 nm thick, formed on a 31 μm Si p^+-region. A p^{++}-Si contact is placed centrally to enable efficient carrier extraction. Fig. 1(b-c) shows the waveguide taper and cross-sectional structure, with a designed groove for light confinement.

3. Experiment Results

As shown in Fig. 2(a), dark current increases with reverse bias, mainly due to the large Ge absorption area. The device exhibited a responsivity of 1.08 A/W and a saturation current of 54 mA, as shown in Fig. 2(b), indicating strong optical absorption and coupling.

Dynamics measrements results are shown in Fig. 3. Bandwidth measurements using a Keysight VNA showed 3 dB bandwidth of 25.2 GHz at –5 V. High-speed testing with an Anritsu MP1800A produced a clear 32.1 Gbit/s NRZ eye diagram, confirming the device's capability for high-speed data detection.

4. Conclusion

We have demonstrated a four-port evanescently coupled Ge-on-Si PIN PD achieving 1.08 A/W responsivity, 54 mA saturation current, and >25 GHz bandwidth. These results validate the device's potential for next-generation RF photonics and high-speed optical interconnects.

Acknowledgments: This work was partly supported by JST-Mirai Program (JPMJMI20A1) and JST, CREST (JPMJCR2004), and partly based on results from a project (JPNP16007) commissioned by NEDO.

Reference:

[1] K. Sun et al., Appl. Sci. 9, 623 (2019).
[2] X. Hu et al., Opt. Express 28, 38343-38354 (2020).
[3] Y.-K. Wu et al., J. Lightwave Technol. 43, 690-700 (2025).
[4] Y. Huang et al., J. Lightwave Technol. 42, 2362-2370 (2024).
[5] Z. Jiang et al., Opt. Express 29, 7389-7397 (2021).
[6] M. J. Byrd et al., Opt. Lett. 42, 851-854 (2017).
[7] D. Li et al., Photonics 10, 142 (2023).
[8] H. Cao et al., ACS Photonics 11, 1761–1770 (2024).
[9] X. Hu et al., Photonics Res. 9, 749-756 (2021).

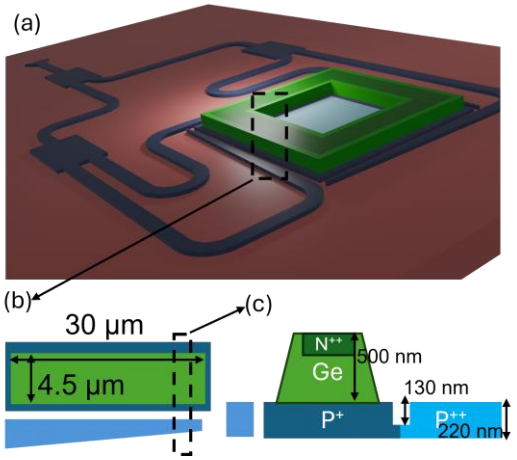


Fig. 1 Schematic image of the 4-port evanescent coupled PIN PD. (a) The 3D schematic image. (b) The top-view schematic of the evanescent taper waveguide and one edge of the Si p^+ area. (c) The cross-sectional schematic of the taper waveguide and one edge of the PIN structure.

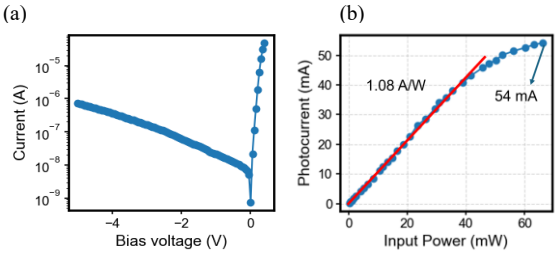


Fig. 2 (a) Dark current as a function of bias voltage. (b) Photocurrent versus input power

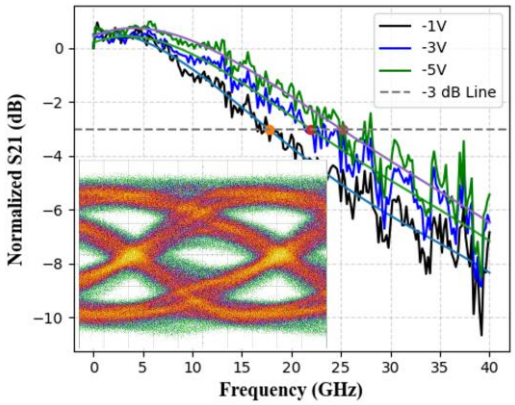


Fig. 3 Normalized S21 curve at different bias voltage and 32.1 Gbit/s NRZ eye diagram.

© 2025年 応用物理学会

狭金属電極ギャップを有する InGaAs MSM 型受光器の Si 導波路への集積

Integration of InGaAs MSM Photodetector with Narrow Metal Electrode Gap onto Si Waveguide

◦小松 健太郎 [1], 赤澤 智熙 [1], モンフレ ステファン [2], ブフ フレデリック [2],
トープラサートポン カシディット [1], 竹中 充 [1]
(1.東大院工, 2.ST マイクロエレクトロニクス)

◦ Kentaro Komatsu[1], Tomohiro Akazawa[1], Stéphane Monfray[2], Frédéric Boeuf[2], Kasidit Toprasertpong[1], Mitsuru Takenaka[1]
(1. The Univ. of Tokyo, 2. STMicroelectronics)
E-mail: komatsu@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【背景・目的】Si フォトニクスにおける受光器は、光通信波長帯での高効率な光吸収を実現するため、主に Ge や InGaAs といった異種材料を集積して作製される。これらの受光器においては、PIN 構造をはじめとする各種デバイスの小型化によって、高速動作の実現を目指した研究開発が進められている[1]。MSM（Metal–Semiconductor–Metal）構造を用いた受光器は簡便な構造で作製が可能であることから、Si 導波路へ集積も報告されているが[2,3]、電極間のギャップはおおよそ 700 nm 程度にとどまり、さらなる狭ギャップ化による性能向上の余地がある。本研究では、光吸収層として InGaAs を用い、その上に 300 nm の電極ギャップを有する MSM 構造を Si 導波路上に集積した導波路型受光器を作製し、動作特性について評価を行った結果について報告する。
【素子作製】デバイスの上面および断面の模式図を Fig. 1 に示す。まず、100 nm 厚の p 型 InGaAs 層を有する InP エピタキシャル基板と Si 導波路を形成した SOI 基板を、Al_2O_3 を介して直接接合した。続いて、EB リソグラフィおよびドライエッチングにより InGaAs パターンを形成した後、EB 蒸着およびリフトオフプロセスにより、最小 300 nm のギャップを有する Ni/Au 電極を形成し、受光器を作製した。Fig. 2 は作製したデバイスの光学顕微鏡画像である。今回作製した MSM 受光器の構造は、電極ギャップを導波路に対して並行方向に形成した構造となっている。
【測定結果】作製した電極間ギャップ 300 nm、素子長 5 μm のデバイスにおける、入射光強度を変化させた際の電流–電圧特性を Fig. 3(a)に示す。印加電圧 1 V において、2.56 mW の光が入射したときの光電流は 2619 μA となっており、受光感度としては 1.03 A/W と高い値が得られた。Fig. 3(b), (c)に動作速度の測定結果を示す。Fig.3(b)はネットワークアナライザを用いて測定した S パラメータの測定結果であり、印加電圧 1V におけるデバイスの 3 dB 帯域幅は 21 GHz である。また、Fig. 3(c)のように 25 Gbit/s において明瞭なアイパターンの開口が確認され、高速動作が可能であることが示された。
【謝辞】本研究の一部は JST CREST（JPMJCR2004）、 JST 未来社会創造事業（JPMJMI20A1）、JSPS 科研費（JP23H00172）、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業（JPMXP1225UT1021）、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（JPNP16007）の助成を受けて実施した。【参考文献】[1] C. Guanyu, et al., Laser & Photonics Reviews 16.12 (2022). [2] V. Laurent et al., Applied Physics Letters 92.15 (2008). [3] B. Joost et al., Journal of Lightwave Technology 25.4 (2007).

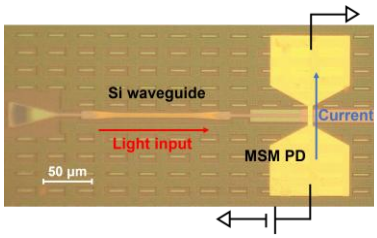


Fig. 2 Microscope image of the fabricated MSM PD.

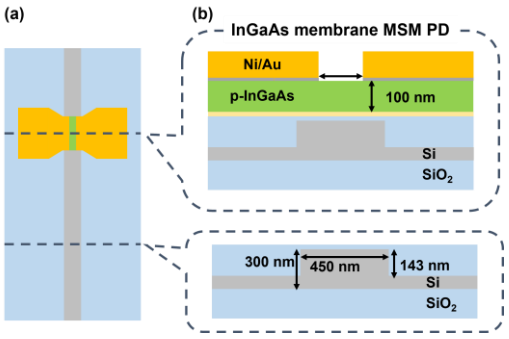


Fig. 1 (a) Top-view schematic of the InGaAs MSM photodetector (PD). (b) Cross-sectional schematic of the MSM PD.

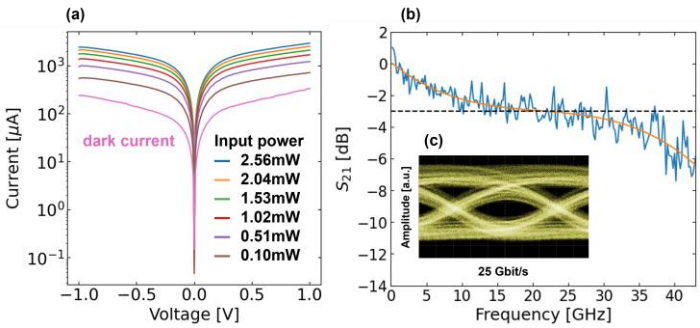


Fig. 3 (a) I-V characteristic of the fabricated PD under different optical input powers. (b) Measured frequency response. (c) Eye diagram at 25 Gbit/s.

© 2025年 応用物理学会

SiGe/Ge 多重量子井戸 LED における EL 発光特性の井戸幅依存性

Influences of Well Layers Thickness on EL Properties for SiGe/Ge Multi Quantum Well LEDs

[1]東京都市大, [2]阪大基礎工, [3]阪大基礎工 CSRN, [4]阪大 OTRI スピン

○相川 茉由[1], 菊岡 柊也[1], 山田 道洋[1], 浜屋 宏平[2,3,4], 澤野 憲太郎[1]

[1]Tokyo City Univ., [2] Grad. Sch. Eng. Sci., The Univ. of Osaka.,

[3]CSRN, The Univ. of Osaka., [4]OTRI, The Univ. of Osaka.

○M. Aikawa[1], S. Kikuoka[1], M. Yamada[1], K. Hamaya[2, 3, 4], K. Sawano[1]

E-mail: g2481201@tcu.ac.jp

1. はじめに

近年、量子暗号化技術の重要性が高まり、円偏光を光通信に利用する方法が提案されている。特に Si 基板上にモノリシック集積化でき、通信用波長帯域にて発光可能な Ge がスピン LED 材料として注目されている。Ge の(111)面方位は Ge 上に高品質な強磁性体のエピタキシャル成長を可能にし、強磁性体からスピン偏極電子を Ge へ注入することができる[1]。これまでに我々は、発光波長制御や発光強度増大のために、活性領域への SiGe/Ge 多重量子井戸(MQW)構造の導入を試み、PL 発光の Ge 量子井戸幅依存性について報告している[2][3]。本研究では、SiGe/Ge MQW LED デバイスにおける Ge 井戸幅の PL, EL 発光特性に与える影響について調べた。

2. 実験方法 , 結果と考察

固体ソース MBE を用いて Si(111)上に、MQW 構造を作製した(Fig. 1)。2 段階成長法にて Ge-on-Si(111)を成長させ、その上に $Si_{0.2}Ge_{0.8}$ (膜厚 d=4, 8 nm)/Ge (d=2, 6, 10, 14 nm)を 10 周期成長した。その後 P ドープ Ge 層、低抵抗コンタクト形成のための δ-P ドーピング/Si 極薄層を挿入した Ge キャップ層を成長した。作製した基板をフォトリソグラフィーと反応性イオンエッチングによりメサ型ダイオードに加工し、トップ電極と裏面電極として Au を蒸着した。

XRD 測定では、MQW（多重量子井戸）に対応するフリンジピークが観測され、高い結晶性で周期的な SiGe/Ge ヘテロ構造が形成されていることが確認された。断面 TEM 像からは、MQW 層の界面が急峻で、面内方向に非常に均一であることが分かった。(Fig.1)

I-V 特性測定により良好なダイオード特性が確認され、室温で得られたフォトルミネッセンス（PL）およびエレクトロルミネッセンス（EL）スペクトルでは、全ての MQW LED 試料から 0.7～0.8 eV 帯で強い発光が観測された。発光ピークは、Ge-on-Si 由来の成分と MQW 層由来の成分の 2 つから構成され、後者は MQW の井戸幅に依存する。井戸幅を増加させると低エネルギー側へシフトしており、さらに発光エネルギーの値はシミュレーションともよい一致をしていることから、得られた PL, EL 発光が Ge 量子井戸への閉じ込めによる発光であることが分かった。

本研究の一部は、科研費(21H04635, 23H00258, 23H05455, 23H05458, 24H00034)の支援を受けて行われた。 References; [1] K. Hamaya et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 51, 393001(2018). [2] R. Kanesawa et al., Mat. Sci. Semi. Proc. 177, 108300 (2024). [3] S. Kikuoka et al., Mat. Sci. Semi. Proc. 176, 108299 (2024).

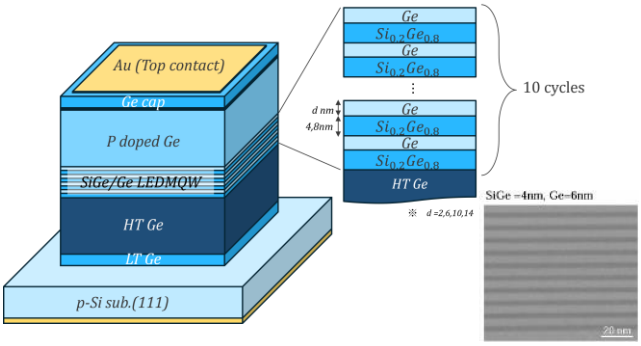


Fig. 1 SiGe/Ge MQW LED structure

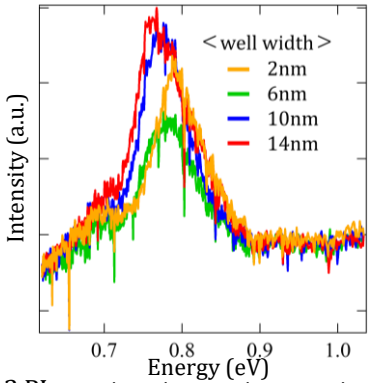


Fig. 2 PL spectra at room temperature

© 2025年 応用物理学会

窒化シリコン導波路型マッハ・ツェンダー干渉計を用いた不揮発な位相シフトの実証

Non-Volatile Phase Shift Using Silicon Nitride Waveguide-Based Mach-Zehnder Interferometer

産総研　○前神 有里子，コン グアンウェイ，高 磊，山本 宗継，成島 利弘，
土澤 泰，河島 整，山田 浩治

AIST, ○Yuriko Maegami, Guangwei Cong, Rai Kou, Noritsugu Yamamoto, Toshihiro Narushima, Tai Tsuchizawa, Hitoshi Kawashima, and Koji Yamada

E-mail: yuriko-maegami@aist.go.jp

無電力で状態を保持できる不揮発性光回路は、低遅延・高スループットなアクセラレータとして注目される光ニューラルネット演算や光量子演算の大規模化において、消費電力の抑制に重要である。従来の集積光干渉回路は熱光学効果により回路を制御し、使用中も常時通電が必要だったが、大規模化により電力消費が数百ワットに達する可能性がある。これに対し、不揮発性光回路は設定後の通電が不要で、より省電力な動作が可能となる。窒化シリコン（SiN）は CMOS プロセスと互換性が高く、光集積回路でも非常によく用いられる材料である。プラズマ化学気相堆積法（PECVD）により成膜した SiN 薄膜はダングリングボンドが多く含まれ、紫外線（UV）照射と熱処理により K センター（·Si≡N3）の荷電状態が変化し、それに伴って屈折率が可逆的に変化することが確認されている[1]。本研究では、この現象を利用したデバイスとして、マイクロヒーターを集積した SiN 導波路型非対称マッハ・ツェンダー干渉計（MZI）を製作し、UV 照射とマイクロヒーターによる導波路の局所加熱により、通信波長帯で不揮発な位相シフトを実証したので報告する。

図 1 (a)はアーム長差が 50 μm の非対称 MZI の概念図、図 1 (b)はその位相シフタの断面構造を示す。ヒーターは導波路と並行に配置され、導波路上方からの UV 照射を可能とするため、導波路に対し 3 μm の開口が設けられている。導波路に用いた SiN の屈折率は約 1.847 で、平均原子組成比は Si:N = 3:4.55 である。図 1 (c)は位相シフタ長 400 μm の MZI における O バンドのスペクトル変化を示す。UV 照射後を初期状態とし、まず上側の位相シフタを加熱すると屈折率バランスが崩れ干渉位相が変化し、さらに下側の位相シフタを加熱すると屈折率バランスが取れ、元の位相状態に戻ることが確認された。この現象は C バンドでも同様に確認され、図 1 (d)より π 位相シフトには 2.2 mm 程度のシフタ長が必要と推定される [2]。K センターの荷電状態変化と屈折率の変化の相関があることから、ダングリングボンド量の多い SiN を用いることにより、より大きな屈折率変化が得られ、より大きな不揮発な位相シフトが期待される。

【謝辞】本研究は JST CREST（JPMJCR24R3）の助成を受けた。

【参考文献】[1] Y. Maegami et.al., SSDM 2022, A-9-05. [2] Y. Maegami et.al., ECOC 2024, W2A.23.

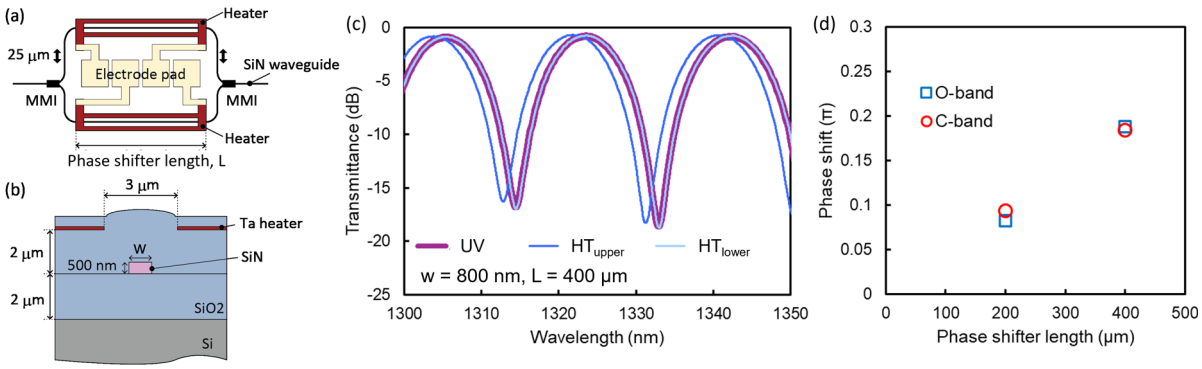


Fig. 1 (a) Schematic illustration of an AMZI. (b) Schematic cross-section of phase shifter. (c) Transmittance spectra of AMZI in the O-band. (d) Phase shifter length dependence of phase shift.

© 2025年 応用物理学会

点対称に縦続接続した MZI 光スイッチの動作特性

Operating Characteristics of Point-Symmetrically Cascaded Mach-Zehnder Interferometer Optical Switch

鹿児島大　○(M1)中村 広和，渡邉 俊夫，永山 務，福島 誠治

Kagoshima Univ., ○Hirokazu Nakamura, Toshio Watanabe, Tsutomu Nagayama, Seiji Fukushima

E-mail: wata104@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

Mach-Zehnder 干渉計（MZI）を縦列に接続した導波路型光スイッチ [1]において、立上り時間が短縮されることが示されている [2]。本稿では、2 つの MZI を線対称に接続した場合と点対称に接続した場合の動作特性の違いを示す。

2. 計算方法

2 つの MZI を図 1 のように線対称に接続した場合、位相差$\Delta\phi$における各出力ポートへの光パワー透過率$|E_1'|^2$, $|E_2'|^2$は次式で表される。

$$|E_1'|^2 = 1 - |E_2'|^2$$

$$|E_2'|^2 = 16k^2(1-k^2)(1-2k^2)^2\cos^4\frac{\Delta\phi}{2}$$

ここでkは方向性結合器の振幅結合率である。

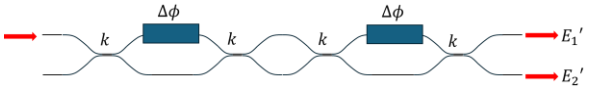


Fig. 1. Configuration of mirror- symmetrically cascaded MZIs.

一方、MZI を図 2 のように点対称に接続した場合、光パワー透過率は次式で表される。

$$|E_1'|^2 = \left\{1 - 8k^2(1-k^2)\cos^2\frac{\Delta\phi}{2}\right\}^2$$

$$|E_2'|^2 = 1 - |E_1'|^2$$

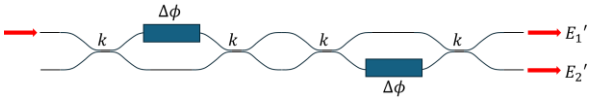


Fig. 2. Configuration of point- symmetrically cascaded MZIs.

3. 計算結果

MZI を線対称に接続した場合も点対称に接続した場合も、$\Delta\phi = 180°$において$|E_1'|^2 = 1$, $|E_2'|^2 = 0$になる。また、$k = \sqrt{2-\sqrt{2}}/2$としたときに$\Delta\phi = 0$において$|E_1'|^2 = 0$, $|E_2'|^2 = 1$になる [1]。結合率がこの値からずれると、$\Delta\phi = 0$において$|E_1'|^2 \neq 0$となり、スルーポートにクロストークが生じる。しかし、MZI を点対称に接続した場合は、位相差$\Delta\phi$を適切な値に設定すれば$|E_1'|^2 = 0$となり、スルーポートへのクロストークを 0 にできる。$k = 0.5$としたときの光パワー透過率の位相依存性を図 3 に示す。

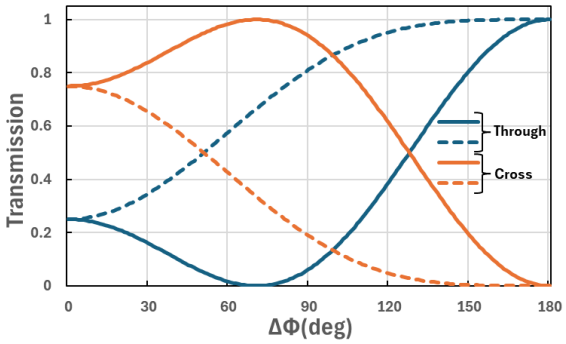


Fig. 3. Phase dependence of optical transmission for $k = 0.5$ (solid lines: point-symmetrical MZIs, dashed lines: mirror-symmetrical MZIs).

点対称に接続した MZI で$k = 1/\sqrt{2}$としたときの光パワー透過率の位相依存性を図 4 に示す。このとき、$\Delta\phi = 90°$において$|E_1'|^2 = 0$, $|E_2'|^2 = 1$となる。

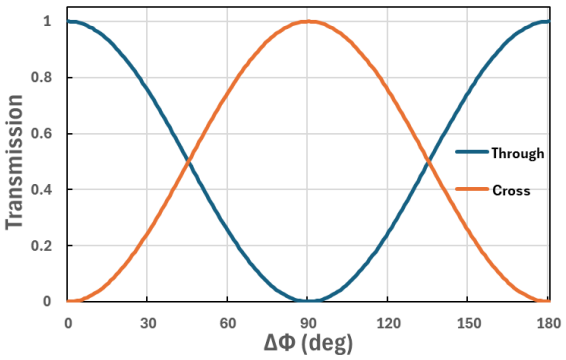


Fig. 4. Phase dependence of optical transmission for $k = 1/\sqrt{2}$ (point-symmetrical MZIs).

4. まとめ

2 つの MZI を点対称に縦続接続した光スイッチでは、結合率が変化したときでも、位相を適切な値に設定するとスルーポートへのクロストークが 0 になることを示した。

参考文献

1) 大庭 直樹, 豊田 誠治, 渡辺 俊夫, 栗原 隆, 第 61 回応用物理学会学術講演会, 5a-K-1, Sept. 2000.
2) T. Watanabe, S. Taguchi, T. Nagayama, and S. Fukushima, 29th Microoptics Conference (MOC 2024), PO-97, Sept. 2024.

© 2025年 応用物理学会

光パワーモニタ内蔵 Si PIN 型位相シフタを用いた 4×4 プログラマブル光回路における位相誤差補正の実証

Phase error correction of a 4×4 programmable photonic integrated circuit enabled by Si PIN phase shifter with built-in optical power monitor

○赤澤 智熙[1]，唐 睿[1]，宮武 悠人[1]，岡野 誠[2]，トープラサートポン カシディット[1]，高木 信一[1]，竹中 充[1]
(1. 東大院工，2. 産総研)
○T. Akazawa[1], R. Tang[1], Y. Miyatake[1], M. Okano[1], K. Toprasertpong[1], S. Takagi[1], M. Takenaka[1]
(1. The Univ. of Tokyo, 2. AIST)
E-mail: akazawa@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【背景・目的】コンピューティング応用などへ向けて，Si プログラマブル光回路（PIC）が注目を集めているが，PIC の正確なプログラミングには，多数集積された光位相シフタの位相誤差の校正が必要となる。このためには，回路中の各光スイッチにおいて，光強度を透明な光パワーモニタ（OPM）を用いて直接モニタすることが有効であるが，OPM への追加の電気配線が必要となり，回路のスケーリングが困難となる点が課題である[1]。本研究では，Si PIN 型導波路を順バイアス条件下では位相シフタとして，逆バイアス条件下では透明な OPM として用いることで，位相シフタ以外への追加の電気配線を取り除き，簡便かつスケーラブルな手法で，回路中の位相誤差の校正に成功したので報告する。
【結果】Si PIN 型導波路を用いた 4×4 Clements 型光回路[2]の顕微鏡写真を図 1 に示す。まず， 2×2 マッハツェンダー干渉計（MZI）の入力に波長 1550 nm の CW 光をグレーティングカプラ（GC）を介して入射し，MZI 中の PIN 導波路に順バイアスを印加することで，出力ポートの光強度を変化させ，逆バイアスを印加した PIN 導波路によって，Si の欠陥準位に起因した光電流を読み取った（図 2(a)）。Bar/Cross ポートでの GC からの透過光強度と PD の電流の位相シフタの印加電圧依存性を図 2(b)，(c)にそれぞれ示す。これらの図から，光電流は透過特性に追従しており、そのパワー分岐比の誤差は最大 3%以下であることが分かった。次に，作製した回路中の位相誤差を校正するため，回路の入力に CW 光を入射し，回路の初段の位相シフタへの順バイアス電圧を掃引し，次段における逆バイアス下の PIN 型 PD によって、パワーの分割比を測定した。これにより，初段の位相シフタに存在する位相誤差を特定することが可能である。同様の手順を回路入力部から出力部まで繰り返すことにより，図 3 に部分的に示すように，回路中の各光スイッチにおける位相誤差を測定した。この位相誤差の情報をもとに，様々な行列を実現し，測定した結果を図 4(d)(e)(f)に示す。なお，図 4(a)(b)(c)では，Clements の行列分解法により，決定論的に導出された位相シフト量に基づいて構成された行列の測定結果を示しており，提案手法による回路の位相誤差の校正によって，所望の行列を実装できていることが確認された。
【謝辞】本研究の一部は， CREST （JPMJCR2004）と科研費（JP24KJ0823）の助成により実施された。【参考文献】[1] S. Bandyopadhyay *et al.*, *Optica* 8, 1247 (2021). [2] W. R. Clements *et al.*, Optica 3, 1460 (2016).

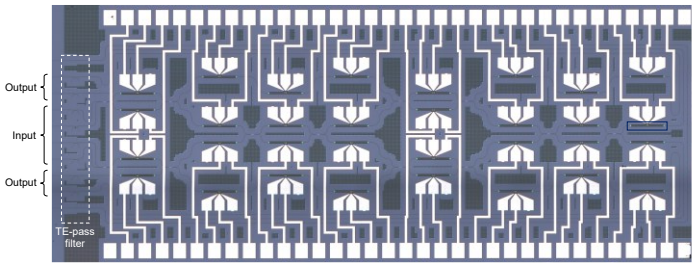


Fig. 1. Microscope image of a 4×4 programmable PIC based on PIN diodes.

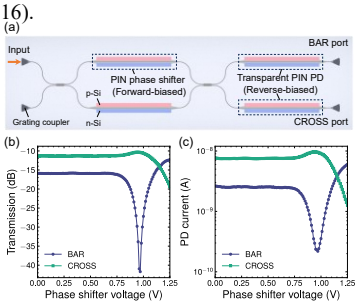


Fig. 2. (a) Measured transmissions via grating couplers and (c) measured currents of transparent PIN PDs at bar and cross ports in 2×2 MZI.

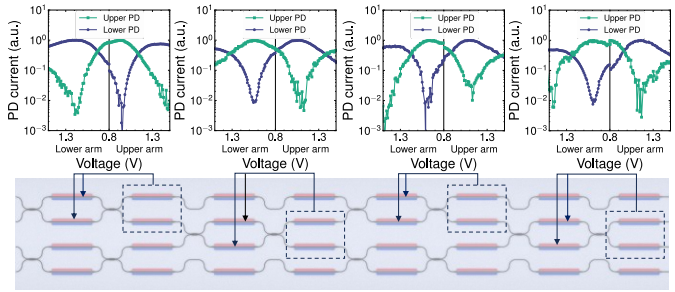


Fig. 3. Representative results of the power ratio measurement for the identification of phase errors at each MZI.

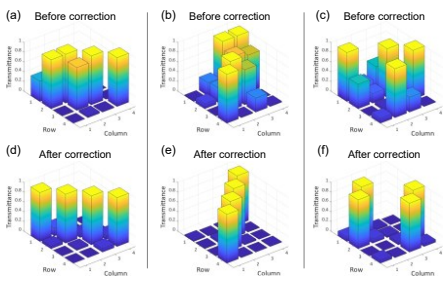


Fig. 4. Examples of matrices implemented by a 4×4 programmable PIC (a)(b)(c) before the error correction and (d)(e)(f) after the error correction.

© 2025年 応用物理学会

プログラマブル光回路によるランダムユニタリ行列生成器の比較分析

Comparative Analysis of Random Unitary Matrix Generators based on Programmable Photonic Circuits

東大院・工　○(D)任 淳，田之村 亮汰，種村 拓夫
The Univ. of Tokyo, ○Chun Ren, Ryota Tanomura, Takuo Tanemura
E-mail: chun.ren@tlab.t.u-tokyo.ac.jp

1. 背景

ランダムユニタリ行列はイメージングや光計算、量子情報処理などで広範に応用される[1]。任意の Haar ランダムユニタリ行列を実現できるプログラマブル光回路として、マッハツェンダー干渉器 (MZI) 方式[2]や多ポート方向性結合器(MDC) 方式[3,4]による光ユニタリ変換器 (OUC)がある。本研究では、MZI-OUC と MDC-OUC をランダムユニタリ行列生成器として用いた場合の行列ランダム性を分析・比較した。両構成とも任意の$N \times N$ユニタリ行列の実現にはN^2個の光位相シフタを必要とする一方で、ランダムユニタリ行列生成器の用途では、MDC-OUC 方式を用いることで、位相シフタ数を $3N$ にまで削減できることを明らかにしたので報告する。

2. 結果

Fig. 1(a)(b) に示した N 入力 M 段 MZI-OUC と MDC-OUC において、$N=M$ での Haar ランダム性が保証されるように、OUC に含まれる MN 個の位相シフト値を MZI-OUC で特定分布[2]、MDC-OUC で一様分布に従ってサンプリングし、計 20,000 個のユニタリ行列を構成した。

得られたユニタリ行列の集合に対し、固有値分布$\rho(\theta)$、固有値間隔分布$p(s)$、および固有ベクトル要素分布$p(y)$を計算し、以下の(1)～(3)式で表される Haar ランダムなユニタリ行列の理論分布[5,6]と比較することで、MZI-OUC と MDC-OUC の行列ランダム性を評価した。

$$\rho(\theta) = \frac{1}{2\pi} \tag{1}$$

$$p(s) = \frac{32s^2}{\pi^2}\exp\left(-\frac{4s^2}{\pi}\right) \tag{2}$$

$$p(y) = \frac{(\nu/2)^{\frac{\nu}{2}}}{\Gamma(\nu/2)}\left(\frac{y}{\langle y\rangle}\right)^{\frac{\nu}{2}-1}\exp\left(-\frac{\nu}{2}\cdot\frac{y}{\langle y\rangle}\right) \tag{3}$$

Fig. 1(c) に $N = 32$, $M = 3$ の場合の理論分布（青）と、MZI-OUC および MDC-OUC の数値計算結果（赤）を示す。入力数Nに比べて段数Mを大幅に削減し$M=3$とした場合、MZI-OUC は位相シフタ数の減少により行列ランダム性が著しく劣化するのに対し、MDC-OUC では依然理論分布とよく一致する良好な行列ランダム性が確認できる。Fig. 1(d)では、様々な N に対し$M=3$とした場合、$p(s)$, $p(y)$の理論分布との平均二乗誤差は MZI-OUC では増加するのに対し、MDC-OUC では減少する傾向が見られ、3 段 MDC-OUC の行列ランダム性の優れたスケーラビリティが確認された。本結果は $3N$ 個の位相シフタによる$N \times N$ランダムユニタリ行列生成の可能性を示唆しており、大規模ランダム行列生成器の実現が期待できる。

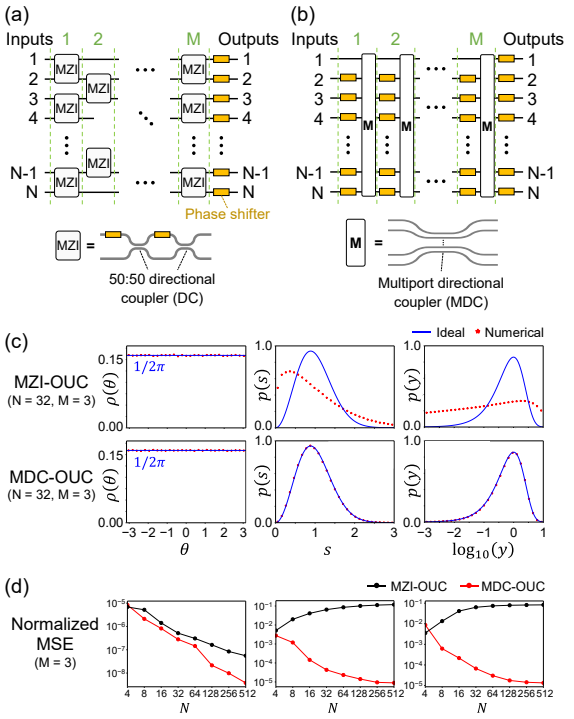


Fig. 1 (a) Schematic of N-port M-layer MZI-OUC
(b) Schematic of N-port M-layer MDC-OUC
(c) Numerical result of randomness analysis of two OUCs ($N = 32$, $M = 3$)
(d) Normalized MSE of each distribution from theoretical curve ($N = 4, 8, 16, \ldots, 512$; $M = 3$)

謝辞: 本研究は科学研究費補助金 21K18168 の助成によって実施された。

参考文献

[1] S. Gigan *et al.*, *Nat. Phys.*, **18**.9, 980-985 (2022).
[2] N. J. Russell *et al.*, *New J. Phys.*, **19**.3, 033007 (2017).
[3] R. Tang *et al.*, *OECC/PGC*, Singapore (2017).
[4] R. Tanomura *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **17**.2, 024071 (2022).
[5] F. Mezzadri, *arXiv* preprint math-ph/0609050 (2006).
[6] K. Życzkowski *et al.*, *J. Phys. A-Math.*, **27**.12, 4235 (1994).

© 2025年 応用物理学会

汎用デジタルツインに向けた光演算回路パラメータの機械学習推定

Machine Learning Prediction of Photonic Processor Parameters for General-Purpose Digital Twin

NTT ナノフォトニクスセンタ[1], NTT 物性研[2], NTT CS 研[3], 産総研[4], ○池田 幸平[1,2], 北 翔太[1,2], 青山 一生[3], 鈴木 恵治郎[4], 前神 有里子[4], コン グアンウェイ[4], 山本 宗継[4], 山田 浩治[4], 新家 昭彦[1,2], 澤田 宏[3], 納富 雅也[1,2]

NTT Nanophotonics Center[1], NTT BRL[2], NTT CSL[3], AIST[4], ○K. Ikeda[1,2], S. Kita[1,2], K. Aoyama[3], K. Suzuki[4], Y. Maegami[4], G. Cong[4], N. Yamamoto[4], K. Yamada[4], A. Shinya[1,2], H. Sawada[3], and M. Notomi[1,2]

E-mail: kohei.ikeda@ntt.com

近年、光演算回路を用いた高速・低消費電力な情報処理への期待が高まっている[1]。これに伴い、光演算回路の挙動を高精度に模倣できるデジタルツインモデルの構築することは、様々なタスクに対応可能な汎用性と実用性の観点から極めて重要である。小規模な光演算回路に対しては、各回路素子の誤差を直接測定する決定論的校正が行われてきたが[2]、回路規模が大きくなるほど、クロストークなどの複雑な内部応答が顕著になるため正確なモデリングが困難となり、タスクごとの実機学習による実証が主流になっている[3]。この手法は、タスクごとに再学習が必要になるため汎用性に乏しいという課題がある。我々は、前回までにそのようなクロストークや回路パラメータ（分岐比誤差、伝搬損失など）を機械学習により推定することでランダムデータに対して高い忠実度でモデリング可能であることを示してきた[4]。この手法では、まず決定論的に各移相器の変調効率と初期位相誤差（移相器パラメータ）を導出し、その後、ランダム位相を与えて各 MZI の回路パラメータを機械学習により推定するというハイブリッド方式を採用していた。しかし、決定論的較正時の位相設定によりクロストークが誘発され、移相器パラメータの正確な見積もりが困難であったことから、汎用化に必要な真の値を得られていなかった。そこで、本研究では、この課題を克服するために、回路パラメータと移相器パラメータのすべてを機械学習で推定するアプローチを試みた。

Fig.1 (a)は、産総研ファウンドリで試作した集積 MZI 光演算回路の MZI ユニットセルであり、多モード干渉（MMI）カプラ、および熱光学型ヒータで構成されている。光演算回路は、入力ベクトルを生成する複素数エンコーダと 10×10 Clements 型ユニタリ変換回路（全移相器数：入力 20 個+行列 90 個）から構成される。各移相器に対して、0～8 mA の範囲で一様分布からランダムにサンプリングした電流を印加し、その時の各出力ポートの光強度を測定してデータセットを作成した。このデータセットを用いて、Fig.1 (a)に示す回路パラメータ(t, γ)と移相器パラメータ(K_0, K_1, K_2)、さらに各移相器間でのクロストークの大きさを表す係数(κ)を機械学習により推定した。κを学習する際には、すべての値が正になるよう制約を設け、さらに不要な係数を抑えるために L1 正則化を加える工夫を施した。Fig.1 (b)は、従来のハイブリッド手法と本手法における忠実度の Epoch に沿った推移を示す。提案手法では、従来法と比較して、収束までに要する Epoch 数が少なく、最終的な忠実度も 0.935 と高い値を示し、実機の挙動を高精度に再現できることが確認された。Fig. 1(c)は機械学習で推定された初期位相誤差 K_0 のヒストグラムを示し、中心値 0.16 rad、標準偏差 0.53 rad となった。今後は、構築したデジタルツインモデルを用いて、MNIST 画像分類タスクに最適な位相設定学習を行い、識別精度を評価することで本モデルの汎用性を検証していく予定である。

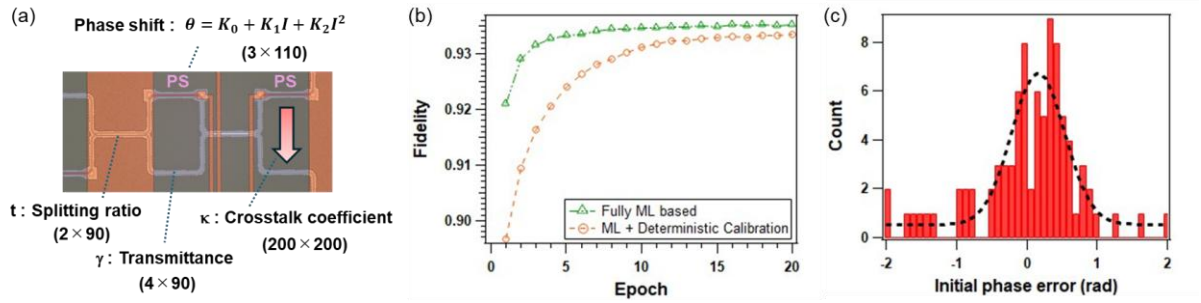


Fig.1 (a) Optical microscope images of fabricated single MZI. The number in parentheses indicates the total number of parameters. (b) Comparison of training fidelity between the conventional hybrid approach and the proposed machine-learning-based calibration. (c) Histogram of the estimated initial phase errors.

参考文献

[1] B. J. Shastri et al., Nat. Photon. **15**, 102 (2021). [2] Y. Shen et al., Nat. Photon. **11**, 441 (2017). [3] S. Bandyopadhy et al., Nat. Photon. **18**, 1335 (2024). [4]池田ら，第71回応用物理学会春季学術講演会, 22p-11F-2 (2025).

© 2025年 応用物理学会

ヘテロジニアス 2 波長可変レーザを用いた THz 帯変調波の生成

Generation of THz-Modulated Waves Using a Heterogeneous Dual-Wavelength Tunable Laser diode

早大理工，○(B)河野 颯眞 ，辻下 汐陽 ， 北 智洋
Waseda Univ. ， ○Soma Kawano , Kiyoharu Tsujishita , Tomohiro Kita
E-mail : kawano0606@akane.waseda.jp

研究背景・目的

近年，無線通信量の急激な増加に伴い，より高周波な周波数帯域が求められており，Beyond 5G においては，100 GHz~1 THz 程度の THz 帯の使用が検討されている．しかし現在のエレクトロニクスを用いて生成した高周波信号においては，信号品質の低下，伝送損失の増加といった課題があり，フォトニクス技術を用いた THz 無線通信技術に注目が集まっている[1]．本研究ではヘテロジニアス 2 波長可変レーザの出力光に光領域で変調することで THz 波を搬送波とした高周波変調波の生成を試みた．

ヘテロジニアス 2 波長可変レーザの動作原理

本研究で用いたレーザは，出力側端面の反射率 6%の量子井戸 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)とシリコンフォトニクス(SiPh)によって作製した 2 波長可変フィルタを結合した構造(Fig.1)を持つ[2]．2 波長可変フィルタには導波路型 DBR(Distributed Bragg Reflector)とリング共振器を用いた波長フィルタが二組形成されている．リング共振器の共振波長間隔を DBR の反射帯域と同程度に設計しているため，一組のリング-DBR フィルタによって単一の発振波長のレーザ光を出力することが可能である．さらにリング共振器上に設置したヒータによって，発振波長を独立に制御できるため，2 波長間の周波数差を制御できる．またリング共振器-DBR 間に設置したヒータを加熱することで，縦モードの位相も制御可能である．

THz 帯変調波の生成

SOA の出射側端面から出力した 2 波長光をレンズモジュールによってファイバに結合し，LN(LiNbO3)光変調器によって 12.5 Gbps の強度変調を行った後に，ファイバ光アンプによって増幅，周波数帯域 220～330 GHz の UTC-PD(Uni-Traveling Carrier Photodiode)によって THz 波へと変換した．この時の 2 波長光の波長スペクトルを Fig. 2 に示す．周波数差約 281 GHz の 2 波長光レーザ光が確認でき，発振波長のサイドには 4 光波混合に起因した 2 本のピークが現れている．UTC-PD によって THz 波に変換された変調

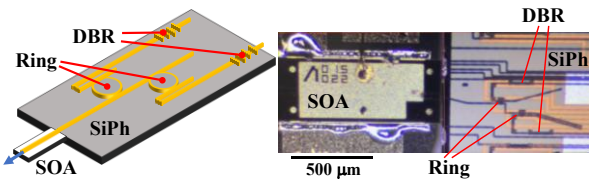


Fig.1. Structure of a dual wavelength tunable laser.

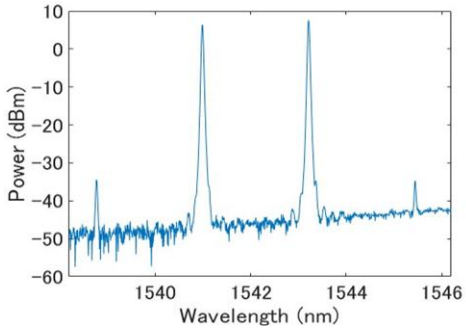


Fig.2. Wavelength spectrum of a dual-wavelength tunable laser.

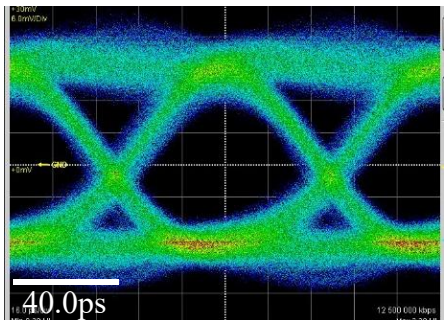


Fig.3. Eye-diagram (12.5Gbps).

波は，導波管を介して TH 波検出器に入力しオシロスコープによって変調信号を確認した．Fig. 3 に観測したアイパターンを示す．明瞭なアイ開口が確認でき，アイパターンから算出した BER(Bit Error Rate)は約3.98×10^{-10}であった．

まとめ

2 波長光を光領域で変調することで，高い SN 比を有する THz 帯高周波変調波の生成に成功した．

謝辞

本研究の一部は，JST A-STEP(JPMJTR23RG)，総務省 SCOPE(JP235003005)，及び科研費(23H01472)の助成のもとに実施された．

参考文献

[1] T. Nagatsuma, et al., Opt. Express 21, 23736 (2013).
[2] Y. Tomimura, et al., Photonics 11, 811 (2024).

© 2025年 応用物理学会

マルチインプットスターカプラを用いたパッシブ OPA の高分解能化

Resolution Enhancement of Passive Optical Phased Arrays Using Star Couplers

早大理工，○谷口 莉彩，菰田 百香，北 智洋

Waseda Univ. Risa Taniguchi, Momoka Komoda, Tomohiro Kita

E-mail: wa-starsha10@asagi.waseda.jp

1. 研究背景

近年， LiDAR(Light Detection and Ranging)などの光センシングの分野におけるビームステアリングの手段として，OPA(Optical Phased Array)が注目されている．特にアレイ導波路回折格子(AWG)の原理を利用したパッシブ OPA は位相シフトに電力を必要としないため，従来のアクティブ OPA と比較して 1/10～1/100 の低消費電力化が可能である[1]．しかしながら，パッシブ OPA では 2 次元でのスキャニング(θ x 及び θ y)において θ y 方向の分解能が原理的に制限される．これに対し本研究ではマルチインプットスターカプラ[2]を採用し，光スイッチを用いてその入力を切り替えることによって θ y 方向の分解能が向上することを示した．

2. デバイスの構造と原理

パッシブ OPA においては，アレイ導波路に遅延線を設けることで光アンテナにおいて出射される光波間に等間隔の位相差を与えている．ここで，遅延線の長さが一定の場合，位相差が波長に依存するために波長掃引によって θ x 方向のビームスキャンが可能である．また、θ y 方向は、光アンテナに用いているブラッグ回折格子の回折角の波長依存性によって制御される．ここで，アレイ導波路への分波構造にマルチインプットスターカプラを導入する．Fig. 1 内挿図に示すように本スターカプラは，4 つの入力ポートがスラブ導波路に対して斜めに入射しており，32 本の出力ポートに光が到達するまでに光路長差が発生するため，入力ポートを切り替えることで出力ポート間の位相差を離散的に変化させることができる．したがって入力ポートを切り替えることでビームスキャニングの開始点が θ x 方向にずれ，結果として θ y 方向の分解能が向上する．本研究では入力ポートが 4 つのスターカプラを用いていることから，分解能は約 4 倍になることが期待される．また 4 つの入力ポートの切り替えには Fig. 1 に示すように熱光学式の光スイッチを3台用いている．

3. 実験結果

設計したデバイスの構造をもとに入射光の波長を 1500～1600 nm 掃引した時の出射角度をシミュレーションした結果を Fig. 2 に示す．従来型のパッシブ OPA の θ y 方向の分解能は 1.1° なのに対して，スターカプラにおいて分解能は 0.27° まで向上することが確認できる．本デバイスの FFP(Far field pattern)の測定結果を Fig. 3 に示す.ここで、入射光の波長は固定しているが，入力ポートの切り替えによって θ x が変化していることが確認できる．

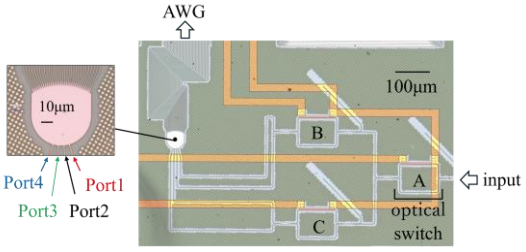


Fig.1. Fabricated star-coupler and three optical switches.

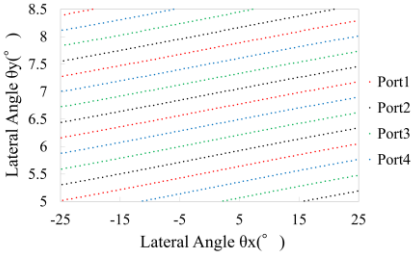


Fig.2.Simulated beam direction angles for each input port.

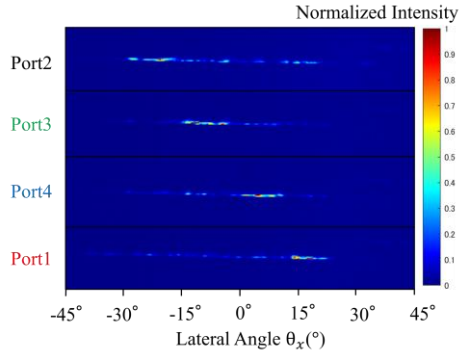


Fig.3. Measured FFP at a fixed wavelength for each input port.

4. まとめ

本研究により，パッシブ OPA にマルチインプットスターカプラを導入することで θ y 方向の分解能を向上する原理が実証された．

謝辞

本研究の一部は，JST A-STEP(JPMJTR23RG)，総務省 SCOPE(JP235003005)，及び科研費(23H01472)の助成のもとに実施された．

参考文献

[1] Y. Misugi, et al., Opt. Express. 32(8), 13746 (2024).
[2] P. Muñoz, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 28(5) 8300416 (2022)

© 2025年 応用物理学会

自己相似光導波路アレイにおけるクロストーク抑制の実証

Demonstration of the crosstalk mitigation in self-similar waveguide arrays

東北大通研[1]，東北大院工[2]，○(M1)遠山 航汰[1,2]，菊地 涼[2]，松田 信幸[1,2]

Tohoku Univ.[1,2], ◦Kota Toyama[1,2], Ryo Kikuchi[2], Nobuyuki Matsuda[1,2]

E-mail: toyama.kota.r4@dc.tohoku.ac.jp

高密度で隣接された光導波路間での光波のクロストークの抑制は，マルチコア光ファイバの空間多重度や光回路の集積度の向上のために重要である．そのため，光波の局在伝搬を実現する構造は広く研究されており，その一つとして自己相似（Self-similar; SS）光導波路アレイ[1]が提案されている．我々はこれまでに SS 光導波路アレイにおける光波の局在伝搬を，Si 導波路アレイの電磁界解析により示し[2]，また Si 光導波路アレイを試作することで，実際に光局在伝搬が生じることを部分的に実証した[3]．しかし，この時導波路アレイの一部の入出力ポートのペアに対する計測にとどまっていた．今回すべての入出力ポートペアに対しての計測を行い，明瞭な光局在伝搬を確認した．

試作した SS 光導波路アレイの導波路コアは Si，クラッドは SiO_2，導波路本数は 32，コア高さは 220 nm，導波路長さは 1.5 mm である．各導波路のコア幅と各導波路間の間隔をそれぞれ伝搬定数と結合係数に対応させて変調することで，伝搬定数が自己相似的[1]となり，かつ結合係数が一定値となるように設計した．ここで自己相似的な伝搬定数とは，いくつかの周期的なパターンを重ね合わせることで得られるものである[1]．また，コア幅の変調範囲は 450 nm～500 nm である．この光局在現象は，Tight-binding モードの分岐や結合モードの局在などで説明される．

波長 1.55 μm, TE 偏波の CW 光を入力し得られた出力強度を，全ての入出力ポートのペア（1024 通り）について測定した結果を Fig. 1 に示す．対角成分でのみ大きな出力強度を確認でき，その他全ての入出力ポートのペアについて出力強度が低いことを観測した．隣接導波路とのクロストークの平均値は–15.1 dB であり，理論値の –14.7 dB と整合する．よって，全ての導波路について光局在伝搬を確認できた. 21 番導波路の透過率が低いのは，入力部の破損によるものと思われる．加えて，導波路アレイの設計改善により，クロストークのさらなる削減にも成功した．

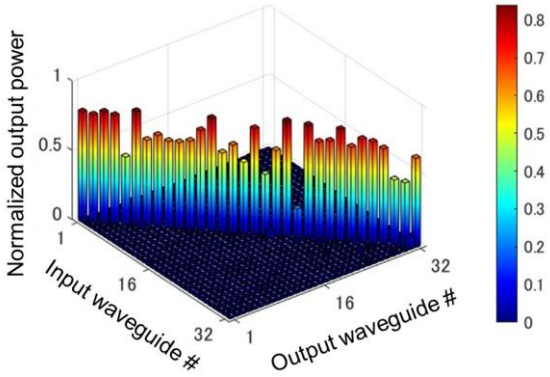


Fig. 1: Normalized output power distribution of self-similar waveguide array.

[1] J. Guglielmon and M. C. Rechtsman, Phys. Rev. A **99**, 063807 (2019).

[2] 菊地 涼他, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-PA6-5, (2019).

[3] 菊地 涼他, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 19a-Z10-1, (2021).

© 2025年 応用物理学会

テレセントリックレンズ光学系による SLG FPA ビーム走査

SLG FPA Beam Scanner using Telecentric Lens Optics

横国大院工　○鎌田幹也，玉貫岳正，廣谷圭祐，馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ., ○M. Kamata, T. Tamanuki, K. Hirorani, and T. Baba

E-mail: kamata-mikiya-wk@ynu.ac.jp

Si フォトニクス FMCW LiDAR が開発され，注目されている．我々はスローライト回折格子 (SLG) ビームスキャナ搭載 FMCW LiDAR を実証してきた [1]．SLG から出射される ϕ 方向に扇状に拡がった光は，特殊設計のプリズムレンズ [2]によりビーム状にコリメートされる．このビームは，θ 方向には波長掃引や熱光学効果を使って回折で走査する．一方，ϕ 方向にはアレイ状に配置した SLG の切り替えとレンズに対するオフセットを利用して，フォーカルプレーンアレイ（FPA）方式で走査する [3]．プリズムレンズに関して，最近は高 NA 薄型や 2 枚組構成を設計してきたが [4]，構造最適化が難しいという問題があった．これを解決するため，今回は，テレセントリックレンズ光学系 [5, 6] によりθ方向も FPA 方式を用いたビーム走査を検討した．

図 1(a)にその光学系を示す．SLG から出射された扇状ビームは，市販の 3 枚の平凸シリンドリカルレンズにより θ, ϕ 方向それぞれに対してコリメートされる．SLG 側から 1 枚目のレンズは θ 方向に対してテレセントリックレンズとなっており，SLG からの出射角に依らず平行光へと変換され，同レンズの焦点面で θ 方向のみ集光される．つまり出射角の変化が集光スポット位置の変化に変換されるため，FPA と同様の原理で 3 枚目のレンズにより θ 方向をコリメートし，ビーム走査できる．2 枚目のレンズは 1, 3 枚目と直交する向きに置かれ，ϕ 方向がコリメートされる．図 1(b)は，波長を変化させて SLG の θ 方向出射角を変化させたときのコリメート光の遠視野像を重ね合わせて示している．およそ点状のスポットを維持しながら θ 方向にビーム走査されることを確認した．図 1(c)は波長に対するビーム走査角 θ を示している．SLG から出射されたビームを 2–14°走査したとき，レンズ通過後は−14°から−2°と逆方向へ走査される所望の動作が得られた．図 1(d)には波長に対するコリメート光のビーム拡がり角 δθ, δϕ をそれぞれ示しており，δθ ≈ 0.12°, δϕ ≈ 0.06°のビームが得られた．この光学系は，従来のプリズムレンズのような複雑な構造を必要としないため，SLG LiDAR の性能改善が期待され，小型化も可能である．現在，LiDAR 動作の実証を進めている．

本研究は科研費基盤研究(A) (25H00852)，立石科学技術振興財団研究助成 S の援助を得ている．

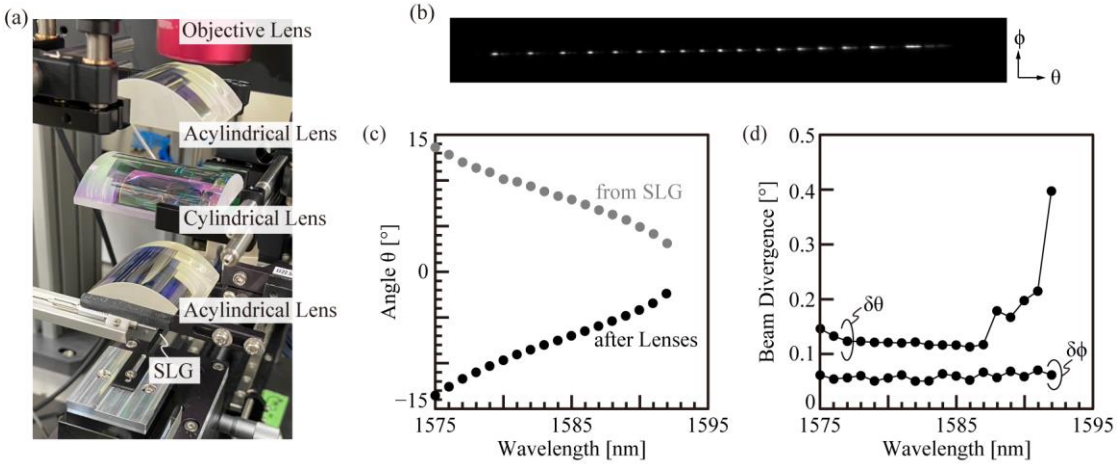


図 1 (a) テレセントリックレンズを用いた光学系. (b) レンズによりコリメートされた光の遠視野像の重ね合わせ. (c) 波長に対するビーム出射角度 θ．灰色は SLG から出射されたビーム，黒色はレンズ通過後のビーム．(d) コリメート光のビーム拡がり角 δθ, δϕ.

参考文献

1) T. Baba et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **28** (5), 8300208 (2022). 2) J. Maeda et al., Opt. Lett., **44**, 5780 (2019). 3) H. Ito et al., Optica, **7**, 47 (2020). 4) 鎌田ら，秋季応物講演会, 17a-C32-2 (2024). 5) X. Lee et al., Optics and Laser Technology, **125**, 106013 (2020). 6) Q. Li et al., micromachines, **15**, 712 (2024).

© 2025年 応用物理学会

SiN マイクロリング波長選択スイッチを集積した SLG ビームスキャナ

SLG beam scanner integrated with SiN microring wavelength selective switches

横国大院工，○小松慶喜，玉貫岳正，鎌田幹也，馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ.,○ Y. Komatsu, T. Tamanuki, M. Kamata, T. Baba

E-mail: komatsu-yoshiki-pv@ynu.jp

我々は Si フォトニクススローライト回折格子 (SLG) ビームスキャナ搭載非メカ式 FMCW LiDAR を開発している [1,2]. ここでは 2 次元スキャンのため，32~128 本の SLG を熱光学式マッハツェンダ干渉型 (MZI) 光スイッチの 6~8 段の従属接続によって切り替えている. しかし，MZI スイッチは送受往復で最大 14 段接続の累積損が 10 dB 以上と大きく，LiDAR の性能を制限している. そこで本研究では，図 1(a)のように SiN 導波路に光を結合させ，熱光学式 SiN マイクロリング共振器 (MRR) 波長選択スイッチとSiN/Si テーパ結合を組み合わせ，スイッチの往復損失を減らした. SiN は二光子吸収がないため [3]，入力パワーによる損失補償も可能である.

実際に図 1(b)のようなデバイスを Si フォトニクスウエハプロセスにより製作した. 全ての SiN MRR は半径 35 μm の同一設計である. バス導波路と MRR の間のギャップを 0.5 μm としたとき，共振波長でのドロップ損は 1.8 dB であった. また，SiN/Si テーパ結合の損失は 0.1 dB 以下であった. よって，バス導波路と 1 個の SLG の間の往復損失は 4 dB まで抑制された. 図 1(c)は MRR スイッチによる導波路切り替えで SLG からの出射光の近視野像を観測した結果である. ここでは，レーザ波長は SLG の動作帯域を考慮し，MRR が非共振となる 1522 nm に固定した. そして，1 個の MRR を加熱して共振状態に切り替え，対応する SLG から光が出射され，隣接する SLG からの光の漏れは見られなかった. 同様の動作を 8 個の MRR に順次行い，全てで SLG を選択することができた. 今後は SLG によるビーム走査も実証し，2 次元ビーム走査や LiDAR 動作を行う予定である.

本研究は科研費基盤研究(A) (25H00852)，および立石科学技術振興財団の援助を受けている.

参考文献 1) T. Baba, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **28**, 8300208 (2022). 2) Y. Maeda, et al., VLSI Symposium, JFS5.3 (2024). 3) 小松ら，春季応物講演会, 15p-K505-14 (2025)

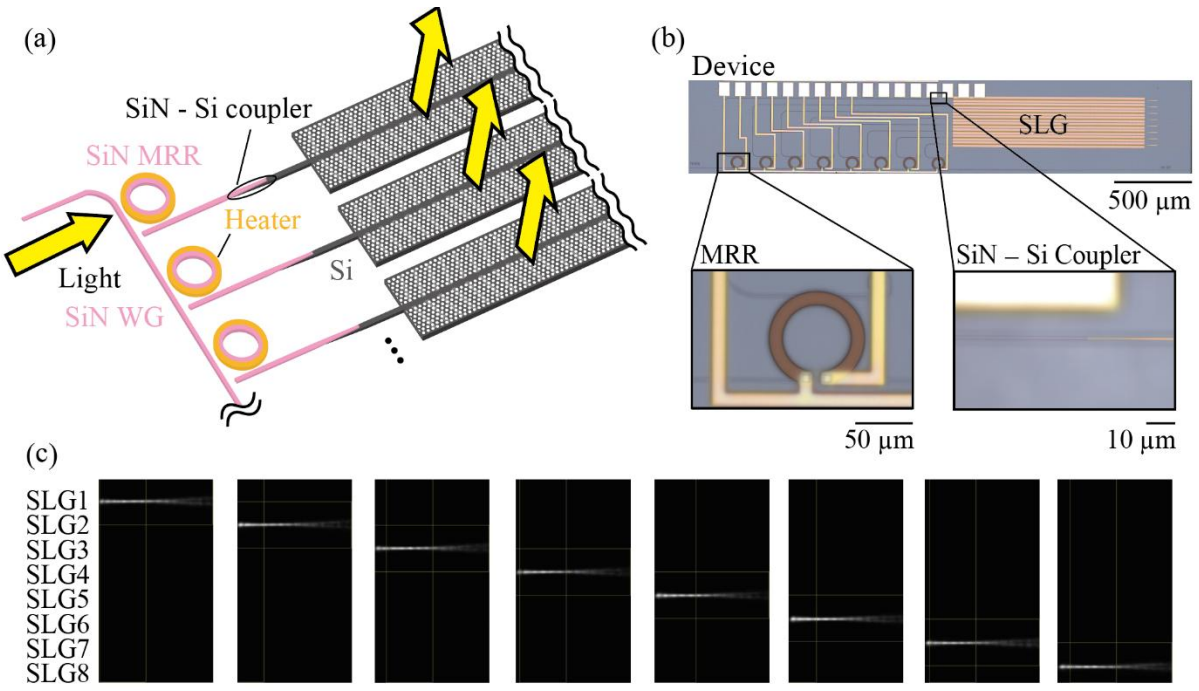


図 1 SiN MRR 波長選択スイッチ集積 SLG ビームスキャナ. (a) 全体構成. (b) 製作したデバイス. (c) 熱光学効果による MRR スイッチ切り替えを行ったときの 8 個の SLG からの出射光の近視野像.

© 2025年 応用物理学会

SLG 光ビームスキャナと補間 k クロックサンプリングを用いたリアルタイム Si フォトニクス非機械式 FMCW LiDAR (IV) – 4 サブアレーSLG への適用

Realtime Si photonics nonmechanical FMCW LiDAR with SLG beam scanner and interpolation k-clock sampling (IV) --- Application to 4 sub array SLG

横国大院工，○山﨑竣平，玉貫岳正，鎌田幹也，馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ., ○S. Yamazaki, T. Tamanuki, M. Kamata, T. Baba

E-mail: yamazaki-shumpei-xf@ynu.jp

小型・低コストで高い安定性が期待できる Si フォトニクス非メカ式ビームスキャナ搭載オンチップ LiDAR が開発されている．我々はフォトニック結晶から成るスローライト回折格子（SLG）スキャナ[1, 2]と FMCW LiDAR チップ[2]を開発した．ここでは周波数変調光が必要となり，以前は SSB 変調器を用いてきたが，設備が大掛かりになる．一方，レーザの波長掃引と光ファイバ干渉計の k クロックによる非線形補正リサンプリングを組み合わせた方法もある[4]．我々はチップ上にこの干渉計を集積してこの方法を適用し，ビームスキャンと FMCW 測距を同時に実現して，リアルタイム LiDAR 動作を得た[5]．今回は高い受信感度が期待される 4 サブアレーSLG 搭載の LiDAR チップに対して同様の動作を実現すべく，波長掃引光による光走査を実施した．

製作したデバイスを Fig. 1 に示す．ここでは，1 列に並べた 4 個の SLG によって並列的に光を送受信する．これにより SLG の損失を抑制しながら開口面積を拡大し，送受信効率の向上，S/N の改善が見込める．ただし出力光は 4 つの SLG それぞれから出力されるため，全ての方位を正確にそろえる必要がある．また，波長掃引を行いながらそれを保つ必要もある．そこで本研究では，波長に対するビーム形状を精密に調べ，個々の SLG に搭載した p-i-p ヒータの熱光学効果を利用して，方位を調整した．その結果の一部が Fig. 2 である．最終的にこの制御には FPGA 回路を利用し，リアルタイムビームスキャンが行えるようにした．現在，さらに LiDAR イメージ取得の実験にも取り組んでいる．

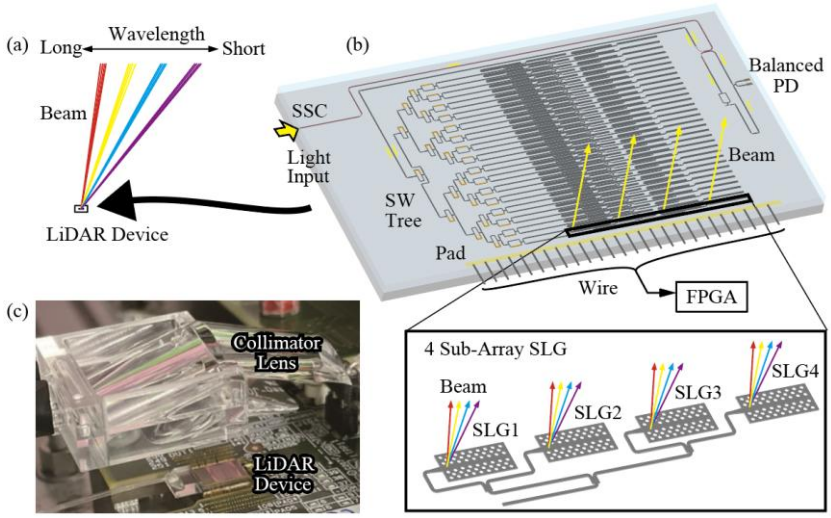


Fig. 1 4 sub-array SLG FMCW LiDAR. (a) Schematic of beam scanning. (b) Schematic of LiDAR chip. (c) Fabricated device.

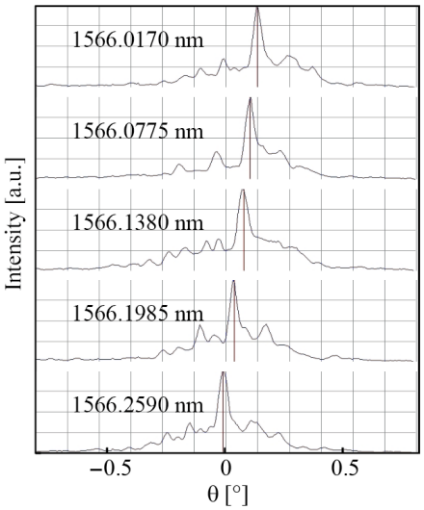


Fig. 2 Beam profiles when the wavelength swept.

なお，本研究は科研費基盤研究(A) (25H00852)，立石科学技術振興財団研究助成 S の援助を得ている．

参考文献 [1] H. Ito, et al., Optica **7**, 47 (2020). [2] T. Tamanuki, et al., J. Lightwave Technol.**39**, 904 (2021). [3] T. Baba, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **28** (2022) 8300208. [4] M.Okano, et al., Opt. Express **28**, 23988 (2020). [5] S. Yamazaki et al., Opt. Express **31**, 21191 (2024)

© 2025年 応用物理学会