

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.1】 2.3 加速器技術・加速器質量分析・ビーム分析、7.4イオンビーム一般のコードシェアセッション

[8p-N403-1~15] CS.1 2.3 加速器技術・加速器質量分析・ビーム分析、7.4イオンビーム一般のコードシェアセッション

[8p-N403-1]

[第58回講演奨励賞受賞記念講演] Ar-GCIBスパッタリングによるmPEG分子の損傷

○水谷 優里¹、藤井 麻樹子²、瀬木 利夫¹、松尾 二郎¹ (1.京大院工、2.横浜国大院環情)

[8p-N403-2]

反応性GCIB照射によるエッチング効果の基板温度依存性

○(M2)伊藤 汰一¹、北中 晴也¹、竹内 雅耶¹、豊田 紀章¹ (1.兵庫県立大学工)

[8p-N403-3]

固液界面観察に向けたX-ray PEEM高感度化の原理実証
— GCIBで極薄化したSiNx膜の利用—

○竹内 雅耶¹、鈴木 哲²、豊田 紀章¹ (1.兵庫県立大工、2.兵庫県大高度研)

[8p-N403-4]

イオンビームによるAgナノ粒子凝集体の改質

○(M1)江本 圭佑¹、高廣 克己¹、高曲 賢治²、小野 凌平² (1.京工繊大、2.ハニー化成株式会社)

[8p-N403-5]

イオンビーム誘起CVD法の酸化ゲルマニウム、酸化錫、酸化ケイ素、炭化ケイ素の成膜への応用

○吉村 智¹ (1.阪大工)

[8p-N403-6]

放射性核種原子分光のための2色2段共振器強化型吸収分光法の開発

○寺林 稜平¹、望月 拓海¹、富田 英生¹ (1.名大院工)

[8p-N403-7]

結晶表面ストリッパーによる炭素イオンの荷電変換と干渉分子の解離

○神野 智史¹、松原 章浩²、藤田 奈津子¹、木村 健二¹ (1.原子力機構、2.ペスコ)

[8p-N403-8]

JAEA-AMS-TONOにおける加速器質量分析装置に関する研究開発; 2025年秋

○藤田 奈津子¹、神野 智史¹、南谷 史菜¹、前田 祐輔¹、三宅 正恭²、松原 章浩²、西尾 智博²、小川 由美²、北野 敏彦³、渡邊 隆広¹ (1.原子力機構東濃、2.ペスコ、3.ビームオペレーション)

[8p-N403-9]

東大MALTにおける³⁶Cl-AMSのバックグラウンド評価

○松崎 浩之¹、山形 武靖¹、戸谷 美和子¹、徳山 裕憲¹ (1.東大MALT)

[8p-N403-10]

筑波大学6MVタンデム加速器質量分析装置における¹²⁹I測定のパフォーマンス評価

○(M1)佐久間 光紀¹、松村 万寿美²、高橋 努²、吉田 哲郎²、笹 公和^{2,3} (1.筑波大理工情報生命学術院、2.筑波大応用加速器部門AMSグループ、3.筑波大数理物質系)

[8p-N403-11]

KEK-12GeV陽子シンクロトロン内の電源ケーブル被覆中³⁶Clを用いた熱中性子フルエンスの推定

○(M1)木村 龍拓¹、吉田 剛²、松村 宏²、松村 万寿美¹、石田 正紀²、渡邊 瑛介²、津金 聖和²、李 恩智²、塩原 良建³、三橋 正裕³、八島 浩⁴、平野 雄生³、中屋敷 勇輔³、大石 晃嗣³、栗田 紗緒里⁵、中田 実希⁵、佐瀬 卓也⁵、Bui Ngoc Thien⁶、高橋 努¹、吉田 哲郎¹、笹 公和¹ (1.筑波大、2.高エネ研、3.日環研、4.京都大、5.核融合研、6.総研大)

[8p-N403-12]

Development of time over threshold method for acquiring decay signals in cavity ring-down spectroscopy

○(M1)Konrad Raphael Kleineidam^{1,2}, Erik Thiel^{1,2}, Takumi Mochizuki¹, Ryohei Terabayashi¹, Kenji Shimazoe³, Klaus Wendt², Hisashi Abe⁴, Norihiko Nishizawa¹, Hideki Tomita¹ (1.Nagoya Univ., 2.Mainz Univ., 3.Tokyo Univ., 4.AIST)

[8p-N403-13]

北太平洋の¹²⁹Iの起源

○山形 武靖¹、永井 尚生¹、斉 遠志¹、徳山 裕憲¹、土屋 陽子¹、戸谷 美和子¹、松崎 浩之¹ (1.東京大学 MALT)

[8p-N403-14]

ハイマツ試料中放射性炭素濃度の年変動に関する研究2024

○武山 美麗^{1,2}、森谷 透^{1,2}、櫻井 敬久²、宮原 ひろ子³、三宅 芙沙⁴、門叶 冬樹^{1,2} (1.山形大AMSセンター、2.山形大理、3.沖縄科学技術大学院大、4.名古屋大)

[8p-N403-15]

屋久杉年輪の¹⁴C分析による1279年頃の宇宙線変動の調査

○三宅 芙沙¹、木村 勝彦²、森谷 透³、武山 美麗³、門叶 冬樹³、Lukas Wacker⁴ (1.名古屋大学、2.福島大学、3.山形大学、4.ETH Zurich)

Ar-GCIB スパッタリングによる mPEG 分子の損傷

Damage to mPEG molecules by Ar-GCIB sputtering

京大院工¹, 横浜国大院環情² ○(M2)水谷 優里¹, 藤井 麻樹子², 瀬木 利夫¹, 松尾 二郎¹

Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.¹, Institute of Environment and Information Sciences,
Yokohama Natl. Univ.²,

°Yuri Mizutani¹, Makiko Fujii², Toshio Seki¹, Jiro Matsuo¹

E-mail: mizutani.yuri.24x@st.kyoto-u.ac.jp

二次イオン質量分析法 (SIMS) は、対象分子の分布の可視化技術であるイメージング質量分析法のなかで最も高い空間分解能のイメージングを取得することができる。しかし、有機物を低損傷でスパッタリングすることが可能なガスクラスターイオンビーム (GCIB) を用いてもなお、高質量領域での感度が不足しており、測定対象は低質量領域に制限されている。高質量領域で高空間分解能のイメージングを実現するためには、現状から二次イオン収率を4~5桁程度増大することが求められる。しかし、高質量領域で二次イオン収率が低い原因に対して、分子損傷およびイオン化率がどのように関係しているかは未解明である。そこで本研究では、GCIB による分子損傷に注目し、スパッタされた分子を捕集することでその分子構造に着目する。これにより、分子損傷と分子量との関係を解明することを目的とする。

モデル高分子として、数平均分子量が約 2000 のポリエチレングリコールモノメチルエーテル (mPEG2000) を用いた。サンプルとして、キャプチャ法[1]により試料基板に Ar-GCIB (10 kV, クラスターサイズ約 2500) を照射し、ターゲット基板と平行に位置する基板で捕集されたスパッタ分子を溶解させたキャプチャ試料を作製した。作製した試料はスパッタリング以外での分子損傷を防ぐ目的で、エレクトロスプレーイオン化質量分析法 (ESI-MS) を用いて測定した。

mPEG ($=\text{HO}[\text{C}_2\text{H}_4\text{O}]_n\text{CH}_3$) はその分子構造により、結合の切断が x 回の場合、短鎖化した mPEG と PEG ($=\text{HO}[\text{C}_2\text{H}_4\text{O}]_n\text{H}$) が $1:x$ の比で生成すると考えられる。つまり、この2種の生成量の比から GCIB スパッタリングによる結合の切断回数が推測可能である。mPEG2000 のキャプチャ試料中の、短鎖化した mPEG および PEG それぞれの1価のイオンの分子量分布はともに $n=5-25$ でほぼ同強度であった。さらに mPEG550 と PEG600 を等物質質量ずつ混合した標準試料の測定により、分子量 600 付近で mPEG と PEG の ESI-MS 測定での感度はほぼ同等であることが分かった。これにより、短鎖化した mPEG および PEG は $1:1$ で生成しており、GCIB スパッタリングによる化学結合の切断は1回のみと結論づけられた。ここで、キャプチャ試料から得られる mPEG の分布には短鎖化した mPEG も含まれることから、短鎖化した mPEG の代わりに同一の分布と推測される PEG を差し引くことで、無損傷の mPEG2000 の分布を得た。これを未照射の mPEG2000 の分布と比較した結果 (Fig. 1)、分子量が大きいほど GCIB スパッタリングによる分子損傷を受けやすいことが示唆された。

[1] 杉本他、第 70 回応用物理学会春季学術講演会
16a-D519-10 (2023)

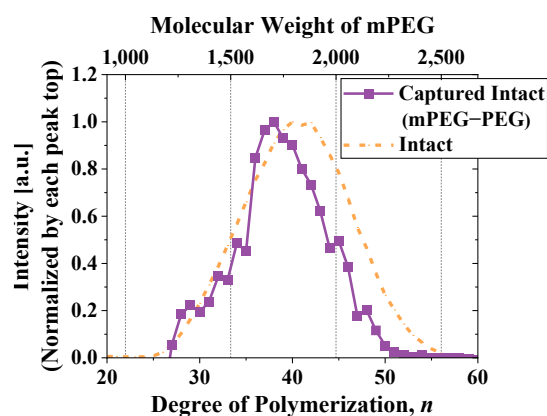


Fig. 1 Comparison of the molecular weight distributions of intact molecules before and after irradiation.

反応性 GCIB 照射によるエッチング効果の基板温度依存性

Temperature dependence of etching effects using

Reactive GCIB Irradiation



兵庫県立大学工 〇(M2C)伊藤汰一,北中晴也,竹内雅耶,豊田紀章

Graduate School of Engineering, University of Hyogo,

〇Taichi Ito, Seiya Kitanaka, Masaya Takeuchi, Noriaki Toyoda.

E-mail: ei24t004@guh.u-hyogo.ac.jp

数千個のガス分子を低エネルギーで輸送可能なガスクラスターストリームは、表面での反応を促進するため、反応性エッチングにおける新たな表面反応励起源として期待されている。これまで、 SF_6 などの反応性ガスで構成された GCIB によるエッチングや、反応性ガスを雰囲気ガスとして導入し、吸着表面に GCIB 照射を行うことによる反応性エッチングが可能であることを示してきた[1]。前回の応用物理学会での報告では、低温 (-150°C まで) でのエッチング効果について、 SF_6 ガス雰囲気下での Ar-GCIB 照射と、雰囲気ガスなしでの SF_6 -GCIB 照射を比較し、低温では表面吸着によるエッチング促進が見られることを報告してきた。今回の報告では、低温から高温(400°C)領域でのエッチング効果の温度依存性について検討する。

本研究では、Fig.1 に示す GCIB 照射装置を用いて Si および SiO_2 膜へのエッチングを行った。GCIB を構成するガスとして SF_6 を供給し、ガス圧を調整することで平均クラスタサイズを変化させ、エッチング深さの基板温度依存性を測定した。GCIB 照射条件は、加速電圧 20kV であり、イオン照射量を $1.0 \times 10^{16} \text{ions/cm}^2$ に換算してエッチング深さを比較した。基板冷却には液体窒素供給とペルチェ素子を用いて $30 \sim -150^\circ\text{C}$ に温度を調整し、基板を加熱するときはヒーターを用いて $30 \sim 400^\circ\text{C}$ に温度を調整した。

一般にイオンビームを用いたエッチングを行った場合、基板温度を上げることによって反応生成物が揮発しやすくなりエッチング深さは増加するが、GCIB 照射によるエッチングを用いた場合、エッチング深さが顕著な増加は見られなかった。一方、基板温度を低温にして SF_6 -GCIB 照射を行うと、エッチング深さの増大が見られた。またノズル供給 SF_6 圧力が大きいほどエッチング深さの増大が見られた。これは、 SF_6 分子の表面吸着が影響したと考えられる。講演では、GCIB 照射を各種ガス雰囲気下で行った場合のエッチング効果の温度依存性等についても報告する予定である。

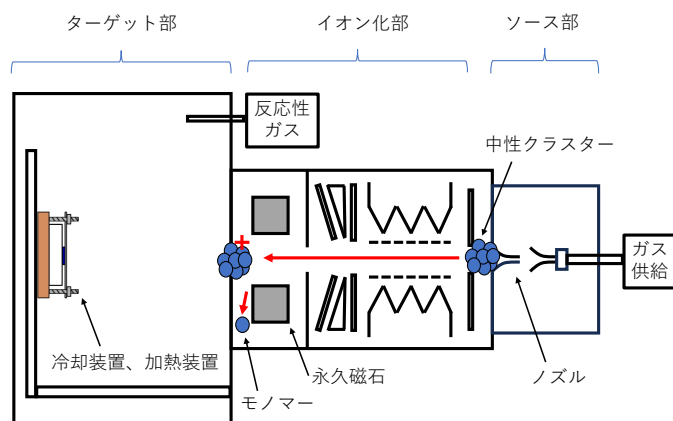


Fig.1 GCIB irradiation equipment

[1]豊田紀章,応用物理,90,239-243(2021)

固液界面観察に向けた X-ray PEEM 高感度化の原理実証 — GCIB で極薄化した SiNx 膜の利用 —

Proof-of-principle study for enhancing the sensitivity of X-ray PEEM for solid–liquid interface observation – Application of GCIB-thinned SiNx membranes –

兵庫県大工¹, 兵庫県大高度研², [○]竹内雅耶¹, 鈴木哲², 豊田紀章¹

Grad. school of Eng., Univ. of Hyogo¹, LASTI, Univ. of Hyogo²,

[○]Masaya Takeuchi¹, Satoru Suzuki², Noriaki Toyoda¹

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

【序論】近年、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、燃料電池や触媒反応に関わる固液・気液界面の構造解析の重要性が高まっている。これらの界面現象を可視化・理解するためには、液体中でのナノスケール観察が不可欠である。Scanning Electron Microscope (SEM) や Photoemission Electron Microscopy (PEEM) を用いた液体の直接観察は、界面における化学組成や構造変化を高分解能で捉える有力な手法である。しかし、これらの観察には高強度かつ極薄な電子透過窓が必要であり、検出感度向上には膜厚の最適化が不可欠である。我々は、ガスクラスターイオンビーム (GCIB) によって窒化シリコン (SiNx) 膜を数 nm レベルまで低損傷で極薄化する手法を開発した。これにより、2 keV 未満の電子線を用いた EDS (エネルギー分散型 X 線分光) による純水中の酸素ピークの検出に成功し、その感度向上を確認した¹。本研究では、GCIB 処理によって極薄化した SiNx 膜を用い、X-ray PEEM による検出感度向上の原理実証を行う。

【実験・結果】我々は、兵庫県立大学が所有するニュースバル放射光施設のビームライン BL-9A に設置された X-ray PEEM を用いて、純水の直接観察を試みた。その実験スキームを図 1 に示す。観察には、膜厚 9 nm の窒化シリコン (SiNx) メンブレンを有する TEM ウィンドウチップを用い、そこに X 線を照射して、液体からの光電子および二次電子の放出を観測した。先行研究では、水では 538 eV 付近に「Main-edge」と呼ばれる特徴的なピークが現れることが報告されている²。図 2 には、非共鳴波長である 525 eV および共鳴波長である 538 eV の X 線照射時に取得した PEEM イメージの差分像を示す。黄枠で示した領域は、SiNx 膜下に水が存在する領域に対応しており、明瞭なコントラストが確認できた。以上より、X-ray PEEM を用いた純水の直接観察が可能であることを示した。本講演では、GCIB を用いた反応性エッチングにより SiNx 膜を極薄化することで、X-ray PEEM による液体観察の感度向上の可能性を議論する。

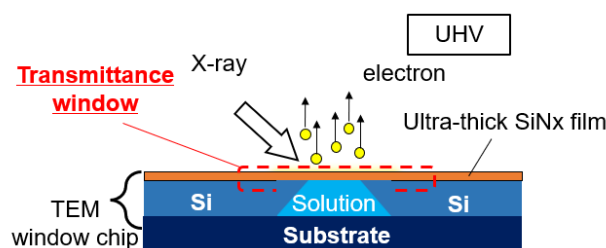


Fig. 1 Schematic diagram of the liquid cell

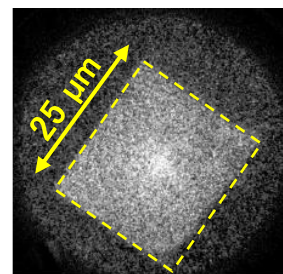


Fig. 2 Subtraction image of the X-ray PEEM measurement

【謝辞】本研究は JSPS 科研費 23K13236 の助成を受けたものです。

1. M. Takeuchi, S. Suzuki, M. Nakamura, T. Hata, Y. Nishiuchi, K. Tada, and N. Toyoda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63**, 07SP04 (2024).
2. L. Zhou, X. Wang, S. Hyun-Joon, L. Zhang, and J. Hu, *Microsc. Microanal.*, **24**, 470–471 (2018).

イオンビームによる Ag ナノ粒子凝集体の改質

Ion Beam Modification of Silver Nanoparticle Aggregates

京工繊大¹, ハニー化成株式会社² (M1)江本圭佑¹, 高廣克己¹, 高曲賢治², 小野凌平²Kyoto Inst. Tech.¹, Honny Chemicals Co., Ltd.², Keisuke Emoto¹, Katsumi Takahiro¹, KenjiTakamagiri², Ryouhei Ono²

E-mail: m25672038@edu.kit.ac.jp

現在、金属ナノ粒子が示す局在型表面プラズモン共鳴 (LSPR) を利用した、反応性窒素化合物 NO_x、硫黄化合物 SO_x、揮発性有機化合物 (VOC) の検知が行われている。それらの化合物をより高感度に検知するためには、光吸収スペクトルにおいて、LSPR ピークをできるだけシャープにすること (先鋭化) が望まれる。本研究では、Ag ナノ粒子凝集体への He イオン照射によって LSPR ピークの先鋭化を図った。また、Ag ナノ粒子凝集体を堆積させる SiO₂ 基板に特殊加工を施し、その効果を検討した。

卓上型スパッタコーターを用いて、鏡面研磨した透明石英基板 (10×10 ×0.5 mm³) および SiO₂ スプレーコーティングにより表面粗さを rms ~ 90 nm とした同透明石英基板に Ag をスパッタ蒸着させた。それらの試料を、それぞれ、Ag/SiO₂ および Ag/sc-SiO₂ と表記する。Ag をスパッタ蒸着後、24 時間真空中で保管し、その後、30 keV He イオンを両試料に同一条件で照射した。イオン照射前後で、紫外可視分光光度計 V-630 (JASCO; 波長範囲 190 – 1000 nm) を用いて光吸収分光を行った。

Fig. 1a に示すように、スパッタ蒸着後の Ag NPs/SiO₂ 試料では、波長 510 nm 付近にブロードな LSPR ピークが観測された。この試料に He イオンを照射量 $0.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ まで照射すると、LSPR ピークが短波長側にシフト (ブルーシフト) し、先鋭化した。このブルーシフトと先鋭化は、He イオンが与える電子励起効果により、Ag ナノ粒子が加熱され、微小粒子が消失することや、粒子同士が融合することで、粒間距離が増大したためと考えられる。なお、ピークが

最も先鋭化する最適な照射量は、現在調査中である。Ag/sc-SiO₂ 試料に同照射量で照射した結果、さらに先鋭化した LSPR ピークが得られた (Fig. 1b)。このように、明確な基板効果が認められた。Ag/sc-SiO₂ 試料では、基板表面の凹凸により、Ag ナノ粒子の三次元的な分散が生じたためであると推測される。

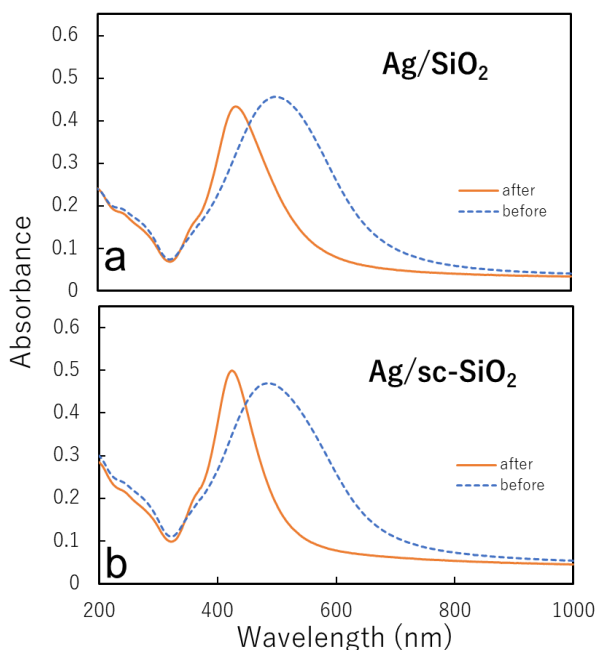


Fig.1 Optical absorption spectra of Ag/SiO₂ (a) and Ag/sc-SiO₂ (b) before and after irradiation with 30 keV He ions to a fluence of $0.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$.

イオンビーム誘起CVD法の 酸化ゲルマニウム、酸化錫、酸化ケイ素、炭化ケイ素の成膜への応用

Application of ion beam induced chemical vapor deposition for the formation of germanium dioxide, tin dioxide, silicon dioxide, and silicon carbide films

阪大院工¹, °吉村智¹

Osaka Univ.¹ °S. Yoshimura¹

E-mail: sa.yosimura@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

イオンビーム誘起 CVD (IBICVD)法は、ナノスケールの立体構造形成、磁気媒体の開発、などで利用されている。また、チタン、アルミなどの各種金属の酸化膜の成膜が可能である。しかしながら、ゲルマニウムと錫の酸化膜の成膜は、IBICVD 法ではまだ行われてない。今回は、IBICVD 法で、酸化ゲルマニウム、酸化錫、酸化ケイ素、炭化ケイ素の成膜を試みた結果を報告する。

実験は、ULVAC 製のイオンビーム装置を用いて行った。この装置は、フリーマン型イオン源、高精度質量分離器、成膜チャンバーから構成されている。IBICVD 法では、原料ガスを基板に吹き付け、そこに同時にイオンビームを照射する。酸化ゲルマニウムの成膜は以下の手順で行った。まず、炭酸ガスをイオン源に導入し、解離することにより酸素イオン (O^+) を生成した。質量分離器により酸素イオンビームのみを単離し、20-200 eV の低エネルギーの酸素イオンビームを生成した。次に、液体原料気化供給装置を用いてヘキサメチルジゲルマンを気化し、これを 0.7 sccm の流量で室温の基板に吹き付けた。そこに前述の酸素イオンビームを照射したところ、基板上に膜ができていることを確認した。成膜率のイオンエネルギーへの依存性を調べたところ、50 eV のときに膜厚は最大となった。膜を XPS, FTIR, XRR で分析した結果、酸化ゲルマニウムであることを確認した[1]。膜中に炭素はほとんど含まれていなかった。膜厚は約 100 nm であり、密度は 3.9 g/cm³ であった。酸化錫、酸化ケイ素の成膜実験では、原料をテトラメチル錫、ヘキサメチルジシロキサンにそれぞれ交換し、手順は酸化ゲルマニウムの場合と同様にして行い、それぞれの実験で、酸化錫[2]と酸化ケイ素[3]の成膜に成功した。

炭化ケイ素の成膜では、原料のジメチルシランを 800℃の基板に吹き付けつつアルゴンイオンビームを照射した。ジメチルシランは、その分子中に、ケイ素原子を 1 個、炭素原子を 2 個持っているため、ジメチルシランを用いた熱 CVD では、炭素が過剰な SiC になることがある。我々は、ジメチルシランを用いた熱 CVD プロセスにより成膜中の SiC 膜に、同時にアルゴンイオンビームを照射し続けることにより、炭素過剰な状態を改善できることを見出した。これは、照射したアルゴンイオンビームが、膜中の炭素原子を選択的にスパッタしたためと考えられる[4]。

[1] Yoshimura, et al., Nucl. Instr. Method A, 1056 (2023) 168707.

[2] Yoshimura, et al., Heliyon, 11 (2025) e42442.

[3] Yoshimura, et al., Nucl. Instr. Method B, 549 (2024) 165276.

[4] Yoshimura, et al., Nucl. Instr. Method B, 527 (2022) 40.

本研究は、科学研究費補助金 (25K15759) の支援を受けて実施した。

放射性核種原子分光のための 2 色 2 段共振器強化型吸収分光法の開発

Development of 2-color cavity enhanced absorption spectroscopy

toward atomic spectroscopy of radio nuclides

名大院工¹ [○]寺林 稜平¹, 望月 拓海¹, 富田 英生¹

Nagoya Univ.¹, [○]Ryohei Terabayashi¹, Takumi Mochizuki¹, Hideki Tomita¹

E-mail: terabayashi.ryouhei.e6@f.mail.nagoya-u.ac.jp

1. 諸言

高反射率光共振器内の多重反射を利用した共振器強化型吸収分光法、特にキャビティリングダウン吸収分光法 (Cavity ringdown spectroscopy: CRDS) は、数 km に及ぶ超長光路とレーザー強度変動ノイズの影響を受けにくい測定原理により、気体状微量物質の光吸収を高感度・高精度に測定可能である。近年、2 本の連続発振レーザー光を共振器内で同時共鳴させ、物質の 2 段吸収現象を観測することで、より高い同位体選択性を実現した 2 色共鳴 CRDS (2-color CRDS) が米国 LLNL のグループにより提案され、特に N_2O と $^{14}\text{CO}_2$ に対する原理実証がなされている[1]。CRDS の超高感度と 2 色 2 段吸収による高い選択性を兼ね備えた本手法を様々な対象に適用できれば、これまでにない新たな放射性核種分析法の開発につながる。本研究では、特に気体状原子を対象にした 2-color CRDS を実証し、その放射性核種分光への適用性を検討することを目的とし、研究を進めている。

2. 近赤外レーザーを用いた原子分光用 2-color CRDS 体系の構築

分析対象の 2 段吸収遷移波長に合わせた 2 台の連続発振レーザーを用意し、偏光を利用して空間的に重ね合わせて高反射率光共振器に入射し、その透過光をそれぞれ光検出器で観測する。レーザー光を音響光学変調器 (AOM) 等の光スイッチを用いて任意のタイミングで遮断し CRDS 測定を行い、1 段目レーザー光の入射有無で 2 段目吸収の差を評価することで、測定対象の分析を行う。原子に対する 2-color CRDS 実証実験のための体系として、抵抗加熱原子源から生成された気体状原子を CRDS により分光する光共振器セルを構築した。その概要を図 1 に示す。発表では、近赤外レーザーを用いた原子分光用 2-color CRDS 体系の構築と、それを用いた分光実験の結果について報告する。

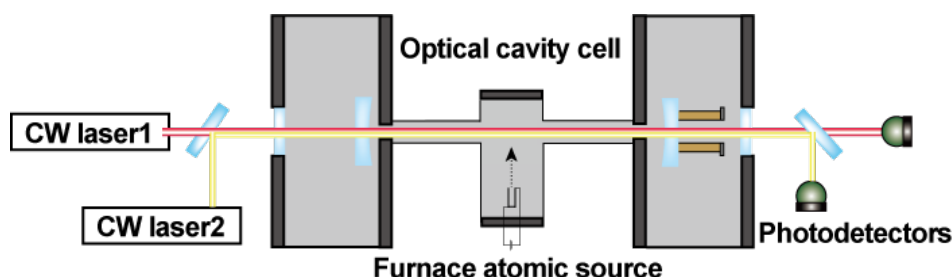


Fig. 1 The schematic of 2-color CRDS

[1] A.D. McCartt, *et. al.*, ACS Sens. 7, 3258-3264 (2022) .

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費若手研究 (23K13686) の助成を受けたものです。

結晶表面ストリッパーによる炭素イオンの荷電変換と干渉分子の解離

Charge conversion of carbon ions and dissociation of interfering molecules

by crystal surface strippers

原子力機構¹, ペスコ² ○神野 智史¹, 松原 章浩², 藤田 奈津子¹, 木村 健二¹

JAEA¹, PESCO², °Satoshi Jinno¹, Akihiro Matsubara², Natsuko Fujita¹, Kenji Kimura¹

E-mail: jinno.satoshi@jaea.go.jp

加速器質量分析法(AMS)は、考古学や地球科学で広く用いられ、2000 年代以降は主に ^{14}C 年代測定向けに加速電圧 200~500 kV の小型 AMS が実用化されている。AMS では、目的核種を負イオン化してタンデム加速器に入射し、ターミナル部のガスストリッパーにより正イオンへの荷電変換と同質量数の干渉分子の解離を行う。小型化のためには加速エネルギーの低減が必要だが、100 keV 未満ではガスとの衝突によるビームの発散が増大し、透過率が低下する。また、漏洩したガスによる散乱で安定同位体が軌道を外れ、バックグラウンドが増大するため、差動排気部を長くする必要があり、小型化に限界があった。

この課題に対し、我々はイオンの鏡面散乱を利用した結晶表面ストリッパー法を開発した。原子的に平坦な結晶表面とイオンの相互作用により、超高真空中で ^{14}C -イオンの荷電変換と、 $^{13}\text{CH}^-$ と $^{12}\text{CH}_2^-$ の干渉分子の解離が可能となる[1, 2]。

図 1 に示すプロトタイプは約 1.9m×1.9m で、最大 40 kV のイオン源デッキのみで C⁻イオンを加速する。初期の表面散乱実験では、劈開によって原子レベルの平坦性が得られる KCl 結晶を用いた結果、鏡面反射した C⁺イオンの角度広がりやガスストリッパーよりも大幅に小さく、結晶表面ストリッパーの優位性が示された[3]。次に、照射による表面チャージアップを抑えるため、格子定数が KCl と近く、狭いバンドギャップを持つ SnTe を蒸着した。また、理論的に仕事関数の高い材料は荷電変換効率が高いことが示唆されているため、平坦性では劣るものの、雲母上に成膜した金(111)表面も試験した。

^{13}CH および $^{12}\text{CH}_2$ の解離断片の C⁺を分析磁石と静電偏向器の調整で比例計数計に導き、解離率を評価した。その結果、KCl に比べて Au(111)が荷電変換と分子解離の両方で改善を示した。なお、詳細は講演で報告する。

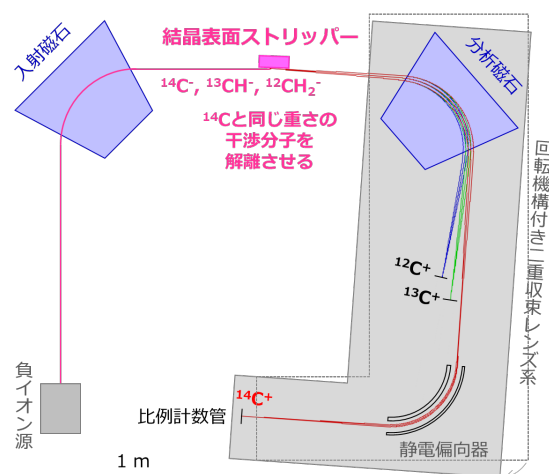


図 1. 開発した超小型 AMS の概念図

[1] A. Matsubara, N. Fujita, K. Ishii, NIM B 437 (2018) 81-86.

[2] N. Fujita, A. Matsubara, K. Kimura, S. Jinno, Y.S. Kokubu, NIM B 532 (2022) 13-18.

[3] S. Jinno, A. Matsubara, N. Fujita, K. Kimura, NIM B 557 (2024) 165545.

**JAEA-AMS-TONO における
加速器質量分析装置に関する研究開発; 2025 年秋
Research and Development for Accelerator Mass Spectrometer
at JAEA-AMS-TONO; 2025**

日本原子力研究開発機構¹, 株式会社ベスコ², ビームオペレーション株式会社³,
○藤田奈津子¹, 神野智史¹, 南谷史菜¹, 前田祐輔¹, 三宅正恭², 松原章浩²,
西尾智博¹, 小川由美², 北野敏彦³, 渡邊隆広¹

Japan Atomic Energy Agency (JAEA)¹, PESCO Co., Ltd.², Beam Operation Co., Ltd.³,
○Natsuko Fujita¹, Satoshi Jinno¹, Fumina Minamitani¹, Yusuke Maeta¹, Masayasu Miyake²,
Akihiro Matsubara², Tomohiro Nishio¹, Yumi Ogawa², Toshihiko Kitano³, Takahiro Watanabe¹
E-mail: fujita.natsuko@jaea.go.jp

日本原子力研究開発機構東濃地科学センター土岐地球年代学研究所では、地質環境の長期安定性に関する研究において、加速器質量分析装置 (Accelerator Mass Spectrometer : AMS) を用いた年代測定および技術開発を行っている。AMS は希少放射性核種を対象とした超微量同位体比測定が可能な装置であり、当センターにおいても地質試料や地下水試料、また技術開発として外部からの考古学試料等の年代測定に取り組んでいる。現在当センターでは AMS を 3 台所有し、うち 2 台は年代測定の実試料測定用であり、もう 1 台が超小型 AMS の開発に向けた試験装置である。

実試料測定用の 2 台の AMS は JAEA-AMS-TONO-5MV (NEC 製 15SDH-2, 最大加速電圧 5.0 MV) と JAEA-AMS-TONO-300kV (HVE 製 4103Bo-AMS, 最大加速電圧 300 kV) であり、2 台とも、炭素-14 (¹⁴C), ベリリウム-10, アルミニウム-26, ヨウ素-129 の 4 核種を測定している。また 5MV の AMS ではこれら 4 核種のルーチン測定に加えて、地下水の年代測定に有用な塩素-36 の測定に向けた技術開発も実施している。JAEA-AMS-TONO-300kV では 4 核種のルーチン測定に加えて、炭素試料のガスイオン源化の検討も開始した。これに関連して、白金を利用して炭素測定の妨害分子となる炭化水素除去技術の開発や、レーザーを利用した前処理技術の開発に着手した。発表では、それぞれの研究開発状況を報告する。

東大 MALT における ^{36}Cl -AMS のバックグラウンド評価

Background of ^{36}Cl -AMS at MALT, The University of Tokyo

東大 MALT, [○]松崎 浩之, 山形 武靖, 戸谷 美和子, 徳山 裕憲

[○]Hiroyuki Matsuzaki, Takeyasu Yamagata, Miwako Toya, Hironori, Tokuyama

MALT, Univ. of Tokyo

E-mail: hmatsu@um.u-tokyo.ac.jp

塩素 36 (^{36}Cl) は、半減期 30.1 万年の放射性核種であり、原子力施設における冷却水等の放射化の評価、アイスコア中に記録されている人類の核活動記録の解読、炭酸塩系岩石試料を利用した照射年代等、近年需要が増加している。 ^{36}Cl -AMS の場合、同重体 ^{36}S の干渉がバックグラウンドを決めている。東大 MALT ではガス充填型電磁石 (Gas Filled Magnet, GFM) を利用して ^{36}S の分離を行ってきた。なお、東大 MALT の GFM は中心軌道の曲率半径は 63cm となっている。Aze (2007) では、電荷 7+, GFM 内のガスは窒素 2 Torr、ガスカウンター (Gas Counter, GC) と組み合わせて、バックグラウンド $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} < 5 \times 10^{-15}$ を実現したとしている。その後、検出効率を重視し、6+を選択し、GFM 内ガス圧を 1.5Torr に下げて実用的なバックグラウンドを $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \sim 1 \times 10^{-14}$ として運用してきた (Matsuzaki, 2015)。しかし、前処理が不十分な試料においては、 ^{36}S の影響で実質的なバックグラウンドが上昇してしまうことや、比の低い試料の測定に対する需要が増加してきていることから、 ^{36}Cl と ^{36}S の分解能を向上すべく、測定系の見直しを行っている。基本的には、イオンエネルギーが高いほうが、同重体分離に有利なことから、電荷を 7+に戻した。GFM については、内部圧力が高いほうが ^{36}Cl と ^{36}S の分離は良くなる一方で、透過率が落ちてくるため、両者のバランスを取ると、2Torr 程度が良いことが確認された。一方、ガスカウンターの分離では、ガスカウンターの有効領域に入る時点でのイオンエネルギーが高いほうが、 ^{36}Cl と ^{36}S の分離は良い。GFM 内を 2Torr、GC ウィンドウに $3\mu\text{m}$ のポリプロピレンを用いる場合、GC 内では、ブラッグカーブのクロスポイント以降の部分を大きく取ったほうが、 ^{36}Cl と ^{36}S の分離が良い。より高い分離を実現するためには、ガスカウンターのウィンドウを薄くし、ガスカウンター内にイオンのエネルギーをなるべく残すことが必要である。東レの PENTM膜は厚さ $0.8\mu\text{m}$ であり、これを用いると、GC 内でクロスポイントの前後を利用することができた。しかし、バックグラウンドの劇的改善には至らなかった。

現在、GC のウィンドウに、窒化ケイ素膜 (150nm)、GC のガスにイソブタンを使用することを検討している。また、イオン源から出てくるイオウイオンそのものを低減する手段 (ターゲットの扱い) も検討したい。

Reference:

T. Aze, et.al. (2007) Improvement of the ^{36}Cl -AMS system at MALT using a Monte Carlo ion-trajectory simulation in a gas-filled magnet, NIM B, 259, 144-148.

H. Matsuzaki, et. al. (2015) The status of the AMS system at MALT in its 20th year, NIM B, 361, 63-68.

筑波大学 6MV タンデム加速器質量分析装置における ^{129}I 測定の性能評価

Performance evaluation of ^{129}I analysis on the 6MV multi-nuclide AMS system

at the University of Tsukuba

筑波大理工情報生命学術院¹, 筑波大応用加速器部門 AMS グループ², 筑波大数理物質系³

○(M1) 佐久間 光紀¹, 松村 万寿美², 高橋 努², 吉田 哲郎², 笹 公和^{2,3}

Grad. Sch. of Sci. and Tech., Univ. of Tsukuba¹, AMS Group, UTTAC, Univ. of Tsukuba², Inst. of

Pure and Applied Sci., Univ. of Tsukuba³

○(M1) Mitsuki Sakuma¹, Masumi Matsumura², Tsutomu Takahashi², Tetsuro Yoshida², and

Kimikazu Sasa^{2,3}

E-mail: s2520181@u.tsukuba.ac.jp

^{129}I は半減期が約 1570 万年の長寿命放射性核種であり、海洋堆積物の年代測定や環境中の放射性ヨウ素の影響評価といった研究に用いられており、最近では加速器質量分析法 (AMS) が主な測定手法となっている。筑波大学における 2024 年度の ^{129}I 測定試料数は 443 個であり、AMS 全測定サンプルの 63% を占めた。同年度の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ のバックグラウンド平均値は $(3.0 \pm 1.3) \times 10^{-14}$ となっている。 ^{127}I の加速器入射前ビーム電流値については 2019 年度から徐々に減少傾向であったが、2024 年度の平均値は 1.5 μA であり、前年度の平均値 (0.71 μA) より若干の増加がみられた。測定値の較正には米国 Purdue 大学より提供された標準試料 (Z94-0597 及び Z94-0596) を用いており、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ はそれぞれ 8.378×10^{-12} と 6.540×10^{-11} である [1]、[2]。2024 年度を通しての両試料の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 測定値の平均は $(7.431 \pm 0.521) \times 10^{-12}$ [$n = 436$] と $(5.886 \pm 0.227) \times 10^{-11}$ [$n = 294$] であり、(測定値)/(公称値) はそれぞれ 0.890 ± 0.062 と 0.900 ± 0.035 となり、誤差内で良い一致を得られた。 ^{129}I -AMS における 1 回の測定セットにおける繰り返し測定精度は、Z94-0597 に対しては 3.5% 程度、Z94-0596 に対しては 1% 以下となる。

標準試料を提供する機関に NIST (米国国立標準技術研究所) [3] があり、SRM (Standard Reference Material) という標準試料を製造している。SRM は複数の測定機関での比較検定によりその値が検証されるが、筑波大学では NIST からの依頼を受け、新たに供給予定である 5 種類の ^{129}I 用 SRM (Blank 試料を含む) について検定を行った。AMS 測定の結果、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ が $10^{-13} \sim 10^{-11}$ 程度の試料では概算値と矛盾のない結果を示した。一方、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ が 10^{-14} 程度の試料では測定値と概算値に約 2 倍の差が生じた。この差は $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ が低い試料の調製の難しさや、AMS の測定感度の限界に起因すると考えられる。

本発表では、筑波大学 6MV タンデム加速器質量分析装置における ^{129}I 測定の性能評価と、 ^{129}I 用 NIST 標準試料の検定結果について報告する。

Reference

[1] P. Sharma et al., *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* 123 (1997) 347.

[2] M. Caffee, (Purdue University), Private communication (2014).

[3] NIST (National Institute of Standards and Technology) 100 Bureau Drive Gaithersburg, MD 20899
<https://www.nist.gov/standards>

KEK-12GeV 陽子シンクロトロン内の電源ケーブル被覆中 ^{36}Cl を用いた熱中性子フルエンスの推定

Estimation of the Thermal Neutron Fluence Using ^{36}Cl Produced in a Power Cable Sheath at the KEK-12GeV Proton Synchrotron

筑波大¹, 高エネ研², 日環研³, 京都大⁴, 核融合研⁵, 総研大⁶ ○(M1)木村 龍拓¹, 吉田 剛², 松村 宏², 松村 万寿美¹, 石田 正紀², 渡邊 瑛介², 津金 聖和², 李恩智², 塩原 良建³, 三橋 正裕³, 八島 浩⁴, 平野 雄生³, 中屋敷 勇輔³, 大石 晃嗣³, 栗田 紗緒里⁵, 中田 実希⁵, 佐瀬 卓也⁵, Bui Ngoc Thien⁶, 高橋 努¹, 吉田 哲郎¹, 笹 公和¹

Tsukuba Univ.¹, High Energy Accelerator Research Organization², Japan Environment Research Co., Ltd.³, Kyoto Univ.⁴, National Institute for Fusion Science⁵, The Graduate University for Advanced Studies⁶ °Tatsuhiko Kimura¹, Go Yoshida², Hiroshi Matsumura², Masumi Matsumura¹, Masaki Ishida², Eisuke Watanabe², Kiyokazu Tsugane², Eunji Lee², Ryoken Shiobara³, Masahiro Mitsuhashi³, Hiroshi Yashima⁴, Yuuki Hirano³, Yusuke Nakayashiki³, Koji Oishi³, Saori Kurita⁵, Miki Nakada⁵, Takuya Saze⁵, Bui Ngoc Thien⁶, Tsutomu Takahashi¹, Tetsuro Yoshida¹, Kimikazu Sasa¹

E-mail: s2110514@u.tsukuba.ac.jp

【はじめに】高エネルギー加速器研究機構(KEK)の、12GeV 陽子シンクロトロン(KEK-12GeV-PS)では、高出力・長期間の運転により、加速器トンネル全体で放射化物が発生することが示唆され、廃止に向けた課題となっている。効率よく廃止を進めるためには中性子分布を知る必要があるが、運用を終えた施設では実測ができない。トンネル内の電源ケーブル被覆には塩素を含むものがあり、安定同位体 ^{35}Cl の熱中性子捕獲断面積は 43.6 barn と大きく、 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 反応により ^{36}Cl が生成する。 ^{36}Cl は γ 線を放出しない半減期 30.1 万年の長寿命放射性核種であるため、減衰を考慮せず全運転期間中の中性子発生の積算量を記録できると期待される。本研究では、加速器質量分析(AMS)を用いて電源ケーブル被覆中 ^{36}Cl を定量し、熱中性子フルエンスの推定を試みた。

【方法】試料として、KEK-12GeV-PS 内の放射化が顕著である EP1 セプタム電磁石の電源ケーブル被覆を用いた。初めに、中性子放射化分析により被覆中の塩素含有量を定量した。次に、被覆の燃焼/水トラップ実験より、AMS に適したイオン性水溶液を得た。そして、イオンクロマトグラフィーで Cl^- 、 SO_4^{2-} (AMS の妨害因子)を分析し、AMS に適した同位体比($^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl} \sim 10^{-11}$)に希釈した。最後に、AMS 用試料の AgCl 沈殿精製を行い、AMS により ^{36}Cl を定量した。

【結果】AMS には筑波大学 6MV タンデム加速器質量分析装置を用いた。5 枚電極型 $\Delta E-E$ ガス検出器を使い、前方 2 つの電極(dE1+dE2)と後方 2 つの電極(dE4+dE5)から得た信号を 2 次元スペクトル表示にすることで、妨害同重体の ^{36}S を ^{36}Cl と分離し、 ^{36}Cl を定量できた。そして、 $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 同位体比と既知の断面積を用いて熱中性子フルエンスを推定した。具体的な定量値や今後の展望などについては発表において議論する。

Time over Threshold を用いたキャビティリングダウン分光における 減衰信号取得法の開発

Development of time over threshold method for acquiring decay signals in cavity ring-down spectroscopy

Nagoya University, Japan¹, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Germany²,

University of Tokyo, Japan³, National Metrology Institute of Japan (NMIJ/AIST), Japan⁴

○ Konrad Kleineidam^{1,2}, Erik Thiel^{1,2}, Takumi Mochizuki¹, Ryohei Terabayashi¹,

Kenji Shimazoe³, Klaus Wendt², Hisashi Abe⁴, Norihiko Nishizawa¹, Hideki Tomita¹

E-mail: kkonradr@students.uni-mainz.de

Cavity ring-down laser spectroscopy (CRDS) provides a highly sensitive method for detection of elements and even individual isotopes in gas samples. In CRDS, laser photons are stored in a high-finesse optical cavity, and the molecular number density inside the cavity can be determined by measuring the decay rate (called the “ring-down rate”) of the transmitted light intensity that leaks out of the cavity. A high-resolution and high-speed data acquisition system is typically used to record the time-dependent change in signal voltage and calculate the decay rate through exponential fitting analysis. On the other hand, by injecting photons of different wavelengths into the optical cavity, it is possible to simultaneously obtain ring-down rates for multiple wavelengths, enabling simultaneous measurement of multiple molecules.

In this study, we investigated a method for acquiring ringdown rates using a simplified measurement system. This provides proof of concept for determining the ring-down decay rate based on time interval (time over threshold: ToT) analysis which utilizes the discrete recording and processing of two or more static threshold timing signals instead of an ADC with full curve fitting (see Fig.1). Additionally, we will discuss further investigations utilizing dynamic threshold curves instead of static thresholds to account for signals with significant variations in amplitude.

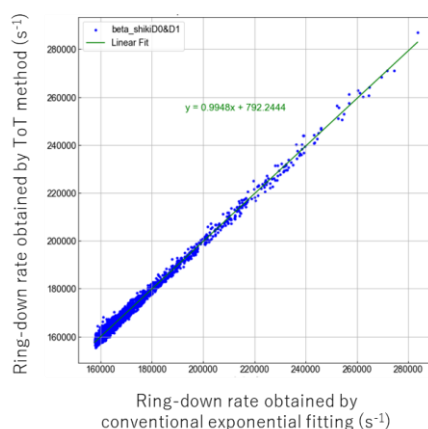


Fig.1 Comparison of ring-down rate estimation using conventional method and time over threshold method

Acknowledgments

This research was supported by JST Core Research for Evolutional Science and Technology (CREST) Grant Number JPMJCR2104 and JSPS KAKENHI Grant Number 22H05023.

北太平洋の ^{129}I の起源

Estimating of the source of anthropogenic ^{129}I in the North Pacific

東大 MALT¹ °山形武靖¹, 永井尚生¹, 斉 遠志¹, 徳山裕憲¹, 土屋陽子¹, 戸谷美和子¹,
松崎浩之¹

MALT, Univ. Tokyo¹, °Takeyasu Yamagata¹, Hisao Nagai¹, Yuanzhi Qi¹, Hironori Tokuyama¹,
Yoko Tsuchiya¹, Miwako Toya¹, Hiroyuki Matsuzaki¹

E-mail: yamagata@um.u-tokyo.ac.jp

人為起源放射性核種 ^{129}I (半減期 1570 万年) と ^{137}Cs (半減期 30.1 年), ^{236}U (半減期 2340 万年) は ^{235}U から生成する。地球表層に存在するこれらの核種の主な起源は大気圏核実験と核燃料再処理工場からの放出である。大気圏核実験は 1950 年代から部分的核実験禁止条約が締結された 1963 年までにネバダ核実験場や南太平洋ビキニ環礁、ノバヤゼムリヤ核実験場等において行われ、核燃料再処理はフランスのラ・アーク再処理工場、マルクール再処理工場、イギリスのセラフィールド再処理工場で 1950 年代から行われている。核実験で生成した人為起源放射性核種は成層圏まで到達し、大気循環によって運ばれ全球に輸送されグローバルフォールアウトとして沈着した。再処理工場からは主に海水へ放出され海水循環とともに北極海に流入する。一部大気に放出された成分が偏西風によって太平洋まで飛来し沈着すると考えられている。太平洋の ^{129}I の起源はグローバルフォールアウトと再処理工場から大気経由の成分とされている。海水に沈着したこれらの核種は保存成分であるため海水と移動をともにする。

我々のグループは福島第一原子力発電所事故の翌年 2012 年と 2017 年に北太平洋で ^{129}I 濃度の観測を行なった。しかし 2012 年と 2017 年の ^{129}I 濃度の深度分布には目立った変化が見られなかった。2012 年から 2017 年の間、 ^{129}I は再処理工場からは毎年 5-10 GBq 程度放出されているが北太平洋には影響が少ないのではないかと考え、起源についての検討を行った。

2012 年の同観測点における ^{134}Cs 濃度(半減期 2.06 年) は福島事故起源であるため ^{137}Cs と ^{134}Cs から福島事故起源とグローバルフォールアウトの成分を求めた。そこから北太平洋の ^{129}I はグローバルフォールアウトと再処理工場からの大気経由での成分が同等程度であると考えられた。本講演では北太平洋における ^{129}I の起源について、深度分布の時間変化、再処理工場起源のない ^{137}Cs , ^{236}U と比較し定量的に議論し、今後の展望について紹介する予定である。

ハイマツ試料中放射性炭素濃度の年変動に関する研究 2024

Research of annual variations of ^{14}C concentrations in pinus pumila 2024

山形大 AMS センター¹, 山形大理², 沖縄科学技術大学院大³, 名古屋大⁴

○武山 美麗^{1,2}, 森谷 透^{1,2}, 櫻井 敬久², 宮原 ひろ子³, 三宅 美沙⁴, 門叶 冬樹^{1,2}

Center for AMS, Yamagata Univ.¹, Fac. of Sci., Yamagata Univ.², OIST³, Nagoya Univ.⁴

○Mirei Takeyama^{1,2}, Toru Moriya^{1,2}, Hirohisa Sakurai², Hiroko Miyahara³, Fusa Miyake⁴,
Fuyuki Tokanai^{1,2}

E-mail: takeyama@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

放射性炭素 (^{14}C) は、宇宙線と大気中の窒素 (^{14}N) との相互作用により生成され、直ちに酸化されて二酸化炭素 ($^{14}\text{CO}_2$) となり、大気中の二酸化炭素と混合して地球規模の炭素循環に取り込まれるため、大気中の ^{14}C 濃度は太陽活動の変動や宇宙線増加現象を反映する。したがって年代の判明している古木試料の ^{14}C 濃度を高精度に測定することで、過去の太陽活動の周期性や太陽フレアに起因する宇宙線増加現象を調べることができる[1-4]。しかしながら、植物が光合成により取り込む大気中 (対流圏) の ^{14}C 濃度は、地球の炭素循環の影響により ^{14}C 生成から時間差が生じ、その濃度変動は地球の成層圏で生成された ^{14}C 量の変動の 1/100 以下まで減衰する。従って ^{14}C をプローブとして過去の宇宙線強度変動や太陽活動を調べるためには、太陽黒点数や二次宇宙線の量が正確に観測されている現代の試料を用いて、植物中の ^{14}C 濃度の時間と変動の依存性を調べるのが重要となる。

そこで、我々は試料中の ^{14}C 濃度変動と宇宙線強度変動、および太陽活動の関係を調べ、地球炭素循環の影響を評価することを目的として、乗鞍岳および蔵王山の高山帯に生息するハイマツの球果と葉 (図 1) を 2018 年から継続的に採取し、 ^{14}C 濃度測定を行っている。また、化石燃料の影響を比較するために、東京都および山形県天童市の市街地からアカマツ試料を採取し、同じく ^{14}C 濃度測定を行っている。試料の ^{14}C 濃度測定には、山形大学高感度加速器質量分析センター (YU-AMS) に設置された AMS システムおよびグラフィット作製システムを使用した。図 2 に各試料の採取年に対する ^{14}C 濃度 ($\Delta^{14}\text{C}$) と太陽黒点数[5]を示す。乗鞍岳と蔵王山で採取したハイマツ試料の $\Delta^{14}\text{C}$ は 2018 年から 2024 年にかけて全体的に減少傾向を示した。本講演では、より詳細な測定結果について報告する。



図 1. 試料に用いたハイマツの球果(左)と葉(右)

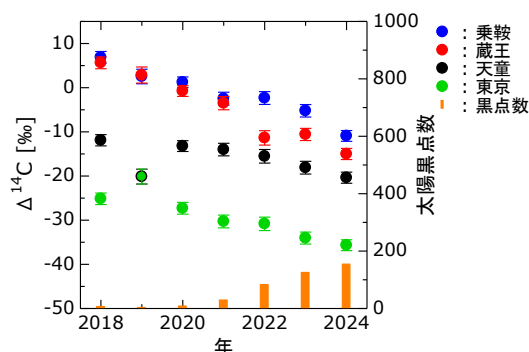


図 2. ハイマツ・マツ球果の採取年に対する $\Delta^{14}\text{C}$ 濃度と太陽黒点数

- [1] F. Miyake et al., Nature, 486, 240-242 (2012).
- [2] F. Miyake et al., Geophys. Res. Lett., 48, e2021GL093419 (2021).
- [3] H. Miyahara et al., Sci. Rep., 11(1), 5482-5482 (2021).
- [4] H. Miyahara et al., Geophys. Res. Lett., 49, e2021GL097201 (2022).
- [5] WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels.

屋久杉年輪の ^{14}C 分析による 1279 年頃の宇宙線変動の調査

Investigation of cosmic ray variation around 1279 CE based on ^{14}C analysis of tree rings from Yakusugi

名大¹, 福島大², 山形大³, ETH Zurich⁴ °三宅 美沙¹, 木村 勝彦², 森谷 透³, 武山 美麗³,
門叶 冬樹³, Lukas Wacker⁴

Nagoya Univ.¹, Fukushima Univ.², Yamagata Univ.³, ETH Zurich, °Fusa Miyake¹, Katsuhiko
Kimura², Toru Moriya³, Mirei Takeyama³, Fuyuki Tokanai³, Lukas Wacker⁴

E-mail: fmiyake@isee.nagoya-u.ac.jp

樹木年輪の炭素 14 (^{14}C) は、過去の銀河宇宙線変動や太陽高エネルギー粒子 (Solar Energetic Particle: SEP) イベントの良い指標と考えられている。これまでに、過去の極端に大きな SEP イベントの痕跡が年輪中の ^{14}C 濃度の急増(いわゆる ^{14}C スパイク)として報告されてきた(e.g., 774 CE, 993 CE: Miyake et al. 2012, 2013)。年輪の ^{14}C 分析から検出されている極端 SEP イベントは、過去約 70 年間の現代観測で確認されているイベントの数十倍～百倍程度と考えられており、仮に現在発生した場合、現代社会に深刻な影響を及ぼす可能性がある。

このような ^{14}C スパイクの一つとして、1279 年～1280 年の ^{14}C 濃度の急増が報告されており、極端 SEP イベントの候補とされている。しかし、先行研究で報告された 1279 年～1280 年の ^{14}C 濃度の増加量は約 5%以下と比較的小さい変化であり (Brehm et al. 2021, Miyahara et al. 2022)、1 年での有意な増加が認められない測定事例も報告されているため (Scifo et al. 2024)、イベントの実在性とその原因について議論が続いている。

本研究では、1279 年頃の宇宙線変動に関する知見を深めるため、屋久杉年輪を用いた高精度な ^{14}C 濃度分析を実施した。木材試料は 1 年輪ごとの分解能と早材・晩材ごとの分解能の 2 通りで切り分け、それぞれ山形大学 (YU-AMS) と ETH Zurich の加速器質量分析装置 (AMS) を用いて ^{14}C 濃度測定を行った。その結果、2 つの機関の ^{14}C データはよく一致した。全ての測定結果を 1 年分解能で平均したところ、1279 年～1280 年の ^{14}C 濃度増加量は先行研究の報告よりも小さいものの、1279～1281 年にかけて測定誤差に対して有意な増加が確認された。本講演では、これらの分析結果を報告するとともに、その原因について考察する。

参考文献

1. Miyake et al. (2012). Nature 486(7402), 240–242.
2. Miyake et al. (2013). Nat Commun 4:1748.
3. Brehm et al. (2021). Nature Geoscience 14(1), 10–15.
4. Miyahara et al. (2022). Geophysical Research Letters 49(5).
5. Scifo et al. (2024). Radiocarbon 66, 518–531.

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.2】 3.2 情報フォトンクス・画像工学、4.4 Information Photonicsのコードシェアセッション

[7p-N322-1~14] CS.2 3.2 情報フォトンクス・画像工学、4.4 Information Photonicsのコードシェアセッション

[7p-N322-1]

物体形状に適応する領域拘束を導入した交互方向乗数法に基づく位相スペクトル推定手法を用いたスペックル相関イメージング

○福吉 佑太¹、最田 裕介²、野村 孝徳² (1.和歌山大院システム工、2.和歌山大システム工)

[7p-N322-2]

ディープラーニングに基づく非視線方向の散乱イメージングにおける拡散媒体の位置推定

○山本 翔¹、渡邊 歴¹ (1.立命館大理工)

[7p-N322-3]

Corrosion monitoring of 3D printed parts using hyperspectral imaging and spectral angle mapper

○(M2)SIMEON Simeon RUKUNDO¹, Maria Merlin Anthony¹, Keerthi K¹, Murukeshan Vadakke Matham¹ (1.Centre for Optical and Laser Engineering, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, Singapore,)

[7p-N322-4]

シングルピクセルを用いた光線方向場マッピング

○岡 将太郎¹、高梨 健太¹、大野 博司¹ (1.(株)東芝)

[7p-N322-5]

デジタル走査照明を用いた光線方向場イメージング

○大野 博司¹、高梨 健太¹、岡 将太郎¹ (1.東芝総合研究所)

[7p-N322-6]

[JSAP-Optica Joint Symposia Invited Talk] Lensfree On-Chip Quantitative Phase Microscopy

○Chao Zuo¹ (1.Nanjing Univ of Science and Technology)

[7p-N322-7]

Tailoring the Stokes' Singularity using Enantiomeric Excess

○(D)ANKITA KARMAKAR¹, MARUTHI M. BRUNDAVANAM¹ (1.IIT Kharagpur.)

[7p-N322-8]

Real-time microplastic detection using polarization digital holographic microscope

○(D)MOHIT RATHOR¹, Vaishnavi Rawat², Arvind Kumar², Rakesh kumar Singh¹ (1.IIT(BHU), 2.BHU)

[7p-N322-9]

SWIR HSI based combustible detection for an improved wildfire warning system

○(P)Maria Merin Antony¹, Suchand Sandeep C. S.¹, Murukeshan Vadakke Matham¹ (1.Nanyang Techn. Univ.)

[7p-N322-10]

[JSAP-Optica Joint Symposia Invited Talk] Observation of Tobacco-cultured Cells by using Three-dimensional Fluorescence Imaging Based on Transport of Intensity Equation and

Prospects for Clarifying the Effects of Terahertz Waves on Cells

○Shiori Matsuda¹, Safumi Suzuki¹, Wataru Watanabe², Osamu Matoba^{3,4} (1.Science Tokyo, 2.Ritsumeikan Univ., 3.Grad. Sch. of System Informatics, Kobe Univ., 4.OaSIS, Kobe Univ.)

[7p-N322-11]

逐次型ゴーストイメージングによるオンライン画像再生

○槻 凌多¹、深津 晋¹ (1.東京大院総合文化)

[7p-N322-12]

シングルピクセルイメージングに向けた2次元ファイバアレイを用いたアダマールマスク生成の基礎検討

○後藤 優太¹、仁田 功一¹ (1.神戸大院シス情)

[7p-N322-13]

偏光多重同軸型シングルピクセルデジタルホログラフィの検討

○松岡 真杜¹、平岩 大輔¹、吉田 周平¹ (1.近畿大総理研)

[7p-N322-14]

多点検出による計算ホログラフィックゴースト回折の計測時間短縮

○河合 慧太¹、野村 孝徳²、最田 裕介² (1.和歌山大院システム工、2.和歌山大システム工)

物体形状に適応する領域拘束を導入した交互方向乗数法に基づく 位相スペクトル推定手法を用いたスペックル相関イメージング

Speckle correlation imaging using a phase spectrum estimation method based on the alternation direction
multiplier method with a region constraint introduced to adapt to object shape

和歌山大院システム工¹, 和歌山大システム工² °福吉 佑太¹, 最田 裕介², 野村 孝徳²

Grad. Sch. Sys. Wakayama Univ.¹, Fac. Sys. Wakayama Univ.², °Yuta Fukuyoshi¹, Yusuke Saita², Takanori Nomura²

E-mail: s256232@wakayama-u.ac.jp

医療分野において、生体細胞を非侵襲にイメージングする技術が求められており、その一手法として、皮膚により散乱した細胞からの光波の計測のみで物体像を再構成するスペックル相関イメージング (SCI) [1] がある。SCI では、計測物体から出射した光が散乱媒質を通過した後の強度分布の自己相関からは物体像のフーリエ振幅スペクトルのみが取得できるため、物体像の再構成には位相スペクトルを推定する必要がある。これには観測した振幅スペクトルや物体像の存在領域を拘束条件として、物体面とフーリエ面において物体像の整合性を保つように分布を更新する手法 [2] が用いられる。しかし、この手法により再構成された物体像の品質は、位相スペクトルの初期分布や事前に設定した存在領域のサイズに依存するという問題がある。この問題に対し、交互方向乗数法 (ADMM) に基づく位相スペクトル推定手法 [3] に、再構成像から抽出した画素集合である物体形状に適応する領域拘束 [4] を導入することを提案する。ADMM に基づく位相スペクトル推定手法では、物体面とフーリエ面の拘束条件を満たす分布と正則化項で得られる損失関数を独立した変数として交互に最適化する。また、物体形状に適応する領域拘束は再構成処理の反復に応じて更新され、物体形状に適応的に変化するため、再構成像品質の向上が期待される。

Fig. 1 に示す光学系を用いて提案手法の有用性を検証した。計測物体として Fig. 2 (a) に示す蛍光励起を想定した LED アレイを用い、散乱媒質通過後の強度分布を取得した。取得した強度分布に対し、ADMM に基づく位相スペクトル推定手法、物体形状に適応する領域拘束を導入した従来手法、提案手法により物体像を再構成した。再構成した画像を Fig. 2 (b), (c), (d) に示す。Fig. 2 (b), (c) では物体像が見られないが、Fig. 2 (d) では明瞭な物体像があらわれ、再構成像品質が向上している。このことから、提案手法の有用性が示された。

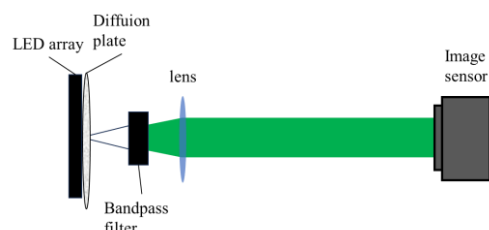


Fig. 1: Optical setup



Fig. 2: (a) Measurement object, and reconstructed image with (b) ADMM, (c) Region constraint adaptively fit to object shape, (d) Proposed method

[1] J. Bertolotti, *et. al.*, Nature **491**, 232 (2012). [2] J. R. Fineup, Opt. Lett. **3**, 27 (1978).

[3] J. Chang, *et. al.*, J. Biophotonics **11**, e201700224 (2018). [4] M. Liao, *et. al.*, Appt. Opt. **58**, 473 (2019).

ディープラーニングに基づく非視線方向の散乱イメージング における拡散媒体の位置推定

Deep Learning-Based Position Estimation of Diffusers

in Non-Line-of-Sight Scattering Imaging

立命館大理工, ○(M2) 山本 翔, 渡邊 歴

Ritsumeikan Univ., Kakeru Yamamoto, Wataru Watanabe

E-mail: re0178pf@ed.ritsumeai.ac.jp

1. はじめに

散乱媒体の奥にある物体を再構成する散乱イメージングの手法として、汎用性の高いディープラーニングを用いた手法が注目されている[1]。しかし、物体や拡散板が異なる位置に分布している場合や移動する場合、物体や拡散板の位置推定や再構成が困難となる。先行研究では、拡散板奥にある物体の深度推定[2]や拡散板の深度推定[3]が報告されている。本研究では、非視線方向散乱イメージングにおける、光軸と垂直方向に移動させた拡散板の位置推定について報告する。

2. 実験方法・結果

Fig. 1 に非視線方向散乱イメージングの実験光学系を示す。波長 632.8 nm の He-Ne レーザーより射出した光は、空間光変調器 (SLM : Spatial Light Modulator) によって強度物体として変調後、拡散角 10° の拡散板によって拡散する。拡散した光を白色拡散ガラスで拡散反射させ、スペックル画像として撮影した。拡散板は光軸と垂直方向に 10 mm の範囲内で 1 mm ずつ移動させた。Fig. 2 に位置推定結果を示す。全ての位置において、誤差 20 μm 以下の精度で位置推定が可能であった。拡散板の光軸と垂直方向の移動に対しても、本手法は高精度な位置推定が可能である。

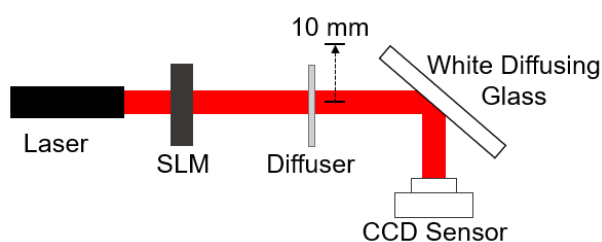


Figure 1. Schematic of the optical setup used for non-line-of-sight (NLOS) scattering imaging.

Position (mm)	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00
Speckle Image					
Estimated Position	0.01	1.00	1.99	3.01	4.00
Position (mm)	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00
Speckle Image					
Estimated Position	4.99	6.00	7.02	7.98	8.96

Figure 2. Results of diffuser position estimation

参考文献

- [1] Y. Li *et al.*: Optica **5**, 1181-1190 (2018).
- [2] S. Zhu *et al.*: Sensors **21**, 90 (2021).
- [3] K. Yamamoto *et al.*: Information Photonics 2025 (submitted).

Corrosion monitoring of 3D printed parts using hyperspectral imaging and spectral angle mapper

Rukundo SIMEON, Maria Merin Antony, Keerthi K and Murukeshan Vadakke Matham*

Centre for Optical and Laser Engineering, School of Mechanical and Aerospace Engineering,
Nanyang Technological University, Singapore, *E-mail: mmurukeshan@ntu.edu.sg

1. Introduction

Surface corrosion in 3D-printed parts compromises structural integrity and aesthetics, but current RGB-based inspection systems lack sensitivity for early-stage detection [1]. Despite ongoing efforts, an effective method to accurately identify and classify such defects remains limited [2]. This study proposes the integration of Hyperspectral Imaging (HSI) with the Spectral Angle Mapper (SAM) algorithm to enable automated, high-sensitivity detection of surface corrosion. By leveraging spectral signatures, HSI facilitates material differentiation and enhances

inspection precision [3].

2. Methods

Two 3D-printed Maraging steel samples with different corrosion levels were examined using hyperspectral imaging. The samples were scanned with a Pika-XC2 camera on a 100 $\mu\text{m/s}$ translation stage under halogen light (400–1000 nm), generating a 3D spectral data cube for non-destructive corrosion analysis (Fig. 1a and b). Spectral data were classified into five corrosion levels (classes) to build a reference library, which enabled detailed mapping of surface corrosion on each sample (Fig. 1c).

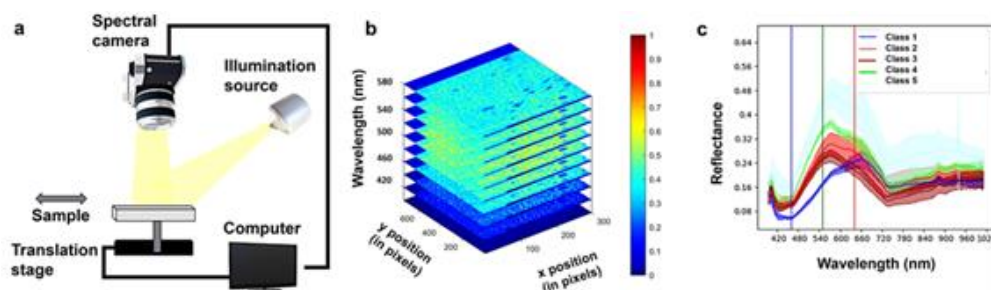


Fig. 1 a. Experimental setup for spectral imaging in reflection configuration and b. representative data cube and c. spectral library created

3. Results and discussion

The hyperspectral images of the two samples were classified using the SAM method by effectively identifying corrosion on the two sample surfaces, as illustrated in Fig. 2 a - d. The colour legend accompanying map the corrosion levels linked to corresponding spectra from each class, enabling the accurate and automated identification of corrosion level based on spectral library.

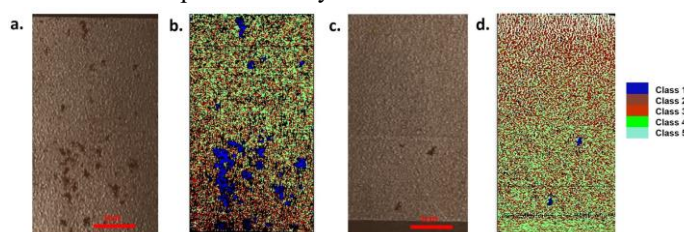


Fig. 2. a & c shows the RGB images of the 3D printed sample 1 and 2, b & d shows the SAM based corrosion mapping in 3D printed sample 1 and 2

It was observed that areas appearing corrosion-free in RGB images were classified as slightly (Class 2) or moderately corroded (Class 3) in SAM classified corrosion maps indicating sensitive detection. During the corrosion process, there is a dynamic redistribution of elements within the metal matrix. Iron atoms from the bulk metal can migrate towards the surface or accumulate in corrosion products, contributing to an enrichment of Fe in corroded areas.

References

- [1] J. R. C. Dizon, et al., Technologies, 9(3), 3, 2021.
- [2] D. A. Lesyk, et al., J. Mater. Eng. Perform., 30(9), 2021.

4. Conclusion

In conclusion, a non-destructive spectral imaging system with $\sim 250 \mu\text{m}$ lateral and $\sim 2 \text{ nm}$ spectral resolution has been developed to detect corrosion in 3D-printed samples with high sensitivity, with corrosion levels classified using the SAM algorithm to enable automation.

Acknowledgements: The authors acknowledge financial support received through COLE-EDB funding at NTU.

- [3] MM Antony, et al., Optics and Lasers in Engineering (2024), 178(1), 108238.

シングルピクセルを用いた光線方向場マッピング

Light direction field mapping with single pixel

(株)東芝¹ °岡 将太郎¹, 高梨 健太¹, 大野 博司¹

Toshiba Corp.¹ °Shotaro Oka¹, Kenta Takanashi¹, Hiroshi Ohno¹

E-mail: shotaro1.oka@toshiba.co.jp

1. はじめに

様々な製造工程の外観検査において、特に数 μm 以下の高低差の微小形状は、画像コントラストが小さくなるため識別が難しい。一方で、微小欠陥によって光線方向場 (BRDF ; Bidirectional Reflectance Distribution Function) が大きく変動することが知られており、その波長依存性にも微小欠陥の特徴が現れると考えられる。そこで、筆者らは、全視野内で BRDF の角度分布と波長依存性を同時にマッピングできる手法を開発した。

2. 開発した光学系

開発した光学系を図 1 に示す。DMD を光源として平行光を作り、試料へ垂直に入射する。試料表面で散乱した光は、ビームスプリッターとレンズを経由して分光器へ導かれる。分光器は、移動可能なステージの上に設置されており、光軸に対して垂直方向に移動することで BRDF を測定することができる。このとき、一度の測定で、分光器で測定可能な全ての波長に対して BRDF を得ることができる (今回の場合は、300nm から 1000nm まで、0.3nm 刻みで BRDF を取得することができた)。

3. 実験結果とまとめ

本光学系を用いて、ステンレス表面の微小キズを BRDF マッピングした。その結果を図 2 に示す。図中の実線はキズがない場所、破線はキズがある場所の測定結果であり、それぞれ代表的な 3 つの波長について結果を示している。本結果より、全ての波長において、微小キズのある領域では BRDF の角度分散が広がっていることがわかる。これにより、本手法により微小キズを検知できることを確認した。本手法は、さまざまな製造工程における外観検査に有効であると考えられる。

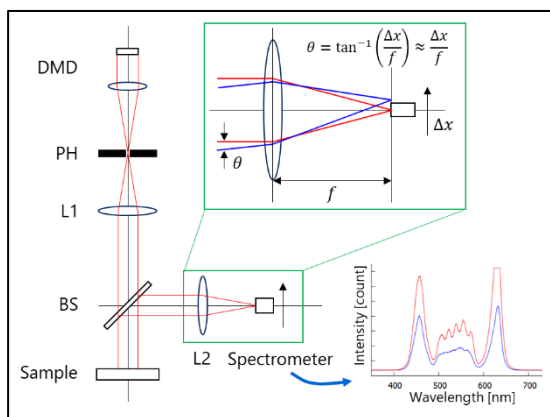


図 1 : 開発した光学系

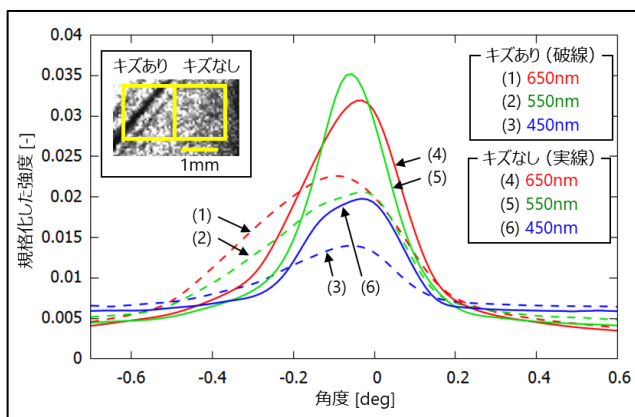


図 2 : ステンレス製試料の BRDF

デジタル走査照明を用いた光線方向場イメージング

Light-direction field imaging using digitally scanned beams

(株) 東芝 総合研究所 ○大野 博司, 高梨 健太, 岡 将太郎

Toshiba Corp. ○Hiroshi Ohno, Takanashi Kenta, and Shotaro Oka

E-mail: hiroshi1.ohno@toshiba.co.jp

さまざまな製造工程において製品の外観検査は重要であり、その自動化によって製造効率を向上させることへの需要が高まっている。しかし、製品表面の μm （マイクロメートル）スケールの微小欠陥は従来のカメラで鮮明化しにくいため、新たな撮像技術が望まれている。一方、微小欠陥からの反射光の方向分布（BRDF ; Bidirectional Reflectance Distribution Function）は、一般的に、標準面のものと僅かに異なることが多い。そのため、BRDF を捉えることで微小欠陥の検知が可能となると考える [1]。そこで、本研究では、デジタル制御で走査可能なスポット照明からの反射光をフーリエ面に投映することにより、BRDF の角度分布の詳細を広い視野で撮像する手法を提案する。

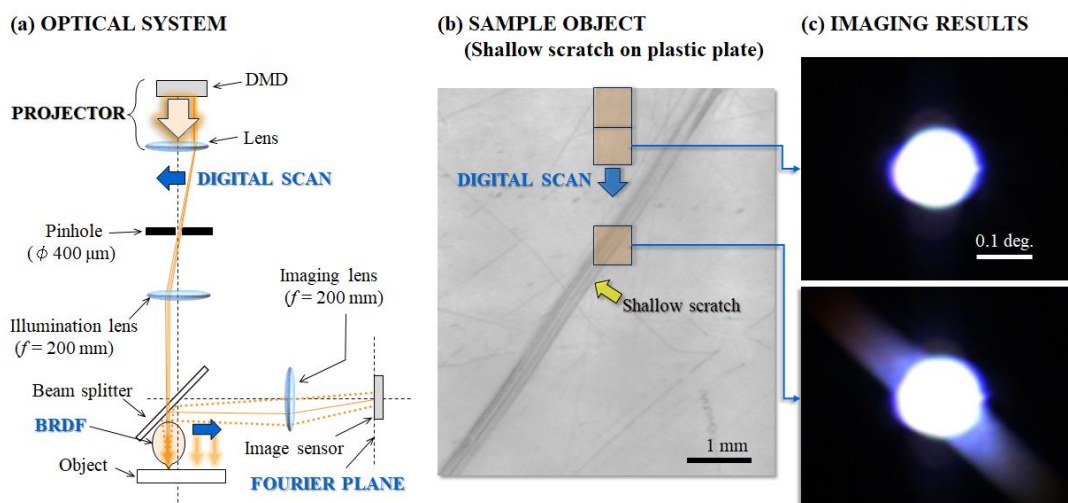


図 1 の(a)に、本光学系の模式図を示す。本光学系は、DMD (Digital Micromirror Device) からの光線群を、ピンホールによって光軸に平行な光線群へと変換する。また、DMD による光強度の空間変調により、物体面に照明スポットを形成し、それを走査する。さらに、撮像レンズのフーリエ面にイメージセンサーを配置し、BRDF を撮像する。これにより、全視野における光線方向場を取得できる。図 1 (b)に、プラスチック表面上の高低差が数 μm の微小欠陥 (shallow scratch) を示す。図 1 (c)に、本光学系により照明スポットをデジタル走査しながら、それぞれの照明スポットで BRDF の角度分布を撮像したものを示す。本図から、微小欠陥の BRDF は、異方性を持って広げることが確認できる。

以上により、本手法は、照射スポットをデジタル走査しながら光線方向場 (BRDF の場) を詳細に捉えることができ、 μm スケールの微小欠陥の検知に有効であると考えられる。

参考文献

[1] H. Ohno, "Digitally directed beams for microscale inspection," Optical Review 32, 396–401, (2025).

Lensfree On-Chip Quantitative Phase Microscopy

Chao Zuo

Smart Computational Imaging Laboratory (SCILab), Nanjing University of Science and Technology
(NJUST)

E-mail : zuochao@njust.edu.cn

Website : www.scilaboratory.com

Abstract:

Lensfree on-chip digital holographic microscopy (LFOCDHM) is an emerging computational optical imaging technique that offers quantitative phase contrast, high space-bandwidth product, and a compact, lensless architecture. These advantages make it particularly attractive for high-throughput imaging in biomedical research, materials science, and industrial inspection. Unlike conventional diffraction-limited systems, the resolution of LFOCDHM is influenced by multiple factors, including the spatial and temporal coherence of illumination, sample-to-sensor distance, finite pixel size of the sensor, and the limited numerical aperture in angular diversity during reconstruction. In this talk, we present a systematic exploration of these parameters to construct a “pixel-resolution-limited” LFOCDHM system. Building upon this foundation, we introduce several pixel super-resolution techniques designed to overcome pixel-size limitations and enhance imaging resolution. Finally, we discuss the potential of integrating optical diffraction tomography into the lensfree on-chip imaging platform to enable high-throughput, 3D label free imaging.

Tailoring the Stokes' Singularity using Enantiomeric Excess

Ankita Karmakar^{1*}, Maruthi M. Brundavanam¹

¹ Department of Physics, Indian Institute of Technology Kharagpur, West Bengal-721302, India

*E-mail: ankitakarmakar@kgpian.iitkgp.ac.in

1. Introduction

Optical Vortex (OV) beams characterized by orbital angular momentum (OAM) possess azimuthal phase variation and a phase singularity at the center [1]. Vector vortex beams (VVBs) are generated by the superposition of two orthogonally linearly polarized optical vortex (OV) beams having different topological charges (TCs) [2]. VVBs find application in optical communication [3], encryption [4], etc.

Stokes' singularity [5] of OVs has been studied over the past few decades. In this paper, we have experimentally demonstrated the generation of VVBs using a common-path technique and tuned the position of Stokes' singularity using an optically active (OA) medium.

2. Experimental details and results

The VVBs are generated using the setup as described in ref [2]. A phase profile corresponding to $TC = 1$ is provided on the screen of the phase-only spatial light modulator so that the generated VVB has equal intensities in the horizontal (H) and vertical (V) polarizations with $TC = 1$ and 0, respectively. The generated VVB is passed through an OA material, which is a mixture of dextro (d) and levo (l) rotatory limonene. The d and l-limonene rotate the plane polarized light by an angle same in magnitude but in the opposite direction. In the proposed method, the excess amount of one enantiomer, enantiomeric excess (EE) is changed to control the resultant rotation of the linear polarization. As a result, the generated VVBs have different relative contributions of the H and V polarizations. H and V polarizations are the singularities of the Stokes field $s = s_2 + is_3$ [6], where s_2 and s_3 are the normalized Stokes parameters. The EE of the OA material is varied from +100% (pure d rotatory) to -100% (pure l rotatory) where $EE = 0\%$ corresponds to racemic mixture (equal amount of d and l) and the corresponding intensity distributions in different polarization projections are captured using charged coupled device (CCD) for the Stokes polarimetry. Fig. 1(a)-(e) shows the polarization distribution over the beam profile for the generated VVBs with EE +100%, +50%, 0%, -50% and -100%, respectively. The C-points are marked with blue dots showing their fixed positions over beam

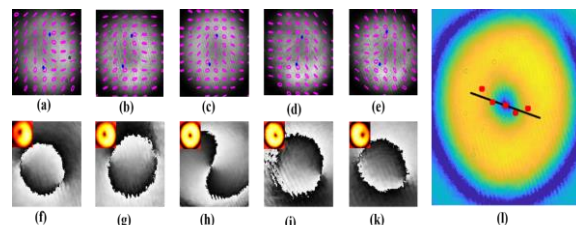


Fig 1: (a)-(e) Spatially varying polarization distribution with C-points shown in blue dots, (f)-(k) $\tan^{-1}(s_3/s_2)$ profile (inset: VVBs projected in the H state shows the position of Stokes' singularity), (l) simulation and experimental trace points of Stokes' singularity due to variation of the different EE.

profile irrespective of EE. The quantity $\tan^{-1}(s_3/s_2)$ plotted in Fig. 1(f)-(k) shows the position of the Stokes' singularity for the abovementioned EEs. The resultant VVBs are projected to H state and the corresponding intensity (inset of Fig. 1(f)-(k)) shows the change in position of the Stokes' singularity passing through the center of the beam. The simulated and experimentally obtained positions of the Stokes' singularity is plotted over the beam cross section as shown in Fig. 1(l). Due to the linearity of the curve, from the position of the Stokes' singularity, any unknown EE of the enantiomeric mixture can be estimated.

3. Conclusion

In conclusion, the position of the Stokes' singularity is controlled by changing the EE of the enantiomeric solution using a stable common path technique. The proposed method helps to determine any unknown EE from the position of the singularity.

Acknowledgement

AK thanks IITKGP for the fellowship.

References

- [1] L. Allen et al., Phys. Rev. A **45**, (1992) 8185.
- [2] B.K. Patra et al., J. Opt. Soc. Am. B **40** (2023) 3240.
- [3] B. Ndagano et al., J. Light. Technol. **36** (2017), 292.
- [4] J. Wang, Photon Res. **4** (2016), B14.
- [5] M. M. Brundavanam et al., Opt. Exp. **20** (2012) 13573.
- [6] I Freund et al., Opt. Lett. **27** (2002), 545.

Real-time microplastic detection using polarization digital holographic microscope

Mohit Rathor^{1*}, Vaishnavi Rawat², Arvind Kumar², Rakesh Kumar Singh¹

¹Laboratory of Information Photonics and Optical Metrology, Department of Physics, Indian Institute of Technology (BHU), Varanasi, Uttar Pradesh, 221005, India

²Department of Dairy Science and Food Technology, Institute of Agricultural Science, Banaras Hindu University, Varanasi-221005, India

E-mail: mohitrathor.rs.phy21@itbhu.ac.in

1. Introduction:

Microplastics (MPs), first identified in 1972 and defined by U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) as particles smaller than 5 mm, are either primary or secondary based on their origin [1]. Plastics like polyethylene (PE), polypropylene (PP), and PET dominate packaging due to their strength and light weight. However, extensive plastic use in packaging leads to significant environmental and ocean pollution [2].

Detection of microplastics (MPs) is crucial for healthcare and food quality inspection. Non-contact methods like polarization imaging (PI) and digital holography (DH) capture MPs' physical features, but have limitations individually. Combining DH's real-time amplitude and phase data with PI's leads to polarization information enhancement for comprehensive and effective MP analysis.

Here in this work, we introduce the polarization in the DH microscope called the polarization Digital Holography microscope (PDHM) for detecting MPs.

2. Experimental details:

A vertically polarized He-Ne laser beam is converted to diagonal polarization using a half-wave plate and then split into two beams by a beam splitter. One beam is a reference, passing through a Sagnac geometry to create two orthogonally polarized reference beams with different carrier frequencies. (γ_1, γ_2) [3]. The orthogonal components of the reference with position vector r are represented as,

$$E_R(r) = \hat{x} \exp(i\gamma_1 r) + \hat{y} \exp(i\gamma_2 r)$$

Another beam, called the object beam, passes through the sample and is imaged onto the camera plane via a 4f system with a 100X oil-immersion objective and a 200 mm focal length lens. The object beam is represented as

$$E_S(r) = \hat{x} E_{Sx}(r) + \hat{y} E_{Sy}(r)$$

Therefore, the intensity at the detector plane is represented as,

$$I(r) = |E_{Sx}(r) + \exp(i\gamma_1 r)|^2 + |E_{Sy}(r) + \exp(i\gamma_2 r)|^2$$

3. Results and Discussion:

An experimentally recorded polarization digital

hologram of MPs (PP and LDPE) is presented in Fig. 1 (a) & (f). The Fourier fringe analysis approach is used to reconstruct the orthogonal polarized components of the beam interacting with MPs, and results are shown in Figs 1(b)-(e) and 1(g)-(j). Figs. 1(b)-(c) and 1(g)-(h) show the amplitude of orthogonal polarized components for PP and LDPE simultaneously. The corresponding unwrapped phase distributions are shown in Figs. 1(d)-(e) & 1(i)-(j). Microscopic images reveal the spatial morphology and optical phase of orthogonal polarization states in MPs, providing complete real-time polarization information. Phase changes in these states indicate the anisotropic properties of the MPs

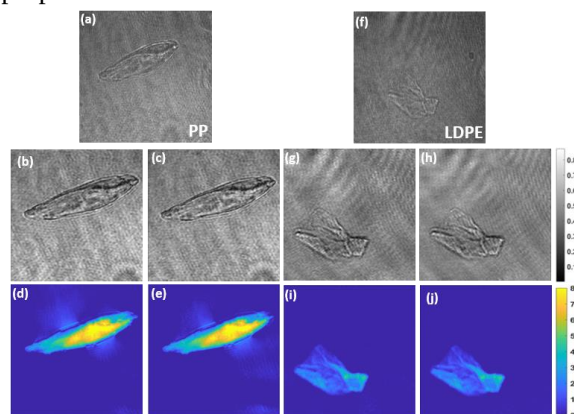


Figure 1 (a),(f) hologram of the PP and LDPE; (b),(c),(g),(h) and (d),(e),(i),(j) are amplitude and unwrapped phase corresponding to the orthogonal state for MPs.

4. Conclusion:

This paper presents a PDHM system for real-time recording and reconstruction of orthogonal polarization states to detect transparent microplastics. Experimental results confirm its effectiveness in identifying MPs' morphological and optical properties for quantitative detection.

5. Acknowledgement:

Supports are acknowledged from the Department of Biotechnology (DBT)-BT/PR35557/MED /32/707/2019 and I-DAPT IIT(BHU)(Grant: R&D/SA/I-DAPTIT(BHU)/PHY/23-24/ 495)

Reference

- [1] Boucher, J.; Friot, D. *Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources*; 2017.
- [2] Beswick, R.; Dunn, D. *Plastics in Packaging: Western Europe and North America*; 2002.
- [3] Rathor, M. *ACS Photonics* **10**(10), 3755–3762 (2023).

SWIR HSI based combustible detection for an improved wildfire warning system

Maria Merin Antony, Suchand Sandeep C. S. and Murukeshan Vadakke Matham*

Centre for Optical and Laser Engineering, School of Mechanical and Aerospace Engineering,
Nanyang Technological University, Singapore, *E-mail: mmurukeshan@ntu.edu.sg

1. Introduction

Wildfires are increasing in intensity and frequency, posing severe risks to life, infrastructure, and ecosystems [1]. Current detection methods often respond too late, after ignition or when fires are already difficult to control. This work proposes an early warning system focused on identifying areas with high combustible material content before ignition. By mapping these zones, preventive actions like fuel removal or fire barriers can be implemented. Such proactive strategies are critical amid rising global temperatures and UNEP's call for rethinking wildfire management. Current strategies are based on detection of flame or smoke [2].

Most of them alarms when the forest fire is initiated

which most of time makes the situation out of human control to put off the fire. Few techniques focus on the forest fire spread rates [3]. This manuscript discusses an approach to develop an early warning system based on the presence of combustible material. Such maps can help to remove the combustible material or make necessary steps such building fire barriers

2. Methods

Imaging setup for SWIR based HSI shown in Fig. 1a. The light used for illumination can be white light source or from the sun. SWIR HSI sensor with lens captures the images and the extracted data is analyzed and classified using a data processor.

3. Results and discussion

Figure 1 b shows the RGB image and classified image using SAM-SID algorithm. It can be seen from the SAM-SID map in Fig. 1c that the combustibles (dried areas of the leaf and parts of the foam are identified correctly.

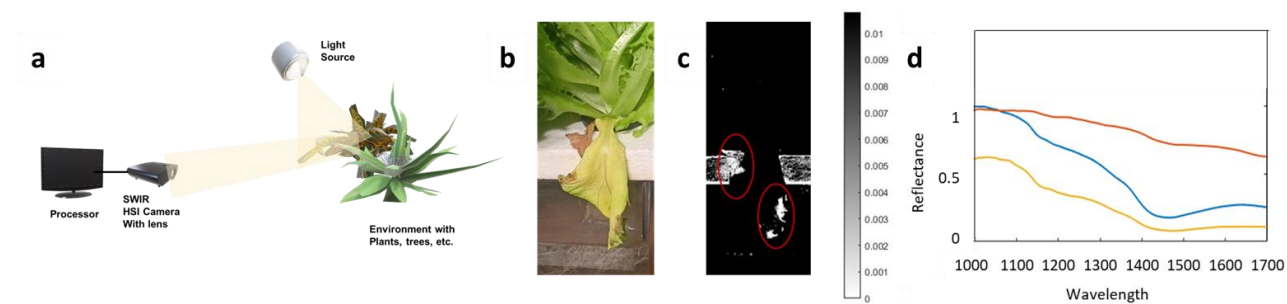


Fig. 1. a. Imaging setup for SWIR HSI to map combustible matter, Identification of combustible material b. RGB image c. SAM-SID mapping, d. Spectra from green (blue line), yellow (yellow line) and dry (red line) areas of leaf

Water content plays a key role in transforming incombustible material into combustible matter, which can be detected through changes in water absorption. Using a SWIR hyperspectral imager operating in reflection mode, we analyze samples such as partially dried leaves. Data is classified using the SAM-SID algorithm, which combines spectral similarity (SAM) and divergence (SID) methods for improved accuracy. This approach enhances early identification of combustible materials for wildfire

References

- [1] C. Fowler, Journal of Ecological Anthropology, 7 (1), pp. 39-63, 2003,
- [2] P. Barmpoutis, et al., Sensors (Basel), 20(22), 2020.

risk assessment.

4. Conclusion

An approach for prediction of early forest fire was discussed and illustrated. Development of the machine learning models incorporating dependence of other parameters such as temperature and topographical patterns forms the basis for future work.

Acknowledgements: The authors acknowledge financial support received through COLE-EDB and WiEST Development Grant funding at NTU.

- [3] G. Peruzzi, A. et al., Sensors (Basel), 23(2), 2023.

Observation of Tobacco-cultured Cells by using Three-dimensional Fluorescence Imaging Based on Transport of Intensity Equation and Prospects for Clarifying the Effects of Terahertz Waves on Cells

Shiori Matsuda¹, Safumi Suzuki¹, Wataru Watanabe², Osamu Matoba^{3,4}

¹ Institute of Science Tokyo, ² Ritsumeikan University,

³ Grad. Sch. of System Informatics, Kobe University, ⁴ OaSIS, Kobe University

E-mail: matsuda@ee.eng.isct.ac.jp

1. Introduction

Fluorescence imaging is a major tool to obtain arbitrary structural information of living organisms using fluorescent proteins. In recent years, three-dimensional (3D) fluorescence imaging based on the transport of intensity equation (TIE) has been used as a useful tool for acquiring such information [1]. However, quality of the acquired image is degraded due to scattering caused by the living tissues when observing the inside of a living body [2]. To address this issue, a research group at Kobe University has proposed a brand new method for which fluorescence imaging based on TIE and scattering imaging based on iterative phase retrieval are combined [3,4]. Three-dimensional structures inside a living body can be captured by removing effect of scattering. Furthermore, this fluorescence imaging technique is expected to play a significant role in elucidating the effects of electromagnetic stimulation on cellular biological functions. For example, it has been reported that high-intensity terahertz (THz) illumination increases the number of actin filaments in HeLa cells [5]. However, research into the effects of THz illumination on cells remains in its early stages and is not yet fully understood. Therefore, fluorescence imaging is essential for further investigation and clarification of these effects.

In this presentation, we report the remarkable results of observation of plant cells using 3D fluorescence imaging through scattering medium based on TIE. We also present our current considerations on the potential application of this imaging technique for observing changes in cellular activity under THz illumination.

2. 3D Fluorescence Imaging through scattering medium based on TIE

Our 3D fluorescence imaging method proceeds as follows. First, the phase distribution of a biological sample is measured by using TIE from three images acquired at different axial positions. Next, the complex amplitude distribution is reconstructed using the intensity distribution from the recorded images and the previously obtained phase distribution. In the final step, the complex amplitude distribution is numerically propagated to the focal plane, and the effects of scattering are mitigated using iterative phase retrieval. Tobacco-cultured cells labeled with GFP tubulin were used as biological samples in our experiment. Figure 1(a) shows the original image, which appears blurred due to scattering. Figure 1(b) shows the reconstructed image, revealing microtubule structures with improved clarity.

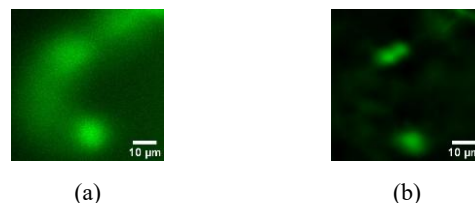


Fig. 1. Reconstruction of tobacco-cultured cells using the proposed method [3]. (a) Acquired image with scattering, (b) Reconstructed image with improved clarity.

3. Prospects for Fluorescence Imaging Combined with THz-illumination

Next, we introduce our current progress in investigating the effects of THz illumination on cellular activity using fluorescence imaging. Utilizing the system described in Section 2, we constructed a setup in which the sample is placed in a film-bottom dish and irradiated with a high-intensity THz signal from the bottom. Hereafter, we plan to use fluorescently labeled cells to observe cellular dynamics under both THz-irradiated and non-irradiated conditions through fluorescence imaging with eliminating thermal effect, aiming to elucidate the effects of THz exposure. In the presentation, we will share the latest progress of this study.

4. Conclusions

We introduced our 3D fluorescence imaging through scattering medium based on TIE. These researches have been extending to explore how THz-illumination affects cellular functions. Such studies are expected to lead to a deeper understanding of previously unexplored cellular functions.

Acknowledgements

This work was supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) KAKENHI (23KJ1570, 20H05886, 21H04663, 21K18724), CREST JPMJCR22P6, JST A-STEP JPMJTR204C. We would like to thank Dr. Takashi Murata for providing the tobacco-cultured cells.

References

- [1] S. Yoon, *et al.*, Nat. Rev. Phys. **2** (2020) 141-158.
- [2] S. K. Rajput, *et al.*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **27** (2021) 6800911.
- [3] S. Matsuda, *et al.*, Opt. Express **32** (2024) 10599.
- [4] S. Matsuda, *et al.*, Opt. Express **32** (2024) 23989.
- [5] S. Yamazaki, *et al.*, PLoS ONE **16** (2021) e0248381.

逐次型ゴーストイメージングによるオンライン画像再生

Online Image Reconstruction by Sequential Ghost Imaging

東大院総合文化¹ ○(D2) 槻 凌多¹、深津 晋¹

Grad. School of Arts and Sciences, UTokyo¹ ○Ryota Keyaki¹, Susumu Fukatsu¹

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

ゴーストイメージング (GI)[1] は空間分解能をもたない単画素検出器で対象 (マスク) を撮像するシングルピクセルイメージングのひとつである。その動作原理は、マスクの照明光と参照光に分岐した2光子対の間に発生する運動量の初期相関にある。これは像の面内位置に関して排他的な光強度ゆらぎの相関をもたらし最終的に空間情報が回復できる。一方、相関で信号を抽出するため高い雑音背景でも再生像 (ゴーストイメージ) が取得でき、センシング等の応用も期待される。

ところがGIでは、誤った位置に相関を見出してしまう偽相関による雑音が必然的に発生する[2]。このためゴーストイメージの信号対雑音比 (SNR) は照明数 N に対して $\sqrt{N}$ 程度しか改善しない。そのせいで高忠実度のゴーストイメージを取得したければ、 N を大きくせざるを得ず、長い測定時間を要する。したがって省リソース化の観点からは、GIが正常に動作していない初期の段階で測定を切り上げあげるのが得策である。この判断にはゴーストイメージの評価指数の N 依存性が有用である (図1(左))。しかし、照明数が N の時、ゴーストイメージ C_N を生成するために必要な計算量は $O(N)$ 程度であり、スケーラビリティが低い。この問題を解決すべく我々は、GIをオンラインアルゴリズム実装する逐次型GI (Sequential GI, SGI) を開発してきた[3]。SGIでは共分散などのアンサンブル平均に対して漸化式でゴーストイメージを記述する。これによって C_{N-1} から C_N を $O(1)$ で生成可能となり、優れたスケーラビリティが担保される。これまでは専ら時間ドメインでSGIとその評価を試みてきたが、今回は空間ドメインSGIの検証に成功したので報告する。実験ではシミュレーションと物理実装を試みた。DMDによりランダムなバイナリでパターンニングした520-nmレーザーダイオードの出力を照明光に用いた。レンズ系を用いて照明パターンをマスク上に結像し、透過光強度を単画素検出器で測定した。なお、今回のGIはコンピュータシミュレーション構成でDMDの入力データを参照光パターンに用いた。実装実験でSGIが C_{N-1} から C_N を計算するのに要した時間を図1(右)の青い線で示す。一方、赤の実線は、通常のGIで C_N を生成した計算時間である。線形回帰による傾きは0.99となって通常のGIによる $O(N)$ が確認された。これに対しSGIでは傾きが0.00045となって $O(1)$ が達成され、その特徴の高スケーラビリティが検証された。

本研究は、日本学術振興会特別研究員奨励費 25KJ1044 の支援を受けて実施された。

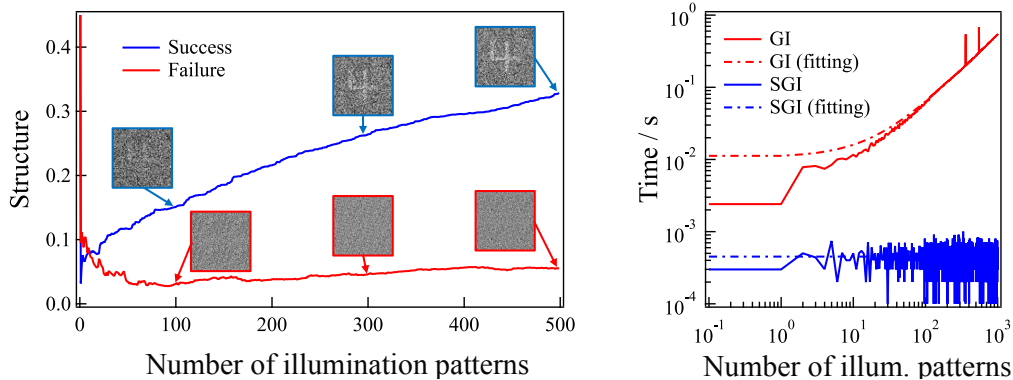


図1: (左) ゴーストイメージと評価指数の N 依存性. (右) C_N 生成の計算所要時間.

- [1] T. B. Pittman *et al.*, Phys. Rev. A **52**, R3429 (1995).
- [2] R. Keyaki and S. Fukatsu, Appl. Phys. Lett. **123**, 011101 (2024).
- [3] Y. O-oka *et al.*, The 78th JSAP autumn meeting, 5p-A413-9, Fukuoka (2017).

シングルピクセルイメージングに向けた 2 次元ファイバアレイを用いた アダマールマスク生成の基礎検討

Fundamental consideration on the generation of Hadamard masks using 2D fiber arrays for single-pixel imaging

神戸大院シス情 ○後藤 優太, 仁田 功一

Kobe University, °Yuta Goto, Kouichi Nitta

E-mail: goto.yuta@port.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

シングルピクセルイメージング(SPI)[1]は 2 次元イメージセンサを用いることなく計測対象の空間イメージングが可能である. そのため, 装置の簡易化や高速・高感度イメージングが可能となる. これまでに SPI を高速化しうる技術としてマルチコアファイバなどによって生成されるスペックルパターンを照明光として用いる方法[2-4]が提案されている. これらは光通信で用いられる高速な光変調器を応用することが可能なため, 高速にスペックルパターンを切り替えることができるが, 高い SNR 耐性を持つアダマールマスク[5,6]などを生成することは難しい.

本研究では 2 次元ファイバアレイを用いてアダマールマスクを生成し SPI を実現する方法を提案する.

2. 2 次元ファイバアレイをアダマールマスクの生成

図 1 に提案手法の構成図を示す. 本手法では, 2 次元正方格子状に配置されたファイバアレイと各ファイバに接続される光変調器または光スイッチを用いて空間的にパターン化された照明光を生成する. パターンの各空間位置に対応するファイバの光を光変調器によって「ON」または「OFF」を操作することによってパターンを生成する.

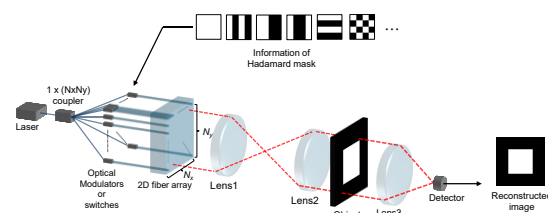


図 1 提案手法の構成図

3. 数値解析

測定対象は図 1 に示すような 16x16 のピクセル数の矩形開口パターンとした. また, 取得した光強度に加算性白色ガウス雑音(AWGN)を付加することでノイズがある環境下での測定を想定した. 図 2 に再構成された画像を示す. 図 4 によると, SNR が低いほど再構成画像が劣化しているが, SNR が 20dB 程度で矩形開口の形が判別できることがわかる. 2 次元ファイバアレイを用いて生成したアダマールマスクパターンによって正しく SPI が実行されることを確認した.

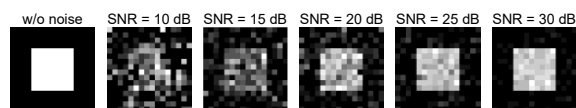


図 2 各 SNR における再構成画像

参考文献

1. M. F. Duarte *et al.*, IEEE Signal Processing Magazine, 25, 83-91, (2008).
2. R. Yamaguchi *et al.*, IEEE Access, 11, 55326, (2023).
3. C. Liu *et al.*, Opt. Express 26, 10048 (2018).
4. J. Hanawa *et al.*, Opt. Express 30, 22911 (2022).
5. Z. Zhang *et al.*, Opt. Express 25, 19619 (2017).
6. K. Shibuya *et al.*, Opt. Rev. 22, 897 (2015).

偏光多重同軸型シングルピクセルデジタルホログラフィの検討

Polarization multiplexed coaxial single-pixel digital holography

近畿大学 (M2) 松岡 真杜, 平岩 大輔, 吉田 周平

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

E-mail: 2433340455g@kindai.ac.jp

1. 序論

単一画素検出器を用いた波面計測の手法であるシングルピクセルデジタルホログラフィ (SPDH) [1] は高感度の計測が可能であり、バイオイメージングなどに応用されている [2]。SPDH では通常のシングルピクセルイメージング (SPI) と比較して、光学系の安定性や測定回数の増加といった問題があることが分かっている。

先行研究では並列位相シフト法を SPDH に適用することで、測定回数を削減する手法を検討し、その有効性を確認した [3]。一方で、光学系の安定性にはいまだ問題があった。本研究では安定性を向上した偏光多重同軸型 SPDH を検討した。

2. 原理

SLM で直交パターンに位相変調したのち、半波長板 (HWP) により 45° 直線偏光とした光と、円偏光をビームスプリッタ (BS) で合波し、これを照明光とする。円偏光は液晶リターダとミラーで生成する。照明光は偏光ビームスプリッタ (PBS) で分割し、それぞれフォトダイオードで強度を測定する。ただし、本稿では原理検証が目的であるためサンプルを用いずに干渉縞を計測した。

測定した光強度は位相が 90° ずれているため、それぞれを複素振幅の実部と虚部の成分として波面を再構成可能である。

3. 方法

本研究で作成した光学系を示す。レーザ光は HWP により 45° 直線偏光とし、BS により分割する。一方の光は液晶リターダを往復させることで位相を $\pi/2$ 遅らせて円偏光とした。もう一方の光は SLM により直交パターンで位相を変調する。SLM の液晶軸が 0° のため、BS と SLM の間に HWP を偏光調整のための設置している。2 つの光を BS で合波し、偏光ビームスプリッタ (PBS) で分割した後、それぞれの光強度を測定した。

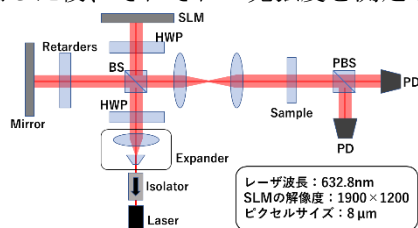


Fig 1. Optics of the proposed method

4. 結果・考察

以下に測定結果を示す。参考として先行研究 [3] で測定された球面波とともに示す。測定時の解像度を 64×64 、AD 変換のサンプリングレートを 50000kHz とし、1000 回分の計測値を平均して一つの照明パターンに対する光強度の計測値とした。また、SLM 上に表示するパターンを拡大して測定を行った。

	先行研究	提案手法
再構成画像		

Fig 2. Measurement results

先行研究で計測した球面波には横方向にノイズが載っていることが分かる。物体光と参照光の光路を分けた干渉計のため、空気の揺らぎやレーザの強度揺らぎによる影響を受けやすかったことが原因と考えられる。一方で、提案手法では同軸型の光学系のため、外乱の影響を抑えることができ、比較的ノイズの少ない再構成結果を得られた。

5. 結論

提案手法では安定性を向上させた同軸型の SPDH 光学系を検討した。提案手法では外乱からの影響を大幅に削減することでノイズの少ない結果を得られた。今後は試料を挿入した状態での計測に取り組む予定である。

参考文献

- [1] L. Martínez-León, P. Clemente, Y. Mori, V. Climent, J. Lancis, and E. Tajahuerce, "Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination," *Opt. Express* **25** (5), 4975–4984 (2017).
- [2] D. Wu, J. Luo, G. Huang, Y. Feng, X. Feng, R. Zhang, Y. Shen, and Z. Li, "Imaging biological tissue with high-throughput single-pixel compressive holography," *Nat. Commun.* **12** (1), 4712 (2021).
- [3] 平岩大輔, 吉田周平, 「並列位相シフト光学系を用いたデジタルゴーストホログラフィの検討」, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会 15a-K508-2 (2025)

多点検出による計算ホログラフィックゴースト回折の計測時間短縮

A Multi-point Detection Approach for Reducing Measurement Time

in Computational Holographic Ghost Diffraction

和歌山大院システム工¹, 和歌山大システム工² [○](M2)河合 慧太¹, 野村 孝徳², 最田 裕介²

Grad. Sch. Sys. Wakayama Univ.¹, Fac. Sys. Wakayama Univ.², [○]Keita Kawai¹, Takanori Nomura², Yusuke Saita²

E-mail: s256066@wakayama-u.ac.jp

フォトダイオードなどの点検知器を用いて物体の複素振幅分布を取得可能な手法の一つに計算ホログラフィックゴースト回折 (CH-GD: Computational Holographic Ghost Diffraction)がある[1]. CH-GD では, 空間光変調器に表示したランダムな位相パターンにより変調された光波が物体まで伝搬し, 参照光波として照射される. その後, 物体から伝搬してきた光波のうち一点の強度を点検知器により検出する. 同様の操作を位相パターンを変更して繰り返し, 参照光波の複素振幅分布と点検知器位置に対応する複素振幅との相関演算から物体の複素振幅分布を再構成する. ここで, 点検知器位置に対応する複素振幅を算出するために, 用いる位相パターンは 4 ステップ位相シフト法[2]を適用できるように作製されている. しかし, CH-GD では高品質な再構成像を得るために多くの測定回数が必要であり, 計測時間が長くなるという課題がある.

そこで, 本研究ではより少ない測定回数で高品質な再構成像を取得することを目的とし, 多点検出による CH-GD を提案する. 提案手法で用いる光学系を Fig.1 に示す. 提案手法では, 従来手法の光学系に複数の点検知器を加え, 一度のパターン照明に対して位置が異なる複数点の強度を検出する. その後, 従来手法と同様の手順により点検知器と同じ数の再構成像を取得し, それらの平均を算出する. 各再構成像には物体からの光波のうちそれぞれの点検知器位置に到達する成分の情報のみが含まれるため, 平均により情報量が増え, 再構成像品質の向上が期待できる.

提案手法の有用性を検証するために複素振幅物体の再構成像比較シミュレーションをおこなった. 提案手法では点検知器を 5 箇所配置した. また, 測定回数は従来手法が 20000 回, 提案手法が 10000 回とし, 再構成像品質を PSNR で評価した. Fig.2 に示す結果より, 強度分布および位相分布において提案手法の有用性が定量的に示された.

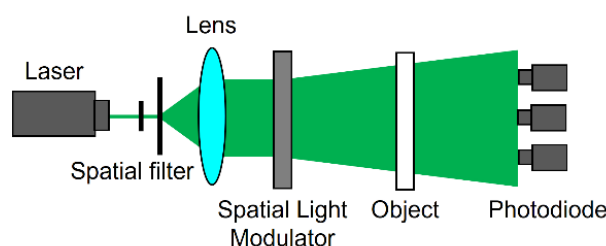


Fig. 1: Optical setup

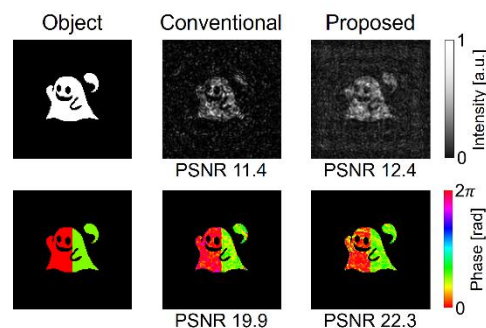


Fig. 2: Object and reconstruct images

[1] Z. Ye, *et al.*, Opt. Lett. **48**, 1618 (2023).

[2] I. Yamaguchi and T. Zhang, Opt. Lett. **22**, 1268 (1997).

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.2】 3.2 情報フォトンクス・画像工学、4.4 Information Photonicsのコードシェアセッション

[8a-N205-1~9] CS.2 3.2 情報フォトンクス・画像工学、4.4 Information Photonicsのコードシェアセッション

[8a-N205-1]

4ステップ一般化位相シフト法を用いた偏光符号化カラーディジタルホログラフィ

○大谷 遥香¹、野村 孝徳²、最田 裕介² (1.和歌山大院システム工、2.和歌山大システム工)

[8a-N205-2]

多重記録体積ホログラム導光板の色分散補正手法

○山川 大路¹、宇津木 健¹ (1.日立研開)

[8a-N205-3]

Artificial Intelligence for Global Optimization of Blind 3D Reconstruction from Time-of-Flight Cameras

○Keith Dillon¹ (1.Univ of Mississippi Med Ctr)

[8a-N205-4]

[JSAP-Optica Joint Symposia Invited Talk] Recent advances in optical methods and deep learning for sound field imaging

○Kenji Ishikawa¹ (1.NTT)

[8a-N205-5]

Deep Neural Network Modeling for Bidirectionally Excited Tamm Plasmon Polariton

○(D)Naseeb Abdu Taikkaden¹, Binu Jose A¹, Pranesh Das¹, Anirban Sarkar¹ (1.NIT Calicut)

[8a-N205-6]

Implicit Neural Representation of Light Fields via Decomposed Spatial Geometry and Color

○Jun Qiu¹, Ligen Shi¹, Chang Liu¹ (1.Beijing Information Science and Technology Univ.)

[8a-N205-7]

A Cascaded Classification Framework for Small Datasets with Data Augmentation Support

○(M2)Yen yu liu¹, Jia-Han Li¹ (1.Dept. of ESOE, Natl. Taiwan Univ.)

[8a-N205-8]

Agro Smart Tool for Crop, Fertilizer Predictor & Disease Detection Using Ai

○(DC)vikram palodiya¹, Sai Prasanna¹, p. Nokesh¹, v. Srikanth¹, Syed Jahangir Badashah¹
(1.Department of Electronics and Communication Engineering, Sreenidhi Institute of Science and Technology, Hyderabad, India.)

[8a-N205-9]

[JSAP-Optica Joint Symposia Invited Talk] Development of Incoherent Digital Holography System Based on Geometric Phase

○KiHong Choi¹, Keehoon Hong¹ (1.Electronics and Telecommunications Research Inst.)

4 ステップ一般化位相シフト法を用いた 偏光符号化カラーディジタルホログラフィ

Polarization-coded color digital holography

using generalized sequential 4-step phase-shifting method

和歌山大院システム工¹, 和歌山大システム工² ◯(M2)大谷 遥香¹, 野村 孝徳², 最田 裕介²

Grad. Sch. Sys. Wakayama Univ.¹, Fac. Sys. Wakayama Univ.², ◯Haruka Oya¹, Takanori Nomura², Yusuke Saita²

E-mail: s256050@wakayama-u.ac.jp

ディジタルホログラフィは計測物体の奥行情報を含む 3 次元空間情報を取得できる技術の一つである。複数の波長情報をもつホログラムを同時取得できる手法として、これまで偏光符号化カラーディジタルホログラフィ [1] を提案してきた。この手法では、複数波長のコヒーレントな光波をそれぞれ異なる直線偏光に符号化 [2] し、複数の波長情報をもつホログラムを取得する。これに対して、波長情報復号および光波の伝搬計算をおこなうことにより、複数波長かつ任意の奥行位置における再生像が取得可能である。しかし、ホログラムに対して単に光波の伝搬計算をした場合、再生像には所望の物体像のほかに、非回折像や共役像といった不要な像が重畳する。これらを除去する手法として、これまで off-axis 法 [3] を用いてきたが、利用できる空間帯域幅積が狭いため、再生像の画質が低くなるという問題があった。この問題に対して、より画質の高い再生像を取得できる 4 ステップ位相シフト法 [4] の適用を検討してきた。4 ステップ位相シフトを用いることにより、空間帯域幅積がより広くなるため、再生像の画質向上が期待できる。しかし、位相遅延素子には波長依存性があり、波長により位相シフト量が異なってしまうため、提案手法に応用する場合、一定の位相シフト量を必要とする 4 ステップ位相シフト法を適用することができない。この課題を解決する手法として、4 ステップ一般化位相シフト法 [5] の適用を提案する。これにより、任意の位相シフト量を用いることができるため、光源ごとに位相シフト法が異なる場合においても不要光の除去が可能である。

Fig. 1 に示す光学系を用いて原理検証実験をおこなった。位相遅延素子である移動ミラーは基準位置から 3 μm まで 1 μm ずつ走査し、合計 4 枚のホログラムを取得した。計測物体を Fig. 2 (a) に、提案手法により取得された再生像を Fig. 2 (b) に示す。Fig. 2 より、物体に対応した波長情報をもつ文字の概形が認識できることがわかる。したがって、提案手法の有用性が定性的に示された。

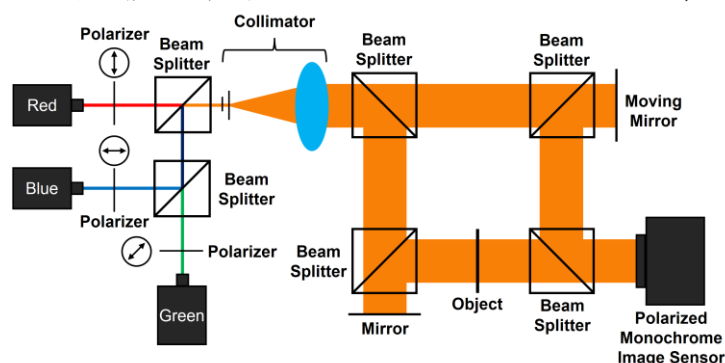


Fig 1: Optical setup



Fig. 2: (a) An object to be measured and (b) a reconstructed image

[1] 大谷他, 日本光学会情報フォトンクス研究グループ第 22 回関西学生研究論文講演会 (2024).

[2] S. Ono, Opt. Express **28**, 34536 (2020).

[3] E. N. Leith and J. Upatnieks, J. Opt. Soc. Am. **52**, 1123 (1962).

[4] I. Yamaguchi, *et al.*, Opt. Lett. **27**, 1108 (2002).

[5] T. Nomura and K. Shinomura, Appl. Opt. **56**, 6851 (2017).

多重記録体積ホログラム導光板の色分散補正手法

Color Dispersion Compensation

for Volume Holographic Multiplexed-Mirror Waveguide

日立研開 °山川 大路, 宇津木 健

Hitachi, Ltd.

°Hiromichi Yamakawa, Takeru Utsugi

E-mail: hiromichi.yamakawa.th@hitachi.com

拡張現実技術の進展に伴い、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)市場の拡大が期待される。小型・軽量かつ視認性の高い HMD を実現するため、薄い光学素子で広視野角を実現できる多重記録型の体積ホログラム導光板を開発している[1]。この導光板は、所定方向以外の光を透過する体積型ホログラムの特性を生かすことで高い透過性を実現できる。一方、導光板媒体の屈折率色分散などの要因により、波長に応じて映像光の投射される方向が異なる場合、色ずれが生じて映像の表示分解能が劣化する課題がある。本研究では、この課題を解決することを目的として、映像光の波長ごとに最適なホログラムを記録する補正手法を検討した。

図 1 に、多重記録ホログラムの記録装置の概略図を示す。本手法では、図 1(a)に示すように、ミラーによって導光板に照射される記録光の入射角度を変えて、干渉縞間隔の異なるホログラムを多重に記録する。ここで、屈折率色分散を補正するため、図 1(b)のように、ゴニオステージによってそれぞれの記録ごとに導光板の角度を変えてホログラムの角度を調整する[2]。図 2(a,b)に、それぞれ色分散補正前の場合(a)と、補正後の場合(b)における HMD の映像表示結果を示す。本手法により、400 mdeg の横方向色ずれ量を実用レベルである 40 mdeg にまで抑制した。また、色分散のほか、記録装置の調整誤差によっても縦方向の色ずれが発生することがわかった。誤差を小さくすることで、縦方向の色ずれ量についても 635 mdeg から 45 mdeg に抑制できることを確認した。この結果により、高い透過性に加え高精細な映像表示を可能とする HMD の実現が期待される。

参考文献

- [1] T. Utsugi et al., "Volume Holographic Waveguide Using Multiplex Recording for Head-Mounted Display." ITE Transactions on Media Technology and Applications 8.4 (2020): 238-244.
- [2] 宇津木健、山川大路、「導光板、導光板の製造方法、及び、それを用いた映像表示装置」、特許第 7210496 号

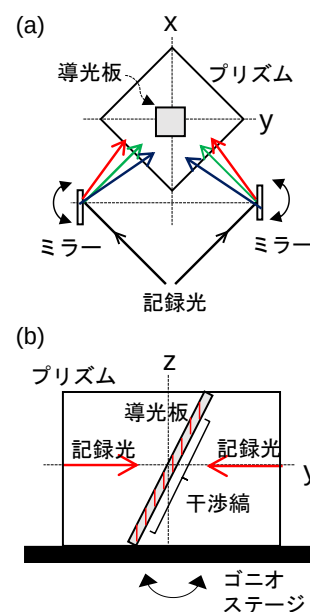


図 1 記録装置の概略図
(a)top view (b)side view

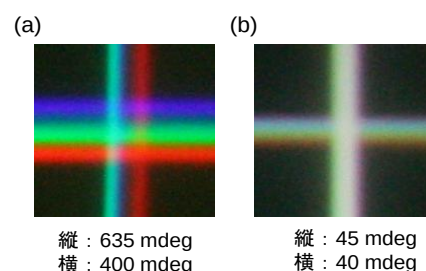


図 2 映像表示結果と色ずれ量
(a)補正前 (b)補正後

Artificial Intelligence for Global Optimization of Blind 3D Reconstruction from Time-of-Flight Cameras

Keith Dillon¹

¹Univ. of Mississippi Medical Ctr.
E-mail: kdillon@umc.edu

We describe an approach to blind 3D reconstruction that combines AI-based assessment of the scene with local optimization for accurate reconstruction. This enables global optimization that does not require accurate ground truth in calibration or a good starting point for parameters. The approach can be used for initial calibration as well as continual online calibration and reconstruction.

1. Introduction

Traditional 3D reconstruction methods solved an inverse problem via optimization; given noisy 2D projections or depth maps, estimate the most probable 3D structure and sensor parameters by minimizing an error metric. These methods relied heavily on priors, good starting estimates, and regularization to stabilize the ill-posed nature of the problem. Machine learning brought a new paradigm, namely data-driven networks trained to map observations directly to 3D scene and parameter estimates. However, this does not take advantage of expert knowledge and requires vast amounts of training data.

Several approaches seek to combine the advantages of traditional tools with powerful data driven models [1]. Recent Generative Pretrained Transformer (GPT) models promise general knowledge based on vast training datasets. Retrieval-Augmented Generation (RAG) [2] systems are used to provide specialized applications by augmenting GPT models with databases and tools. We describe such an approach here; conventional optimization is used as a sub-routine guided by RAG-selected constraints and data.

2. Methods

We use the dataset from [3]. For the Visual Language Model, we utilize intensity images which can be accessed from a time-of-flight camera by summing all channels. Example images are given in Figure 1.

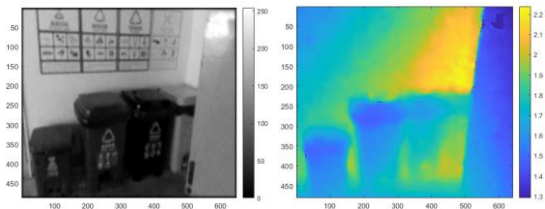


Figure 1. Example intensity image (left) and depth image (right) from time-of-flight camera [3].

The system is described in Figure 2, where the se-

quences of video images is treated as the database (or long-term memory) for the RAG system. For the visual language model, we used the Gemini model ([4]) which supports both text and image prompts. This model used by the system as a supporting “lab assistant” to perform high-level tasks based on a general understanding of the scene, such as identify successive images which appear to be related, i.e., of the same scene and include similar objects, and to provide a rough estimate of the changes between the images, to be used as a starting point for optimization. A sliding window of select related images are then passed to the local optimizer for accurate reconstruction and update of intrinsic parameters.

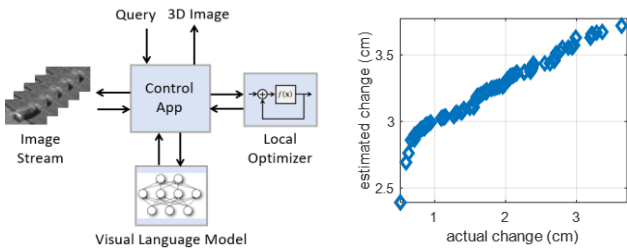


Figure 2. Diagram describing system components and interaction (left); net performance for intrinsics estimation (right).

3. Results and Conclusions

The Visual Language Model proved over 96 percent accurate at determining scene changes. Estimating initial pose estimates was more of a challenge as the model was overconfident in its ability to perform detailed calculations, despite often producing nonsensical results. Best results were achieved by casting the prompt as basic scene understanding. From that starting point, accurate optimization results could be consistently achieved. Future work includes providing the ability to directly consume and compare depth images rather than using intensity images, as well as supporting different types of cameras via new optimization tools added to the system.

References

[1] Keith Dillon, Proc. SPIE 12675, Appl. of ML (2023) 126750Z.
[2] Lewis, Patrick, et al. Adv. Neural IPS. **33** (2020): 9459-9474.
[3] Li, Yijin, et al. ECCV (2022) 619-636.
[4] <https://gemini.google.com>

Recent advances in optical methods and deep learning for sound field imaging

NTT¹ °Kenji Ishikawa

E-mail: ke.ishikawa@ntt.com

Optical methods offer unique advantages for measuring sound fields, including non-invasiveness, high spatial resolution, and the ability to access complex acoustic environments. Over the past decade, advances in acousto-optic sensing have enabled the visualization and reconstruction of sound fields using light, giving rise to a new frontier at the intersection of optics and acoustics. Techniques such as laser Doppler vibrometry, digital holography, and parallel phase-shifting interferometry have made it possible to detect the spatial distribution of sound pressure with high fidelity.

In parallel, recent developments in deep learning have opened new possibilities for enhancing optical sound field measurements. By incorporating data-driven priors and physics-informed approaches, neural networks have demonstrated significantly improved performance over conventional methods in denoising, super-resolution, and tomographic reconstruction of three-dimensional fields.

This talk will provide an overview of recent advances in optical imaging of sound fields, with a focus on both experimental techniques and signal processing methods. High-speed camera-based sound field imaging (Fig.1) can be extended to a variety of data processing tasks by leveraging deep learning frameworks developed for image processing and training data generated through acoustic simulations. By bridging optical sensing, acoustics, and deep learning, these approaches offer a promising pathway toward non-contact, high-resolution measurement tools for scientific and industrial applications.

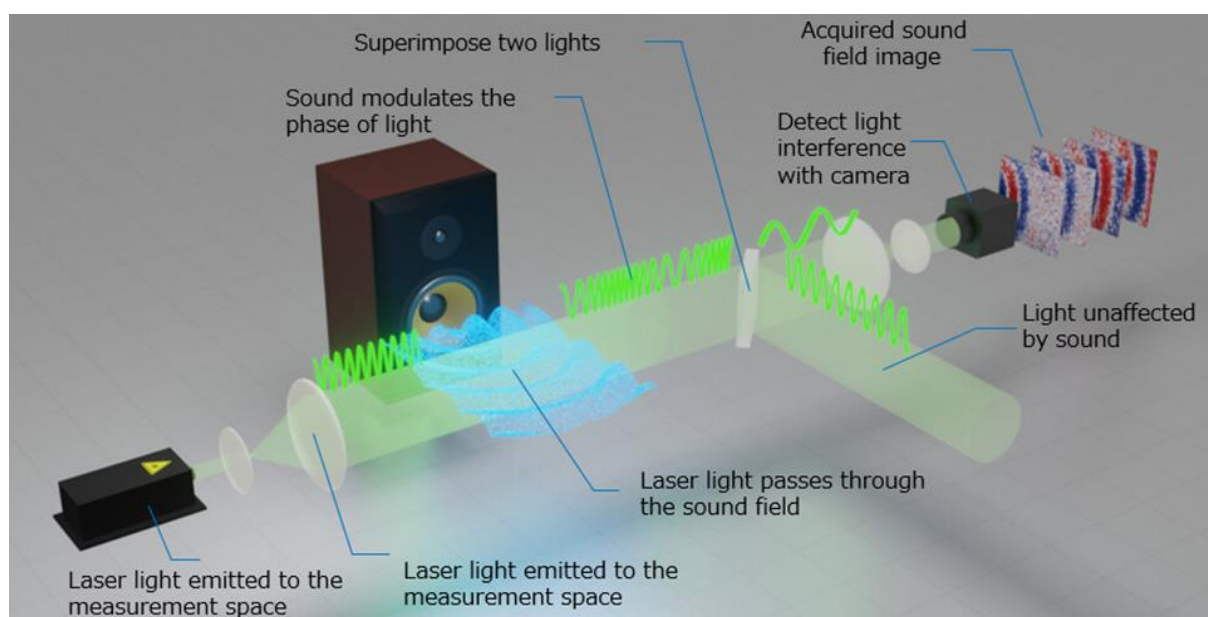


Fig.1 Illustration of optical sound-field imaging system

Deep Neural Network Modeling for Bidirectionally Excited Tamm Plasmon Polariton

Naseeb Abdu Taikkaden¹, Binu Jose A.², Pranesh Das², Anirban Sarkar^{1*}

¹Department of Physics, National Institute of Technology Calicut, Kerala, India

²Department of Computer Science and Engineering, National Institute of Technology Calicut, Kerala, India

*E-mail: anirban@nitc.ac.in

1. Introduction

Tamm plasmon polariton (TPP) confinement at metal-dielectric interface can be enhanced by various approaches. Simultaneous bidirectional excitation of TPP is a feasible approach for its enhanced confinement in a fixed metal-distributed Bragg reflector (DBR) structure when suitable combination of wavelength and phase difference is known. The complexity arises due to the abundant combinations of the parameters that change the confinement quality and to choose an appropriate one becomes tedious. In this regard, deep learning helps to overcome this challenge by training a deep neural network (DNN) to develop an optimized model to predict the desired confinement quality.

2. Methodology

The proposed TPP structure is a 7 bi-layered DBR, where the bi-layer is composed of TiO_2 ($n_1=2.40$, $d_1=60$ nm) and SiO_2 ($n_2=1.45$, $d_2=100$ nm), coated with silver (Ag) film on it. We assume that the metal behaves in accordance to Drude-Lorentz Model [1, 2]. The structure is simulated using COMSOL Multiphysics software for bidirectional excitation of the TPP. Electromagnetic (EM) waves each with input power $P_{\text{in}} = 0.5$ W and transverse Electric (TE) polarization are used to excite the structure simultaneously from both sides for different combinations of wavelength values λ within the range of 655 nm to 665 nm with a step size of 1/30 nm and phase difference values ϕ in the range of 0 to 2π rad with a step size $\pi/150$ rad. For each combination of λ and ϕ , a normalized electric field distribution $|E|$ inside the structure, represented by

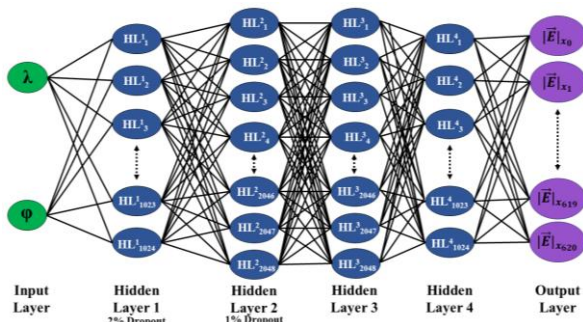


Fig. 1. Proposed DNN Architecture

621 points, is evaluated. Likewise, 90601 sample data are generated for various combinations of (λ and ϕ). The schematic of the proposed DNN is

shown in Fig. 1. The DNN has input layer with two neurons for λ and ϕ , followed by four hidden layers with dropouts for the first two layers, and an output layer with 621 neurons to predict the corresponding $|E|$ field. It is trained with Adam optimizer along with the mean absolute error (MAE) as the cost function. The DNN is trained for 25 epochs.

3. Results

The DNN model is optimized with a very high accuracy of more than 99% for all the test dataset. An instance of prediction for target sample $\lambda = 660.5$ nm and $\phi = 5.7386$ rad) from test dataset is shown in Fig. 2.

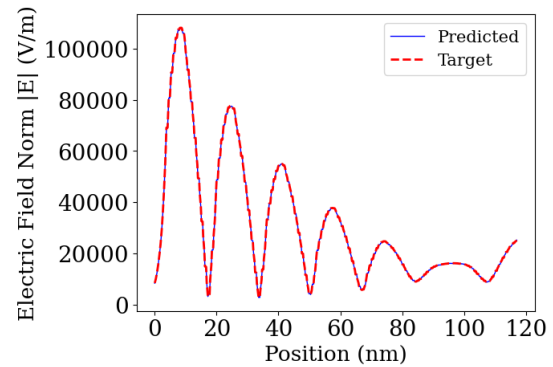


Fig. 2. Comparison of $|E|$ prediction by optimized DNN model against the target.

4. Conclusion

A DNN model for predicting the TPP confinement due to bidirectional excitation with different input wavelengths and phase differences is developed with more the 99% accuracy for a desired structure. The results would help in determining the optimal combination of parameters that can provide maximum field enhancement of a TPP mode in a specific metal-DBR structure, which can be utilized in developing novel TPP based devices.

Acknowledgements

SERB (Grant: SRG/2023/001940), NIT Calicut (Grant: NITC/(R&C)/2023-24/FRG/Phase III/(9)).

References

- [1] A. D. Rakić *et al.*, Appl. Opt., **37**(22), 5271–5283, (1998).
- [2] L. Li *et al.*, Sci. Rep., **12**(1), 14921 (2022).

Implicit Neural Representation of Light Fields via Decomposed Spatial Geometry and Color

Jun Qiu, Ligen Shi, Chang Liu

Institute of Applied Mathematics, Beijing Information Science and Technology University, Beijing, 102206
E-mail: qiu.jun.cn@ieee.org

Abstract

Light-field (LF) cameras [1] have significantly advanced imaging and microscopy by capturing richer multi-dimensional information than conventional 2D images, enabling applications such as depth estimation and digital refocusing. However, the inherent trade-off between spatial and angular resolution remains a key limitation. LF capture both spatial

and angular information under a narrow field of view. Under ideal conditions, disparity propagation from the central view allows for warping to generate other sub-aperture views. However, occlusions and view-dependent effects often hinder this propagation.

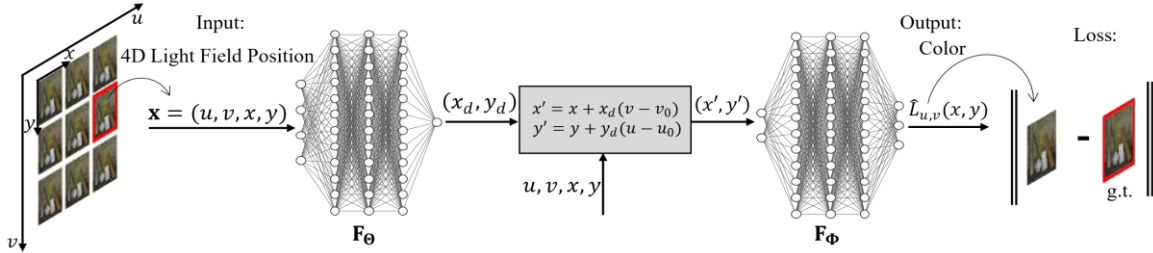


Fig. 1 Architecture of the proposed neural light field model, which consists of a spatial geometry field network $\mathbf{F}_\theta$ and a color field network $\mathbf{F}_\phi$. Both networks use Multiresolution Hash Encoding[2] and MLPs. Given spatial-angular coordinates (u, v, x, y) , $\mathbf{F}_\theta$ predicts offset vectors (x_d, y_d) for warping, which are then passed to $\mathbf{F}_\phi$ to generate the corresponding sub-aperture view.

To address this, we decompose the LF into spatial geometry and central-view color components, modeling geometry as two orthogonal offset vectors (x_d, y_d) . When $x_d = y_d$, the offset correspond to conventional disparity; otherwise, they represent a locally optimal matching displacement. In the proposed Implicit Neural Representation (INR), the LF is decomposed into two implicit neural networks: a spatial geometry field network $\mathbf{F}_\theta$ that learns the spatial offset field, and a color field network $\mathbf{F}_\phi$ that models scene radiance from the central view. These networks are defined as:

$$\mathbf{F}_\theta: (u, v, x, y) \rightarrow (x_d, y_d), \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_\phi: (x, y) \rightarrow L_{u,v}(x, y). \quad (2)$$

Based on spatial-angular consistency, we construct a differentiable neural LF by composing these two fields, enabling a decomposed and interpretable LF representation. For any sub-aperture view $L_{u,v}(x, y)$ is generated by querying the color field at the offset location:

$$\mathbf{F}_\phi(x + x_d \cdot (u - u_0), y + y_d \cdot (v - v_0)) = L_{u,v}(x, y), \quad (3)$$

where (x_d, y_d) are the offset vectors predicted by $\mathbf{F}_\theta$, and (u_0, v_0) denotes the central-view. The overall architecture of the proposed model is illustrated in Fig. 1.

A two-stage training strategy is adopted to improve learning stability and to disentangle the color and geometry

components. In the first stage, the $\mathbf{F}_\phi$ is trained using the central-view to learn radiance under a narrow view. In the second stage, the $\mathbf{F}_\theta$ is optimized using additional sub-aperture views to approximate a continuous view-propagation function. This strategy improves training stability and facilitates the learning of a continuous LF representation.

Experimental results on LF datasets [3] demonstrate that our method effectively parameterizes the LF and achieves high-quality spatial and angular super-resolution. Compared to existing methods(e.g., SIGNET[4], RSEN[5]), our model requires fewer parameters and does not rely on large-scale training data. The main limitation lies in the lack of cross-sample generalization, requiring the model to be retrained for each new LF data. Future work will focus on improving the unified training scheme to achieve more efficient neural LF modeling.

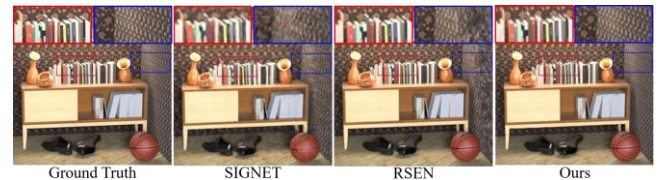


Fig. 2 Visual effect comparison of the sideboard scene: 2× super-resolution results from dataset [2].

References

- [1] Levoy, Marc, and Pat Hanrahan, Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries, 2 (2023) 441-452.
- [2] Müller, Thomas, et al., TOG, 41.4 (2022) 1-15.
- [3] Honauer, Katrin, et al., ACCV 2016, (2016) 20-24.
- [4] Feng, B. Y., and Varshney, A., IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, (2021) 14224–14233.
- [5] Attal, B., Huang, et al., IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (2022) 19819–19829.

A Cascaded Classification Framework for Small Datasets with Data Augmentation Support

Yen-Yu Liu and Jia-Han Li*

Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, Taipei 106319, Taiwan
E-mail: r12525093@ntu.edu.tw, *: jiahan@ntu.edu.tw

1. Introduction

Sea turtles play a pivotal role in marine ecosystems, and monitoring individual turtles is essential for effective conservation and resource management. “TurtleSpot Taiwan” [1], a citizen-science platform in Taiwan, can let the volunteers manually match scale photographs to identify turtle individuals. However, this process is time-consuming and prone to subjective error. To enhance identification efficiency and accuracy, this study proposes a three-level, data-augmentation-assisted classification system specifically designed for sea turtle recognition. By classifying images in sequential stages, the pipeline reduces manual workload and accelerates processing. We further compare and evaluate the performance of three deep-learning architectures, YOLOv5, YOLOv7, and YOLOv8, across these tasks.

2. Methodology and results

In this study, we first gathered a total of 3,040 left-side facial images of sea turtles from the “Turtle Spotter” citizen-science platform, Kaggle, iStock, and News.com.au. We then discarded any samples that were blurred or poorly aligned, and split the cleaned dataset into training, validation, and test sets in an 8 : 1 : 1 ratio. All images were uniformly cropped to 640×640 pixels to ensure consistency of model inputs.

Figure 1 shows the modeling training phase and identification phase. To implement a fully automated recognition pipeline, we developed an interactive, cascaded classification system that invokes three separately trained YOLO [2]models in sequence: Class A distinguishes species, Class B counts the scales beneath the left eye, and Class C identifies detailed facial features. During training, we compared YOLOv5, YOLOv7, and YOLOv8 architectures under identical settings (batch size = 18, input size = 640×640, SGD optimizer, and early-stopping with patience = 50) to balance convergence speed and overfitting control.

Moreover, we applied three augmentation strategies—Gaussian noise, CutMix[3], and their combination—to boost Class C performance by increasing data diversity and reducing overfitting. All models achieved Precision, Recall, and F1-score above 0.94 on Class A and B. On Class C, YOLOv8’s mAP₅₀ improved from 0.3682 (no augmentation) to 0.7243 with Gaussian noise, 0.4320 with CutMix, and 0.7553 with the combined approach, under-scoring the effectiveness of data augmentation. Our pipe-line thus provides fast, preliminary classifications to support downstream manual verification.

Augmentation	Precision	Recall	mAP ₅₀
No augmentation	0.3166	0.5394	0.3682
CutMix	0.3393	0.5066	0.4320
Gaussian Noise	0.6331	0.6617	0.7243
Gaussian Noise+CutMix	0.6484	0.7985	0.7553

3. Conclusions

The proposed three-level classification system successfully reduced the pool of candidate images to under 20% of the original dataset and achieved over 98% accuracy on both the species and scale-count classification tasks. For fine-grained facial feature recognition, combining CutMix with Gaussian noise augmentation significantly improved the model’s performance on small-sample classes. Future work will focus on incorporating additional augmentation methods and planning field deployments to validate the system’s robustness in real-world marine environments.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to Prof. I-Ting Hsieh for his insightful discussions, constructive feedback, and continuous encouragement throughout the development of this work. His guidance played a key role in shaping the direction and refinement of this research.

References

[1] TurtleSpot Taiwan, TurtleSpot Taiwan: Sea Turtle Photo Identification Platform, <https://turtlespottw.org/>
[2] Wang, C.-Y., Bochkovskiy, A., & Liao, H.-Y. M. “YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors.” arXiv preprint arXiv:2207.02696 (2022).
[3] Yun, S., Han, D., Oh, S. J., Chun, S., Choe, J., & Yoo, Y. “CutMix: Regularization strategy to train strong classifiers with localizable features.” Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) (2019): 6023–6032.

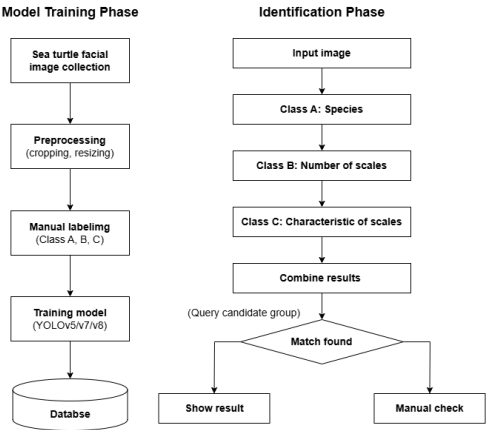


Fig1: Training (left) and inference (right) workflows for facial recognition.

Agro Smart Tool for Crop, Fertilizer Predictor & Disease Detection Using Ai

Vikram Palodiya¹, Sai Prasanna², Nokesh³, Srikanth⁴, Syed Jahangir Badashahh⁵

^{1,2,3,4,5}Sreenidhi Institute of Science and Technology, Department of ECE,
Yamnapet, India-501301.

E-mail: vikram.p@sreenidhi.edu.in

Abstract— Choosing the right crops is tough due to erratic weather, uneven soil, and lack of modern tools, leading many farmers to rely on outdated methods. This results in poor yields or crop failure, often caused by improper fertilizer use or unexpected rain. The Soil-Based Crop Profiling Framework is a desktop application that recommends the best crops and fertilizers based on soil nutrients and rainfall forecasts, helping farmers make smarter decisions.

1. Introduction

Agriculture is the primary livelihood for millions in India. However, many farmers struggle to increase crop productivity. Key challenges include understanding soil health, choosing the right fertilizers, adapting to changing rainfall patterns, and selecting suitable crops. Even within the same region, soil and climate can vary widely, making crop planning complex.[1]

Farmers must consider factors like soil pH, nutrient levels, and rainfall — without access to expert tools or analysis. Many rely on traditional practices or guesswork, which often leads to poor yields or total crop failure. To address these issues, we developed a user-friendly mobile application that gives smart crop and fertilizer recommendations.

Farmers input soil test results, and the system analyzes data to suggest the best crops for their land.[2]

This tool is especially helpful for those unaware of their soil's nutrient content or which crops to grow. It uses real-time environmental and soil data to improve farming decisions. We trained the model using public datasets that link crops with their nutrient needs. A Support Vector Machine (SVM) algorithm compares input data with the trained model Based on this, it recommends both suitable crops and seasonal fertilizers to increase yield and soil health.[3]

2. Theory

We built a simple mobile tool to help farmers make better choices using AI. It takes real soil and weather data to suggest the best crops and fertilizers. Machine learning models, trained on agricultural datasets, power its recommendations. For crop diseases, it lets farmers upload plant photos and get instant diagnoses. Behind the scenes, advanced AI models like SVM and CNN do the heavy lifting.[4]

The web page is easy to use, even for those without tech knowledge. It also explains its suggestions, so users know why a certain crop or fertilizer is recommended. In short, it brings smart farming to the fingertips of everyday Indian farmers.[5]

3. Result



Fig. 1: Crop recommendation

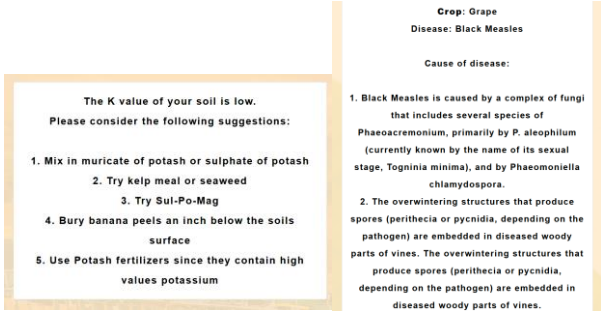


Fig. 2: (a) Fertilizer predictor, (b) Disease detection

The *Agro Smart* tool helps farmers pick the right crop for their land by analyzing soil and climate. It also recommends appropriate fertilizer when soil nutrients are deficient. If plants get sick, they can upload a leaf photo and the app suggests what’s wrong and how to fix it.

4. Conclusions

In conclusion, *Agro Smart* is a user-friendly yet powerful tool designed to help farmers make smarter choices about crops, fertilizers, and plant health. It’s easy to use and gives quick, reliable advice based on real data. The interface explains how and why each recommendation is made, which builds user trust. Helping build trust. In the future, it will get even better—with features like buying suggested products, farmer-shared leaf images, and smarter explanations. Step by step, it’s growing into a helpful companion that supports farmers in improving their harvests, solving everyday challenges, and making farming more efficient and informed.

References

[1] G. A. Miller, "WordNet: A lexical database for English," *Commun. ACM*, vol. 38, no. 11, pp. 39–41, 1995.
[2] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks," in *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 25, 2012.
[3] J. Liu and X. Wang, "Plant diseases and pests detection based on deep learning: A review," *Plant Methods*, vol. 17, p. 22, 2021.
[4] Y. Ferentinos, "Deep learning models for plant disease detection and diagnosis," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 145, pp. 311–318, 2018.
[5] M. Tan and Q. V. Le, "EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks," in *Proc. Int. Conf. Mach. Learn.*, 2019, pp. 6105–6114.

Development of Incoherent Digital Holography System Based on Geometric Phase

Kihong Choi* and Keehoon Hong

Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, 34129, South Korea

E-mail: kihong08@etri.re.kr

Abstract

This study introduces an incoherent digital holographic recording system utilizing geometric phase (GP) lens and polarization-based phase-shifting techniques. GP lens function as both wavefront modulators and phase-shifters, while color polarization image sensors enable real-time full-color holographic video acquisition. Deep learning-based image enhancement addresses noise and resolution issues from low-light conditions and polarization sensors.

As holographic spatial light information processing technology continues to advance, we are witnessing remarkable systemic and algorithmic innovations. Particularly in the aspect of acquiring holograms to generate content, various developments have been made continuously. Precise holographic measurement systems using lasers are already widely used in industry. However, there are many limitations to acquiring hologram content through daily use of lasers, and there are constraints in applying this technology to fields such as fluorescence imaging, which is widely used for bio sample analysis. To address this, incoherent digital holography technology has been developed, and systems utilizing various technologies have been proposed [1-5].

Essential components for constructing an incoherent digital holography system include wavefront modulators and phase-shifting modules. Among these, the phase-shifting module is necessary to remove bias and twin image noise that are inevitably generated as a result of interference, though it may not be needed if an off-axis type system is configured. However, to fully utilize the spatial bandwidth provided by sensors and promote systematic simplicity, it is preferable to use an on-axis type system. For wavefront modulators, traditional interferometer structures such as Michelson interferometers can be used [2], or common-path modulation based on polarization can be performed using birefringent elements. Representative polarization-based wavefront modulators include phase-only spatial light modulators [1], LC GRIN lenses [3], birefringent crystals or lenses [4], and geometric phase (GP) [5,6] and metalenses.

In this presentation, we aim to introduce the development process of incoherent digital holography technology using GP lenses and geometric phase-shifting in particular. Initially, GP lens served only as wavefront modulators [5]. However, we discovered that GP lenses can also function as

phase-shifters when combined with front and rear polarizers, exploiting the geometric phase generated by angular differences between polarizing elements. Additionally, for real-time full-color hologram acquisition, we introduced color polarization image sensors to propose a very compact full-color holographic video camera, as shown in Fig. 1 [6].

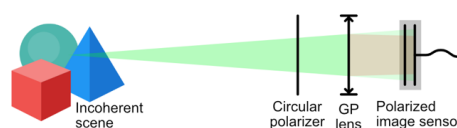


Figure 1. Schematic illustration of GP lens based incoherent hologram recording system.

Through this series of studies, technology has been secured to conveniently acquire full-color video holograms in daily life, but there is still a long way to go in terms of image quality. However, if the quality of acquired holograms improves further to be comparable to the quality of photographs we normally take, this technology is expected to be useful as a content acquisition system for very attractive future holographic displays.

Acknowledgement

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2019-0-00001, Development of Holo-TV Core Technologies for Hologram Media Services);

References

- [1] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," *Opt. Lett.* 32, 912-914 (2007)
- [2] K. Hong and K. Choi, "Single-shot phase-shifting on Michelson interferometry for incoherent digital holography," *ETRI Journal* 47 (2025)
- [3] T. Nobukawa, et al., "Design and fabrication of metasurface towards high-definition complex amplitude measurement," *Proc. SPIE PC13389* (2025)
- [4] T. Tahara, et al., "Natural-light full-color motion-picture holography," *Adv. Photon. Nexus* 4(3) 036006 (2025)
- [5] K. Choi, et al., "Achromatic phase shifting self-interference incoherent digital holography using linear polarizer and geometric phase lens," *Opt. Express* 26, 16212-16225 (2018)
- [6] K. Choi, et al., "Compact self-interference incoherent digital holographic camera system with real-time operation," *Opt. Express* 27, 4818-4833 (2019)

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.2】 3.2 情報フォトンクス・画像工学、4.4 Information Photonicsのコードシェアセッション

[8p-N205-1~6] CS.2 3.2 情報フォトンクス・画像工学、4.4 Information Photonicsのコードシェアセッション

[8p-N205-1]

深層学習によるデノイズ機能を内在した
自己参照型ホログラフィックメモリのための効率的な学習手法の検討

○江藤 優太¹、富岡 莉生¹、高林 正典^{1,2} (1.九工大情報工、2.九工大Neumorphセンター)

[8p-N205-2]

強度輸送方程式を用いたシングルショットベクトル光波イメージング手法の検討

○山本 悠貴¹、下村 優¹、小倉 裕介¹ (1.阪大院情)

[8p-N205-3]

Investigation on Photonic-Electronic Hybrid Convolutional Neural Network using Multi-Layer Metasurfaces and Photonic Integrated Circuit

○(D)Chiyun Li¹, Chun Ren¹, Takahiro Suganuma¹, Takuo Tanemura¹ (1.The Univ. of Tokyo)

[8p-N205-4]

多面光波変換を用いた劣二次スケーラブルな行列積近似演算器

○田口 富隆¹ (1.東京大学大学院)

[8p-N205-5]

音響FDTD法による3D共鳴構造の音圧場の可視化と音の生成

○蓮見 航大^{1,2}、茨田 大輔^{1,2} (1.宇大光工学、2.宇大CORE)

[8p-N205-6]

深度動画データののためのカラーマッピングの提案

○蓮井 翔太¹、茨田 大輔² (1.宇大光工学、2.宇大CORE)

深層学習によるデノイズ機能を内在した 自己参照型ホログラフィックメモリのための効率的な学習手法の検討

Efficient Training Method for Self-Referential Holographic Data Storage

with Built-in Denoising Function by Deep Learning

九工大情報工¹, 九工大 Neumorph センター² ◯(M2) 江藤 優太¹, (D) 富岡 莉生¹, 高林 正典^{1,2}

Kyushu Inst. of Tech.¹, Neumorph Center, Kyushu Inst. of Tech.²,

◯Yuta Eto¹, Rio Tomioka¹, Masanori Takabayashi^{1,2}

E-mail: takabayashi@phys.kyutech.ac.jp

自己参照型ホログラフィックメモリ (SR-HDS: Self-Referential Holographic Data Storage) は, ホログラフィックメモリにおける一光束実装手法の一つである[1]. また, 同一の光学系で深層ニューラルネットワークを実装する自己参照型ホログラフィック深層ニューラルネットワーク (SR-HDNN: Self-Referential Holographic Deep Neural Network) も提案されている[2]. 我々は最近, SR-HDS と SR-HDNN を融合し, SR-HDNN によるデノイズ機能を内在する SR-HDS を提案しているが[3], 再生データページのピクセル数が増加すると学習に要するコストが増大するという課題があった. 本稿では, 再生データページをデノイズ効果が実証されている小領域に分割し, 一領域で得られた学習結果を全体に適用する局所学習手法を提案する.

提案手法の有効性を確認するため, 数値シミュレーションを実施した. まず, SR-HDS における記録再生シミュレーションにより, ピクセル数が 32×32 , 64×64 , 128×128 の再生データページを取得した. 次に, 各データページを 16×16 ピクセルのブロックに分割し, 左上のブロックに着目してノイズ特性を分析した. この結果に基づき, 同様のノイズ特性を持つ再生データページを人工的に生成し, 学習用データと

して 1400 組のペア画像を用意した. さらに, SR-HDS のシミュレーションで得られた 100 枚の再生データページを SR-HDNN に入力し, 出力結果の SNR (Signal-to-Noise Ratio) を評価した. その結果, Fig. 1 に示す通り, 32×32 , 64×64 , 128×128 のすべての場合において SNR の向上, すなわちデノイズ効果が確認された. これは, 再生データページの一部領域で学習した結果を全体に適用可能であることを示唆している. したがって, データページ内のノイズ特性が均質であれば, ページサイズに依存しない低コスト学習が可能であるといえる. 以上より, 提案する局所学習手法の有効性が示された.

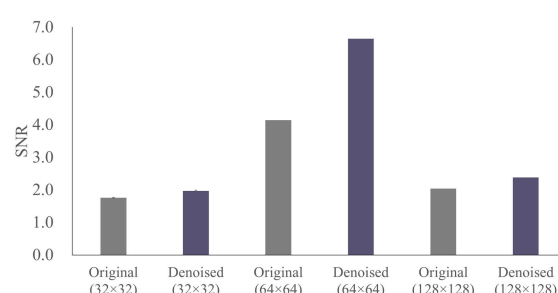


Fig. 1. SNR of original and denoised datapages.

参考文献

- [1] M. Takabayashi and A. Okamoto, Opt. Express 21, 3, pp. 3669-3681(2013).
- [2] R. Tomioka and M. Takabayashi, Opt. Rev., 30, pp. 387-396 (2023).
- [3] Y. Eto, R. Tomioka, T. Takatsu and M. Takabayashi, Opt. Rev., (in press).

強度輸送方程式を用いたシングルショットベクトル光波 イメージング手法の検討

Single-shot vector wavefront imaging method using transport-of-intensity equation

阪大院情, °山本 悠貴, 下村 優, 小倉 裕介

The Univ. of Osaka °Yuki Yamamoto, Suguru Shimomura, Yusuke Ogura

E-mail: y.yamamoto@ist.osaka-u.ac.jp

光強度, 位相, 偏光 (ベクトル光波) の同時イメージングは, 物質の形状や構造特性解析において重要な役割を果たす. 我々はこれまで強度輸送方程式 (TIE) と偏光カメラを組み合わせたベクトル光波イメージング手法を検討してきた[1]. TIE は強度分布の軸方向変化から位相を回復する非干渉位相計測法であり, 光学系の安定性や構成の簡便さに優れる. TIE は単一露光で複数の偏光強度分布を取得できる偏光カメラとの組み合わせにより, ベクトル光波の同時イメージングを効率的に実装できる. しかし従来手法では, 位相, 偏光を得るために必要な画像を逐次的に撮影する必要があり, 動的対象の観察への適用には制限があった. 本研究では, シングルショット偏光 TIE を実現するため, 回折格子を導入した光学系を設計し, 基本機能の一つである位相計測特性をシミュレーションにより調べた.

設計した光学系を Fig. 1 に示す. サンプル出射光は直後に配置された透過型回折格子により 0 次光と±1 次光に分離される. +1 次回折光に対しフーリエ面のレンズ L_c で位相を操作することにより焦点外強度分布を生成する. ここで, 焦点外距離は Fig. 1 中の式(1)に相当する. -1 次光は四分の一波長板 (QWP) を通過させて偏光を変調し, 偏光解析に用いる. 像面上に形成されるこれらの回折像を単一の偏光カメラで同時に撮像することで, 所望の光強度画像を一度に取得する. 0 次光, +1 次光を用いた 2 平面の前方差分により軸方向強度微分値を推定し, TIE で位相分布を回復する. 一方, 0 次光, -1 次光の各偏光成分の強度から, 各位置における偏光状態を求める. 以上の手順により, ベクトル光波イメージングを実行する.

設計した光学系の動作を確認するため, 波動光学に基づくシミュレーションを実施した. Fig. 2(d)の位相分布を持つ光波の光学系通過をモデル化し, 像形成を数値的に再現した. Fig. 2(a)-(c)は像面 (偏光カメラ面) での強度分布を示しており, (a)は全体の強度分布, (b)は 0 次光, (c)は+1 次光の強度分布である. これらの分離された強度分布に TIE を適用することで, Fig. 2(f)に示す位相分布が回復された. 回復された位相分布は自由空間伝搬の計算結果 (Fig. 2(e)) と類似しており, シングルショット化の実現可能性が示された.

本研究は JSP 科研費 (JP20H05886) の助成を受けたものである.

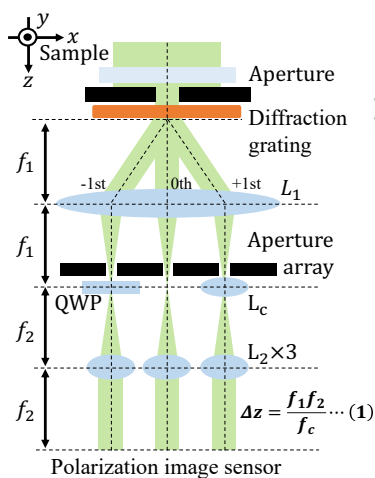


Fig. 1 Designed optical system

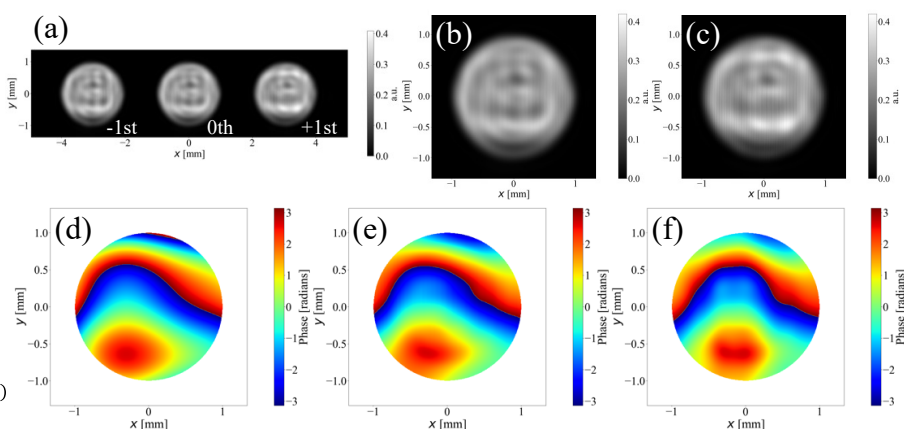


Fig. 2 (a) Overall, (b) 0th-order, (c) +1st-order images. Phase distributions: (d) at sample, (e) by free-space propagation, and (f) retrieved by TIE.

参考文献

- [1] Y. Yamamoto, S. Shimomura, Y. Ogura, "Vector wavefront imaging using transport-of-intensity equation with a polarization camera", Proc. of BISC 2025, JS2-04, April 2025.

多層メタサーフェスと光集積回路を用いた 光電ハイブリッド畳み込みニューラルネットワークの検証 Investigation on Photonic-Electronic Hybrid Convolutional Neural Network using Multi-Layer Metasurfaces and Photonic Integrated Circuit

○李池雲, 任淳, 菅沼貴博, 種村拓夫 (東大院・工)

°Chiyun Li, Chun Ren, Takahiro Suganuma, and Takuo Tanemura (The Univ. of Tokyo)

E-mail: chiyun.li@tlab.t.u-tokyo.ac.jp

【背景】深層ニューラルネットワーク (DNN) の規模および応用範囲の急速な拡大に伴い、モデルのパラメータ数と演算量、特に推論の計算時間と消費電力が飛躍的に増大している[1,2]。従来の GPU ベースの推論システムの代替手段として、光演算の可能性が探究されている。なかでも、波長以下の微細散乱構造を高密度に集積したメタサーフェス (MS) は、光が透過するだけで大規模な畳み込み演算を無電力かつ超高速に実現できるため、近年急速に注目を集めている。これまで、MS をイメージセンサーに接続した光電ハイブリッド NN 等が提案され、有効性が実証されている[3,4]。一方、これらのアプローチは、イメージセンサー上の多数のピクセルを使用するため、高速化と省電力化には限界がある。

本研究では、このようなメタサーフェス (MS) を複数使用し、更にプログラム可能な光集積回路 (PIC) を融合することで、光電変換部とデジタル NN の処理を大幅に軽減した光電ハイブリッド畳み込み NN (CNN) を提案する。多層 MS からなる複数の畳み込み層と PIC により可変制御性を両方用いることで、電気段でのデジタル処理の規模を大幅に削減しながらも高い分類精度を維持できることを数値検証より明らかにした。

【提案手法】Fig. 1(a)に、提案する NN 構成を示す。入力画像信号を多層 MS に入射し、光学畳み込み層により特徴量を抽出する。第一および第二畳み込み層がそれぞれ低次特徴および高次特徴を抽出する。空間解像度と出力数は層を追うごとに縮小され、最終的に少数 (本稿では 25 個) のグレーティングカップラを介して PIC に結合する。位相シフタから構成されるプログラマブルな PIC 内では、任意の積和演算を行った後に、受光器 (PD) アレイにより光電変換される。今回は、入出力数が高々 32 のシリコン PIC [5] を想定した。電気領域では、小規模 (32 入力程度) のデジタル信号処理により非線形活性化関数と全結合層を適用して分類結果を出力する。

【計算結果】多層 MS による光学 CNN の層数および PIC の有無を変えながら、パディングされた 32×32 ピクセル (1024 入力) の MNIST 画像を用いて分類精度を評価した。PIC の入力、出力数をそれぞれ 25 と 32 に設定し、活性化関数には ReLU を用い、出力クラス数を 10 に固定した。Fig. 1(b)に結果を示す。多層 MS により光学 CNN の層数を増やすことで、正答率が向上することが分かる。さらに、可変 PIC を導入することでより正答率が向上し、3 層の光学 CNN との組み合わせで最大 96.3% の正答率を達成した。多層 MS により 1024 入力データが 1/40 以下のデータに高効率に圧縮され、ワンチップに集積可能な 25 入力 32 出力規模の PIC を用いても十分な正答率が得られることを明らかにした。PD 数とデジタル NN 規模が 32 にまで削減され、大幅な省電力・低遅延化が期待される。

参考文献 [1] LeCun et al. Nature 521, 436 (2015). [2] Mennel, L. et al. Nature 579, 62 (2020). [3] Wei, K. et al. Sci. Adv. 10, eadp0391 (2024). [4] Luo M. et al. Las. Photon. Rev. 18, 2300984 (2024). [5] Ren, C. et al. CLEO, Long Beach (2025).

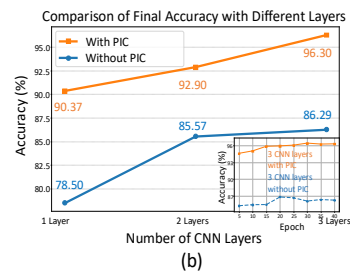
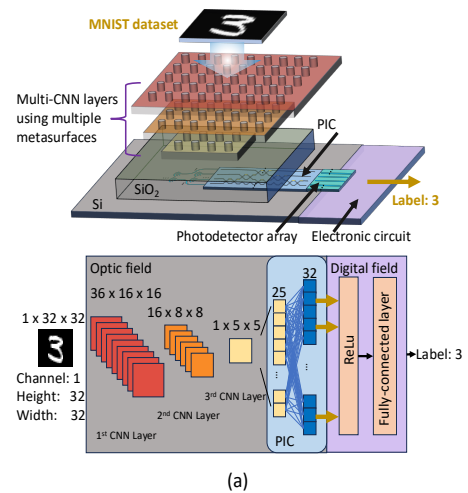


Fig. 1 (a) Photonic-electronic NN inference framework, and (b) Comparison of test accuracy across different models.

多面光波変換を用いた劣二次スケーラブルな行列積近似演算器

Sub-quadratic scalable approximate matrix multiplier using multi-plane light conversion

東大院工¹ ○田口 富隆¹

Univ. Tokyo¹, ○Yoshitaka Taguchi¹

E-mail: ytaguchi@ieee.org

光による行列積演算は、その省エネルギー性や低いレイテンシから機械学習分野での応用が期待されている。プログラマブルな演算器デバイスは行列が持つ自由度と同じ数の変調器を必要とし、扱うモード数の二乗に比例した変調器が最低でも必要になる。変調器の数を減らすため、機械学習モデルを光デバイスに合わせる研究が行われてきた [1]。本研究では、多面光波変換 (MPLC: multi-plane light conversion) を用いて近似演算を目的とすることで、既存の機械学習モデルを変更せず二乗より優れたスケーリングを示す行列積近似演算器を構成し、文章分類モデルを題材とした数値シミュレーションで実証を行ったので報告する [2]。

図 1 に、MPLC 型行列積演算器の構成を示す。緑点線で挟まれた部分が変換器の各段を示しており、赤の四角で表されたモードごとの位相シフタと、黒の四角で表された $2N$ モードミキサから構成される。 $2N$ モード全体でこのデバイスはユニタリ変換器として振る舞うが、このうち N モードを使用することで一般的な行列積演算器を取り出すことができる。合計段数は m である。 N モード線形変換が持つ自由度と、段数 $m = N + 1$ の変換器の自由度が等しいため、従来は $m = N + 1$ として研究が行われてきた。図 2 に、段数 m を変えながら行列最適化に L-BFGS 法を適用した場合の行列の誤差の関係を示す。縦軸は行列の誤差の中央値を、横軸は $m/(N + 1)$ を表す。段数が $m = N + 1$ より少ない場合は誤差が入るが、許容される誤差に応じて段数を調節することで近似演算器として振る舞うことを示唆している。図 3 は行列要素の最大誤差の 99 パーセンタイルと必要な段数の関係を示し、この近似演算器は $m = N + 1$ の場合と比較して劣二次のスケーリングを示すことがわかる。 $N = 32$ の近似演算器を文章分類モデルに適用すると、精度劣化を 3.2% に抑えつつ、もとの半分の数の演算器でモデルを実行できることが数値シミュレーションにより分かった。

以上のように、MPLC 構造がスケーラブルな近似行列積演算器として振る舞うことを示し、その特性を数値計算により評価した。詳細は公演で報告する。

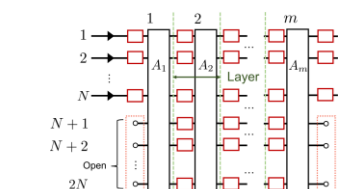


図 1 MPLC 構造の概略図。赤四角: 位相シフタ、黒四角: モードミキサ

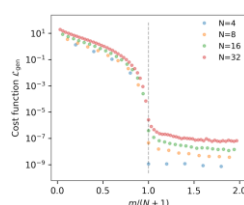


図 2 段数と行列誤差の関係。
 $m/(N + 1) < 1$ が近似演算領域。

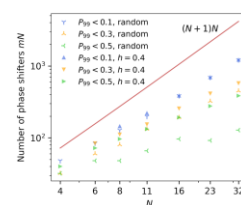


図 3 最大誤差 99 パーセンタイルに応じた必要な位相シフタ数。

参考文献

[1] G. Cong *et al.*, Nat. Comm., **13**, 3261 (2022)

[2] Y. Taguchi, arXiv:2412.11515 (2025)

音響 FDTD 法による 3D 共鳴構造の音圧場の可視化と音の生成

Acoustic FDTD-based Visualization and Sound Generation in 3D Resonant Structures

宇大光工学¹, 宇大 CORE² ○ 蓮見 航大¹, 茨田 大輔^{1,2}

Opt. Eng., Utsunomiya Univ.¹, CORE, Utsunomiya Univ.², ○Kodai Hasumi¹, Daisuke Barada^{1,2}

E-mail: mc256553@s.utsunoiya-u.ac.jp

1 研究背景

近年, VR 技術の普及により, 現実に近い仮想空間への注目が高まっている. これらを実現するためには, 物理現象の正確な再現が必要になる. 物理現象の中でも, 音響現象は目に見えないため, その設計は非常に困難である. 本研究では, 音圧場の可視化を行うことで, 仮想空間での音響体験の向上だけでなく, 現実の楽器設計等への応用も可能にすることを目的としている.

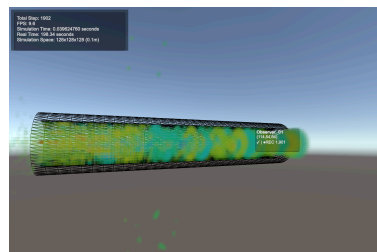


Fig. 1: 3次元 FDTD

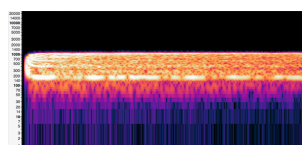


Fig. 2: 得られたスペクトログラム

2 実装方法

FDTD(Finite Difference Time Domain) は, 電磁波の解析に広く用いられている手法である. この手法を音響に適用したのが音響 FDTD 法であり, 空間を小さな立方体に離散化 (ボクセル化) し, 各ボクセルにおける音圧の変化を時間ステップごとに計算する. この手法を用いることで, 複雑な形状における音波の伝播や反射といった現象を解析できる.

本研究で用いた音響 FDTD 法 [1] では, 現在の時間ステップの近傍の 27 点と過去の値を参照し, 次の音圧場の計算を行う. 音圧場の可視化には Unity のパーティクルシステムを用い, 閾値以上の音圧ボクセルを動的に描画できるように工夫した. パーティクルの色は音圧を反映している.

シミュレーション領域の境界には一次吸収境界条件を適用し, 解析への影響を軽減した. 領域内のオブジェクトの表面と各ボクセルとの交差判定を行い, 障害物を自動抽出するボクセル化手法を用いた. 障害物のボクセルには剛壁条件を設定した.

3 実験結果

筒状のオブジェクトの始端と終端それぞれにインパルス音源と観測点を設置した. シミュレーション画面を Fig. 1 に示す. 観測点における音圧場の変化を記録し, wav ファイルとして記録した. スペクトログラムを Fig. 2 に示す.

今後は, より複雑な形状における音圧場の解析を行い, 想定した音が生成できるか, その際の可視化の様子も含めて検証を行う.

謝辞

本研究の一部は, カワイサウンド技術・音響振興財団の助成により行われた.

参考文献

- [1] 土屋 隆生, “音場シミュレーションと音空間レンダリング”, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, 10(3), pp.206-218, 2017.

深度動画データのためのカラーマッピングの提案

Proposed of the Color Mapping Method for Depth Video Data

宇大光工学¹, 宇大 CORE² ○蓮井 翔太¹, 茨田 大輔²

Opt. Eng., Utsunomiya Univ.¹, CORE, Utsunomiya Univ.², ○ Shota Hasui¹,
Daisuke Barada²

E-mail: shoutahasui@gmail.com

1 はじめに

近年スマートフォンに LiDAR が搭載された機種が市場に出回っており、手軽に三次元形状計測が行えるようになってきた。将来的には標準的に搭載されることも期待できる。これを用いると特別な装置を用いずに三次元形状計測が行えるだけでなく、メタバース等の仮想空間に計測した物体を置くこともできる。そこで、LiDAR 等で撮影した深度情報を持つデータを後から動作解析や三次元形状測定を任意のタイミングで行うためにデータを動画化して残すことを考えた。しかし、raw データを動画として扱うと、膨大なデータ量になってしまうことから、カラー動画ファイルで用いられる高圧縮な形式に変換することで改善することを期待した。そこで本研究では、深度動画データに適切なカラーマッピング方法を提案し、一般の動画形式で保存し取り扱うことを検討する。

2 提案手法と結果

LiDAR から得られる深度情報は通常 16 ビット ($2^{16} = 65,536$ 階調) で表現される。本研究では、撮影した動画のフレームレートに合わせて各フレーム間の動きを差分として検出し、その有効性を評価する。深度分解能を 0.25 mm と設定し、各ピクセルについて前フレームとの差分を計算する。差分が手前方向に動いた場合は赤チャンネルに、奥方向に動いた場合は青チャンネルに振り分け、対象物が存在しない領域は緑色で示す。動きの大きさは一般的な 8 ビットカラー (0-255 階調) にスケーリングし、動きが

大きいほど色が鮮やかに見えるよう可視化する。

有効性の実証例として、球体が手前に近づいてくる動きを本手法でシミュレーションした。得られた深度マップをフレームごとに画像として保存し、再度動画ファイルに圧縮・復元した際の揺らぎを調査する。Fig.1 にシミュレーションから得られたフレームを、Fig.2 に圧縮後に再生したフレームを示す。比較したところ、完全一致を 100 %とした場合の再現率は 98.80 %に達し、高い一致性が確認された。

今後は、本手法を用いて実際の人間の動きを計測し、得られた深度データを三次元空間で再構成することを目指す。

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

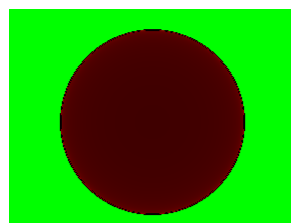


Fig. 1: Simulation of sphere movement using the proposed method

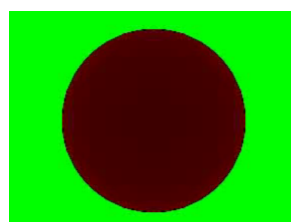


Fig. 2: Image reconstructed after compression to video file

[1] 蓮井翔太, 茨田大輔, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 17p-A37-5 (2024)

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.3】 3.5 超高速・高強度レーザーと3.7 光計測技術・機器のコードシェアセッション

[8p-N402-1~16] CS.3 3.5 超高速・高強度レーザーと3.7 光計測技術・機器のコードシェアセッション

[8p-N402-1]

デュアルコム分光偏光解析法を用いた進相軸依存のシングル・ピクセル・複屈折イメージング

○谷村 省吾¹、長谷 栄治²、澁谷 九輝³、浅原 彰文⁴、時実 悠²、南川 丈夫^{2,5}、安井 武史² (1.徳島大院創成、2.徳島大pLED、3.浅井農園、4.電通大、5.阪大院基礎工)

[8p-N402-2]

光コムを用いた瞬時3次元測定におけるコヒーレントリンクによる広ダイナミックレンジ化

○小椋 胡太郎¹、加藤 峰士¹、美濃島 薫¹ (1.電通大)

[8p-N402-3]

赤外モード同期レーザーを用いた相関分光イメージング

○藤原 心¹、森近 一貴¹、芦原 聡¹ (1.東大生研)

[8p-N402-4]

ファイバー型サニャック干渉計を用いた表面弾性波の測定

○(D)前澤 和来¹、渡邊 紳一¹ (1.慶大理工)

[8p-N402-5]

微小共振器中の非縮退四光波混合を用いた光リザバーコンピューティングの数値計算による検討

○坂上 颯汰¹、久世 直也² (1.徳島大光、2.徳島大ポストLEDフォトニクス)

[8p-N402-6]

光コムの位相制御による広帯域背景光除去手法を用いた高感度分光計測に関する研究

○(M1)関口 杏理¹、日野 圭人¹、浅原 彰文¹、加藤 峰士¹、美濃島 薫¹ (1.電通大)

[8p-N402-7]

2種の光コムを用いた高分解能デュアルコム分光のSNR向上

○柏木 謙¹、大久保 章¹、稲場 肇¹ (1.産総研)

[8p-N402-8]

デュアルコム分光を用いた積分吸光度モデルによる非線形ガス温度推定

○武子 尚生¹、高星 拓海¹、杉山 陽平²、洪 鋒雷²、中嶋 善晶¹ (1.東邦大、2.横浜国立大学)

[8p-N402-9]

機械共有型デュアルコムファイバレーザーを用いた簡便かつ高品位な中赤外分光手法の研究

○(M1)山田 海¹、長尾 康生¹、加藤 峰士¹、浅原 彰文¹、美濃島 薫¹ (1.電通大)

[8p-N402-10]

再生増幅器と光周波数コムを用いた非同期光サンプリング法の開発

○柴田 理来¹、渡邊 紳一¹ (1.慶大理工)

[8p-N402-11]

NALM型モード同期ファイバーレーザーを光源とした可搬型光周波数コムのオープンパス環境下における特性評価

○光本 涼¹、吉井 一倫¹、山本 伸一¹ (1.龍谷大理工)

[8p-N402-12]

Narrowband Mode-Locked Cr:ZnS Laser with Electrical Wavelength Control

○(P)Zhang Zheyuan¹, Ikki Morichika¹, Satoshi Ashihara¹ (1.Tokyo Univ. IIS)

[8p-N402-13]

利得スイッチレーザーパルス波形のK-means法による機械学習分析

○小林 真隆¹、玉置 亮^{2,3}、薄倉 淳子^{1,4}、中前 秀一¹、金 昌秀^{1,4}、伊藤 隆⁴、片山 郁文²、秋山 英文^{1,4}
(1.東大物性研、2.横浜国大理工、3.慶大理工、4.LDseed)

[8p-N402-14]

電気光学変調コムを用いたシングルコムバーニア方式による周波数計測

○佐藤 優成¹、日達 研一²、中野 晶博¹、吉田 靖典¹、野邑 寿仁亜¹、眞田 治樹²、小栗 克弥²、石澤 淳¹
(1.日大生産工、2.NTT物性研)

[8p-N402-15]

デュアルコムレーザーによるラマンソリトンの発生

○高星 拓海¹、武子 尚生¹、高橋 永斉²、川嶋 利幸²、中嶋 善晶¹ (1.東邦大、2.浜松ホトニクス株式会社)

[8p-N402-16]

コヒーレンスと周波数間隔を可変とする光テラヘル波の距離計測応用

○(M1)中村 真音¹、能宗 大輔¹、颯汰 村上¹、達俊 塩田¹ (1.埼玉大理工)

デュアルコム分光偏光解析法を用いた 進相軸依存のシングル・ピクセル・複屈折イメージング

Single-pixel birefringence imaging based on dual-comb spectroscopic polarimetry with fast-axis sensitivity

¹徳島大院創成, ²徳島大 pLED, ³浅井農園, ⁴電通大, ⁵阪大院基礎工

○(M2)谷村 省吾¹, 長谷 栄治², 澁谷 九輝³, 浅原 彰文⁴, 時実 悠², 南川 丈夫^{2,5}, 安井 武史²

¹Grad. Sch. Sci. Tech. Innov. Sci., Tokushima Univ, ²pLED, Tokushima Univ. ,

³Asai Nursery, ⁴UEC, ⁵Grad. Sch. Engg. Sci., Osaka Univ.

S. Tanimura¹, E. Hase², K. Sibuya³, A. Asahara⁴, Y. Tokizane², T. Minamikawa^{2,5}, and T. Yasui²

E-mail : c612432019@tokushima-u.ac.jp

yasui.takeshi@tokushima-u.ac.jp

<https://femto.me.tokushima-u.ac.jp>

<https://www.youtube.com/@takeshiyasui2792/>

分光偏光解析は光学部品や半導体材料、バイオセンシング評価の重要な手法である。我々はこれまでに機械的偏光変調を不要とするデュアルコム分光偏光測定 (DCSP) [1, 2]を開発してきた。しかし DCSP は点計測であるため、イメージング応用には機械的走査が必要となる。この課題を解決する手法の1つがシングル・ピクセル・イメージング (SPI) [3]である。前回、DCSP に SPI を導入し、原理検証を行った[4]。今回の報告では、複屈折試料を計測し、進相軸に応じて異なる振幅比画像を取得した結果を示す。

図 1(a)に実験装置を示す。Signal 光コムは空間光変調器 (SLM) および偏光ビームスプリッタ (PBS) によりアダマール行列パターンで空間強度変調され、1/2 波長板と偏光子により偏光制御後、試料に照射される。照射後、Local 光コムと干渉してインターフェログラムを生成し、直交する 2 つの偏光成分 (X 偏光、Y 偏光) に分離して光検出器で検出する。各偏光成分のフーリエ変換により振幅比および位相差スペクトルを取得し、各アダマール行列パターンに対して繰り返す。最終的に、PD 信号と照明パターンの相関解析により画像を再構成する。

試料は複屈折性 1951 USAF テストチャート (R3L1S1B, Thorlabs 社製) を使用した。ターゲット部分と背景部分で 30 度の進相軸のずれがある。図 1 (c), (d) にサンプル角度ごと (90, 135 deg) の振幅比画像、図 1 (e) に 0 度~135 度での振幅比値のプロットを示す。進相軸の違いによる振幅比の変化を取得できた。

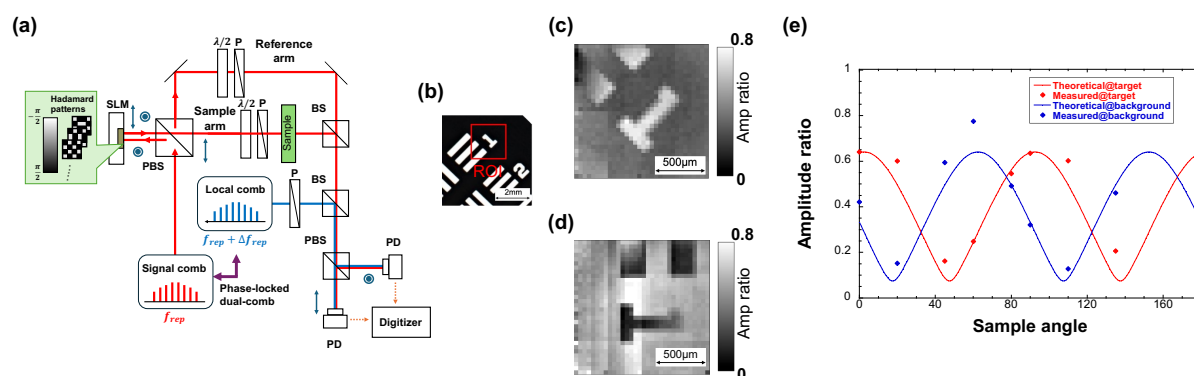


Fig.1 (a) DCSP-SPI measurement system, (b) Test sample (R3L1S1B), (c) amplitude ratio image (90deg), (d) amplitude ratio image (135 deg), (e) Amplitude ratio for each sample angle

[1] T. Minamikawa *et al.*, Nature Commun. **8**, 610 (2017). [2] H. Koresawa *et al.*, arXiv:2308.03011 (2023).

[3] K. Shibuya *et al.*, Opt. Rev. **22**, 897(2015).

[4] 谷村他, 2024 秋季応物学会, 19a-A37-4 (2024).

光コムを用いた瞬時 3 次元測定における コヒーレントリンクによる広ダイナミックレンジ化 Wide Dynamic Range One-shot 3D Imaging by Coherent Link Using Optical Frequency Comb

電通大¹, °小椋 胡太郎¹, 加藤 峰士¹, 美濃島 薫¹

UEC¹, °Kotaro Ogura¹, Takashi Kato¹, Kaoru Minoshima¹

E-mail: k.minoshima@uec.ac.jp

形状計測は科学技術の基盤であり、さらなる高度化が求められている。我々の研究グループでは、これまでチャープした光コムのスペクトル干渉を用い、空間・時間・色情報の超高速変換によって、高速・広範囲・高精度を同時に実現する 3 次元計測手法を開発した[1]。本手法では、光コムの位相制御によって生成される 90 度位相差パルス対を干渉計測に用いることで、2 位相ロックインアンプと同様の原理で、光干渉縞波形の振幅と位相を瞬時に画像として取得する全光ヒルベルト変換手法を開発し、用いている[2]。これまでに、振幅情報を用いた測定によって、 μm オーダーの精度で m オーダーの物体情報の瞬時測定を実現した。さらに、位相情報を組み合わせることによって、測定の空間ダイナミックレンジの拡大が可能となる。本研究では、光コムを用いた距離計測で確立してきた、異なる目盛りと範囲を持つものさしを正確につなぎ合わせて長距離絶対計測を実現するコヒーレントリンク手法[3]を、瞬時 3 次元形状計測に適用し、微細から大型までの構造を nm レベルの不確かさで瞬時に絶対計測できる 3 次元計測手法の実現をめざした。

Fig. 1 に実験配置を示す。位相制御された Er ファイバコムを光源 ($f_{\text{rep}} = 51 \text{ MHz}$) として 2 つに分け、一方は測定対象であるブロックゲージによる段差物体に測定光として照射し、他方は 90 度位相差パルス対を生成したのち参照光として用いた。測定光と参照光を干渉させてカメラで取得し、各ピクセルごとに得られた干渉信号の二乗と平方根から振幅、除算と逆正接から位相情報を求めることで、全光ヒルベルト変換手法を用いて 3 次元測定を行った。Fig. 2 に振幅情報から求めた 3 次元像、Fig. 3 に位相情報から求めた 3 次元像を示す。段差の設計値は、それぞれ、 $0 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$ であるのに対し、実験結果の振幅情報から求めた値は $0 \pm 0.75 \mu\text{m}$, $499.83 \pm 0.62 \mu\text{m}$ となり、また位相情報から求めた値は $430 \pm 110 \text{ nm}$, $-210 \pm 40 \text{ nm}$ となった。振幅情報から求めた測定不確かさが波長以下となったため、これらの結果を組み合わせることが可能となり、測定値として $0.43 \pm 0.76 \mu\text{m}$, $499.62 \pm 0.62 \mu\text{m}$ が得られた。以上の結果から、光コムを用いたコヒーレントリンクによる nm レベルの測定精度をもつ広ダイナミックレンジ瞬時 3 次元計測原理が示された。

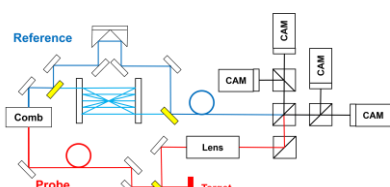


Fig. 1 実験配置図

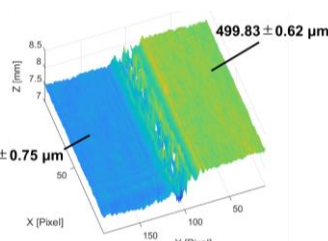


Fig. 2 振幅から求めた 3 次元像

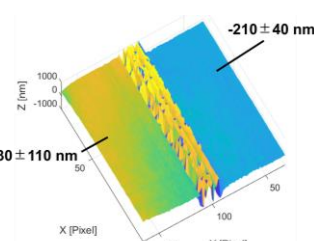


Fig. 3 位相から求めた 3 次元像

- [1] T. Kato, M. Uchida, and K. Minoshima, *Sci. Rep.*, **7**, 3670 (2017).
- [2] T. Kato, H. Ishii, K. Terada, T. Morito, and K. Minoshima, arXiv:2006.07801 (2020).
- [3] K. Minoshima and H. Matsumoto, *Appl. Opt.* **39**, 5512 (2000).

赤外モード同期レーザーを用いた相関分光イメージング

Correlation Spectroscopic Imaging using Infrared Mode-locked Laser

東大生研¹, [○]藤原 心¹, 森近一貴¹, 芦原 聡¹

IIS, The Univ. of Tokyo¹, [○]Kokoro Fujiwara¹, Ikki Morichika¹, and Satoshi Ashihara¹

E-mail: kokorofu@iis.u-tokyo.ac.jp

分光イメージングとは、空間の2次元情報に波長軸を加えた3次元情報を取得する手法である。特に、赤外波長域は分子の振動回転運動を励起できるため、非接触かつラベルフリーに分子の同定と定量解析が可能であり、生体計測や環境センシングなど幅広い分野での応用が期待されている。しかし、分光イメージングでは膨大なデータ数を取得するため、計測時間が長くなりリアルタイム計測が困難であるという課題がある。近年、可視光への波長変換を行い、高速なSiカメラのフレームレートに合わせて波長を掃引することで高速化は進んでいる[1]が、依然として取得波長数に比例して撮影時間が延びるという問題を抱えている。一方で、実際の応用においては、対象となる分子種が限られている場合が多い。そこで我々は、分子の吸収線を抽出するフィルターを用いることで、スペクトル全体を取得せずに分子種を識別できるシステムを開発した[2]。本研究では、このアプローチを赤外分光イメージングに応用し、測定対象の分子種がわかっている場合に、各分子に特化したスペクトルパターンをあらかじめ設計することで、限られた測定回数でも分子識別が可能な相関分光イメージング法を提案し、その有効性を実証した。

図1に光学系を示す。光源としてCr:ZnSモード同期レーザー(2~2.5 μm)[3]を用い、DMDを用いた4f光学系によるスペクトルフィルター[2]により分子の吸収を抽出するような光を生成する。この光をサンプルに照射し、赤外カメラにより空間情報を取得した。図2に光源のスペクトル、PEとPETの透過スペクトル、および対応するフィルターの透過率を示す。吸収を抽出するようなフィルターを実現できていることがわかる。図3は5種のプラスチックをPEおよびPETフィルターを通して観測した結果であり、各フィルターに対応するプラスチック種のみが顕著な信号を示していることがわかる。本手法では、スペクトルフィルター(DMD)の切り替えを高速に行うことで、カメラのフレームレートに近い速度(150 Hz)での分子選別イメージングが可能である。

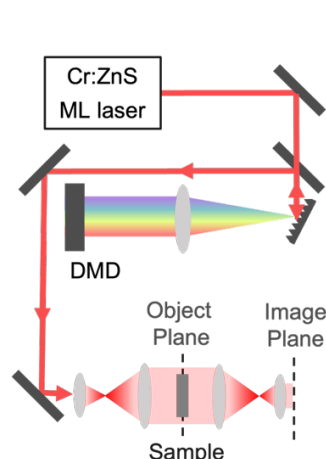


Fig. 1 Optical setup for correlation spectroscopic imaging.

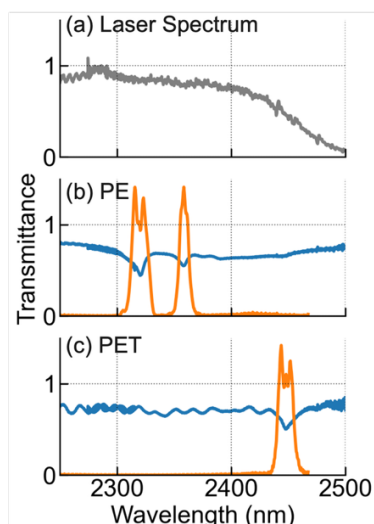


Fig. 2 (a) Laser spectrum. Absorption (blue) and designed transmittance spectrum (orange) for (b) PE filter and (c) PET filter.

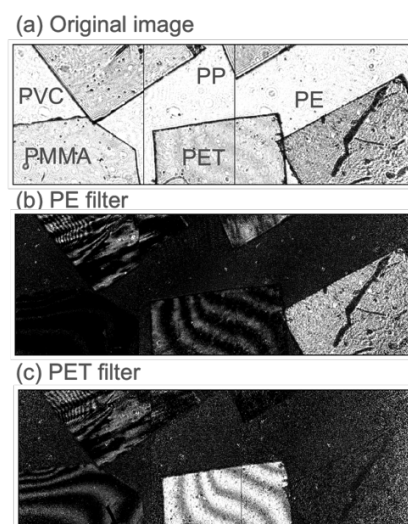


Fig. 3 (a) Optical image of plastic samples and images taken through the (b) PE and (c) PET filter.

- [1] Fang, J. *et al.*, Nat. Commun. 15, 1811 (2024). [2] K. Fujiwara *et al.*, Opt. Lett. 49, 3898 (2024).
[3] D. Okazaki *et al.*, Opt. Exp. 28, 19997 (2020).

ファイバー型サニャック干渉計を用いた表面弾性波の測定

Measurement of Surface Acoustic Waves Using a Fiber-Based Sagnac Interferometer

慶大理工 ○(D) 前澤 和来, 渡邊 紳一

Keio Univ.

E-mail: tmkztchk0416k@keio.jp

近年、フォノンの一種である表面弾性波 (surface acoustic wave; SAW) とマグノンの結合によるマグノンフォノンカップリングの研究が注目を集めている。SAW は空間伝搬に伴う振幅減衰が小さいため、マグノンフォノンカップリングによって、マグノンによる情報の長距離伝搬が可能になると考えられている[1,2]。このようなマグノンフォノンカップリングの研究においては、SAW の振動を正確に測定することが極めて重要である。これまでに、くし型電極やレーザー光によって励起された SAW の時空間分布を可視化する方法として、サニャック干渉計を用いた測定手法が活用されてきた [3-5]。本研究では、サニャック干渉計をファイバーベースの光学系として構成することで、持ち運びが可能で、かつアライメントの手間を大幅に削減できるシステムを実現した。さらに、デュアルコム測定と組み合わせることで、SAW の定量的な変位測定を行った。

光源としては周波数を安定化した 2 台のパルスレーザー (デュアルコム) を用い、それぞれをシグナルコム、ローカルコムとした。シグナルコムをファイバー型サニャック干渉計に入れ、干渉計から出た 2 つのパルスをローカルコムと干渉させた。そして、干渉信号から得られるシグナルコムの光の位相情報を用いて SAW の変位を定量的に求めた。また、シグナルコムと SAW の周波数を同期し、SAW に位相変調をかけることで SAW の振動 1 周期分の変位を測定した。

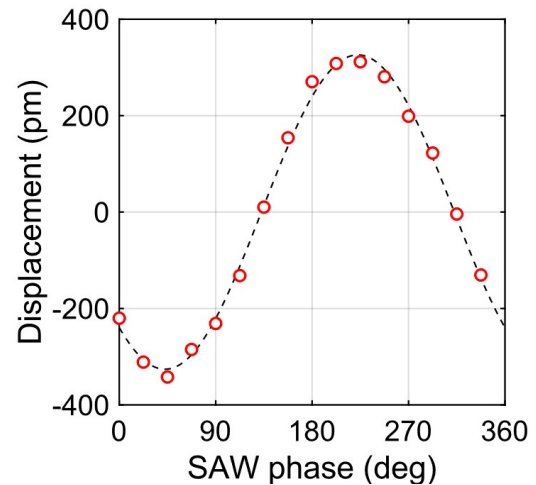


Fig. 1. SAW phase dependence of the displacement.

図 1 は SAW の位相を変えたときの表面変位量を表している。図 1 に示すように SAW の位相とともに変位が正弦波で変化する様子を明確に測定することに成功した。また、デュアルコムを用いているため、光の位相情報から SAW の変位の絶対値を直接求めることができる。図 1 に示すように、得られたデータに正弦波フィッティングを行うことで、SAW の振幅が約 326 pm と求められた。今後はこの技術を用いてマグノンと結合した SAW の時間分解計測を行い、そのダイナミクスの解明を目指す。

本研究の一部は科研費 (25KJ2060, 25H02153, 24K21743, 23K26165)、JST CREST (JPMJCR19J4)、および MEXT Q-LEAP (JPMXS0118067246) の支援を受けた。

- [1] B. Casals, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 137202 (2020). [2] K. Maezawa, *et al.*, Phys. Rev. Applied **21**, 044047 (2024).
[3] T. Tachizaki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **77**, 043713 (2006). [4] A. Iwasaki *et al.*, APL Photonics **7**, 106101 (2022).
[5] D. Nishikawa, K. Maezawa *et al.*, Opt. Lett. **50**, 1929-1932 (2025).

微小共振器中の非縮退四光波混合を用いた光リザーバーコンピューティングの数値計算による検討

Numerical investigation of optical reservoir computing using non-degenerate four-wave mixing in micro resonator

徳島大光¹, 徳島大ポストLED フォトニクス²

○坂上 颯汰¹, 久世 直也²

Tokushima Univ.¹, Inst. Post-LED Photon., Tokushima Univ.²

°Sota Sakaue¹, and Naoya Kuse²

E-mail: kuse.naoya@tokushima-u.ac.jp

リザーバーコンピューティング(RC)は、固定重みの再帰構造を持つリザーバー層と、出力層のみの学習を併用することで、高速な学習と高い時系列予測能力を両立する機械学習モデルの一つである。RCの固定されたリザーバー層という特徴から、物理系を用いてリザーバー層を実装する研究が注目されており、特に高非線形性ファイバー (HNLF) を用いた光 RC では、四光波混合 (FWM) による周波数コムを特徴量として用いることで、カオス時系列予測に対する高い精度を示した[1]。ファイバーRCではメモリ効果の欠如、集積化の困難、高いポンプエネルギーが必要といった課題が残る。本研究ではこれらの課題を解決するために、微小光共振器中 (MRR) の FWM による周波数コムをリザーバー層として用いる新規の光 RC アーキテクチャを提案し、その性能を数値計算で評価した。

シミュレーションで想定している構成を図 1(a)に示す。まず CW ポンプ光と入力データに沿って強度変調したシグナルポンプ光を MRR に入力する。MRR 内ではカスケード的な FWM により光周波数コムが形成される。形成された各コムモードの応答を特徴量として扱い、光領域でリッジ回帰により出力層の重みづけを行う。また本研究では RC の拡張として、入力前にデータをメモリマスク関数で加工する手法[2]も導入した。図 1(b)はコムモードを 8 本使った時の、各 RC の精度の変化を示す。リング RC はファイバーRC と同じ Santa Fe 予測タスクにおいて、特にリッジ回帰時の時間多重回数を減らしても高い精度を達成した。また、メモリマスクはリッジ回帰時の時間多重化をしなくても、精度が向上することが確認できた。

[1] K.Sozos, et al., IEEE J.Quantum Electron., **60**, 1-6 (2024). [2] N.Cox, et al., Chaos **34**, 073111 (2024).

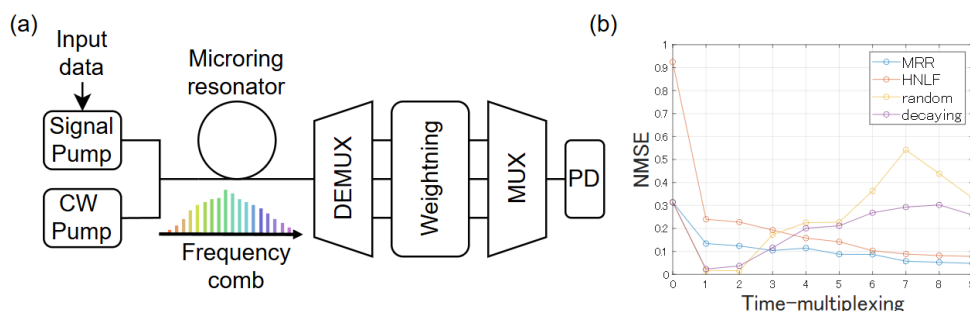


Figure 1. (a) 想定しているセットアップ. (b)ファイバーRCとリングRC、メモリマスクの有無による精度比較. MRRとHNLFの場合はリッジ回帰時の時間多重回数、メモリマスク2種の場合はリッジ回帰時の時間多重回数はゼロであり、マスク時のメモリ時間数を横軸にしている。

光コムの位相制御による広帯域背景光除去手法を用いた 高感度分光計測に関する研究

High-sensitivity spectroscopic measurement using a broadband background light canceling method based on phase control of optical frequency comb

電通大¹, [○](M1) 関口杏理¹, 日野 圭人¹, 浅原 彰文¹, 加藤 峰士¹, 美濃島 薫¹

UEC¹, [○]Anri Sekiguchi¹, Keito Hino¹, Akifumi Asahara¹, Takashi Kato¹, and Kaoru Minoshima¹

E-mail: k.minoshima@uec.ac.jp

微量ガスなどの吸収分光においては、微弱な吸収信号の定量化やスペクトル波形の正確な測定が求められる。しかし、透過信号光において吸収線信号の占める割合はわずかであり、目的の信号に寄与しない背景光が大部分を占めている。これにより、測定器の飽和による感度低下や光源の強度変動によるベースライン変動等が生じる課題がある。その解決法として、偏光素子等を用いて逆位相光を発生させ、背景光を干渉によって除去する手法[1]があるが、広帯域光や高精度素子の得られない波長帯においては、素子の波長依存性等の性能限界により制約が生じる。また、環境変動による干渉位相安定性が不確かさ要因となる。我々は、これまでに、光コムの位相制御性を用いて高精度な広帯域逆位相パルス対を生成し、その干渉による背景光除去手法[2～4]を開発して断層測定に適用した。本研究では、本手法を吸収分光法に適用し、高感度化を行った。

図 1(a)に実験系を示す。光源に Er ファイバコムを用い、繰り返し周波数 f_{rep} (108 MHz) とキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} が 4 : 1 となるように光コムを制御することで、隣接するパルス間位相差が全帯域で 90° となるパルス列を生成した。これを分岐させ、片方の光路に 2 パルス分の遅延を与えることにより逆位相関係のパルス列対を同時生成した。片側光路に測定試料である HCN ガスセルを設置し、透過光と逆位相関係にある参照光とを干渉させたのちに検出し、光スペクトルの測定を行った。結果を図 1(b)に示す。本手法を適用しない試料透過光（青線）に見られた吸収に寄与しない背景光は、逆位相干渉によってキャンセルされ（赤線）、演算なしに、吸収線が直接取得されていることがわかる（下段に拡大図）。このとき 2 つの光路に分散調整機構を導入し抑制比を最適化した結果、試料透過光の検出後に演算により吸収スペクトルを得る従来手法に比べて信号雑音比は 10.4 dB 増加し、本手法による分光計測の高感度化が示された。分散調整とスペクトル波形の対称性向上により、さらなる広帯域の背景光抑制比向上が期待される。

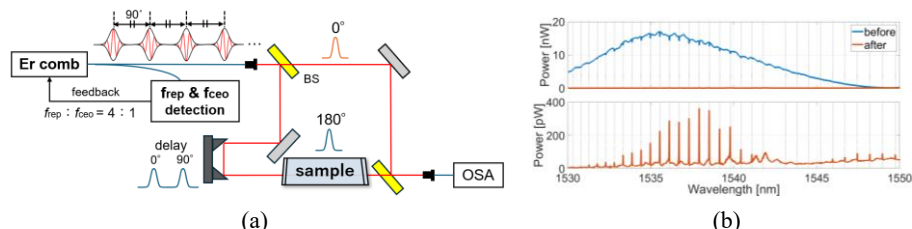


図 1(a) 実験装置図, (b) 背景光除去によって得られる HCN 吸収スペクトル, 青線が除去前, 赤線が除去後

[1] T. Tomberg, A. Muraviev, Q. Ru, and K. L. Vodopyanov, Optica, Vol. 6, No. 2 (2019)

[2] 加藤, 森藤, 猫島, 美濃島, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 25a-E302-3 (2022).

[3] T. Kato, K. Hino, Y. Nekoshima, and K. Minoshima, CLEO 2023, STh4K.7 (2023).

[4] 日野, 加藤, 美濃島, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-A37-3 (2024).

2種の光コムを用いた高分解能デュアルコム分光の SNR 向上

SNR enhancement of dual-comb spectroscopy using two-types of optical combs

産総研 ○柏木 謙, 大久保 章, 稲場 肇

AIST, ○Ken Kashiwagi, Sho Okubo, Hajime Inaba

E-mail: ken.kashiwagi@aist.go.jp

光周波数コム(光コム)の応用の裾野は広がり、デュアルコム分光[1, 2]は広く研究され続けている。デュアルコム分光では測定対象の分光情報を信号コムで取得し、その信号コムの各モードに載っている分光情報を分離する。ファイバコムが高い周波数分解能で分光情報を取得し、変調器型光コム(EOM コム)で高速に情報を取得するデュアルコム分光を実現した[2, 3]。この手法は、干渉信号の周期が短く EOM コムの各モードパワーが高いため、短い平均時間で高い SNR が得られる。本発表では平均回数は維持したまま、さらに SNR を向上した結果を報告する。

Fig. 1 に実験系を示す。信号コムは繰り返し周波数 43.85 MHz の Er ファイバコムであり、高フィネス光共振器に安定化した狭線幅レーザ(波長 1535 nm)に位相同期した。他方、信号コムに位相同期した波長 1551 nm のレーザを EOM コムの光源とし、光変調器による変調、平均パワー200 mW まで増幅の後に高非線形ファイバ中でスペクトルを拡大し、狭線幅レーザとのビート信号を参照して変調信号周波数を制御して位相同期した。EOM コムの繰り返し周波数は Er ファイバコムの約 228 倍の約 10 GHz とした。信号コムは分散を与えた後に空間に出射し、アセチレン($^{13}\text{C}_2\text{H}_2$)のガスセル(長さ 20 cm, 圧力 1.1 kPa)を透過し、局発コムと合波して BPF(幅 12 nm)を透過後にバランス検出した。得られた干渉信号をアンチエイリアシングフィルタ後にデジタイザで記録した。1 つの干渉波形の測定時間は 66 μs であり、平均時間を ~200 ms(3000 回平均に相当)とした。分散により信号コムのパルス幅を拡げることで、干渉信号のセンタースタート振幅を抑え各ビート信号の振幅をより強く得ることで、以前は 560 であった SNR が Fig. 2 のように 710 まで向上した。その結果、Voigt Profile によく一致するプロファイルが観測された。

本研究は JSPS 科研費 JP18H01907, JP22H01997 の助成を受けた。

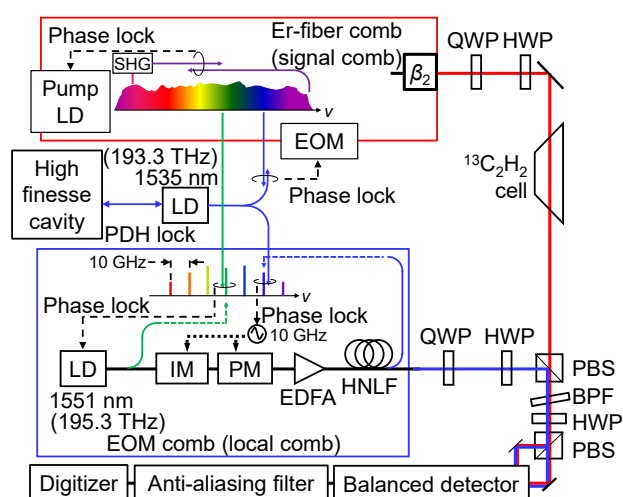


Fig. 1 Experimental setup

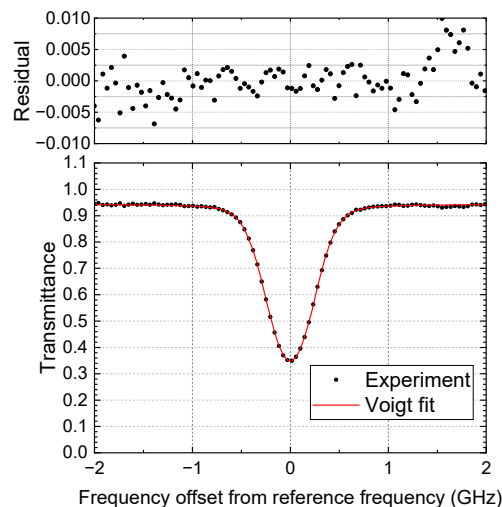


Fig. 2 Measured transmittance around the $\nu_1 + \nu_3$, $P(8)$ line.

[1] F. Keilmann, et al., Opt. Lett. 29, 1542 (2004).

[2] I. Coddington, et al., Phys. Rev. Lett., 100, 013902 (2008).

[3] 柏木、大久保、稲場、第 70 回 応用物理学会 春季学術講演会、16p-A502-12, (2023)

[4] 柏木、大久保、稲場、第 84 回 応用物理学会 秋季学術講演会、22p-A602-10, (2023)

デュアルコム分光を用いた積分吸光度モデルによる非線形ガス温度推定

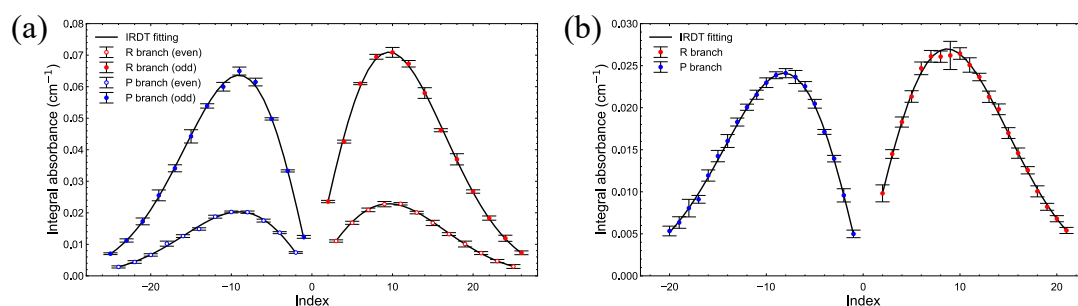
Nonlinear gas temperature estimation using an integral absorbance model with dual-comb spectroscopy

東邦大¹, 横国大² ◯(M2) 武子 尚生¹, (M1) 高星 拓海¹, (D3) 杉山 陽平², 洪 鋒雷²,
中嶋 善晶¹Toho Univ.¹, Yokohama Nat'l Univ.², ◯Naoki Takeshi¹, Takumi Takahoshi¹, Yohei Sugiyama²,
Feng-Lei Hong², Yoshiaki Nakajima¹

E-mail: yoshiaki.nakajima@sci.toho-u.ac.jp

ガス温度計測は、反応化学、環境モニタリング、産業分野など、幅広い分野において重要視されている。近年では、非接触かつ多成分ガスを同時計測可能なデュアルコム分光[1]に基づく温度測定手法として、回転準位分布温度測定 (RDT)[2]が実証されている。RDT では、分子の吸光度スペクトル形状が Boltzmann 分布に従うことを利用して、熱力学的温度に直接アクセスできるという特徴がある。しかし、RDT には適用可能な分子種に制限があり、この課題に対して我々は、Integration Log RDT (ILRDT)[3]を提案してきた。ILRDT では、積分吸光度に対して対数をとることで線形フィッティングを可能にする手法であるが、高温領域では推定温度に系統的なバイアスが生じる可能性が指摘されている。

そこで本研究では、より高精度な温度推定を実現するため、積分吸光度と温度の関係を非線形にモデル化した新たな手法として、Integration RDT (IRDT)を提案する。IRDT は、高温環境下における温度推定の精度向上が期待される。本手法の検証のため、Er モード同期ファイバレーザを用いたデュアルコム分光計を用いて、 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ と H^{13}CN のガス温度推定を行った。その結果、推定温度はそれぞれ 293.2 K, 292.8 K となり、白金測温体による実測温度と不確かさの範囲内で一致する結果を得た。本講演では、IRDT と ILRDT との比較、およびそれぞれの適用条件について、シミュレーションと実験結果を交えて報告する。本研究は NEDO の研究助成を受けて行われた。

Fig. 1 Temperature estimation of IRDT: (a) $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$, (b) H^{13}CN [1] I. Coddington, et al., *Optica* **3**, 414-426 (2016).[2] Y. Shimizu, et al., *Appl. Phys. B* **124**, 71 (2018).

[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).

機械共有型デュアルコムファイバレーザを用いた 簡便かつ高品位な中赤外分光手法の研究

Study on Simple and High-Quality Mid-Infrared Spectroscopy with Mechanical-Sharing Dual Comb Fiber Laser

電通大¹, [○](M1)山田 海¹, 長尾 康生¹, 加藤 峰士¹, 浅原 彰文¹, 美濃島 薫¹

UEC¹, [○]Umi Yamada¹, Kosei Nagao¹, Takashi Kato¹, Akifumi Asahara¹, and Kaoru Minoshima¹

E-mail: k.minoshima@uec.ac.jp

中赤外波長域は分子の指紋領域と呼ばれ、分光ガスセンシングなどへの応用が注目されている。一方、2つの光コムを用いたデュアルコム分光法は、高速・広帯域・高分解能な優れた特徴から、その手段として期待されている。しかし、デュアルコムは大掛かりで複雑な制御が必要であるという実用上の課題があり、近年、受動的に安定な光コムを同時発生可能な一体型デュアルコムレーザが開発されている。これまでに我々は、双方向型の一体型ファイバ共振器を用いて中赤外デュアルコムを発生し、精密ガス分光を実証した[1,2]。一方、2台の独立共振器を用いる機械共有型デュアルコムレーザ[3]は、パルス間の共振器内非線形相互作用が生じない安定な発振が可能であることから、低雑音モード同期機構と組み合わせることで、特に、高次の非線形光学効果を用いる中赤外光発生の実用光源として期待される。そこで本研究では、さらなる実用的かつ高品位な中赤外デュアルコム分光の実現を目指して、受動安定度を向上させた低雑音モード同期機構に基づく機械共有型デュアルコムファイバレーザを開発し、中赤外光発生を行った。

図 1(a)に開発した実験系の構成を示す。非線形増幅ループミラー(NALM)を用いた 2 台の Er ファイバ光コム共振器($f_{\text{rep}} = 110$ MHz, 中心波長: 1580 nm)から成る。全偏波保持ファイバ共振器、NALM モード同期機構とゼロ分散共振器の採用による堅牢かつ低雑音動作の実現を目指した。さらに、ファイバ部の近接および空間素子の一体化によって、無制御動作においても高い相対安定性を実現した。この近赤外光出力をもとに、光増幅器(EDFA)、高非線形ファイバ(HNLF)、非線形光学結晶(PPLN)からなる差周波発生過程を用いて、2つのコム出力において広帯域中赤外光を発生させた(図 1(b))。さらに、発生した中赤外光を用いてデュアルコム干渉計を構築し、インターフェログラム(IGM)を取得した。中心波長 4060 nm において、半値幅 54 nm のバンドパスフィルタを用いてスペクトルの一部を切り出し測定した結果、図 1(c)に示すように無制御動作において明瞭な IGM が取得できた。同様に、波長帯を変えながら 3000 から 4300 nm にわたって測定を行ったところ、全帯域で明瞭な IGM が取得できた。これにより、開発した広帯域中赤外光コム光源はデュアルコム分光に十分な相対コヒーレンスを有することが示された。

[1] 李, Tian, 吉井, 中嶋, 加藤, 浅原, 美濃島, 応用物理学会秋季講演会 10p-N106-7 (2021)

[2] A. Asahara, G. Fukawa, T. Shimizu, T. Kato, and K. Minoshima, CLEO 2024, SF2P.4 (2024)

[3] Y. Nakajima, Y. Kusumi, and K. Minoshima, Opt. Lett. **46**, 5401 (2021)

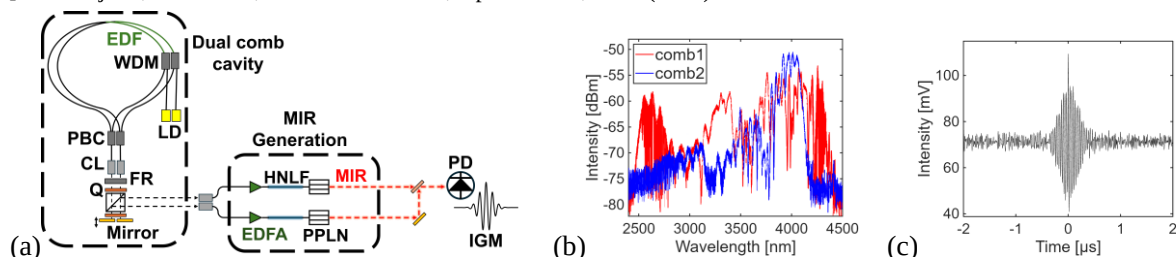


図 1 (a)実験構成図, (b)発生させた中赤外光, (c)中赤外デュアルコム分光による IGM

再生増幅器と光周波数コムを用いた非同期光サンプリング法の開発

Development of Asynchronous Optical Sampling Using a Regenerative Amplifier

and an Optical Frequency Comb

慶大理工,[○]柴田 理来, 渡邊 紳一

Keio Univ., [○]Riku Shibata, Shinichi Watanabe

E-mail: riku.shibata@keio.jp

光ポンプ・光プローブ法は光によって誘起された現象の超高速応答を測定できるため、光物性実験において代表的な実験手法である。例えば、フェリ磁性絶縁体であるイットリウム・鉄・ガーネット(YIG)系の材料では、超短パルス光によって励起されたマグノンのダイナミクスが古くから測定されている[1]。また近年ではマグノン・フォノンカップリングを起こしたマグノンのコヒーレント振動も観測されている[2]。このような現象は高時間分解能($\sim$ ps)と広い時間窓($\sim$ 100 ns)を両立しないと観測できないため、測定が難しかった。ポンププローブ法を高速に行う手法として、繰り返しのわずかに異なる 2 台のパルスレーザーを用いる非同期光サンプリング法(ASOPS)があるが、繰り返し周波数が 100 MHz 程度のレーザー発振器を用いるため、時間窓は 10 ns 程度にとどまっている[3]。本研究では、ポンプ光に再生増幅器(繰り返し 50 kHz, 中心波長 1030 nm)、プローブ光に光周波数コム(61 MHz, 1550 nm)を用いることで、ASOPS の高時間分解能、高速性を保ったまま、時間窓を 20 μ s まで拡張することに成功した。

再生増幅器と光周波数コムを用いて ASOPS を行うためには、これらの繰り返し周波数の正確な同期が必要である。そこで本研究では、完全に位相同期したデュアル光周波数コム光源の片方を再生増幅器のシード光に用いて、再生増幅器ともう片方の光周波数コムの繰り返し周波数の正確な同期を実現した。これらをビスマス添加 YIG (Bi-YIG) に入射し、透過したプローブ光の偏光回転を測定した。

Figure 1 に、ポンプ光の位置をプローブ光の位置から 150 μ m 離して測定した時の測定信号を示す。ポンプ光照射から 0.3 ns 後に到達したマグノンと、30 ns 後に到達した弾性波パルス(フォノン)の信号が同時に観測された。このように群速度が 100 倍異なるようなマグノンとフォノンのダイナミクスを一括で計測することに成功した。

本研究の一部は科研費(25KJ2061, 25H02153, 24K21743, 23K26165), JST CREST

(JPMJCR19J4), および MEXT Q-LEAP (JPMXS0118067246) の支援を受けた。

[1] F. Hansteen, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 47402 (2005). [2] T. Hioki, *et al.*, Commun Phys **5**, 115 (2022).

[3] A. Asahara, *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 062003 (2020).

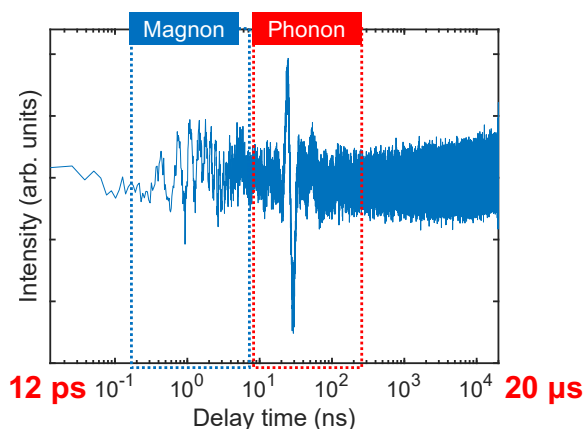


Figure 1. Photo-induced dynamics of magnon and phonon.

NALM 型モード同期ファイバーレーザーを光源とした可搬型光周波数コムのオープンパス環境下における特性評価

Characterization of a Portable Optical Frequency Comb Based on NALM Mode-Locked Fiber Laser in Open-Path Environment

龍谷大理工 ○光本 涼, 吉井 一倫*, 山本 伸一

Ryukoku Univ. ○Ryo Mitsumoto, Kazumichi Yoshii*, Shin-ichi Yamamoto

*E-mail: yoshii@rins.ryukoku.ac.jp

近年, 光を用いた環境計測分野において, 光周波数コム(光コム)の応用が注目されている. しかし, それらの研究例の多くは, 温度や振動などの外乱が制御された実験室内で実施されている. そのような中, 米国国立標準技術研究所のグループは, 建物内に設置した光コムによる数 km に及ぶオープンパス大気計測 [1]や, トレーラー内に搭載した光コムによる実験室外での大気分析を実現 [2]している. 国内でも農地や工場などでの大気計測の需要が高まる中, 光コムを光源としたこれらの報告は未だ少ない. そこで本研究では, オープンパス大気計測へ応用可能な可搬型光コムシステムを開発[3]し, 実際にオープンパス環境下における特性評価を行った.

本研究で開発した可搬型光コムシステムの光源には, 繰り返し周波数 250 MHz の NALM 型エルビウムファイバーコムを用いた. 出射光を偏波保持エルビウム添加ファイバー増幅器で増幅した後, 偏波保持高非線形ファイバーに入射することで, 1-2 μm 帯のスーパーコンテニューム光(SC光)を生成した. SC 光はビームエキスパンダーにより拡大し, オープンパスへ出射した後, レトロリフレクターで反射させ, 分光器を用いてスペクトルを測定した. 本システムは, 構成要素を 19 インチラックハードケースに収納することで高い可搬性を実現し, ポータブル電源により駆動可能である. 可搬型光コムシステムを屋外に設置し(Fig.1 (a)), SC 光をオープンパスへ出射した. レトロリフレクターにより反射された SC 光のスペクトルを 10 秒間隔で 100 分間測定した結果を Fig.1 (b)に示す. 得られたスペクトルの各波長帯域のピーク形状は長時間安定しており, 基準スペクトルの頻繁な再校正を行うことなく安定した分光測定が可能であることを示している.

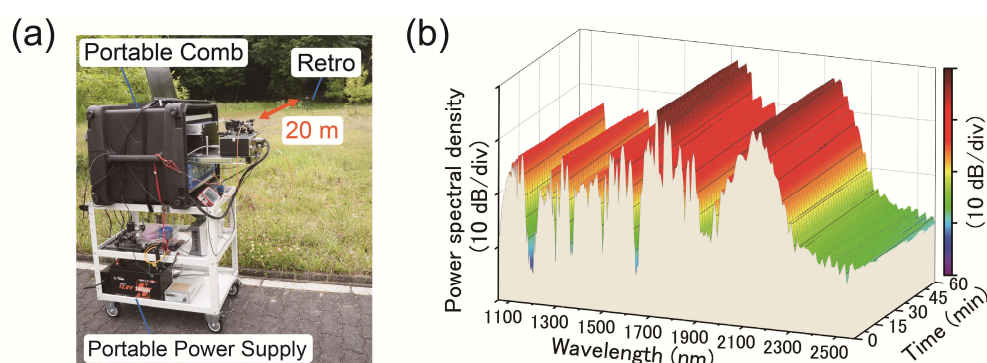


Fig.1 (a) Photograph of a portable comb in open-path operation. The system and the control PC were powered by a portable power supply. The SC light is projected with a telescope over an open-path to a retroreflector. The open-path length is 20 m. (b) Long-term stability of the SC light spectra measured.

参考文献

- [1] G. Ycas, *et al.*, *Optica*, **6**, 165 (2019).
- [2] D. I. Herman, *et al.*, *Science Advances*, **7**, 9765 (2021).
- [3] 光本 涼, 吉井 一倫, 山本 伸一, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-K304-9, (2025).

電氣的波長制御が可能な狭帯域モード同期 Cr:ZnS レーザー
Narrowband Mode-Locked Cr:ZnS Laser with Electrical Wavelength Control

東大生研 °張 哲元, 森近 一貴, 芦原 聡

IIS, the Univ. of Tokyo, °Z. Zhang, I. Morichika, and S. Ashihara

E-mail: zyzhang@iis.u-tokyo.ac.jp

We report the first demonstration of electrical wavelength control in a Cr:ZnS laser using an electro-optic (EO) modulator. By solely adjusting the modulation frequency of the modulator, the output wavelength can be tuned over a broad range. In this proof-of-concept experiment, a tuning range of 60 nm was achieved by varying the modulation frequency by 300 kHz.

Lasers operating in the 2-3 μm spectral region are highly attractive for applications such as vibrational spectroscopy and mid-infrared LiDAR. The most commonly used gain medium for laser in this region are Cr:ZnS/Se crystals, which can provide high gain efficiency and broad gain bandwidth in solid-state lasers at room temperature. Over the past decades, various wavelength tuning techniques have been incorporated into Cr:ZnS/Se lasers to enhance spectral brightness and improve spectral flatness [1, 2], which are promising in high-sensitivity spectroscopic applications. However, most existing tuning techniques for solid-state lasers rely on mechanical adjustments, which limit the tuning speed to several hundred hertz. Dispersion tuning is a promising non-mechanical technique capable of providing wavelength tuning and narrowband mode-locking with a wide tunable range [3]. While this method has been demonstrated in fiber lasers, its application in solid-state lasers remains limited. One of the key challenges lies in the lack of suitable high-speed modulators that operate effectively in the 2-3 μm range and satisfy the necessary requirements in modulation frequency, modulation depth, and aperture size.

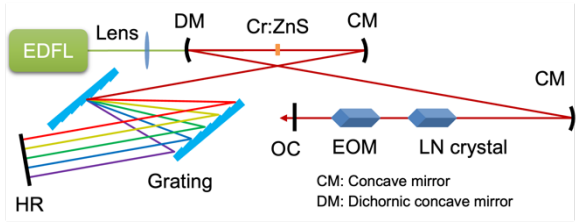


Fig. 1. Setup of the proposed wavelength-tunable mode-locked Cr:ZnS laser.

In this study, we demonstrate a dispersion-tuned Cr:ZnS solid-state laser by employing an EO phase modulator for intensity modulation. The setup of the laser is illustrated in Fig. 1. The total cavity length is ~ 163 cm, corresponding to a free spectral range

(FSR) of ~ 92 MHz. A pair of diffraction gratings is placed at one end of the cavity to introduce chromatic dispersion of ~ 0.6 ps/nm (~ 1.6 ps²), making the cavity round-trip time and FSR dependent on wavelength. Due to the polarization dependence of the gratings, the intra-cavity and output beams are horizontally polarized. The EO phase modulator, fabricated from lithium niobate (LN), is positioned near the output coupler (OC) and aligned at a 45° angle with respect to the polarization direction of the light in the cavity. A second LN crystal, with its optical axis perpendicular to that of the modulator, is used to compensate for birefringence effects.

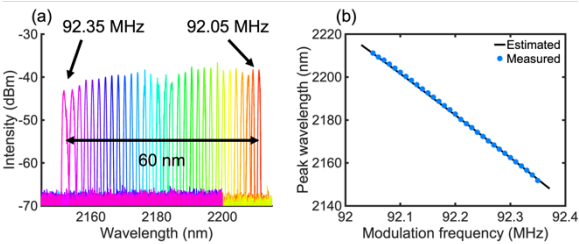


Fig. 2. (a) Optical spectra and (b) peak wavelength vs. modulation frequency.

The output spectra for various modulation frequencies are shown in Fig. 2(a). As the modulation frequency is tuned from 92.05 MHz to 92.35 MHz, the central wavelength shifts from 2211 nm to 2151 nm. The dependence of peak wavelength on modulation frequency is plotted in Fig. 2(b). The average spectral width is 0.3-0.4 nm, with an estimated pulse duration of ~ 2 ps.

This demonstration of the electrically controlled, wavelength-tunable, mode-locked Cr:ZnS laser in the 2-3 μm mid-infrared region represents a significant advance toward rapid, programmable wavelength control. This approach provides a powerful platform for applications such as high-speed, high-sensitivity spectroscopy and agile-wavelength LiDAR systems.

References

[1] M. Yumoto, N. Saito, U. Takagi, and S. Wada. "Electronically tuned Cr: ZnSe laser pumped with Q-switched Tm: YAG laser." *Optics Express* 23 (19), 25009-25016 (2015).
[2] Z. Zhang, X. Bu, D. Okazaki, W. Song, I. Morichika, and S. Ashihara. "Tunable mode-locked laser in the 2.0-2.6 μm range with GHz-level spectral width and sub-nanosecond pulse duration." *Applied Physics Letters* 126 (5) (2025).
[3] S. Yamashita, and M. Asano. "Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on dispersion tuning." *Optics Express* 14 (20), 9299-9306 (2006).

利得スイッチレーザーパルス波形の K-means 法による機械学習分析

Clustering of gain-switched laser pulse waveforms by K-means method

東大物性研¹, 横浜国大理工², 慶大理工³, LDseed⁴

○小林真隆¹, 玉置亮^{2,3}, 薄倉淳子^{1,4}, 中前秀一¹, 金昌秀^{1,4}, 伊藤隆⁴, 片山郁文², 秋山英文^{1,4}

ISSP, Univ. of Tokyo¹, Yokohama Natl. Univ.², Keio Univ.³, LDseed Co., Ltd.⁴

○M. Kobayashi¹, R. Tamaki^{2,3}, J. Usukura^{1,4}, H. Nakamae¹, C. Kim^{1,4}, T. Ito⁴,

I. Katayama², H. Akiyama^{1,4}

E-mail: kobayashi.masataka@issp.u-tokyo.ac.jp

利得スイッチ半導体レーザー (GSLD) は、小型、安定、堅牢、高効率、低コストといった応用上の優れた特性を備えており、さらにパルス波形や繰り返しレートに対する柔軟な選択性を有することから、光加工や生物医学分野などにおける新たな用途に向けたシードパルス光源として期待されている。これまでに我々は、手のひらサイズのポータブルな GSLD モジュールを開発し[1]、分散補償チャープパルス分光法を用いることで、同モジュールから発生するパルス波形をサブピコ秒の時間分解能でシングルショット測定できることを実証してきた[2,3]。この成果により、従来のサンプリング測定では捉えられなかった、パルスごとの揺らぎや一時的な挙動の観測が可能となり、利得スイッチ駆動に内在する非線形性や時間発展の理解に向けた環境が整いつつある。しかしながら、シングルショット測定で得られる数百～数千個規模の波形データに対して、個々の波形に注目し、その特徴を定量的かつ客観的に解析・分類する作業は、人の手によって行うには現実的でなく、従来は主に平均波形や特定の統計量（パルス幅やピーク強度の分布など）に基づいた評価に留まっていた。そのため、パルスプロファイルの形状そのものの変動に着目するアプローチは極めて限定的であり、GSLD の内部動作メカニズムをより深く理解するための解析手法の拡充が求められている。そこで本研究では、分散補償チャープパルス分光法を用いて得られた GSLD シングルショット波形 1181 個に対して、パルス幅・ピーク数・ピーク強度・積分強度などの複数の特徴量を抽出し、教師なし機械学習手法である K-means 法を用いたクラスタリングを適用することで、それらの定量的な分類を試みた。Fig. 1 に GSLD 出力パルスを 4 つのクラスに分類した結果を載せる。主要な形状は、ラウンドトリップ間隔に対応した部分的にモードロック的な構造を示したものであった (Cluster_1 及び 2)。倍周期構造を有するパルス列も少数ながら見られた (Cluster_4)。これらの中間的な特徴のパルス波形も確認された (Cluster_3)。

本研究の一部は、文科省 ARIM 事業 (JPMXP1224 NM0008) の支援を受けた。【参考文献】[1] M. Kobayashi *et al.*, JJAP **64**, 038004 (2025). [2] 玉置亮 他, 第 85 回応用物理学会秋季, 20p-C301-1(2024). [3] 玉置亮 他, 第 72 回応用物理学会春季, 15a-K308-5 (2025).

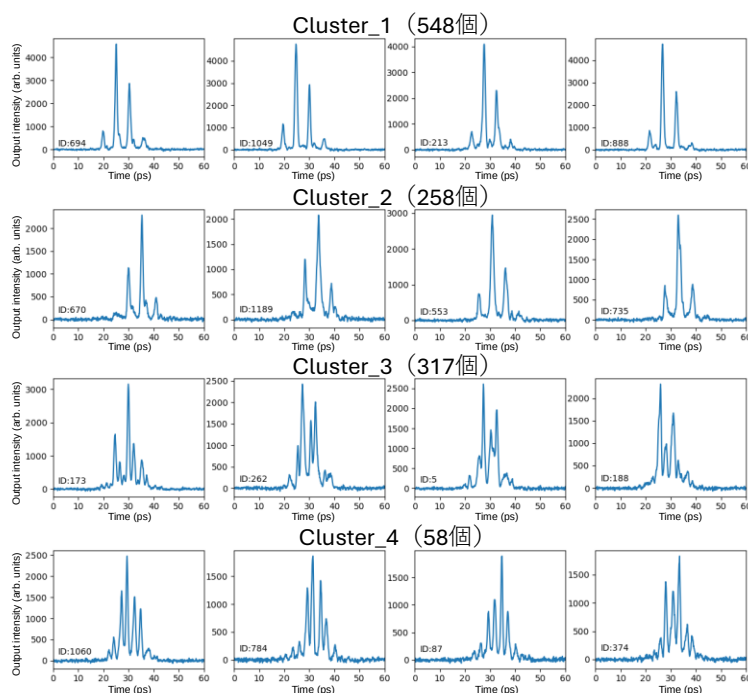


Fig. 1: Clustering of GSLD single-shot waveforms obtained via dispersion-compensated chirped-pulse spectroscopy using K-means.

電気光学変調コムを用いたシングルコムバーニア方式による周波数計測

Frequency measurement by single-comb Vernier method using electro-optic modulation comb

日本大学¹, NTT 物性研² [○](M2)佐藤 優成¹, 日達 研一², (M1)中野 晶博¹, (M2)吉田 靖典¹,
野邑 寿仁垂¹, 眞田 治樹², 小栗 克弥², 石澤 淳¹

Nihon Univ.¹, NTT BRL.², [○]Yusei Sato¹, Kenichi Hitachi², Akihiro Nakano¹, Yasunori Yoshida¹,
Junia Nomura¹, Haruki Sanada², Katsuya Oguri², Atsushi Ishizawa¹

E-mail: ciyu24020@g.nihon-u.ac.jp

光周波数の高精度な測定は、光周波数標準や精密計測の分野で重要であり、高精度な波長計と光周波数コム(光コム)を併用することで実現される。現在では、光コム単独での周波数測定法の実現が望まれている[1]。我々はファイバーレーザーコムのモード間隔のわずかな違いを利用することにより、光の周波数を高精度に測定するシングルコムバーニア方式を提案実証した[2]。この手法では、光コムのモード番号の差 k_i に注目し、等比級数的に k_i を増大させて複数回の測定を行う。これにより、 k_i を正確に求めつつその値を大きくし、結果としてモード番号 N を自然数の精度で求めることが可能である。被測定レーザーに求められる周波数安定度の要件が緩和されれば、測定可能な光源の種類が拡大し、より高い汎用性が実現される。近年、半導体レーザーの狭線幅化などにより、デュアルコム分光や通信応用などにおいて MHz 精度での計測が求められている。

そこで本研究では、モード間隔がマイクロ波で容易に可変できる電気光学変調 (EO) コムを用いたフリーランの半導体レーザーにも適用可能な周波数計測法を提案する[Fig. 1(a)]。実験配置図を Fig. 1(b)に示す。本手法では、位相同期ループ回路により安定化したレーザー f_{cw} を電気光学変調器によって変調することで EO コムを発生させる。その後、シングルコムバーニア方式により、被測定レーザー f'_{cw} が種光源である f_{cw} より M 本離れているか特定することで光周波数を測定する。EO コムはモード間隔が GHz オーダーで変えることができるため、 f'_{cw} の周波数変動の影響を受けづらい。そのため、 $k_1 = 1$ の場合でもモード次数の誤差はすでに 0.1 以下と小さく、さらに k_i の増加に伴い誤差が減少する傾向が確認されたことから、堅牢性の高い結果が得られた[Fig. 1(c)]。

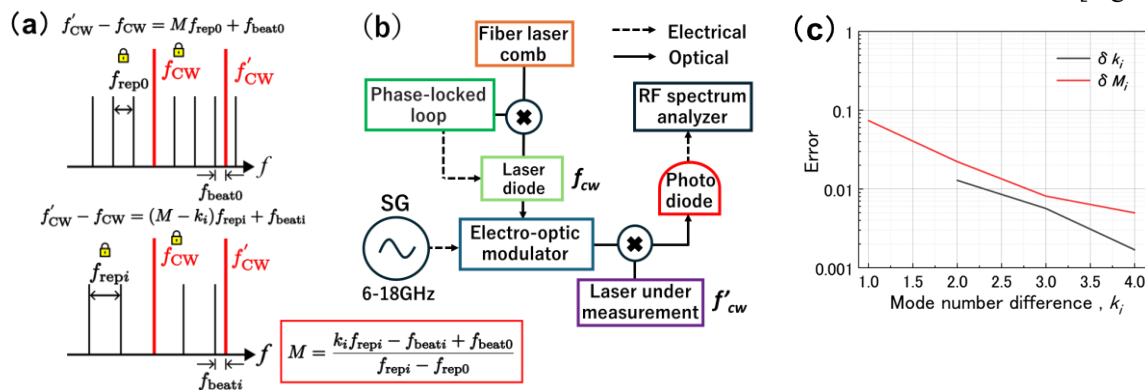


Fig.1. (a) single-comb Vernier method. (b) Experimental setup. (c) Error analysis for k_i and M values.

[1] A. Ishizawa, *et al.*, *Sci. Rep.* **13**, 8750 (2023).

[2] K. Hitachi, *et al.*, *Opt. Express*, **33**, 16684 (2025).

本研究の一部は科研費(24K01388)の助成を受けて行われました。

デュアルコムレーザーによるラマンソリトンの発生

Generation of Raman Solitons based on a dual-comb fiber laser

東邦大¹, 浜松ホトニクス株式会社²○高星拓海¹, 武子尚生¹, 高橋 永斉², 川嶋 利幸², 中嶋善晶¹Toho Univ.¹, Hamamatsu Photonics K.K.²○Takumi Takahoshi¹, Naoki Takeshi¹, Hisanari Takahashi², Toshiyuki Kawashima²,Yoshiaki Nakajima¹E-mail: yoshiaki.nakajima@sci.toho-u.ac.jp

近年、高速・高分解能・広帯域な分光手法として、デュアルコム分光が注目されている。特に近年では、周波数安定化制御を必要とせず、1 台のレーザから繰り返し周波数がわずかに異なる 2 つの光コムを同時に出力可能なデュアルコムレーザーの開発が進展している[1]。我々はこの光源を用いて、ガス分光などに適用してきたが[2]、依然として測定時間と測定帯域の間に存在するトレードオフが課題となっており、その解決法が求められている。

本研究では、このトレードオフを解消する手法として、ラマンソリトンの自己周波数シフトによる波長可変特性に着目した[3]。Fig. 1(a)に示すように、東邦大学にて開発した双方向動作型デュアルコムファイバレーザーの出力を、Er 添加光ファイバ増幅器 (EDFA) によって光増幅し、その出力端にラマンファイバを接続する構成を実験的に検討した。その結果、Fig. 1(b)に示すように、CW ポートの EDFA 出力パワーを増加することで、ラマンソリトンが長波長側へ連続的にシフトする様子を確認した。これは、高ピークパワーのパルス光がラマンファイバ中で非線形ラマン散乱を誘起した結果と考えられる。本研究は NEDO の研究助成を受けて実施された。

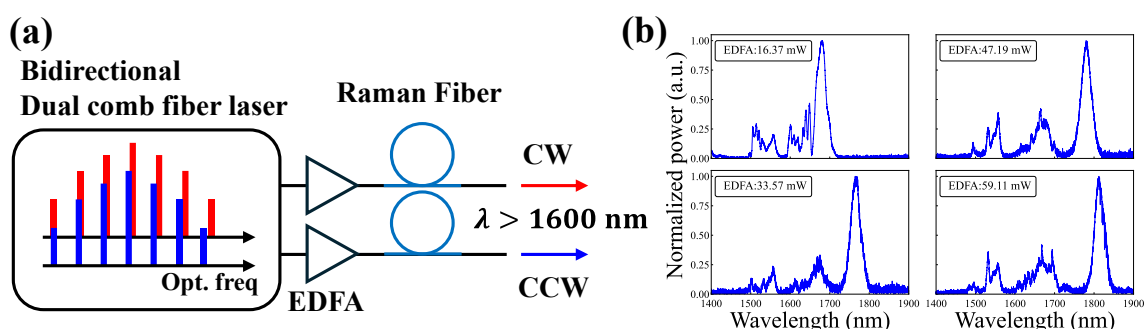


Fig.1 (a) Experimental setup, (b) Raman shift induced by increased output power from EDFA, observed at the CW port.

[1] Y. Nakajima, et al., Optics Express, 27, 5931 (2019)

[2] 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)

[3] N. Nishizawa and T. Goto, IEEE Photon. Technol. Lett. 11, 325–327 (1999).

コヒーレンスと周波数間隔を可変とする光テラヘルツ波の距離計測応用 Optical Terahertz Waves Generation with Variable Coherence and Frequency Interval and its Application to Distance Measurement

埼玉大学, (M1)中村真音, 能宗大輔, (B)村上颯汰, 塩田達俊

Saitama Univ., Mao Nakamura, Daisuke Noso, Sota Murakami, Tatsutoshi Shioda

E-mail : tshioda@mail.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

近年の産業分野において、製品の安全性、信頼性担保の観点から製品形状の全数検査の需要が高まっている。全数検査の達成には、製品を高速かつ高精度で非接触に計測する必要があるが、分解能 μm 、計測時間 ns を両立する手法はない。距離情報を含んだ位相を直流電圧値として得る新たな計測手法である2波長同時ヘテロダイン検波法[1]を提案し、分解能 μm 、計測時間 ns を達成した。本手法では、光周波数コムシンセサイザ/アナライザを用いてモードロックされた周波数の異なるテラヘルツ波を用いる。この周波数間隔 Δf を拡大することで計測精度が向上するが、干渉させた信号を計測に用いるため、デバイスの周波数帯は MHz 帯である。本実験では周波数間隔 Δf を 2.5GHz から 10THz まで拡大し、距離計測を行った。また低コヒーレンス光源でもこの原理が成り立つことを報告する。

2. 原理

光周波数コムシンセサイザ/アナライザによって生成された周波数間隔 Δf のテラヘルツ波を Fig1 のように2つの周波数成分のみを切り出し、これを信号光と呼ぶ。信号光に対し、わずかに中心周波数の異なる参照光を干渉させることでヘテロダイン検波を2つ同時に行う。この2つのビート信号を利用し、電圧値に変換し計測を行う。信号光と参照光の光路長差 ΔL を機械的に掃引すると、2波長ヘテロダイン検波法によって得られる直流電圧値の式は以下の(1)のようになり、正弦波を描く。

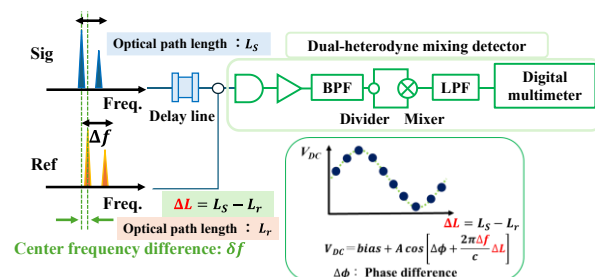


Fig.1. Principle of dual-heterodyne mixing

$$V_{DC} = \text{bias} + \alpha \cos\left(\Delta\phi + \frac{2\pi\Delta f}{c}\Delta L\right) \quad (1)$$

本手法では、音響光学素子(AOM)を用いて信号光から参照光を生成するため、2モード間にはコヒーレンスが必要ないと考えられ、低コヒーレンス光源においても同様に距離計測を行うことができる。

3. 実験と結果

(1)式より周波数間隔 Δf によって V_{DC} の波長が決まる。また、 Δf が 10THz であるとその波長は約 $30\mu\text{m}$ となる。したがって、 Δf を THz 帯とすることで $1\mu\text{m}$ の分解能を得ることができる。Fig.2 に 10THz まで拡大した際の計測結果を示す。

本実験において位相検出のために用いた計測機の周波数帯は MHz 帯であり THz 帯での位相計測を約 10^{-6} の帯域のデバイスで達成した。低コヒーレンス光源でも同様に位相・距離計測を達成した。

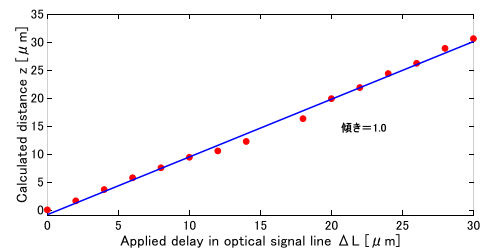


Fig.2 Distance z calculated from V_{DC} (10THz)

4. まとめ

本実験では分解能 μm 、計測時間 ns の位相・距離計測方法として2波長同時ヘテロダイン検波法を提案し、テラヘルツ波を 10^{-6} の帯域のデバイスで約 3% の精度で距離計測を達成し、低コヒーレンス光源においても計測が可能であることを報告した。

参考文献

- [1] T. Shioda, T. Yamazaki, "Proposal of dual-heterodyne-mixing method and application to high-speed waveform measurement using low-speed equipments", Optics Communications, Volume 283, Issue 23, December (2010), 4733-4740

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.4】 3.8 テラヘルツ全般、3.11 ナノ領域光科学・近接場光学のコードシェアセッション

[9a-N102-1~10] CS.4 3.8 テラヘルツ全般、3.11 ナノ領域光科学・近接場光学のコードシェアセッション

[9a-N102-1]

非相反Fano共鳴を有する単一メタ分子による一方向モード励起

○(M2)石田 浩己¹、黒澤 裕之¹、上田 哲也¹ (1.京都工繊大)

[9a-N102-2]

高屈折率・低反射なメタサーフェスによる0.3 THz帯エアリービーム生成素子の設計

○田中 悠太¹、落合 真海¹、鈴木 健仁¹ (1.農工大)

[9a-N102-3]

搬送波を超えた周波数で動作する時間変調磁性メタマテリアルによるマイクロ波周波数変換

○(PC)児玉 俊之¹、菊池 伸明²、千葉 貴裕³、岡本 聡^{4,5}、大野 誠吾⁶、富田 知志^{1,6} (1.東北大高教機構、2.秋田大院理工、3.山形大院理工、4.東北大多元研、5.東北大CSIS、6.東北大院理)

[9a-N102-4]

高抵抗率単結晶シリコン基板上に形成されたテラヘルツ帯フォトニック集積回路用MEMS駆動可変光減衰器

○千葉 滉平¹、金森 義明¹ (1.東北大工)

[9a-N102-5]

誘電体基板上に形成された金属格子によるテラヘルツ帯透過型フィルタ

○(M2)島田 陽人¹、金森 義明¹ (1.東北大工)

[9a-N102-6]

赤外波長空間分割メタ表面の構築

○(M2)和田 一希¹、西島 喜明^{2,3}、松尾 保孝⁴ (1.横浜国大理工、2.横浜国大工、3.JSTさがけ、4.北大電子研)

[9a-N102-7]

導電性高分子PEDOT/PSSインクのスクリーン印刷により作製したオールポリマー広帯域電波吸収メタマテリアルのマイクロ波吸収特性

○松井 龍之介¹、芳川 翔¹、滝川 和希¹、寺井 裕人¹、青木 裕介¹、村田 博司¹ (1.三重大院工)

[9a-N102-8]

表面格子共鳴に結合した準BICモードに基づく波長・帯域可変プラズモニックメタサーフェス吸収体

○川崎 大輝¹、田中 拓男¹ (1.理研)

[9a-N102-9]

シリコンフォトニック結晶を用いた広帯域テラヘルツ半波長板の構造最適化計算による高性能化

○山根 秀勝¹、山田 義春¹、近藤 裕佑¹、富士田 誠之²、村上 修一¹ (1.大阪産業技術研究所、2.阪大院基礎工)

[9a-N102-10]

Fabrication and optical characterization of near infrared metasurfaces based on
monocrystalline yttrium iron garnet thin films

○Siyuan Gao¹, Kota Taniguchi¹, Yambe Takeru¹, Hironobu Yoshimi¹, Satoshi Iwamoto^{2,3},
Yasutomo Ota¹ (1.Keio Univ., 2.IIS, Utokyo, 3.RCAST, Utokyo)

非相反 Fano 共鳴を有する単一メタ分子による一方向モード励起

Unidirectional mode excitation by a single metamolecule

with nonreciprocal Fano resonance

京都工繊大 [○](M2) 石田 浩己, 黒澤 裕之, 上田 哲也

Kyoto Institute of Technology, [○]Koki Ishida, Hiroyuki Kurosawa, and Tetsuya Ueda

E-mail: m4621002@edu.kit.ac.jp

空間反転対称性を破った系に磁性を導入することにより時空間反転対称性が同時に破れ、磁気カイラル効果や電気磁気効果などの無偏波の電磁波に対する方向複屈折(2色性)が得られる[1]. 我々はこれまでに、Q 値が大きく異なる 2 つの共鳴間で生じる Fano 共鳴と磁性の協奏により電気磁気効果が生じ、マイクロ波の一方向透過が起こることを数値計算および実験により確かめた[2]. 一方、相反原理より、一方向だけに吸収を示す系では、一方向へ電磁モードを励起することができると考えられる. 今回、非相反 Fano 共鳴を有するメタ分子によるマイクロ波の一方向へのモード励起を観測したので、それについて報告する.

図 1 に今回提案するメタ分子とその給電系の模式図を示す. 金属ダブルバー(以下 double bar :DB)が YIG(Yttrium Iron Garnet)板上に配置されており、YIG 板は金属 DB と平行方向に磁化している. このメタ分子に $-y$ 方向から挿入したマイクロストリップ線路で給電し、Port3 から Port1 および 2 への透過係数(S_{13} および S_{23})を数値計算により求めた.

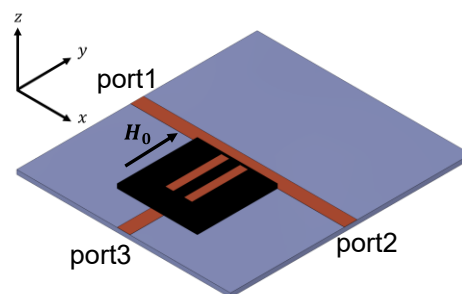


図 1: メタ分子の模式図.

図 2 に透過率の計算結果を示す. 赤および青線はそれぞれ $|S_{13}|^2$ および $|S_{23}|^2$ である. 周波数 4.5 および 4.7 GHz 近傍の共鳴ピークはそれぞれ金属 DB に誘起される電流が対称, および反対称のモードに対応している. 反対称モードでは、透過率の差分が約 0.37 となる非相反応答を示した.

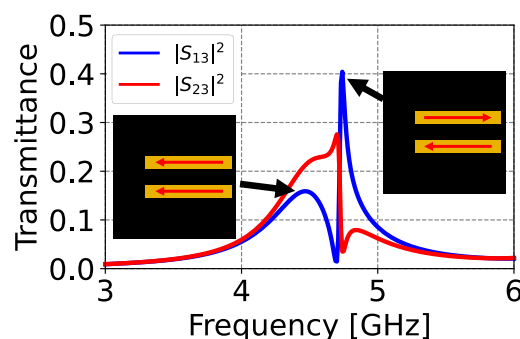


図 2: 透過特性の計算結果および対称, 反対称モードの模式図(inset).

当日は、実験結果も交えながら、非相反 Fano 共鳴を有するメタ分子により一方向モード励起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] H. Kurosawa *et al.* Opt. Express **30**, 37066-37075 (2022). [2] 石田ほか 第 72 回応物春季学術講演会(15p-K506-12).

高屈折率・低反射なメタサーフェスによる 0.3 THz 帯エアリービーム生成素子の設計

Design of airy beam element made with high refractive index and low reflectance metasurface in the 0.3-THz band

○田中 悠太¹, 落合 真海¹, 鈴木 健仁²

○Yuta Tanaka¹, Mahiro Ochiai¹, Takehito Suzuki³

東京農工大学 工学府 知能情報システム工学専攻¹, 東京農工大学 工学研究院 先端電気電子部門²

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology¹

Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology²

Email: takehito@go.tuat.ac.jp

1. まえがき

テラヘルツ波は、従来の無線通信で用いられているマイクロ波やミリ波よりも高周波な電磁波であり、次世代の高速無線通信[1]での利用が期待されている。しかしながら、高周波の電磁波は回折が起こりづらくなり、所望の位置に電磁波が届きづらいという課題がある。そこで、本研究では、独自の高屈折率・無反射なメタサーフェス[2]を積層した構造により、非回折光の一つであるエアリービーム[3]をテラヘルツ波帯で生成する光学素子を設計した。エアリービームは、自己修復性や自己加速性などの特長を有する電磁波である[4]。エアリービーム生成素子を実証することで、テラヘルツ波帯での障害物のある伝搬路における通信[5]などへ貢献できる。

2. エアリービーム生成素子の構造

図 1(a)、(b)にそれぞれ設計したエアリービーム生成素子の正面図と単位周期構造を示す。設計したエアリービーム生成素子は、0.312 THz の平面波をエアリービームに変換する。設計した素子は、誘電体基板の表と裏の両面の対称な位置にカット金属ワイヤーを配置した平面構造を、接着シートで 3 層積層した構造である。図 1(a)の平面構造は、寸法の異なるカット金属ワイヤーで理想の透過位相遅れ分布を模擬するように設計している。図 1(b)の単位周期構造のカット金属ワイヤーの長辺方向の長さ l と間隔 g を変化させることで、様々な透過位相遅れを設計できる。

図 2(a)に、今回設計したエアリービーム生成素子の y 軸方向の理想の透過位相遅れ分布を示す。エアリービーム生成素子の理想の透過位相遅れが、式(1)に示すエアリー関数 $Ai(y/u)$ が図 2(b)に示すように正の値の場合には 0 度、負の値の場合には 180 度、となるように設計する[3]。ここで、式(1)中の y はエアリービーム生成素子の素子平面上の y 座標を示し、 u は定数である。今回、 u は参考文献[3]の値を参考に試行として $u=840$ とした。

$$Ai\left(\frac{y}{u}\right) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos\left(\frac{t^3}{3} + \frac{y}{u}t\right) dt \quad (1)$$

3. エアリービーム生成素子

図 3(a)、(b)、(c)にはそれぞれ、(a)設計したエアリービーム生成素子の伝搬路に障害物を設置していない場合と(b)障害物を設置した場合、(c)ガウシアンビームを障害物に対して入射した場合の電界強度分布の解析結果を示す。図 3(a)、(b)、(c)の 3 つともに、入射波には半径 5 mm のガウシアンビームを用い、障害物には寸法が 9.5 mm × 1 mm × 1 mm の完全導体(PEC)を用いた。解析は Ansys 社の有限要素法電磁界シミュレータ HFSS を用いた。図 3(a)の解析結果から、エアリービーム生成素子通過後のテラヘルツ波のメインロブと複数個のサイドロブが y 軸の正の方向に湾曲している。設計したエアリービーム生成素子通過後のテラヘルツ波

が、エアリービームの特性である自己加速性を有していると考えられる。また、図 3(b)、(c)の解析結果から、エアリービーム生成素子通過後の電磁波は、ガウシアンビームよりも、PEC を通過後の電界強度が顕著に高いことを確認した。設計したエアリービーム生成素子通過後のテラヘルツ波が、エアリービームの特性である自己修復性を有すると考えられる。以上より、独自の高屈折率・無反射なメタサーフェスを積層した構造によりエアリービーム生成素子を設計した。

4. まとめ

独自の高屈折率・無反射なメタサーフェスを積層した構造により、エアリービーム生成素子を設計した。今後、設計したエアリービーム生成素子の作製、実験評価を進める。本研究成果は、独自の高屈折率・無反射なメタサーフェスを積層した構造が幅広く応用可能なことを示唆している。

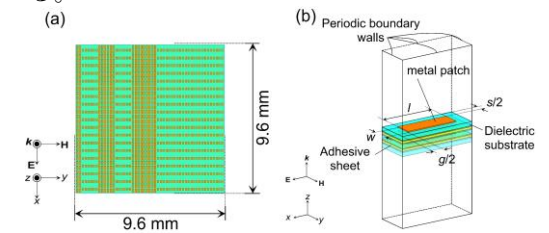


Fig.1 (a) Front view of the designed airy beam element and (b) unit structure used for the element.

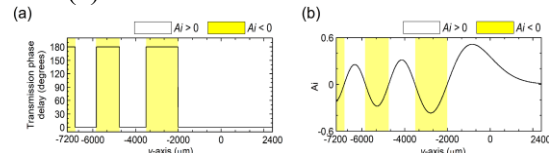


Fig.2 One-dimensional (a) phase distribution of the airy beam element and (b) airy function in the y -axis.

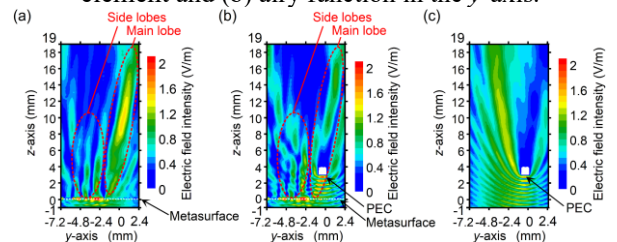


Fig.3 Simulated electric field intensity distribution of (a) airy beam, (b) airy beam with a PEC obstacle, and (c) gaussian beam with a PEC obstacle.

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] S. Dang et al., Nat. Electron. **3**(1), 20–29 (2020).
- [2] K. Ishihara and T. Suzuki, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, **38**(9), 1130–1139 (2017). (日本特許 6596748 号, 日本特許 7315983 号)
- [3] Y. Zhuang et al., Optics Express, **32**(18), 31325–31333 (2024).
- [4] J. Broky et al., Optics Express, **16**(17), 12880–12891 (2008).
- [5] J. Hu et al., Nat. Commun. **15**(2944), 1–9 (2023).

搬送波を超えた周波数で動作する時間変調磁性メタマテリアルによる マイクロ波周波数変換

Microwave Frequency Conversion using Time-varying Magnetic Metamaterials

Operating at Frequencies beyond the Carrier-wave Frequency

東北大高教機構¹, 秋田大院理工², 山形大院理工³, 東北大多元研⁴, 東北大 CSIS⁵, 東北大院理⁶

○ 児玉 俊之¹, 菊池 伸明², 千葉 貴裕³, 岡本 聡^{4,5}, 大野 誠吾⁶, 富田 知志^{1,6}

IEHE, Tohoku Univ.¹, Akita Univ.², Yamagata Univ.³, IMRAM,⁴ CSIS,⁵ Dept. of Physics,
Tohoku Univ.⁶

○ T. Kodama¹, N. Kikuchi², T. Chiba³, S. Okamoto^{4,5}, S. Ohno⁶, S. Tomita^{1,6}

E-mail: tkodama@tohoku.ac.jp

誘電率(ϵ)や透磁率(μ)を時間領域で制御する時間変調メタマテリアルが関心を集めている。 ϵ や μ が変調すると搬送波が変調周波数で周波数変換される。これまでの ϵ 変調による可視-近赤外光の周波数変換[1]に対し、我々は μ の時間変調に取り組んでいる。前回、 μ 時間変調メタマテリアルによるマイクロ波の周波数変換を初めて実証し、上方/下方変換の非対称性について報告した[2]。変調周波数が搬送波の周波数を超える条件では時間回折などの特異な現象が起こる可能性があり興味深い。そこで今回は、変調周波数が十分高い条件での周波数変換について報告する。

Fig. 1(a)と(b)に作製した μ 時間変調メタマテリアルの光学顕微鏡像を示す。非ドーピングシリコン基板に厚さ 200 nm の金 (Au) の蛇行線路 (橙色)、厚さ 200 nm のガラス (SiO₂) のスペーサ (青色)、厚さ 200 nm の Au のコプレーナ伝送線路 (CPW, 赤色) をスパッタリング成膜とリソグラフィ工程で作製する。最後に厚さ 250 nm の強磁性体 Ni₈₀Fe₂₀ を蛇行線路と CPW が交差する 5 μ m $\times$ 5 μ m の領域に成膜する (Fig.1(b) 緑色)。

電磁石で 30.4 mT の直流磁場 H_{dc} を $-x$ 方向に印加する。蛇行線路に周波数 4.0 GHz の変調波を流し、CPW にはそれより低い周波数 0.7 GHz の搬送波を流した。スペクトラムアナライザで測定した透過スペクトルを Fig.1 (c) 挿入図に示す。0.7+4.0=4.7 GHz の変換波が生成されている。また Fig.1 (c) より、変換波の振幅強度が磁場に依存することがわかる。これは 0.7 GHz の搬送波が、自身よりも高速の 4.0 GHz で動作する μ 変調を介して変換されていることを示している。講演ではより詳細な実験結果と数値計算を交えて議論する。

本研究は JST-CREST(JPMJCR 2102) によって支援されている。東北大の金森義明教授との有益な議論に感謝する。[1] Y. Zhou et al., Nat. Commun. 11, 1 (2020). [2] T. Kodama et al., arXiv:2503.04571, 児玉他、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 15p-K305-13.

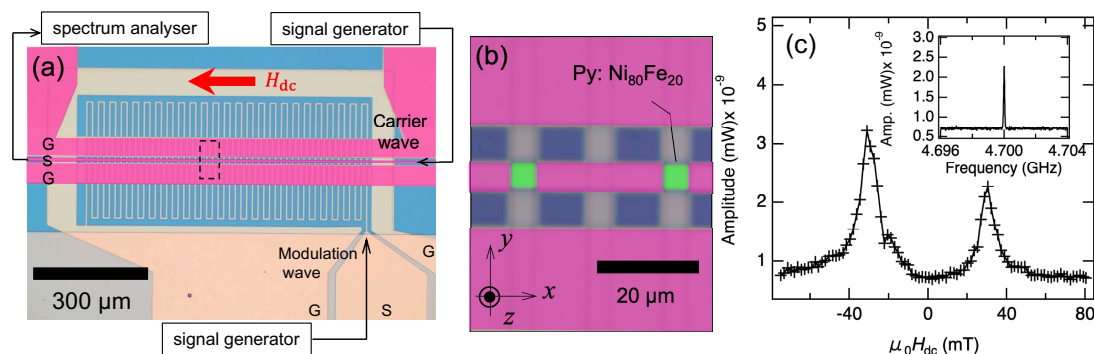


Fig 1: (a) A photograph of the metamaterial device and (b) an enlarged view. (c) Amplitude of the converted signal as a function of dc magnetic fields. Inset: Converted signal spectra.

高抵抗率単結晶シリコン基板上に形成された テラヘルツ帯フォトニック集積回路用 MEMS 駆動可変光減衰器 MEMS-Actuated Variable Optical Attenuator Formed on a High-Resistivity Single-Crystal Silicon Substrate for Terahertz-Band Photonic Integrated Circuits

東北大工¹ ○千葉 滉平¹, 金森 義明¹

Tohoku Univ.¹ ○Kohei Chiba¹, Yoshiaki Kanamori¹

E-mail: ykanamori@tohoku.ac.jp

次世代移動通信システム (6G) 用の電波として期待されているテラヘルツ波を、低損失で伝送・制御するために、高抵抗率シリコン導波路を基盤としたテラヘルツ帯フォトニック集積回路 (THz-PIC) の研究が進められている^[1]。THz-PIC において、移相器や可変スプリッタ、可変光減衰器 (VOA) などの可変パッシブ素子は、回路の効率性や信頼性向上において重要な役割を果たす。しかしテラヘルツ領域では、変調度の大きな材料や低損失な材料が限られており、可変パッシブ素子の消費電力の増大や挿入損失の増加が課題である。本研究では、微小電気機械システム (MEMS) に基づく低消費電力かつ低挿入損失な VOA を提案する。

提案する VOA (Fig. 1) は、分断された固定導波路と可動導波路から構成され、可動導波路は静電アクチュエータと一体化している。静電アクチュエータに印加する電圧を変化させることで、導波路を連続状態から完全分断状態まで連続的に制御できる。本素子は吸収損失が小さい高抵抗率シリコン導波路のみを伝搬する構造なため、低い挿入損失を実現できる。一般的に、静電アクチュエータは silicon-on-insulator 基板上に製作されるが、本研究では単層の高抵抗率単結晶シリコン基板上に製作する構成を考案し、実証に成功した。VOA は高い精度で製作され、印加電圧に対する可動導波路の変位量は理論値と 10 μm 以内の誤差で制御できた。テラヘルツ周波数領域分光装置による透過波強度の測定結果から、周波数 0.3 THz において電圧 0 V (導波路の完全分断状態) から 60 V (連続状態) にかけて透過波強度は単調に増加し、最大消光比 -22.1 dB を達成した (Fig. 2)。さらに、最大消費電力 12.5 mW は従来研究の 1/60 以下、挿入損失 0.56 dB は従来研究の約 1/5 に抑えられた^[2]。

本研究の一部は JSPS 科研費 Grant No. 25KJ0563, JST SPRING Grant No. JPMJSP2114, JST CREST Grant No. JPMJCR2102 の助成を受けた。本研究に対して有益なコメントをいただいた猪股直生博士、岡谷泰佑博士に感謝申し上げる。

[1] D. Headland, *J. Light. Technol.* **38**, (2020) 6853.

[2] M. Mittendorff, *ACS Photonics* **4**, (2017) 316.

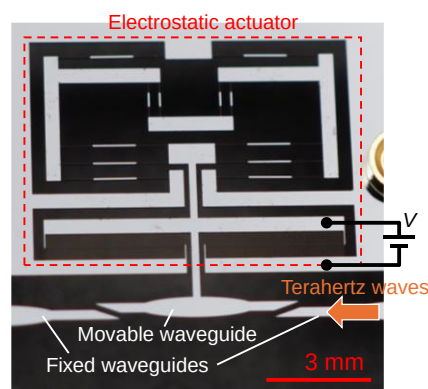


Fig. 1 Top view of the fabricated variable optical attenuator.

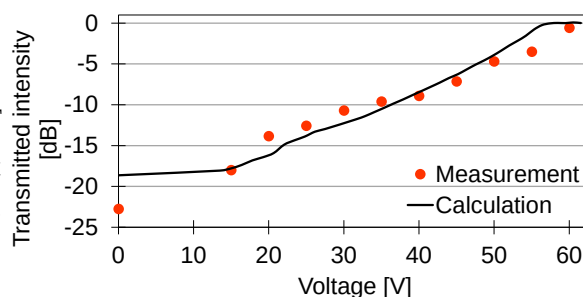


Fig. 2 Transmitted intensity.

誘電体基板上に形成された金属格子によるテラヘルツ帯透過型フィルタ

Terahertz-Band Transmissive Filter Using Metallic Grids Formed on Dielectric

Substrates

東北大工¹ ○(M2) 島田陽人¹, 金森義明¹

Tohoku Univ.¹, ○Haruto Shimada¹, Yoshiaki Kanamori¹

E-mail: ykanamori@tohoku.ac.jp

次世代移動通信システム（6G）用の電磁波としてテラヘルツ波の利用が期待されている。テラヘルツ帯で利用されるバンドパスフィルタとして、金属メッシュが 1960 年代から用いられており、それに関する研究が取り組まれてきた^[1]。本研究では、テラヘルツ帯の電磁波を高効率で透過するバンドパスフィルタを、市販のシクロオレフィンポリマー（Cyclo Olefin Polymer: COP）フィルムへ周期的に金（Au）を蒸着させることで設計した。また、作製されたフィルタの透過特性を 0.3 THz から 0.4 THz のサブテラヘルツ帯で実験的に検証した。

設計したフィルタの断面形状を Fig. 1(a)に示す。ユニットセル及び金属格子部分は正方形である。周波数 0.3 THz から 0.4 THz の電磁波を金属格子方向から垂直に入射させ、各パラメータを変化させ、最適な透過率を持つフィルタを計算にて決定した。入射電磁波波長を 0.1 μm 刻みで計算した結果、ユニットセル周期 $\Lambda=712 \mu\text{m}$ 、金属格子層厚み $d_g=100 \text{ nm}$ 、COP フィルム厚み $d_h=188 \mu\text{m}$ 、フィルファクター $F=0.78$ の場合に、0.38 THz で透過率が 0.94 と最大になった。実際に製作されたフィルタの表面を観察した図を Fig.1 (b)に示す。次に、光学特性はテラヘルツ周波数領域分光装置により測定した。放物面鏡を用いて作製したフィルタに平行ビームを入射させ、フィルタの透過率を測定した。Fig. 2 に計算結果と測定結果を示す。測定の結果、0.38 THz で透過率 0.94 と最大となった。測定結果は、厳密結合波解析法により計算した透過率とよく一致した。

本研究の一部は、JST-CREST（JPMJCR2102）の支援を受けた。本研究に対し有益なコメントを頂いた猪股直生博士に感謝申し上げる。

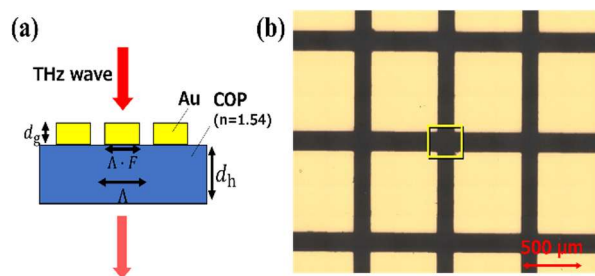


Fig. 1 (a) Across section of a transmissive filter

(b) A top view of fabricated filter.

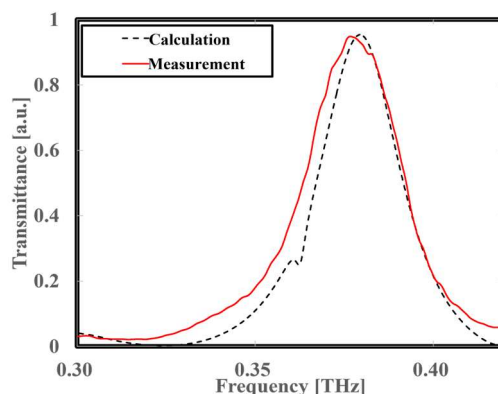


Fig. 2 Calculated and measured results.

[1] K. Sakai and L. Genzel: Review of Infrared and Millimeter Waves, Ed. K. J. Button, pp.155-247, Plenum Press, New York (1983).

赤外波長空間分割メタ表面の構築

Construction of space-dividing metasurface in mid infrared wavelength

横浜国立大学大学院理工学府¹, 横浜国立大学大学院工学研究院²,JST さきがけ³, 北海道大学電子科学研究所⁴○ (M2) 和田 一希¹, 西島 喜明^{2,3}, 松尾 保孝⁴Graduate School of Engineering Science, Yokohama National Univ.¹, Faculty of Engineering, YokohamaNational Univ.², PRESTO-JST³, Research Institute for Electronic Science, Hokkaido Univ.⁴,°Kazuki Wada¹, Nishijima Yoshiaki^{2,3}, Yasutaka Matsuo⁴

E-mail: wada-kazuki-df@ynu.jp

【緒言】多成分同時検出赤外ガスセンサの実現¹⁻²⁾に向け、任意の波長を任意の空間に対して集光する波長空間分割メタ表面デバイスの構築が強く望まれている。本研究では、MIM 構造 (Au-SiO₂-Au ナノ構造体) のメタ表面が持つ高効率光熱変換³⁾にメタレンズ構造を導入⁴⁾することで、異なる波長を異なる焦点位置に集光できるメタレンズを実現する (図 1)。本発表では時間領域差分 (FDTD) 法による解析と半導体微細加工技術による作製について報告する。

【実験手法】多波長分割を実現するために、非対称十字型メタ分子を用いる。異なる偏光に対する放射位相を FDTD 法により網羅的に探索した。次に、球面レンズの式によって二次元的にメタ分子を配置し、全メタレンズの解析を行った。

【結果・考察】上記手法により設計したメタ表面について解析を行った。図 2 は x-y 電界強度分布図 (z=30 μm) であり、このメタ表面は波長 5.0 μm, 5.5 μm, 6.0 μm, 6.5 μm の光をそれぞれ、(20 μm, 0, 30 μm), (0, 20 μm, 30 μm), (-20 μm, 0, 30 μm), (0, -20 μm, 30 μm) の座標に集光させるよう設計を行っている。電界強度分布図から焦点座標における集光の様子が確認できており、本デバイスがレンズの役割を果たすことが確認できた。FDTD 法による解析と作製の評価について報告する。

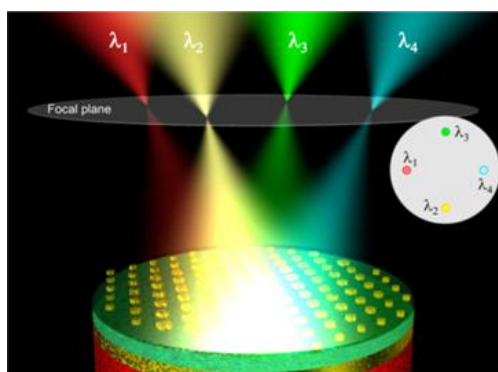


Figure 1 Schematic diagram of the metasurface fabricated in this study

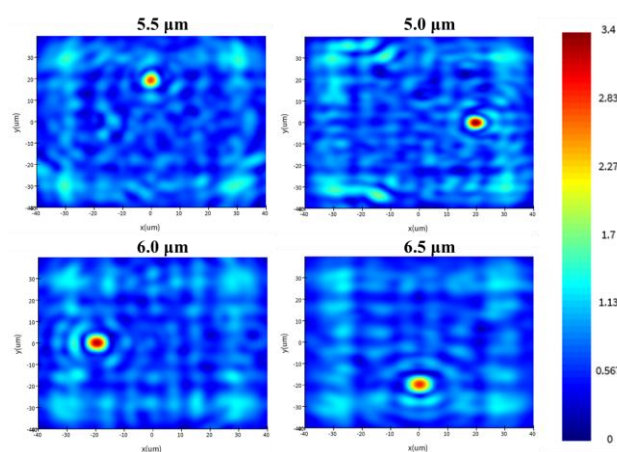


Figure 2 Electric field intensity distribution map for each wavelength

【参考文献】¹⁾ Y. Nishijima *et al.*, Opt. Express. **21**, 13502-13514, (2013). ²⁾ Y. Nishijima *et al.*, Opt. Express. **30**, 4058-4070 (2022). ³⁾ Y. Nishijima *et al.*, Sci. Repo. **9**, 8284 (2019). ⁴⁾ Y. Nishijima *et al.*, ChemRxiv. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2025-swmcj>, (2025).

導電性高分子 PEDOT/PSS インクのスクリーン印刷により作製したオールポリマー広帯域電波吸収メタ材料のマイクロ波吸収特性

Microwave Absorption Characteristics of All-Polymer Broadband Metamaterial

Absorber Fabricated by Screen Printing of Conducting Polymer PEDOT/PSS Ink

三重大院工¹, [○]松井龍之介¹, 芳川 翔¹, 滝川 和希¹, 寺井 裕人¹, 青木 裕介¹, 村田 博司¹

Mie Univ.¹, [○]Tatsunosuke Matsui¹, Sho Yoshikawa¹, Kazuki Takikawa¹, Hiroto Terai¹, Yusuke Aoki¹,

Hiroshi Murata¹

E-mail: matsui@elec.mie-u.ac.jp

情報通信技術の開発が近年ますます進展する中、電波吸収体への需要も高まっている。そのような中、薄型の電波吸収体を実現する技術として電波吸収メタ材料に関する研究が国内外において活発に行われており、広帯域吸収を示すメタ材料 (broadband metamaterial absorber: BMMA) も数多く報告されている [1]。既報の電波吸収メタ材料の多くは金属パターン層/誘電体層/金属接地面の MIM の三層で構成されているが、本研究グループでは、金属層として導電性高分子 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT/PSS)を用いて、ポリマー基板へのスクリーン印刷によるオールポリマーBMMA の開発を検討してきた。これまでに、数値電磁界シミュレーションによる素子の設計 [2] や、高抵抗パターン層および低抵抗接地面に適した表面抵抗率を得るための印刷条件の検討 [3] について報告してきた。本研究では、PEDOT/PSS インクのスクリーン印刷による素子の作製と、マイクロ波吸収特性の測定結果について報告する。

インクには、市販のスクリーン印刷用 PEDOT/PSS インク (Orgacon EL-P-5015, 日本アグフアマテリアルズ) を用い、スクリーン印刷用卓上型手刷台 (WHT ラボ, ミノグループ) を用いて PET フィルム上に印刷したものをフォーム基板に貼り付けて素子を作製した。図 1(a)および(b)に、作製した BMMA の写真ならびに測定した吸収スペクトルをそれぞれ示す。Wi-Fi の 2.4 GHz および 5 GHz をカバーするような広帯域で無反射吸収特性が得られている。

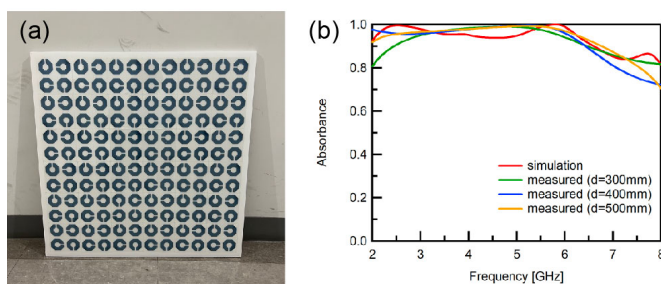


Fig. 1: (a) Photograph of BMMA fabricated by screen printing of PEDOT/PSS ink. (b) Measured absorption spectra.

謝辞：本研究は、科研費 (24K07560)・電気通信普及財団の援助により行われたものである。

参考文献

- [1] B.-X. Wang *et al.*, Adv. Funct. Mater. **33**, 2213818 (2023).
- [2] 芳川他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集, 20a-P02-8 (2024).
- [3] 芳川他, 電気学会研究会資料, DEI24088, pp. 19-23 (2024).

表面格子共鳴に結合した準 BIC モードに基づく
波長・帯域可変プラズモニックメタサーフェス吸収体
Tunable Plasmonic Metasurface Absorber based on
Surface Lattice Resonance-coupled q-BIC mode

理研¹ ○川崎 大輝¹, 田中 拓男¹

RIKEN¹, °Daiki Kawasaki¹, Takuo Tanaka¹

E-mail: daiki.kawasaki@riken.jp

金属（プラズモニック）や誘電体（ミートロニック）のナノ構造を二次元平面に配列したメタサーフェスは、面内で光を強く局在化させる特性から、光-物質間相互作用の増強とそれに伴う透過/吸収シグナル変化を利用した非標識の物質センシングに応用できる。センサ感度を決定する重要因子は共鳴下での電場増強度と線幅である。一般的に、プラズモニック構造は微小モード体積により高い増強度を持つが寄生損失により線幅が広い。一方で、ミートロニック構造は低損失により狭い線幅を持つが波長程度のモード体積により増強度が低い。従来、両者はトレードオフの関係にあり、両立には限界がある。この限界打破の一つの方法は、プラズモニックメタサーフェスの線幅の狭化である。そのためには、放射損失の低減が必要であり、その方法として以下の二つが挙げられる；1）表面格子共鳴：ナノ粒子の局在表面プラズモンの集団振動と回折モードの結合により実効的な放射損失を低減できるが、ナノ構造密度と散乱/吸収断面積の低下により信号強度も低下し、波長・帯域調整も限定される；2）パラメトリック準 BIC (Bound State in the Continuum)：構造パラメータ空間中 BIC 近傍での対称性破壊により放射損失を制御できるが、信号強度も放射結合に伴い低下する。

本発表では、パラメトリック準 BIC モードを表面格子共鳴に結合させることで、高増強度・狭線幅を両立し、かつ、パラメータスケーリングにより波長・帯域を近赤外全域（700 ~ 1600 nm）で調整可能なプラズモニックメタサーフェス吸収体について報告する。まず、数値計算

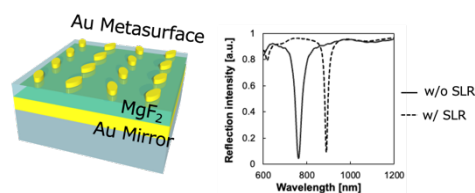


Figure 1. Plasmonic metasurface (left) and its reflection spectrum w/o and w/ surface lattice resonance (SLR).

と実験測定から、準 BIC モードと表面格子共鳴との結合を観測した。格子定数の $1/4 \rightarrow 1/2$ 波長への拡張に伴い線幅が狭化し、かつ、分散性が顕著になった。この結果から、準 BIC モードは表面格子共鳴と結合できると考えられる。さらに、対称性破壊パラメータ（楕円配向角度）の操作で、結合有無の双方で線幅と吸収強度を調整できることを確認し、表面格子共鳴結合下でも準 BIC の特性を保持できることを明らかにした。さらに、結合下では、非結合下の約 $1/3$ の線幅で同等の吸収強度を呈した。結合モード理論を用いて、これらの起源を解析したところ、結合下では、表面格子共鳴モードの線幅を保持しつつ、対称性破壊パラメータで吸収強度を制御できることがわかった。最後に、パラメータスケーリングで単一吸収バンドを近赤外全域で調整できることを確認した。これらの特性は、今後の非標識センサへの応用において、従来のセンサ性能値の刷新に繋がると期待できる。

シリコンフォトニック結晶を用いた広帯域テラヘルツ半波長板の 構造最適化計算による高性能化

Performance Enhancement via Structural Optimization of Broadband Terahertz Half-Waveplates Based on All-Silicon Photonic Crystals

大阪技術研¹, 阪大基礎工²

○山根 秀勝¹, 山田 義春¹, 近藤 裕佑¹, 富士田 誠之², 村上 修一¹

ORIST¹, Univ. of Osaka²,

°Hidemasa Yamane¹, Yoshiharu Yamada¹, Yusuke Kondo¹, Masayuki Fujita², Shuichi Murakami¹

E-mail: yamane.hidemasa@orist.jp

テラヘルツ帯域のデバイスは、通信、医療、セキュリティなど多岐にわたる分野での応用が期待され、その伝搬制御技術が求められている。我々は MEMS 微細加工技術を用いて、シリコンに楕円状の周期貫通孔を加工した 2 次元異方性フォトニック結晶を作製し、テラヘルツ帯域において広帯域に機能する半波長板を開発した[1]。しかしながらこの半波長板は、理論上、結晶構造に起因する束縛状態と考えられるピークの鋭い共鳴が半波長板としての機能帯域に複数現れており、潜在的欠陥となる可能性を持っていた。

本研究では、先行研究で得られた形状パラメータを起点に、楕円長軸 a および短軸 b と、それぞれの方向の周期 x , y の 4 つを制御変数として、構造最適化計算を用いて半波長板の高性能化を目指した。フォトニック結晶の速軸、遅軸の位相差の π からのずれの絶対値を目的関数として、COMSOL Multiphysics を用いた解析を行った。最適化前と後のフォトニック結晶の位相差のスペクトルをそれぞれ Fig. 1 の青、赤線で示す。いずれも広帯域で位相差がおよそ π となっているが、最適化前（青線）では複数のピーク含まれているのに対して、最適化後（赤線）では 0.4–0.7 THz の全帯域でピークのない滑らかなスペクトルが得られた。最適化されたフォトニック結晶構造は Fig. 2 に示す。これは MEMS 微細加工技術により容易に作製可能なサイズスケールであった。高抵抗シリコン基板にフォトリソグラフィとシリコン深掘りエッチング装置を用いてこのフォトニック結晶を作製し、テラヘルツ時間領域分光法により位相差スペクトルを測定した。その結果、理論性能をよく再現する広帯域半波長板としての機能を確認することができた。

本研究は科研費 JP2 4K 00933 の助成を受けて実施された。

[1] 山根ら, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-A34-6 (2024).

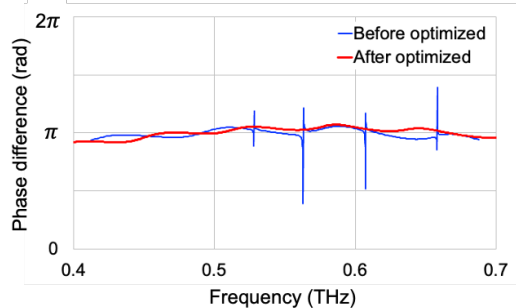


Fig. 1. Phase difference spectra of half-waveplate. Blue and red lines are corresponding to the designs before and after optimized, respectively.

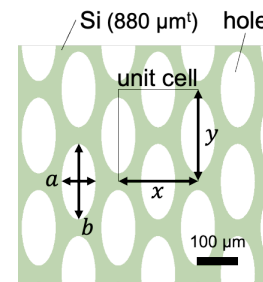


Fig. 2. Schematic of the biaxial all-silicon photonic crystal designed through structural optimization.

単結晶イットリウム鉄ガーネット薄膜を母材とした 近赤外メタサーフェス構造の作製と光学評価

Fabrication and optical characterization of near infrared metasurfaces based on monocrystalline yttrium iron garnet thin films

慶應理工¹, 東大先端研², 東大生研³, ○高 思源¹, 谷口 公太¹, 山家 健¹,
吉見 拓展¹, 岩本 敏^{2,3}, 太田 泰友¹

Keio Univ.¹, RCAST², IIS³, the Univ. of Tokyo. ○Siyuan Gao¹, Kota Taniguchi¹, Takeru Yambe¹,
Hironobu Yoshimi¹, Satoshi Iwamoto^{2,3}, Yasutomo Ota¹

E-mail: gaosy@keio.jp

Nanopatterning magneto-optical (MO) materials is a promising route toward compact nonreciprocal photonic devices. Monocrystalline yttrium iron garnet (YIG) and its derivatives are representative transparent MO materials in the near infrared, yet their physical hardness and chemical inactivity make nanopatterning extremely challenging [1]. This fabrication challenge has hampered the realization of YIG-based metasurfaces capable of tight light confinement, causing a lag behind recent rapid advances in all-dielectric MO metasurface designs [2-3]. Previously, a bismuth-substituted YIG (Bi:YIG) metasurface has been demonstrated on a gadolinium gallium garnet (GGG) substrate [4]. However, the small refractive index contrast between YIG and GGG limited the light confinement within the MO layer. In this work, we report the nanofabrication and optical characterization of a MO metasurface based on monocrystalline Bi:YIG prepared on SiO₂ operating at near infrared wavelengths.

The metasurface comprises a two-dimensional (2D) array of elliptical air holes (period $P = 700$ nm, major axis $a = 350$ nm, minor axis $b = 380$ nm, thickness h) patterned into a Bi:YIG membrane on a silica substrate (Fig 1(a)). Fabrication of the monocrystalline Bi:YIG layer on SiO₂ involves wafer bonding process, followed by grinding and chemical mechanical polishing of the Bi:YIG layer. The final thickness was finely controlled by dry etching process [5]. Nanopatterning was accomplished by electron-beam lithography and dry etching. The fabricated metasurface spans a large area with 120 periods along both the x and y directions as shown in Fig. 1(b). Figure 1(c) shows an SEM image of air holes patterned into Bi:YIG. Figure 1(d) shows the measured reflection spectra of the fabricated metasurfaces under normal incidence, revealing an optical resonance peak in the near infrared. The observed peaks depend on the thickness of the MO layer. We assume that the optical resonance originates from quasi-bound state in the continuum modes [6]. Further details regarding the device design, fabrication, and optical characterization will be discussed in the presentation.

Acknowledgements: We thank the fruitful discussion with Satomi Ishida, Hideo Otsuki, Hidetsugu Matsukyo. This work was supported by JST FOREST (JPMJFR213F), JST CREST (JPMJCR19T1) and KAKENHI (25K01697, 24K17582), Mizuho Foundation for the Promotion of Science, Iketani Foundation, Nippon Sheet Glass Foundation. **References:** [1] T. Tepper and C. A. Ross, J. Cryst. Growth 255, 324 (2003). [2] A. Christofi et al., Opt. Lett. 34 1838 (2018). [3] Siyuan Gao, et al., Appl. Phys. Express 16 072003 (2023). [4] Ignatyeva, D.O. et al. Nat Commun 11, 5487 (2020). [5] K. Taniguchi et al., JSAP Autumn meeting, 19a-A33-6 (2024). [6] S. Gao et al., PECS-XIII, 29-A-05 (2023).

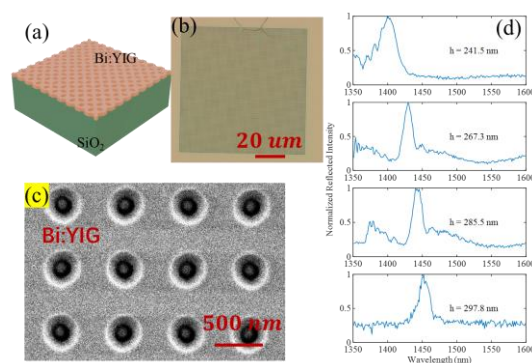


Fig. 1. (a) Illustration of the metasurface structure; (b) Optical image of the fabricated large area metasurface; (c) SEM image of air holes on Bi:YIG; (d) Optical response of the metasurfaces with different Bi:YIG slab thicknesses h .

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.5】 3.10 フォトニック構造・現象、3.13 シリコンフォトニクス・光電融合集積・光制御のコードシェアセッション

[9a-N202-1~11] CS.5 3.10 フォトニック構造・現象、3.13 シリコンフォトニクス・光電融合集積・光制御のコードシェアセッション

[9a-N202-1]

L-bandに発振波長を有するナノ共振器シリコンラマンレーザの開発 (II)

○市之瀬 陸人¹、山崎 祥英¹、石原 歩^{1,2}、金丸 優太¹、浅野 卓³、野田 進^{3,4}、高橋 和^{1,2} (1.大阪公大院工、2.岡山大院環境生命自然、3.京大院工、4.京大高等研究院)

[9a-N202-2]

ナノ共振器シリコンラマンレーザモジュールの動作特性評価

○山崎 祥英¹、高濱 渉^{1,2}、石原 歩^{1,2}、金丸 優太¹、市之瀬 陸人¹、岡野 誠³、高橋 和^{1,2} (1.大阪公大院工、2.岡山大、3.産総研)

[9a-N202-3]

両面誘電体メタサーフェスを用いたマルチコアファイバ用多機能結合器の実証

○鰐井 雄介¹、相馬 豪¹、任 淳¹、種村 拓夫¹ (1.東大院工)

[9a-N202-4]

スローライト応用に向けたフォトニック結晶導波路の光閉じ込め制御

○名和 翔太¹、廣谷 圭祐¹、馬場 俊彦¹ (1.横国大院工)

[9a-N202-5]

SLGビームスキャナにおける回折格子のトポロジカル最適化(III)

○廣谷 圭祐¹、馬場 俊彦¹ (1.横国大院工)

[9a-N202-6]

変調PCSELとSPADを用いたオールチップ型非機械式3次元ToF-LiDAR

○八木 雄大¹、De Zoysa Menaka¹、石崎 賢司¹、井上 卓也¹、吉田 昌宏¹、峯山 佳之²、Ligges Manuel³、Albert Konstantin³、野田 進^{1,4} (1.京大院工、2.スペースビュー、3.フラウンホーファーIMS、4.京大高等研究院)

[9a-N202-7]

SiフォトニクスSLG FMCW LiDARのリアルタイム振動測定

○鎌田 幹也¹、玉貫 岳正¹、黒田 礼翔¹、馬場 俊彦¹ (1.横国大院工)

[9a-N202-8]

硫化アンチモンを用いた行列演算用メタ導波路の設計

○武田 知大¹、田鍋 衛¹、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)

[9a-N202-9]

光電気等化によるSiフォトニック結晶光変調器の100 Gbaud動作

○川原 啓輔^{1,2}、土澤 泰³、山本 宗継³、前神 有里子³、山田 浩治³、馬場 俊彦¹ (1.横国大院工、2.東科大工、3.産総研)

[9a-N202-10]

光-電-光変換素子への適用に向けたシリコンフォトニック結晶共振器型変調器

○北 翔太^{1,2}、ブロカード アンソニー^{1,2}、荒畑 雅也^{1,2}、倉持 栄一^{1,2}、高 磊³、前神 有里子³、コン グ
アンウェイ³、山本 宗継³、山田 浩治³、新家 昭彦^{1,2}、角倉 久史^{1,2}、納富 雅也^{1,2} (1.NTTナノフォトニ
クスセンタ、2.NTT物性研、3.産総研)

[9a-N202-11]

シリコンフォトニクス負荷抵抗型光-電-光変換デバイスの動作実証

○荒畑 雅也^{1,2}、北 翔太^{1,2}、新家 昭彦^{1,2}、角倉 久史^{1,2}、納富 雅也^{1,2} (1.NTTナノフォトニクスセンタ、2.NTT物性
研)

L-band に発振波長を有するナノ共振器シリコンラマンレーザの開発 (II)

Development of L-band Raman silicon nanocavity laser (II)

大阪公大院工¹, 岡山大院環境生命自然², 京大院工³, 京大高等研究院⁴

市之瀬 陸人¹, 山崎 祥英¹, 石原 歩^{1,2}, 金丸 優太¹, 浅野 卓³, 野田 進^{3,4}, 高橋 和^{1,2}

Osaka Met. Univ.¹, Okayama Univ.², Kyoto Univ.³, KUIAS.⁴

✉R. Ichinose¹, S. Yamasaki¹, A. Ishihara^{1,2}, Y. Kanemaru¹, T. Asano³, S. Noda^{3,4}, and Y. Takahashi^{1,2}

E-mail: sr25623d@st.omu.ac.jp

【序論】我々はこれまで、光通信で最も重要な波長帯である C-band (1.55 μm 帯) において、高 Q 値ナノ共振器を用いた超低閾値シリコンラマンレーザの開発に取り組んできた[1–3]。ラマンレーザは、広い波長範囲でレーザ発振が可能という特長を持つことから、C-band 以外の通信バンドへの応用も期待される。近年、C-band の長波側に位置する L-band (1565–1625 nm) の利用が増加しており、我々は前回、L-band におけるナノ共振器シリコンラマンレーザの発振動作 (1580 nm) を報告した。今回、1600 nm を超える波長域で発振するナノ共振器シリコンラマンレーザの試作を行い、そのデバイス設計上の課題を調査したので報告する。

【サンプル構造・結果】図 1 は今回新たに設計・作製したラマンレーザに用いたヘテロナノ共振器の構造である。本レーザは、図 2 に示す 2 つのナノ共振モード (pump mode と Stokes mode) に励起光とラマン光を閉じ込める構造となっている。1600 nm を超える帯域で動作させる上で、薄膜の厚みが 220 nm であること、2 つのモードの周波数差 Δf をシリコンのラマンシフトである 15.606 THz に近づける必要があることの両方を考慮して[4]、ヘテロ構造の格子定数を 443–448–453 nm, 空気孔の半径を 147 nm に設定した。FDTD 計算による 2 つの共振モードの設計 Q 値 (Q_p と Q_s) は 41 万と 142 万である。ラマンレーザの発振閾値に影響する $Q_p \times Q_s$ 値は、C-band 帯の共振器と比べて 2.2 倍小さくなった。図 3 は測定された 2 つの共振モードの共鳴スペクトルである。得られた共振波長と周波数差 15.604 THz は狙い通りであり、先行研究と比較してレーザ発振に十分と考えられる高い Q 値が得られた。特に Stokes mode においては設計 Q 値と同等の値が得られており、L-band ラマンレーザ化による作製精度の劣化は確認されなかった。今後、構造の最適化により、 $Q_p \times Q_s$ 値を現状の 1 桁向上させることで、C-band ラマンレーザと同様の超低閾値での発振が期待される。発振特性など、詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究は JST-START, 科研費の支援を受けた。

【文献】[1] Y. Takahashi, *et al.*, *Nature* **498**, 470 (2013). [2] D. Yamashita, *et al.*, *Optica* **5**, 1256 (2018). [3] T. Kawakatsu, *et al.*, *Opt. Express* **29**, 17053 (2021). [4] D. Yamashita. *Opt. Express* **23**, 3951 (2015).

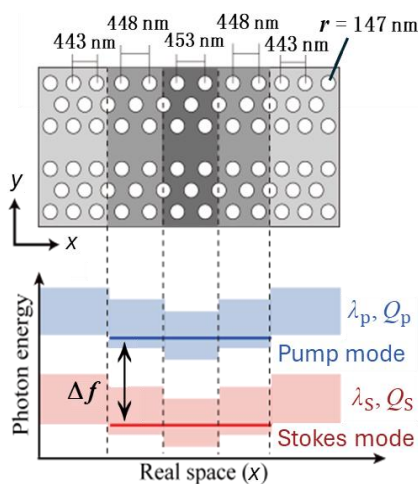


Fig. 1. Heterostructure nanocavity for L-band Raman laser.

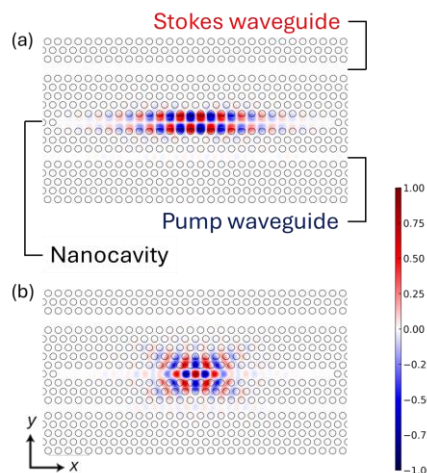


Fig. 2. Calculated electric field distribution for Pump mode (a) and Stokes mode (b).

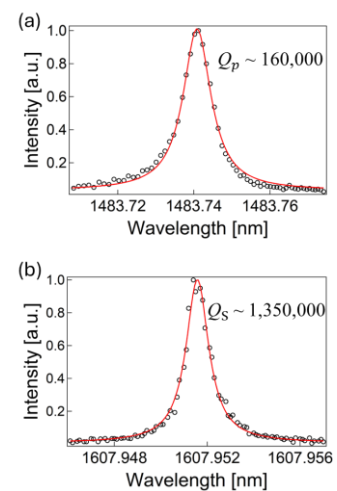


Fig. 3. Resonant spectra for Pump mode (a) and Stokes mode (b).

ナノ共振器シリコンラマンレーザモジュールの動作特性評価

Development of nanocavity-based Raman silicon laser module

大阪公大院工¹, 岡山大院環境生命自然², 産総研³,
 °山崎 祥英¹, 高濱 渉^{1,2}, 石原 歩^{1,2}, 金丸 優太¹, 市之瀬 陸人¹, 岡野 誠³, 高橋 和^{1,2}
 Osaka Met. Univ.¹, Okayama Univ.², AIST³, °S. Yamasaki¹, W. Takahama^{1,2}, A. Ishihara^{1,2},
 Y. Kanemaru¹, R. Ichinose¹, M. Okano³, and Y. Takahashi^{1,2}
 E-mail:sr25638@st.omu.ac.jp

【序論】我々は、高 Q 値ナノ共振器を用いた超低閾値シリコンラマンレーザを開発してきた[1-3]. シリコンラマンレーザは、光励起型レーザであるが、室温で安定な連続発振を実現した唯一のシリコンレーザであり、我々は電流注入型のレーザ開発を目指している[4]. また、パッシブ光デバイスの特長を生かして、空間電荷センサという新たな応用を提案してきた[5]. これまで、シリコンラマンレーザの光学特性は、微小なシリコンチップに対する顕微分光測定手法により調べられてきた. 今後、応用分野を拓げるためには、多くの研究者が手にできるようにすることが重要である. 近年、我々はフォトニック結晶導波路を用いたフォトニック帯電センサモジュールを開発して、実装技術を高めてきた[6]. しかし、ラマンレーザのモジュール化は、より高い技術が要求されるため、実現していなかった. 今回、シリコンラマンレーザチップを搭載したファイバモジュールを試作し、その動作を評価したので報告する.

【構造・結果】図1は試作したラマンレーザモジュールのスナップショットである. 金属筐体に2本の光ファイバが接続されている. 筐体内部にはシリコンラマンレーザチップとレンズが固定されている. レーザチップはCMOS互換プロセスにより作製されており[3], レーザ共振器にはマルチヘテロ共振器が利用されている[1]. モジュール化前に測定した励起モードの Q 値は93,600, ストークスモードの Q 値は1,710,000である. このモジュールの入力ファイバ側に波長可変レーザを繋ぎ、出力ファイバ側に、励起レーザ光を除去する波長フィルタを挿入して発振特性評価を行った. 図2に入力出力特性を示す. 発振閾値(I_{th}) が778 nWにおいて明瞭なレーザ発振が確認された. 横軸は励起用の共振モードに入射した強度を示しており、 I_{th} で規格化されている. 縦軸は出力ファイバから得られたラマン強度である. 最大出力2.71 nWが $3.1 \times I_{th}$ の励起強度で得られた後、出力が飽和しているのは、2光子吸収キャリアによる自由キャリア吸収のためである[2]. 詳細は当日報告する.

【謝辞】本研究はJST-STARTの支援を受けた.

【文献】[1] Y. Takahashi, *et al.*, Nature **498**, 470 (2013). [2] D. Yamashita, *et al.*, Optica **5**, 1256 (2018). [3] T. Yasuda, *et al.*, OSA Contin. **3**, 814 (2020). [4] Y. Shimomura, *et al.*, Opt. Express **33**, 18515 (2025). [5] S. Yasuda, *et al.*, Opt. Express **29**, 16228 (2021). [6] 大塚亘晟, 他, 2024年秋季応物講演会, **20a-C42-5**.

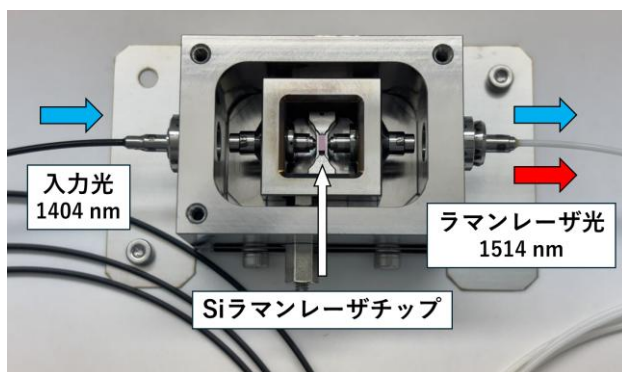


Fig. 1. Photograph of Raman laser module.

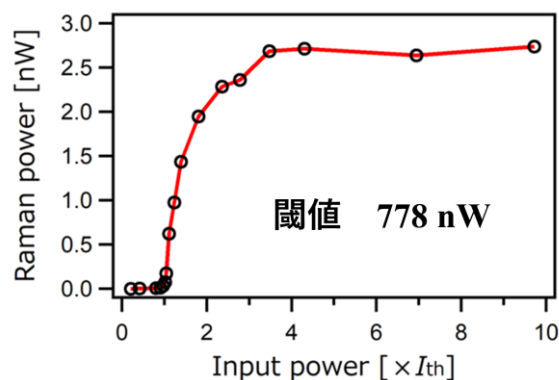


Fig. 2. Input-output relation for the module.

両面誘電体メタサーフェスを用いたマルチコアファイバ用多機能結合器の実証

Demonstration of Multi-Functional Coupler for Multi-Core Fiber using Double-Sided Dielectric Metasurface

東大院工¹ [○](M2) 鐫井 雄介¹, 相馬 豪¹, 任 淳¹, 種村 拓夫¹

The Univ. of Tokyo¹, [○]Yusuke Tsubai¹, Go Soma¹, Chun Ren¹, Takuo Tanemura¹

E-mail: yusuke.tsubai@tlab.t.u-tokyo.ac.jp

1. 背景

マルチコアファイバ (multicore fiber: MCF) を用いた空間分割多重 (space-division multiplexing: SDM) 光通信システムでは, MCF と光集積回路 (photonic integrated circuit: PIC) との間の高効率な光結合が重要となる. これに対して近年, SiO₂ 基板の両面に誘電体メタサーフェスを配置したコンパクトなデバイスにより, MCF 用 fan-in/fan-out 素子を実証した例が報告されている[1]. 今回, このような両面メタサーフェス構造の設計を更に工夫することで, 従来のアレイ配置変換に加えて, 偏波分離, 偏波回転, スポットサイズ変換を実現する多機能デバイスを試作・実証したので報告する.

2. 構造・原理

Fig. 1 にデバイスの概略図を示す. SiO₂ 基板の両面に Si 楕円ナノピラーを高密度に配置した誘電体メタサーフェスを形成する. 各メタサーフェスでは, ナノピラーの寸法や配置間隔を適切に設計することで所望の位相分布を与え, さらに楕円ナノピラーの回転角度を調整することで偏波状態も制御できる[2]. このようなメタサーフェスを2層透過することで, 偏波分離, 偏波回転, アレイ配置変換, スポットサイズ変換の4つの機能を有する結合器が実現できる[3].

今回は, 4 コア MCF (ピッチ 39.7 μm , モードフィールド径 8.9 μm) からの入力光を偏波成分毎に分離し, 全てを x 偏波光に変換した上で, 8 チャンネル SiN 導波路アレイ (ピッチ 30 μm) に結合する素子を設計した. 厚さ 625 μm の SiO₂ 基板の両面に 0.7 μm 間隔で並んだ高さ 1.05 μm の Si ナノピラーからなるメタサーフェスを想定する. 入出力の各点において必要とされる光の位相変化および偏波状態を解析的に求め, それらを実現するための最適なナノピラーの形状パラメータをジョーンズ行列随伴法[4]により計算した.

3. 作製・測定

設計した素子を試作した. 入力側 (MCF 側) のメタサーフェスを電子線描画及びドライエッチングにより作製した後, 裏面アライメントを用いたレーザ描画によって形成したアライメントマークを用いることで, 出力側 (PIC 側) のメタサーフェスを作製した. Fig. 2(a)に試作した素子の写真を示す.

入力側 MCF のコアに該当する位置に単一モー

ドファイバを配置し, 透過光の強度分布を InGaAs カメラで観測した. 入射光の偏波状態は偏波コントローラで制御し, 透過光については偏光子を用いて特定の偏波成分を選択的に観測した. Fig. 2(b) に各入力コアと偏波に対する出力の x 偏波強度を示す. すべての入力条件において所望の位置に, x 偏波, かつ, 5 μm 以下のスポットサイズのモードとして出力されることが確認された.

4. まとめ

両面メタサーフェスを用いることで, MCF と PIC 間の高効率結合に重要となる, アレイ配置変換, スポットサイズ変換, 及び, 偏波分離, 偏波回転機能が得られることを実証した.

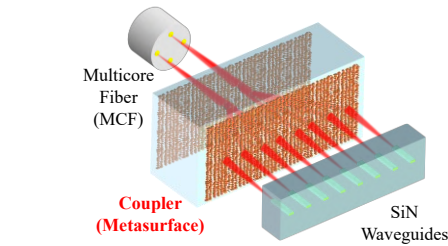


Fig. 1. Schematic of a double-sided metasurface coupler for an MCF and a SiN PIC.

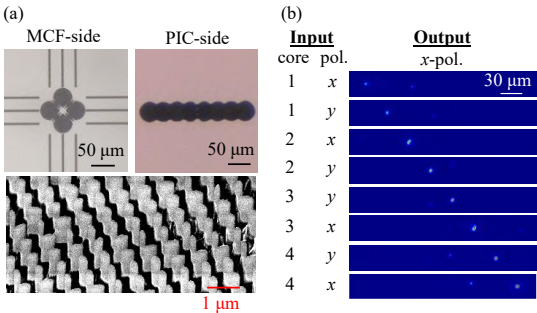


Fig. 2. Experimental results. (a) Fabricated device. (b) Measured x-polarized output intensity images for different input core positions and polarization states.

謝辞: 本成果は国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究 (JPJ012368C 08801) により得られた. また, 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] J. Oh et al., *J. Light. Technol.* **42**, 2385–2396 (2024).
[2] A. Arbabi et al., *Nat. Nanotech.* **10**, 937–943 (2015).
[3] Y. Tsubai et al., *OECC/PSC, TuF3-2* (2025).
[4] G. Soma et al., arXiv:2401.05127 (2024).

スローライト応用に向けたフォトニック結晶導波路の光閉じ込め制御

Optical confinement engineering in photonic crystal waveguides for slow light applications

横国大院工 ○名和翔太, 廣谷圭祐, 馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ., S. Nawa, K. Hirotani, T. Baba

E-mail: nawa-shota-td@ynu.jp

近年, 光トランシーバ, LiDAR など様々な分野で Si フォトニクス PIC が使用され, その範囲や規模が拡大している. Si フォトニクスの限界を打破するスローライトデバイスは, ビームスキャナや光変調器への応用が期待されている[1-3]. ここで, ビームスキャナでは, 空間ビーム拡がりを抑えるためにフォトニック結晶導波路 (PCW) のモードサイズが大きい方が好ましい. 一方, 光変調器では, 電極を p-n 接合付き導波路コアに近づけて低抵抗化し, 周波数応答を高めるために, モードサイズが小さい方が好ましい. しかし, これまでの PCW のモードサイズはフォトニックバンドによって規定されるスローライト特性によって決まる. フォトニックバンドは PCW を構成する円孔配列の最適化によって既に精密に設計されており, これまでの設計パラメータの範囲では自由に変えることができなかった.

本研究は, 円孔調整に加えて, 図 1 のようなリブやブラッググレーティングの融合により, モードサイズを自由に制御することを目指す. 初期段階として, 図 2 のような PCW に沿った溝を導入したときのモード分布と浅堀回折格子を加えたスローライトグレーティング (SLG) の放射ビーム拡がりを計算した. 図 3 は制御前後の SLG のモード分布とビーム拡がりの計算結果である. 円孔をわずかに外側へシフトし, リブを追加することで, 図 4(e)のようにモードサイズが大きくなり, ビーム拡がり抑制の効果を確認した.

本研究は科研費基盤研究(A) (25H00852) と立石財団研究助成 S の支援を得て行われたものである.

参考文献 [1] H. Ito et al., Optica 7, 47 (2020). [2] T. Baba et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 28, 8300208 (2022). [3] K. Kawahara, et al., Optica 11, 9 (2024).

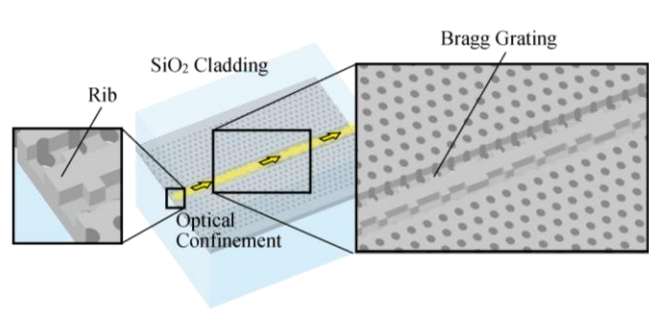


図 1 光閉じ込め制御 PCW の概要.

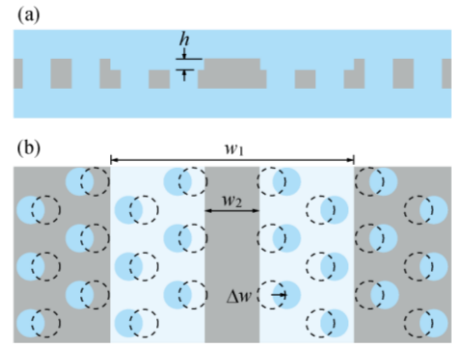


図 2 計算した構造. (a) 断面図. (b) 上面図.

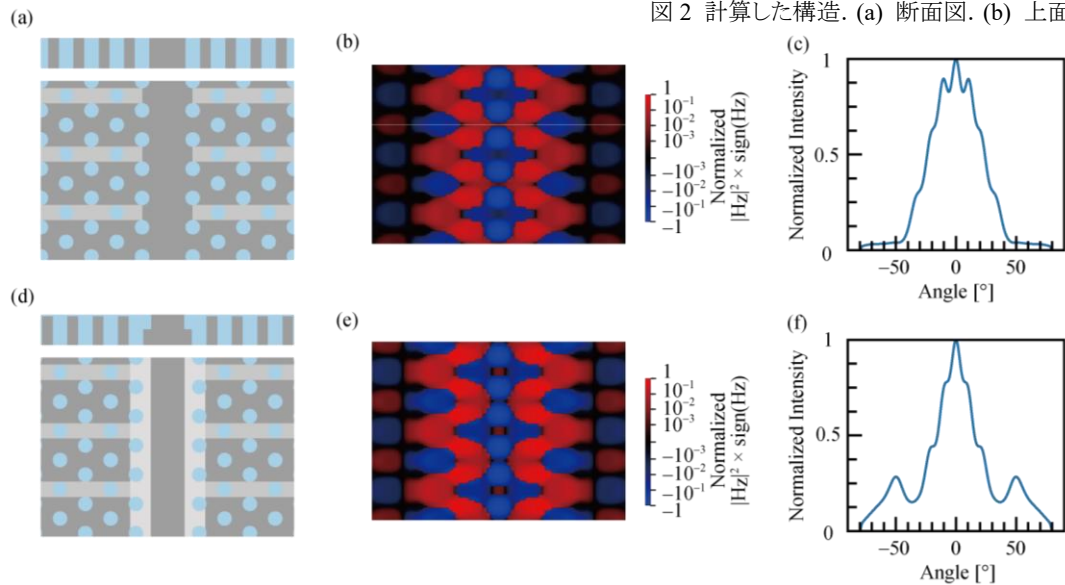


図 3 光閉じ込め制御前後の SLG 計算結果の比較 (a) 制御前の構造. (b) モード分布. (c) ビーム拡がり. (d) 制御後の構造. (e) モード分布. (f) ビーム拡がり.

SLG ビームスキャナにおける回折格子のトポロジカル最適化(III) Topological optimization of diffraction grating in SLG beam scanner (III)

横国大院工 ○廣谷 圭祐, 馬場 俊彦

Yokohama Nat'l Univ. ○Keisuke Hirotsu¹, Toshihiko Baba¹

E-mail: hirotsu-keisuke-fn@ynu.jp

Si フォトニック結晶導波路 (PCW) を利用したスローライト回折格子 (SLG) は、メカを使わずに光ビームを広角スキャンできる^{1,2)}。我々はこれまで、図 1(a) のような 3 列目の円孔を導波路進行方向にシフトさせた PCW に単純なパターンの浅堀回折格子(深さ 10 nm)を加えた SLG により、片方向の FOV $\approx 20^\circ$ (両方向で 2 倍) を得てきた。ただし、LiDAR 応用にはさらなる FOV 向上が求められる。加えて、従来構造では長波長側でのビーム広がり $\delta\phi$ やサイドローブが大きく、プリズムレンズ^{3,4)}を用いたコリメートの負担が大きいという問題があった。LiDAR の感度向上のためには、SLG の効率向上も必要であった。これらの課題に対して、これまで我々は、浅堀回折格子の位置や角度を最適化して上方放射率を高め、高効率化をはかってきた⁵⁾。しかし、高 n_g 、広 $\Delta\lambda$ 、高効率、高 FOV、低 $\delta\phi$ 、低サイドローブの全てを満たす最適化には至っていない。前回まで我々は、これらすべてを総合的に達成する最適設計を行った^{6,7)}。本研究では、これらの SLG を実験的に検証したので報告する。

図 1(b) は、以前に設計した C バンド全域がスローライト ($n_g \approx 20$, $\Delta\lambda = 35$ nm) の PCW⁸⁾に従来構造と同様の浅堀回折格子を加えた SLG の結果である。この構造では、スローライト帯域の拡大により、放射角度 θ が $6^\circ \sim 34^\circ$ となり、従来構造と比べて 1.4 倍の FOV が得られた。また、動作帯域中央の $\delta\phi$ は図 1(a) より小さい。しかし、波長依存性があり、長波長側では $\delta\phi$ が急激に大きくなった。図 1(c) は回折格子をトポロジカル最適化し、円孔のサイズも変調した構造である。回折格子は縦方向に 3 個、横方向に 10 個に分割し、Lumerical の 3 次元バンド計算と CMA-ES を組み合わせて形状や位置を自動最適化した。ここでは SiO₂ クラッド/空気境界での反射損を減らすため、 $\delta\phi$ に加えて SiO₂ 中のビームのサイドローブを小さくする目的関数を設定した。結果は波長依存性が抑制され、全帯域において $\delta\phi < 25^\circ$ となった。FOV も 28° を維持した。ピーク強度も全体的に平均で 4 dB 程度、従来構造を上回っており、効率が改善したことを確認した。

以上、トポロジカル最適化した SLG において、高 n_g 、広 $\Delta\lambda$ 、高効率、高 FOV、低 $\delta\phi$ 、低サイドローブの全てを満たすことが確認された。これらはビームコリメート条件を緩和し、SLG LiDAR の性能向上に寄与すると期待される。

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。

参考文献 1) H. Ito et al., *Optica* **7**, 47 (2020). 2) T. Baba et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **28**, 8300208 (2022). 3), J. Maeda et al., *Opt. Lett.*, **44**, 5780 (2019). 4) R. Kubota et al., *CLEO-PR, CQP17A* (2022). 5) S. Suyama et al., *Opt. Express* **31**, 22170 (2023). 6) 廣谷ら, 応物秋季講演会, 17p-A34-12 (2024). 7) 安藤ら, 応物春季講演会, 24p-11A-3 (2024). 8) K. Hirotsu et al., *Opt. Lett.* **46**, 4422 (2021).

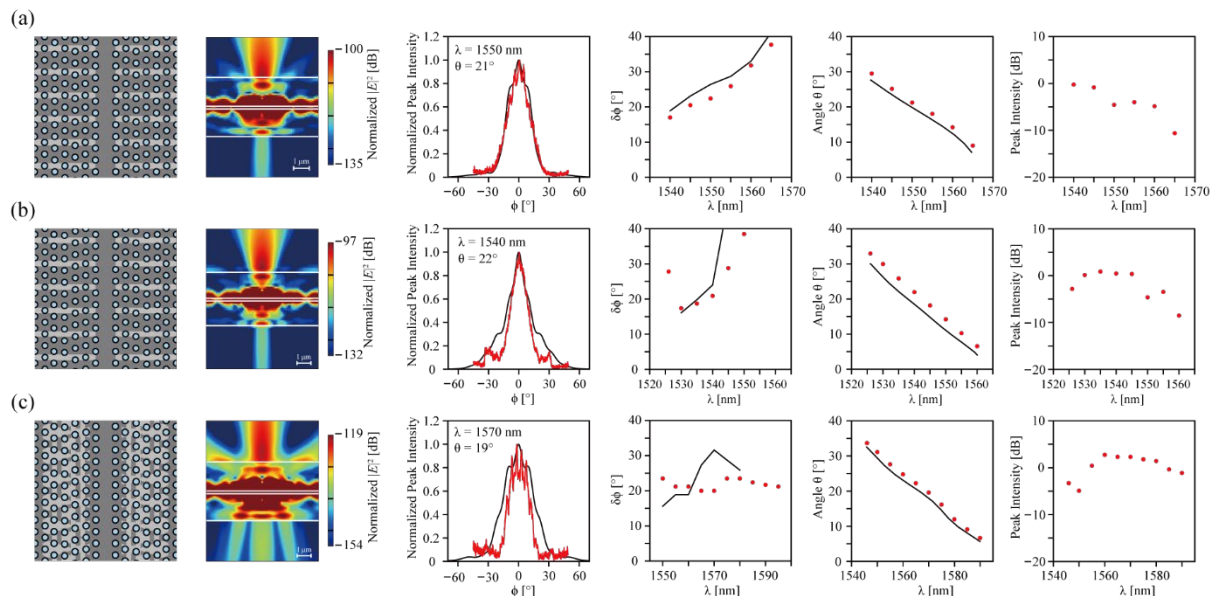


図 1 異なる設計の SLG 構造とビーム特性。左から、平面構造、放射断面での光強度分布、ビーム形状、 $\delta\phi$ の波長依存性、 θ の波長依存性、ピーク強度の波長依存性。それぞれ黒線が計算結果、赤線が実験結果を示す。(a) 従来構造。(b) フル C バンド単純浅堀回折格子構造。(c) 回折格子トポロジカル最適化構造。

変調 PCSEL と SPAD を用いたオールチップ型非機械式 3 次元 ToF-LiDAR All chip non-mechanical 3D ToF-LiDAR based on modulated-PCSELs and SPADs

京大院工¹, スペースビュー², フラウンホーファー IMS³, 京大高等研究院⁴
 ○八木雄大¹, De Zoysa Menaka¹, 石崎賢司¹, 井上卓也¹, 吉田昌宏¹, 峯山佳之²,
 Ligges Manuel³, Albert Konstantin³, 野田進^{1,4}

○Y. Yagi¹, M. De Zoysa¹, K. Ishizaki¹, T. Inoue¹, M. Yoshida¹, Y. Mineyama², M. Liggres³,
 K. Albert³, S. Noda^{1,4} (Kyoto Univ.¹, SpaceView², Fraunhofer IMS³, KUIAS⁴)

E-mail: yagi.y@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, menaka@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)は、2次元フォトニック結晶の特異点(Γ 点、M点等)における大面積共振効果を用いた新たな半導体レーザーである[1]。これまで、我々は、M点で動作するPCSELにおいて、格子点の位置や大きさを変調させた変調PCSEL(M-PCSEL)を提案し、任意の2次元方向へのビーム出射や、多方向同時ビーム出射や広範囲均一照射等、様々な機能性を実現してきた[2]。さらに、このようなM-PCSELにより光源部のレンズ系や回折光学素子などを不要としつつ、2次元単一光子アバランシェダイオード(SPAD)アレイと組み合わせた、3次元 ToF-LiDAR の検討をも行ってきた[3,4]。今回、様々な方向にビームを出射する複数のM-PCSELチップのアレイシステムを電子的に制御することで非機械式のビーム走査を可能とし、オールチップ型非機械式3次元 ToF-LiDAR の原理実証を行ったので、報告する。

[実験] オールチップ型非機械式3次元 ToF-LiDAR の原理実証に用いた、電子的ビーム走査可能なM-PCSELアレイシステムの概要を、図1に示す。同図(a)のような9個のM-PCSELからなるチップを基本ユニットとする。それぞれのチップは、2本の $12^\circ \times 1^\circ$ の帯状パターンを様々な角度で出射可能となっている。これらの複数のM-PCSELチップを、個別に選択駆動可能な回路(図1(b))に実装することで、電子的な高速スイッチングによる非機械式ビーム走査を可能とした。実際に、7つのM-PCSELチップを用いて、一部重複させながら、 $12^\circ \times 10^\circ$ 程度の範囲で電子的に走査しながらスクリーンに照射し、SPADセンサーで照射範囲を観察した様子を図1(c)に示す。ここで、図1(c)の点状の分布は、SPADアレイの画素に対応しており、画素数と受光系の倍率を考慮すると、約 0.25° 間隔となっている。

このようなM-PCSELアレイシステム・駆動系を用いて、一画素あたり $\sim 0.2W$ 程度で照射しつつ、2次元SPADアレイを用いて距離計測を行った様子を、図2に示す(今回は原理実証のため、SPADは低感度のものを用いている)。計測において、背景光の影響を除去するために、単一画素内の複数のSPADの同時計測手法を活用している[4]。図2に示すように、スクリーンの前に立つ人の動き(手の振りや、前後への移動など)に対応する、測距画像を得ることに成功した。今後、SPADの高感度化や画素数の増大、M-PCSELそのものの多接合化や短パルス駆動電流の大電流化等による出力増大により、車載応用に必要とされる長距離化($>200m$)・広FOV化($>25^\circ \times 100^\circ$)が期待できる。詳細は当日報告する。

[謝辞] 本研究は、NEDO 委託事業(JPNP23023, JPNP22007)、および科研費(22H04915, 23)のもと行われた。**[文献]** [1] S. Noda *et al.*, *Advances in Optics and Photonics*, **15**, 977 (2023). [2] S. Noda *et al.*, *Nature Reviews Electrical Engineering* **1**, 802 (2024). [3] M. De Zoysa, 野田, 他, 2024 年秋応物, 17p-A34-11. [4] 八木, 野田, 他, 2025 年春応物, 15p-K505-15.

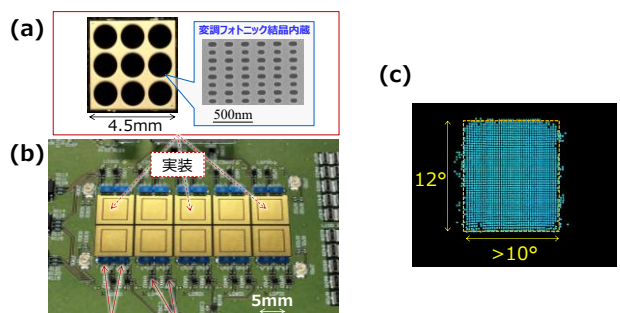


図1(a):M-PCSELアレイの写真、(b):駆動回路の写真
(c):M-PCSELアレイをビーム走査し、スクリーンに照射した様子

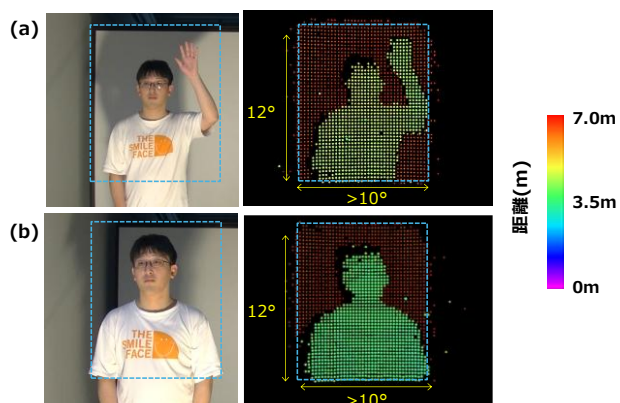


図2(a)(b):距離計測の様子および計測したポイントクラウド

Si フォトニクス SLG FMCW LiDAR のリアルタイム振動測定

Real-time Vibrometer Operation in Si Photonics SLG FMCW LiDAR

横国大院工 [○]鎌田幹也, 玉貫岳正, 黒田礼翔, 馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ., [○]M. Kamata, T. Tamanuki, R. Kuroda, 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。FMCW 方式はドップラーシフトを検出することで距離だけでなく、速度・振動も同時に測定できる¹⁻³⁾。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 を開発し⁴⁾、距離と速度を同時に検出したリアルタイム動作を実証してきた⁵⁾。今回は、リアルタイム動作による距離・振動点群画像を取得した。

図 1(a)に測定系を示す。プリディストーションした三角波電流により波長 1538 nm の DFB レーザを直接変調し、掃引周期 $T = 200 \mu\text{s}$ 、掃引帯域 $B = 10 \text{ GHz}$ の線形 FMCW 光を生成、LiDAR デバイスに入力した。SLG から出射されたビームはプリズムレンズによりコリメートし、再帰性反射シートを貼り付けたスピーカーに照射した。物体からの戻り光を同じ SLG で受光、チップ内部のバランス型 Ge フォトダイオードでコヒーレント検波し、TIA で増幅した後、電気スペクトルアナライザ (ESA) で測距信号スペクトルを取得した。このとき、FPGA による DAC 制御回路を用いて LiDAR デバイスのビーム走査を行った。また、スピーカーの振動周波数 f_{vib} は、測距スペクトルのピーク周波数の両側に生じる側波帯の周波数 f_H, f_L から、 $f_{\text{vib}} = (f_H - f_L)/2$ により求めた。図 1(b)には異なる距離に設置した 4 つの振動させたスピーカーに対し、それぞれ 1 点ずつビームを走査して得られた距離 (3 次元的位置) と振動 (色) のリアルタイム点群画像を示している。各スピーカーはそれぞれ $f_{\text{vib}} = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 \text{ kHz}$ で振動させており、それらに対応する振動を距離と同時に検出した。このときのフレームレートは約 0.8 fps である。図 1(c)は、スピーカーから流す音を C6 から C7 まで 1 音階ずつ変化させたときに得られた f_{vib} を示している。各音階に対応する f_{vib} が得られ、リアルタイム振動検出を実証した。さらに音楽の音階を取得することにも成功し、遠隔マイクとしての動作も確認できた。現在、ESA の代わりに FPGA 回路によるスペクトル取得を行う高速・高解像度のリアルタイム点群画像・振動検出も試みている。

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。

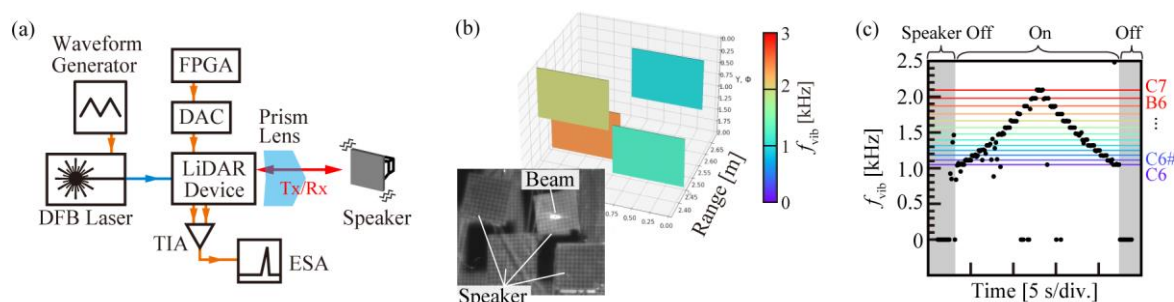


図 1 (a) リアルタイム FMCW 振動測定系. (b) 4 つのスピーカーに対し測定した距離・振動のリアルタイム点群画像. 左下図は赤外線カメラで撮影したターゲットの様子. (c) スピーカーの音を C6-C7 まで変化させときに得られた f_{vib} .

参考文献

- 1) J. Riemensberger et al., Nature, **581**, 164 (2020).
- 2) S. Suyama et al., Opt. Express, **29** (19), 30727 (2021).
- 3) H. Jang et al., Optics and Lasers in Engineering, **160**, 107283 (2023).
- 4) T. Baba et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **28** (5), 8300208 (2022).
- 5) 玉貫ら, 秋季応物講演会, 17a-C32-1 (2024).

硫化アンチモンを用いた行列演算用メタ導波路の設計

Design of meta-waveguide for matrix-vector multiplication using Sb_2S_3

◦武田 知大¹, 田鍋 衛¹, トーprasertpong カシディット¹, 竹中 充¹

(1. 東大院工)

◦ T. Takeda¹, M. Tanabe¹, K. Toprasertpong¹, M. Takenaka¹

1. The Univ. of Tokyo

E-mail: takeda@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【背景・目的】深層学習などのコンピューティング応用を目的に、シリコンフォトニクス・プラットフォーム上でマッハ・ツェンダー干渉計やリング共振器を用いた行列演算用光回路が報告されている[1,2]。これらの光回路では個別の演算ユニット素子を縦続接続することから規模拡大に課題がある。一方、メタ構造を用いた光導波路は単独の素子で行列演算が可能であることから、回路の大幅な小型化が期待される。これまでに、Si 層を部分エッチングした行列演算用メタ導波路が報告されているが、演算する行列を変更できないという課題がある[3]。そこで、我々は相変化材料である硫化アンチモン(Sb_2S_3)を用いた行列演算用可変メタ導波路を提案している (Fig. 1)。硫化アンチモンの相状態 (アモルファス、結晶) をレーザー照射により制御することで、書き換え可能なメタ構造を持つ光導波路を形成できる。我々はこれまでに、窒化シリコン上に堆積した硫化アンチモンへのレーザー直描で導波路やグレーティングカプラの形成に成功している。本研究では Si スラブ導波路上に Sb_2S_3 を堆積させた構造において、行列演算用メタ構造をインバースデザインにより設計したので報告する。

【素子構造】Fig. 1 に今回シミュレーションによる設計を行った素子構造を示す。Si 導波路を使った 2 入力 2 出力の行列演算素子を想定した。行列演算部は Si スラブ導波路上に Sb_2S_3 を堆積した構造となっている。行列演算部の断面構造を Fig. 2 に示す。220 nm 膜厚の Si 層の上に 30 nm の Sb_2S_3 を堆積させた構造になっている。スラブ端からの反射を抑制するため設計領域の両側面には Ge を模した吸収体を配置した。また、300 nm 膜厚の SiO_2 キャッピング層を仮定した。レーザー直描で Sb_2S_3 の相状態を操作することで得られる屈折率差を用いて、書き換え可能なメタ構造を作製することを想定した。

【計算手法】計算コストを削減するためスラブ導波路での有効屈折率を用いて 2 次元 FDTD を反復し、インバースデザインを用いて目的の出力が得られるように設計領域の屈折率分布を最適化した。最適化を行う際の目的関数には目標の透過行列と現在の透過行列の差のノルムの二乗を用い、これを最小化するようにアドジョイント法により勾配降下を繰り返した。反復の途中では設計領域における屈折率分布は Sb_2S_3 が結晶であるときの有効屈折率とアモルファスであるときの有効屈折率の間の中間値を連続的にとりうるが、最後の反復で急峻な二値化をかけることで最終的には、レーザー直描で実現可能な二値の屈折率分布を持つ構造を設計した。動作波長は $1.55 \mu\text{m}$ とした。

【計算結果】設計領域の大きさを $28 \times 28 \mu\text{m}^2$ 、反復回数を 21 回として最適化を行った。インバースデザインによる最適化後の比誘電率の分布を Fig. 3a に、上側の入力ポートから入射された光の伝搬の様子を Fig. 3b にそれぞれ示す。計算手法で述べた、最適化前の目的関数の値は 1.14 であり、反復に伴い減少し最適化後は 0.139 となった。シミュレーションの結果は目的行列と良い一致を得られており、所望の行列演算ができていることが分かった。この結果より、Si 上に堆積した Sb_2S_3 をレーザー直描することで、書き換え可能な光演算用メタ導波路が実現可能であることが分かった。

【謝辞】本研究の一部は JST CREST (JPMJCR2004) の助成を受けて実施した。

【参考文献】[1]Y. Shen *et al.*, Nat Photonics, 11, 441–446 (2017). [2]S. Ohno *et al.*, ACS Photonics, 9, 2614–2622 (2022). [3]V. Nikkhah *et al.*, Nat Photonics, 18, 501–508 (2024). [4]C. Wu *et al.*, Sci adv., 10, eadk1361 (2024). [5]田鍋衛他, 第 58 回応用物理学会春季学術講演会, 16p-K305-5, 2025 年 3 月。

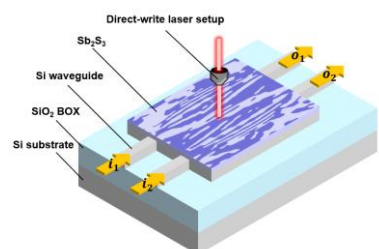


Fig. 1. Schematic of Si/ Sb_2S_3 meta-waveguide using laser direct writing.

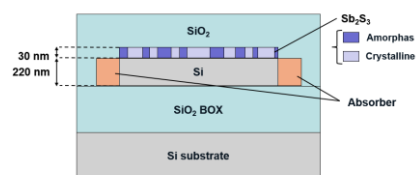


Fig. 2. Cross-sectional schematic of Si/ Sb_2S_3 meta-waveguide.

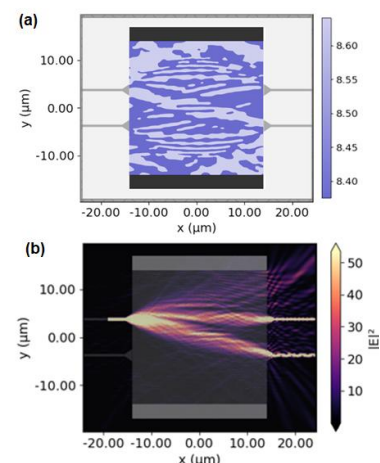


Fig. 3. (a) Relative permittivity distribution after optimization. (b) Light propagation from the upper input port.

光電気等化による Si フォトニック結晶光変調器の 100 Gbaud 動作 100-Gbaud Si Photonic Crystal Modulator Using Electro-Optic Equalizer

横国大院工¹, 東科大工², 産総研³

○川原啓輔^{1,2}, 土澤泰³, 山本宗継³, 前神有里子³, 山田浩治³, 馬場俊彦¹

Yokohama Nat'l Univ.¹, Institute of Science Tokyo², Advanced Industrial Science and Technology³

○K. Kawahara^{1,2}, T. Tsuchizawa³, N. Yamamoto³, Y. Maegami³, K. Yamada³, T. Baba¹

E-mail: keisuke@ieee.org

データセンターの拡大により、高速・低消費電力な光インターコネクションが求められている。Si フォトニック結晶導波路 (PCW) 光変調器は、スローライト効果により $V_{\pi}L$ を低減し、小型・低容量を実現できる。我々は、EO 位相整合電極により 64-Gbaud NRZ 変調を実証し [1]、さらに $V_{pp} < 1$ V の低電圧駆動も達成したが [2]、動作速度は pn 接合部の RC 時定数により制限されていた。スローライト構造を用いた 100 Gbaud 超の Si 変調器も報告されているが [3]、 $V_{pp} = 5$ V の高い駆動電圧を要する。Si 光変調器を高速動作させるには高電圧や DSP による補償が避けられず、低消費電力との両立が課題となっている。本研究では、光と電気の伝搬遅延を用いた等化器 [4] を PCW 変調器に組み込むことで帯域を拡張することを提案し [5]、今回、 $V_{pp} \approx 3$ V、DSP フリーでの 100-Gbaud NRZ 変調を実証した。

図 1(a)に光電気等化を用いた PCW 変調器の顕微鏡写真を示す。移相器を N 個のセグメントに分割し、各セグメント間に伝送線路を挿入した。さらに出力側のセグメントの手前に、リッジ導波路による光遅延線と光交差を設けた。この交差により出力端セグメントのみが逆相で動作し、負のタップ係数をもつ線形等化器が構成されることで、ハイパス特性が得られる。 $N=4$ の場合、図 1(b)に示すとおり、等化により低域利得が 5.6 dB 抑制され、帯域幅は 35 GHz から 81 GHz に拡張された。図 1(c)に NRZ 変調の測定結果を示す。 $V_{pp} \approx 3$ V のプッシュプル駆動において、推定ビット誤り率は 90 Gbaud で 2.4×10^{-3} 、100 Gbaud で 1.9×10^{-2} を示し、いずれも前方誤り訂正のしきい値を下回った。PAM4 変調信号に対する等化効果も確認しており、詳細は当日報告する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23KJ0988 の助成を受けた。任意波形発生器および光検出モジュールはキーサイト・テクノロジーの貸与による。

参考文献 [1] Y. Hinakura *et al.*, "IEEE JSTQE", vol. 27, no. 3, pp. 4900108, May 2021. [2] K. Kawahara *et al.*, *Optica*, vol. 11, no. 9, pp. 1212–1219, Sep. 2024. [3] C. Han *et al.*, *Sci. Adv.*, vol. 9, no. 42, Oct. 2023. [4] L. Breyne *et al.*, *IEEE J. Light. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 1777–1784, 2021. [5] 川原ら, 応物春季, no. 16a-A409-9, 2023.

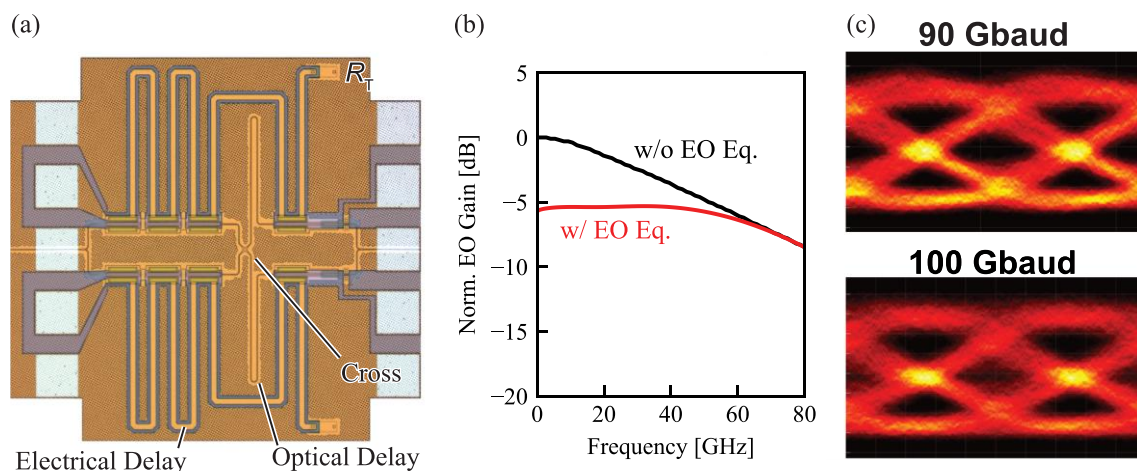


図 1. 光電気等化を用いた Si PCW 光変調器. (a) 顕微鏡写真. (b) EO 周波数応答のシミュレーション結果. (c) NRZ 変調アイパターンの測定結果 ($V_{pp} \approx 3$ V, DSP フリー).

光-電-光変換素子への適用に向けたシリコンフォトニック結晶共振器型変調器

Silicon photonic crystal cavity modulators for applying optical-electric-optical conversion devices

NTT ナノフォトニクスセンタ¹, NTT 物性研², 産総研³, 北 翔太^{1,2}, Anthony Brocard^{1,2}, 荒畑 雅也^{1,2}, 倉持 栄一^{1,2}, 高 磊³, 前神 有里子³, コン グアンウェイ³, 山本 宗継³, 山田 浩治³, 新家 昭彦^{1,2}, 角倉 久史^{1,2}, 納富 雅也^{1,2}, NTT NPC¹, NTT BRL², AIST³, S. Kita^{1,2}, A. Brocard^{1,2}, M. Arahata^{1,2}, E. Kuramochi^{1,2}, R. Kou³, Y. Maegami³, G. Cong³, N. Yamamoto³, K. Yamada³, A. Shinya^{1,2}, H. Sumikura³, and M. Notomi^{1,2}

E-mail: shota.kita@ntt.com

光インターコネクションの短距離化や、光信号・光演算処理への応用に向け、電気光学変調器のさらなる省電力化と高性能化が求められている。現在、シリコンフォトニクス技術に基づく波長分割多重 (WDM) マイクロリング変調器アレイによる大容量トランシーバー¹⁾やフォトニック結晶 (PhC) スローライト導波路型変調器による駆動系込みの省電力動作²⁾が報告されているが、接合容量 (数 10 fF オーダー) が性能向上の制約となっている。今後、省電力かつ広帯域な光-電-光 (OEO) 変換素子の実現には、接合容量のさらなる低減が不可欠である。本研究では、1 fF オーダーの容量を持ち、単一モード特性を有する PhC 共振器型変調器³⁾を、ファウンドリの製造制約を満たすように設計・試作し、64 Gbps の変調動作を確認したので報告する。

Fig. 1(a)に、本研究で設計した素子の CAD 図を示す。接合容量を約 1 fF まで低減しつつ、光閉じ込め係数を確保して変調効率を向上させるため、L5 型の線欠陥共振器を採用した。具体的には、線欠陥の存在する行の左右の空孔 14 個、およびその周囲の上下左右にある空孔 40 個に対して、4 回対称な空孔シフトとサイズ変調を導入した (格子定数やベース空孔半径を含め、計 53 個のパラメータを機械最適化により調整)⁴⁾。このような多数孔変調により、シリカ埋め込み構造下においても、導波路が無い状態での Q 値が数 10 万程度に達することを確認した。この共振器に対し、 Γ M 方向に線欠陥導波路 (1.1 WG) を接続することで、単一モード特性を実現した。また、透過率を重視し、共振器と導波路間の空孔列数を 4 列に設定した結果、 Q 値約 6,000、透過率 42% の設計を得た。産総研ファウンドリにより試作した素子の光学顕微鏡像を Fig. 1(b)に示す。透過スペクトル測定の結果 (Fig. 1(c), (d))、単一モード特性が得られ、設計値とほぼ一致する Q 値が実験的にも確認された。さらに同一デバイスに対し、NRZ の PRBS 信号を印加したところ、50 Gbps および 64 Gbps において明瞭な変調動作が観測された (Fig. 1(e))。一方で、印加電圧 3.5 V に対して得られた消光比 (ER) は約 1.5~2.0 dB と、OEO 変換素子としては変調効率は十分ではなかった。これは、ドーピング濃度の不足や、 Q 値とのバランスが最適でなかったことが主な要因と考えられる。今後はさらなる設計最適化による変調効率の改善を検討する。

参考文献 1) <https://www.nvidia.com/ja-jp/networking/products/silicon-photonics/> 2) K. Kawahara et al., arXiv:2506.04820. 3) K. Nozaki et al., *Nat. Photon* **13**, 454 (2019). 3) E. Kuramochi et al., *PECS-XIII*, P-21 (2023).

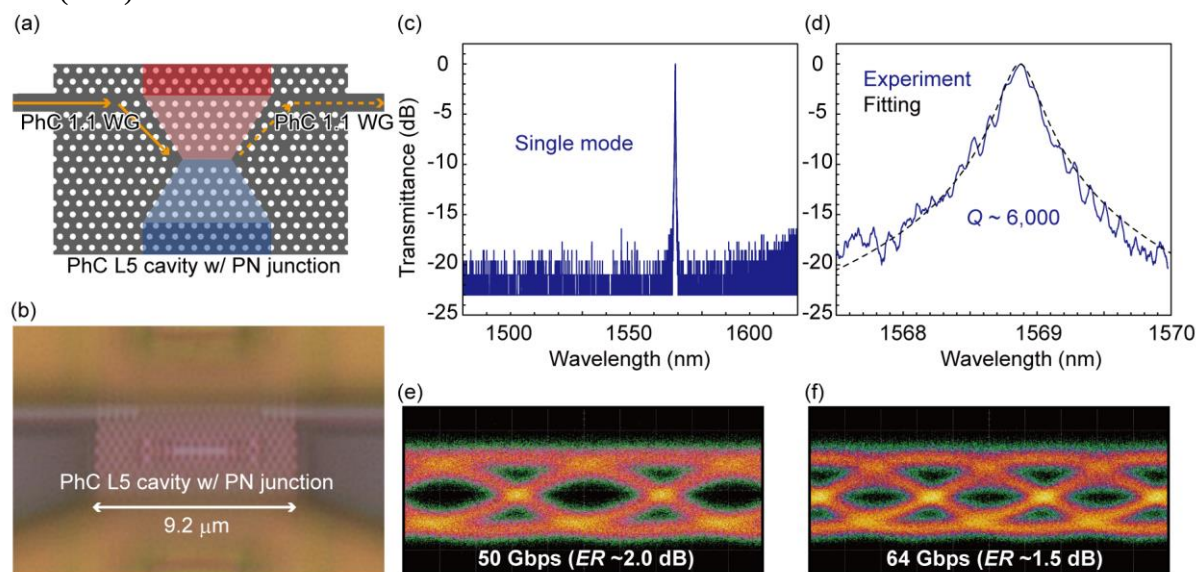


Fig. 1 Silicon photonic crystal L5 cavity modulators. (a) CAD pattern of the measured sample. (b) Optical microscope image of the fabricated sample. (c) Transmission spectrum with the wide range. (d) Transmission spectrum around the resonant mode. The dashed line corresponds to the Lorentzian fitting. (e), (f) Averaged eye patterns for 50 and 64 Gbps PRBS NRZ modulation (pattern length: $2^{15}-1$).

シリコンフォトニクス負荷抵抗型光-電-光変換デバイスの動作実証

Demonstration of load-resistor-type optical-electrical-optical converters based on Si photonics

NTT ナノフォトンセンタ¹, NTT 物性研², ○荒畑 雅也^{1,2}, 北 翔太^{1,2},新家 昭彦^{1,2}, 角倉 久史^{1,2}, 納富 雅也^{1,2}NTT Nanophotonics Center¹, NTT BRL², ○M. Arahata^{1,2}, S. Kita^{1,2}, A. Shinya^{1,2}, H. Sumikura^{1,2}, M. Notomi^{1,2}E-mail: masaya.arahata@ntt.com

近年、アナログ光演算回路を用いた低遅延、低消費電力な光アクセラレータが注目されている[1, 2]。全光型の演算回路は、電気回路で問題となる RC 遅延の影響がないため高レート入力信号処理が可能な一方で、信号増幅や非線形変換などの汎用演算に不可欠な機能に制限がある。そこで電気回路部分の問題を解消しつつ機能を拡大するための光電融合技術による光-電-光(OEO)変換デバイスの実現が必要不可欠である。これまで埋め込みヘテロ成長に基づく低キャパシタンスな InP 系フォトリソニック結晶受光器・変調器と負荷抵抗を集積した、高速動作かつ低消費電力な OEO 変換デバイスが実現されている[3]。しかし、これまで報告されているシリコンフォトニクスによる OEO 変換デバイスは、光変調器がキャリア注入モードで動作するため動作速度が制限されるという問題があった[4]。今回、我々は、シリコンフォトニクス光電融合演算回路の実現に向けて、高速動作のための負荷抵抗型 OEO 変換デバイスの動作特性の評価を行ったので報告する。

図 1(a)に海外ファウンドリでチップ上に作製した OEO 変換デバイスの顕微画像を示す。入力光信号は光検出器(PD)で光電流に変換され、光変調器に並列に接続された負荷抵抗 R_{load} で増幅された電圧信号となる。負荷抵抗の電圧信号で駆動された光変調器(EOM)は外部光源からの入力光を変調し、光変調信号が出力される。ここで、PD は Ge 光検出器であり、EOM はマイクロリング変調器(MRM)である。PD および EOM には逆バイアス電圧をかけることでキャリア引き抜きモードでの動作を制御している。図 1(b)に $R_{load}=100\text{ k}\Omega$ の場合の OEO 変換デバイスの PD に入力した CW 光パワーに対する EOM の出力光パワーを示す。ここで、エッジカップラーでの損失約 3 dB を考慮している。PD の入力光の波長に対して異なる非線形性を示しており、活性化関数として高い表現力を持つことがわかる。また、入力光パワーに対して出力光パワーが大きくなるゲイン領域が存在しており、光回路内の光損失の補償が可能であることがわかる。図 1(c)に $R_{load}=500\text{ }\Omega$ の場合の 4 Gb/s の変調入力光に対するアイパターンを示す。明瞭に開いたアイパターンが観測できていることがわかる。したがって、作製した OEO 変換デバイスのキャリア引き抜きモードでの 4 Gb/s の高速動作を確認した。現状の動作速度はデバイスの RC 遅延で制限されていると考えられる。異なる負荷抵抗値でのデバイス動作や実験結果の詳細については本発表において報告する。

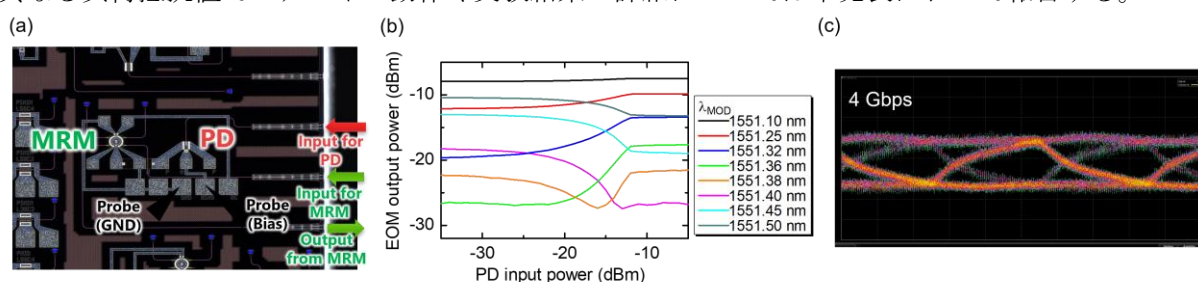


Fig.1 (a) Microscopic image of designed silicon photonic OEO converter. (b) Measured nonlinear activation function of OEO converter for different wavelengths of input signals. (c) Eye pattern of OEO converter with $R_{load}=500\text{ }\Omega$ for 4 Gb/s NRZ input light signals.

参考文献

- 1) Y. Shen et al., “Deep learning with coherent nanophotonic circuits,” Nat. Photon. **11**, 441 (2017).
- 2) M. Arahata et al., “Optoelectronic recurrent neural network using optical-electrical-optical converters with RC delay,” arXiv preprint, arXiv:2411.16186 (2024).
- 3) K. Nozaki et al., “Femtofarad optoelectronic integration demonstrating energy-saving signal conversion and nonlinear functions,” Nat. Photon. **13**, 454-459 (2019).
- 4) S. Bandyopadhyay et al., “Single-chip photonic deep neural network with forward-only training,” Nat. Photon. **18**, 1335-1343 (2024).

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.6】 4.5 Nanocarbon and 2D Materials、17 ナノカーボン・二次元材料のコードシェアセッション

[7p-N205-1~8] CS.6 4.5 Nanocarbon and 2D Materials、17 ナノカーボン・二次元材料のコードシェアセッション

[7p-N205-1]

[JSAP-Optica Joint Symposia Invited Talk] Driving Electronic Structure Changes in 2D semiconductors with intense excitonic fields

○Keshav Dani¹ (1.Okinawa Inst. of Science and Technology)

[7p-N205-2]

Formation of nanoscale defect array in twisted hexagonal boron nitride

○(P)Jacques Hawecker¹, Prajakta Kokate¹, Filchito Bagsican¹, Marisa Hocking², Kenji Watanabe³, Takashi Taniguchi³, Julien Madeo¹, Michael K. L. Man¹, Andrew J. Mannix², Keshav M. Dani¹ (1.OIST, 2.Stanford Univ, 3.NIMS)

[7p-N205-3]

[JSAP-Optica Joint Symposia Invited Talk] Imaging and control polarization switching in tetralayer graphene

Zhou Zhou¹, Xiyao Peng¹, Jianfeng Bi¹, Fei Xue¹, Jie Jiang¹, Huizhen Wu¹, Zhiwen Shi², Haoliang Qian¹, Toshikaze Kariyado³, ○Si Han Zhao¹ (1.Zhejiang University, 2.Shanghai Jiao Tong University, 3.National Institute for Materials Science)

[7p-N205-4]

Study of Gated 2D Semiconductors using Time-Resolved ARPES

○(DC)Harley Suchiang¹, Takumi Fukuda¹, Xing Zhu¹, Xueqi Chen², Filchito Renee G Bagsican^{1,3}, Nanami Tomoda¹, Sathvik Ajay Iyengar^{1,4}, Ouri Karni⁵, Suji Park⁶, Houk Jang⁶, Kenji Watanabe⁷, Takashi Taniguchi⁷, Julien Madeo¹, Michael K L Man¹, Keshav M Dani¹ (1.OIST, 2.Stanford Univ., 3.Shizuoka Univ., 4.Rice Univ., 5.NTT Research, Inc., 6.Brookhaven Nat. Lab., 7.NIMS)

[7p-N205-5]

[JSAP-Optica Joint Symposia Invited Talk] Dynamic strain engineering of two-dimensional transition metal dichalcogenides

○Shun Fujii¹ (1.Keio Univ.)

[7p-N205-6]

Deterministic Formation of Single Organic Color Centers in Single-Walled Carbon Nanotubes

○Daichi Kozawa^{1,3}, Yuto Shiota^{2,3}, Mengyue Wang³, Yuichiro K. Kato³ (1.NIMS, 2.Keio Univ., 3.RIKEN)

[7p-N205-7]

[JSAP-Optica Joint Symposia Invited Talk] Polarized Thermal Radiation from an On-Chip Aligned Carbon Nanotube Film

○Shinichiro Matano^{1,2}, Natsumi Komatsu³, Shengjie Yu⁴, Jacques Doumani⁴, Yui Shimura¹, Junichiro Kono⁴, Hideyuki Maki^{1,5} (1.Keio Univ., 2.Kyoto Univ., 3.Univ. of California, Berkeley, 4.Rice Univ., 5.Center for Spintronics Research Network, Keio Univ.)

[7p-N205-8]

High-performance bilayer selective solar absorber based on carbon nanotube membrane with a tailored optical response

O(DC)Hengkai Wu¹, Taishi Nishihara^{1,2}, Takeshi Tanaka³, Hiromichi Kataura⁴, Yuhei Miyauchi¹
(1.Kyoto Univ., IAE, 2.TUS, 3.AIST, CTMI, 4.AIST, NMRI)

Driving Electronic Structure Changes in 2D semiconductors with intense excitonic fields

Okinawa Inst. of Science and Technology ¹, °Keshav M. Dani¹

E-mail: KMDani@oist.jp

In the 1930s, Frenkel and Wannier postulated the existence of an exciton – a bound electron-hole pair, to explain the unexpected presence of an absorptive neutral state in the forbidden bandgap region of a semiconductor. Since then, excitons have proved to play a vital role in our understanding of the optical response of materials and the functioning of opto-electronic devices. Yet, in all these decades, it has always been known that a fundamental degree of freedom of the exciton has been inaccessible – it's momentum! Resolving the momentum coordinate of excitons could give direct access to rich excitonic phenomena – the excitonic wavefunction, hot excitons, confined excitons, dark excitons and how the presence of intense excitonic fields can drive electronic structure changes in the material!

In this talk, I will give a brief overview of the work in my labs at OIST to answer the above questions. We use time-resolved Momentum Microscopy to visualize dark excitons [1], image the electron around the hole inside the exciton [2], observe the long-predicted anomalous dispersion of the exciton-bound electron [2], resolve the momentum of the exciton-bound hole [3], access the confinement of the interlayer exciton in a moiré cell [3], observe exciton-driven electronic structure changes in materials [4] and further the possibility of dark valleytronics.

References

- [1] J. Madeo, M. K. L. Man, et al. Science 370 2020
- [2] M. K. L. Man, J. Madeo, et al. Science Advances 7 2021
- [3] O. Karni, E. Barr, V. Pareek, J. D. Georgaras, M. K. L. Man C. Sahoo, et al. Nature 603 2022
- [4] V. Pareek, D. Bacon, X. Zhu, et al, submitted.
- [5] X. Zhu, D. Bacon, V. Pareek, et al submitted.

Formation of nanoscale defect array in twisted hexagonal boron nitride

Jacques Hawecker¹, Prajakta Kokate¹, Filchito Bagsican¹, Marisa Hocking², Kenji Watanabe³, Takashi Taniguchi⁴ Julien Madéo¹, Michael K. L. Man¹, Andrew J. Mannix², Keshav M. Dani¹

¹Femtosecond Spectroscopy Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Onna-son; Okinawa, 904-0495 Japan

²Department of Materials Science and Engineering, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA.

³Research Center for Electronic and Optical Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan

⁴Research Center for Materials Nanoarchitectonics, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan

E-mail: Jacques.Hawecker@oist.jp

Point defects in semiconductors have emerged as promising building block for quantum technologies, offering robust, optically addressable electronic spin states. Deterministically positioning these defects into nanoscale arrays could enable scalable quantum information architectures. However, existing techniques for patterning nanoscale defect arrays (e.g., ion implantation, localized strain, laser writing) are limited by micron-scale precision and non-deterministic yield [1,2]. A compelling alternative would be to spatially engineer the property of the material itself.

In this talk, we present our latest results exploring the spatial distribution of defects in twisted hBN, a system that exhibits moiré ferroelectricity [3]. Using photoemission electron microscopy (PEEM), we map the spatial distribution of occupied states at different energies including valence bands, defect states and ferroelectric domain walls. Surprisingly, we find that for small moiré period ($\lesssim 1\mu\text{m}$), photoemission-bright defects are located at domain wall nodes, forming arrays with pitch as small as ~ 200 nm. At larger moiré periods, the photoemission-bright defects align along entire domain walls. Photoluminescence shows that: most of the light emission comes from the photoemission-bright defects located along the domain walls, and that defects share spectral signatures with known C-based single quantum emitters. These findings highlight moiré ferroelectricity in twisted hBN as a new and powerful way to pattern quantum emitters down to the nanoscale.

References

- [1] A. Çakan, et al., Adv. Opt. Mater. **13**, 2402508 (2025).
- [2] F. I. Allen, Beilstein J. Nanotechnology. **12**, 633 (2021).
- [3] C. R. Woods, et.al, Nat. Commun. **12**, 1 (2021).

Imaging and control polarization switching in tetralayer graphene

Zhou Zhou^{1†}, Xiyao Peng^{1†}, Jianfeng Bi¹, Fei Xue¹, Jie Jiang², Huizhen Wu¹, Zhiwen Shi³, Haoliang Qian^{4*}, Toshikaze Kariyado^{5*}, Sihan Zhao^{1*}

¹ School of Physics, Zhejiang University, Zhejiang Key Laboratory of Micro-Nano Quantum Chips and Quantum Control, and State Key Laboratory of Silicon and Advanced Semiconductor Materials, Zhejiang University, Hangzhou, China

² School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China

³ Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy and Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China.

⁴ State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center, College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China.

⁵ Research Center for Materials Nanoarchitectonics (MANA), National Institute for Materials Science (NIMS), 1-1 Namiki, Tsukuba, Japan

†These authors contributed equally to the work.

*Corresponding authors

Email: sihanzhao88@zju.edu.cn

Abstract

Fundamentally distinct from the conventional ferroelectrics, the most discriminative hallmark of the emerging two-dimensional (2D) sliding ferroelectricity is the polarization switching via the domain wall (DW) sliding. Here, we report the first microscopic observation of the polarization switching phenomena in graphene-based systems [1], spatially resolved by a gate-tunable nanoscale optical imaging technique that is sensitive to electric polarization. We observe polarization switching occurs via electric-field triggered DW sliding between two adjacent domains featuring purely stacking-induced opposite electric polarizations in tetralayer graphene, thinnest natural graphene polytypes hosting broken inversion and mirror symmetries. The optical visualization of polarization switching and controlled switching by the electric field and mechanical manipulation demonstrate the sliding mechanism in 2D metals and open doors for optical studies of ferroelectricity and multiferroicity in graphene-based systems. If time allows, I will also briefly talk about our recent discovery of strongly hybridized phonons in one-dimensional van der Waals crystals [2].

[1] Z. Zhou, X. Peng et al., Optical imaging of spontaneous electric polarization and polarization switching in tetralayer graphene. Preprint arXiv:2504.06874 (2025)

[2] S. Sun et al., Strongly hybridized phonons in one-dimensional van der Waals crystals. Physical Review Letters 134, 176101 (2025)

Study of Gated 2D Semiconductors using Time-Resolved ARPES

Harley Suchiang¹, Takumi Fukuda¹, Xing Zhu¹, Xueqi Chen², Filchito Renee G Bagsican^{1,3†}, Nanami Tomoda¹, Sathvik Ajay Iyengar^{1,4}, Ouri Karni⁵, Suji Park⁶, Houk Jang⁶, Kenji Watanabe⁷, Takashi Taniguchi⁸, Julien Madéo¹, Michael K. L. Man¹, Keshav M. Dani^{1*}

¹ Femtosecond Spectroscopy Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University; Onna, Okinawa, Japan 904-0495, ² Department of Physics, Stanford University; Stanford, CA 94305, USA, ³ Research Institute of Electronics, Shizuoka University; Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, 432-8011, Japan, ⁴ Department of Materials Science and NanoEngineering, Rice University; Houston, TX, 77005 USA, ⁵ NTT Research, Inc. Physics & Informatics Laboratories; 940 Stewart Dr, Sunnyvale, CA 94085, USA, ⁶ Center for Functional Nanomaterials, Brookhaven National Laboratory; Upton, NY 11973, USA, ⁷ Research Center for Electronic and Optical Materials, NIMS; 1-1 Namiki, Tsukuba 305-0044, Japan, ⁸ Research Center for Materials Nanoarchitectonics, NIMS; 1-1 Namiki, Tsukuba 305-0044, Japan

†Current affiliation *Email address: kmdani@oist.jp

1. Introduction:

Two-dimensional (2D) semiconductors, such as monolayer (1L) transition metal dichalcogenides (TMDs), host tightly bound excitonic species. Recently, time- and angle-resolved photoemission spectroscopy (TR-ARPES) has shown great promise in studying these photoexcited states due to its ability to resolve momentum which has resulted in the measurement of the excitonic wavefunction [1,2] as well as the study of dark excitons [3]. These initial studies were done in nominally undoped samples, however, the ability to study momentum-resolved dynamics in doped samples will open new avenues of investigation. In this talk, we will discuss our progress in studying gated 2D semiconductors using TR-ARPES.

2. Experiment:

The experimental setup consists of a home-built XUV source (21.7 eV) used as a photoemission probe coupled to a time-of-flight momentum microscope with in-situ voltage bias to control the carrier densities in a gated 1L WS₂ by electrostatic doping.

As shown in figure 1, in contrast to the (a) undoped condition we see the ARPES spectrum in (b) the doped case contains a population of

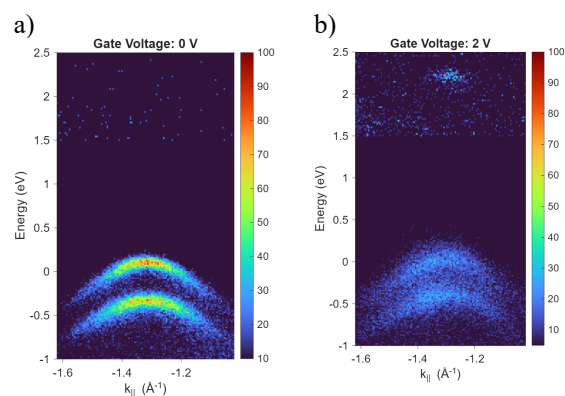


Figure 1: a) ARPES spectrum of a nominally undoped 1L WS₂ about the K-point and b) in the presence of doped electrons due to electrostatic gating.

electrons in the conduction band when a gate voltage is applied.

3. Conclusions:

We have demonstrated the ability of in-situ electrostatic charging of a 2D semiconductor in a momentum-microscope apparatus. This will enable us to use TR-ARPES to study gated 1L WS₂ in the future.

References

- [1] M. K. L. Man et al., Science Advances 7, eabg0192 (2021).
- [2] O. Karni et al., Nature 603,247-252 (2022).
- [3] J. Madéo et al., Science 370, 1199 (2020)

Dynamic strain engineering of two-dimensional transition metal dichalcogenides

Shun Fujii

Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Keio University, 223-8522, Japan
E-mail: shun.fujii@phys.keio.ac.jp

Two-dimensional (2D) transition metal dichalcogenides (TMDCs) are at the forefront of atomically-thin semiconducting materials and exhibit unique physical phenomena that are not observed in their bulk counterparts. For instance, these materials change to direct bandgap semiconductors when exfoliated to a monolayer, and excitons can exist even at room temperature due to their strong binding energy and the reduced screening of Coulomb interactions. In recent years, numerous studies have investigated strain-induced effects on physical properties of TMDCs [1,2].

In this presentation, we focus on surface acoustic waves (SAWs) as an efficient way to precisely control strain and establish a novel platform for ultrafast dynamic modulation of TMDC interfaces. SAWs are a type of acoustic wave that can be excited by fabricating interdigital transducers (IDTs) on piezoelectric substrates. They exhibit high frequencies ranging from several hundred MHz to the GHz regime, and possess amplitudes on the order of several to several hundred picometers. Due to their propagation being confined to the surface of materials, SAWs offer a compelling approach for artificially, dynamically, and rapidly modulating 2D TMDCs and their excitonic properties. Here, we introduce a unique optical measurement technique that overcomes conventional limitations of micro-spectroscopy and report recent experimental results visualizing the excitonic properties of TMDCs under dynamic strain. By establishing a multi-dimensional spectroscopic technique that resolves excitonic photoluminescence dynamics in time, space, and spectrum, we aim to open new avenues for interface engineering of TMDCs using surface acoustic waves.

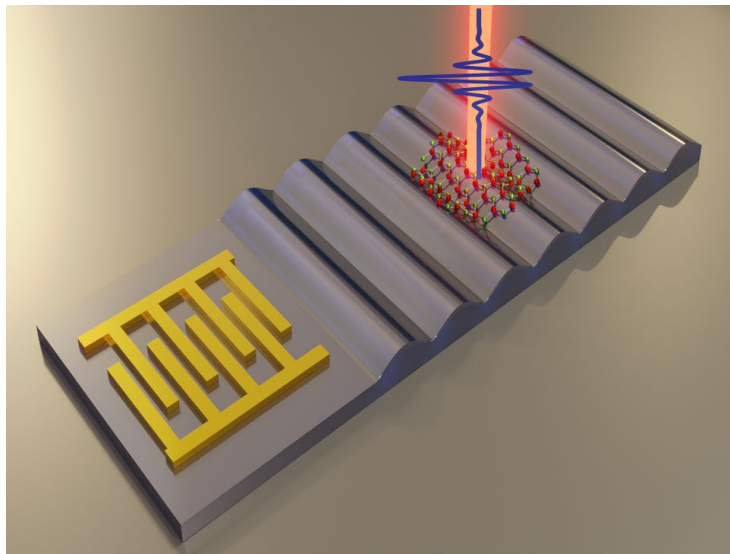


Fig. 1. Schematic illustration of interface engineering of TMDCs by dynamic strain.

References

1. K. Datta, Z. Lyu, Z. Li, T. Taniguchi, K. Watanabe, and P. B. Deotare, Spatiotemporally controlled room-temperature exciton transport under dynamic strain, *Nat. Photonics* 16, 242 (2022).
2. J. M. Kim, K.-Y. Jeong, S. Kwon, J.-P. So, M. C. Wang, P. Snapp, H.-G. Park, and S. Nam, Strained two-dimensional tungsten diselenide for mechanically tunable exciton transport, *Nat. Commun.* 15, 10847 (2024).

Deterministic Formation of Single Organic Color Centers in Single-Walled Carbon Nanotubes

Daichi Kozawa,^{1,2,3} Yuto Shiota,^{2,4} Mengyue Wang,¹ and Yuichiro K. Kato^{1,2}

¹Quantum Optoelectronics Research Team, RIKEN Center for Advanced Photonics, Wako, Saitama, Japan

²Nanoscale Quantum Photonics Laboratory, RIKEN Pioneering Research Institute, Wako, Saitama, Japan

³Research Center for Materials Nanoarchitectonics, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Ibaraki, Japan

⁴Department of Applied Physics and Physico-Informatics, Keio University, Yokohama, Kanagawa, Japan

E-mail: kozawa.daichi@nims.go.jp

Abstract

Quantum light sources capable of emitting single photons on demand are essential for emerging quantum technologies, enabling advances in communication, computing, and sensing applications. Notable developments toward these applications include single-photon emission demonstrated in various solid-state systems such as nitrogen-vacancy centers in diamond, semiconductor quantum dots, and defects in two-dimensional materials (1). Particularly desirable are quantum light sources that operate at room temperature and within the telecom wavelength range (2,3), while material limitations and emission efficiency constraints need to be considered.

Single-walled carbon nanotubes (SWNTs) have emerged as a promising platform for quantum light sources, owing to their unique one-dimensional structure, exceptional optical properties (4), and compatibility with telecom wavelengths (5-7). The introduction of organic color centers in SWNTs (8) has further enabled single-photon emission at room temperature with large tunability of the emission energy. Nevertheless, one of the critical challenges is the deterministic control over the formation of these quantum defects, particularly the number of defects introduced and their spatial positioning within single carbon nanotubes. Existing methods often lack the capability or the precision required, limiting their potential for scalable quantum photonic applications.

In this work, we develop a technique for the deterministic creation of single organic color centers using *in-situ* photochemical reaction (9). As nanotubes are functionalized, discrete photoluminescence (PL) intensity changes corresponding to the formation of individual color centers are observed. By stopping the reaction upon detecting the discrete increase, we are able to deterministically create single color centers. Statistical analysis of PL spectra from individual color centers is conducted to obtain quantitative insight into the distribution of color center types. In addition, this technique allows for position-controlled formation of color centers which is validated by PL imaging. Furthermore, we observe photon antibunching from a color center by performing a photon correlation measurement, showing that single quantum defects can be formed using this technique.

Acknowledgements

This work was supported in part by JSPS KAKENHI Grants No. JP24H01210, No. JP23K23161, and No. JP23H00262; JST ASPIRE Grant No. JPMJAP2310; the Canon Foundation; the Mitsubishi Foundation; and MEXT ARIM Grant No. JPMXP1222UT1136. We thank the Advanced Manufacturing Support Team at RIKEN for their technical assistance.

References

- (1) D. Kozawa, S. X. Li, T. Ichihara, A. G. Rajan, X. Gong, G. He, V. B. Koman, Y. Zeng, M. Kuehne, K. S. Silmore, D. Parviz, P. Liu, A. T. Liu, S. Faucher, Z. Yuan, J. Warner, D. Blankschtein, and M. S. Strano, Discretized hexagonal boron nitride quantum emitters and their chemical interconversion, [Nanotechnology 34, 115702 \(2023\)](#).
- (2) S. X. Li, T. Ichihara, H. Park, G. He, D. Kozawa, Y. Wen, V. B. Koman, Y. Zeng, M. Kuehne, Z. Yuan, S. Faucher, J. H. Warner, M. S. Strano, Prolonged photostability in hexagonal boron nitride quantum emitters, [Commun. Mater., 4, 19 \(2023\)](#).
- (3) A. Ishii, T. Uda, and Y. K. Kato, Room-temperature single-photon emission from micrometer-long air-suspended carbon nanotubes, [Phys. Rev. Appl. 8, 054039 \(2017\)](#).
- (4) D. Kozawa, S. Fujii, and Y. K. Kato, Intrinsic process for upconversion photoluminescence via K-momentum-phonon coupling in carbon nanotubes, [Phys. Rev. B 110, 155418 \(2024\)](#).
- (5) A. Ishii, M. Yoshida, and Y. K. Kato, Exciton diffusion, end quenching, and exciton-exciton annihilation in individual air-suspended carbon nanotubes, [Phys. Rev. B 91, 125427 \(2015\)](#).
- (6) A. Ishii, X. He, N. F. Hartmann, H. Machiya, H. Htoon, S. K. Doorn, and Y. K. Kato, Enhanced single-photon emission from carbon-nanotube dopant states coupled to silicon microcavities, [Nano Lett. 18, 3873 \(2018\)](#).
- (7) A. Ishii, H. Machiya, and Y. K. Kato, High efficiency dark-to-bright exciton conversion in carbon nanotubes, [Phys. Rev. X 9, 041048 \(2019\)](#).
- (8) D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. Wang, and Y. K. Kato, Formation of organic color centers in air-suspended carbon nanotubes using vapor-phase reaction, [Nat. Commun. 13, 2814 \(2022\)](#).
- (9) D. Kozawa, Y. Shiota, Y. K. Kato, Deterministic Formation of Single Organic Color Centers in Single-Walled Carbon Nanotubes, [arXiv:2504.20402 \[cond-mat.mtrl-sci\]](#).

Polarized Thermal Radiation from an On-Chip Aligned Carbon Nanotube Film

Shinichiro Matano,^{1,2} Natsumi Komatsu,³ Shengjie Yu,⁴ Jacques Doumani,⁴ Yui Shimura,¹ Junichiro Kono,⁴ and Hideyuki Maki^{1,5}

¹ Keio University, ² Kyoto University (Present), ³ University of California, Berkeley, ⁴ Rice University, ⁵ Center for Spintronics Research Network, Keio University
E-mail: matano.shinichiro.5h@kyoto-u.ac.jp

1. Introduction

A polarized light technique is one of the powerful analysis tools in material science, such as crystal, solid material, and chemical and biochemical molecules. To identify asymmetric structure through the polarized light technique, a polarized light source covering a wide wavelength range, is required. One can use the combination of an unpolarized light source and a polarizer, but it has been challenging to directly produce polarized light over a wide range without any additional polarizer.

Carbon nanomaterial is a potential candidate for development of an innovative thermal light source that can produce light in a wide range. Previously, electrically driven thermal radiation from graphene and carbon nanotubes (CNTs) have been reported [1,2], which cover a wide wavelength range and show thermal stability. However, thermal radiation from aligned CNTs has not been revealed, which has a nanoscale anisotropic structure.

Here, we report an observation of polarized thermal radiation from an aligned CNT film and the development of thermal light emitters based on the CNT film.

2. Results and Discussion

We have developed an electrically driven light-emitting device using a well-aligned CNT film [3], which was prepared by the controlled vacuum filtration method (Fig. 1a) [4]. To understand the effect of the film's anisotropic characteristics, we prepared two types of devices: a parallel (perpendicular) device where applied voltage direction and CNT alignment are parallel (vertical). Fig. 1b shows an infrared light emission image on the parallel device, which exhibits the thermal radiation from an aligned CNT film. Through the investigation of spectral and polarization properties, it was found that the CNT film generates polarized thermal

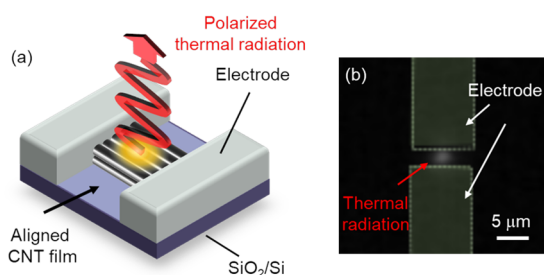


Figure 1 (a) A schematic image of electrical generation of polarized thermal radiation from an aligned CNT film. (b) An image of thermal radiation from a CNT film device observed with an infrared camera.

radiation due to its CNT alignment.

To understand the emission response property, we measured time-resolved light intensities on the CNT radiation (parallel device, Fig. 2a), which exhibits high-speed response on the thermal radiation [5]. Moreover, we demonstrate a micro-device embedded with the suspended structure to achieve polarization improvement (Fig. 2b) [6].

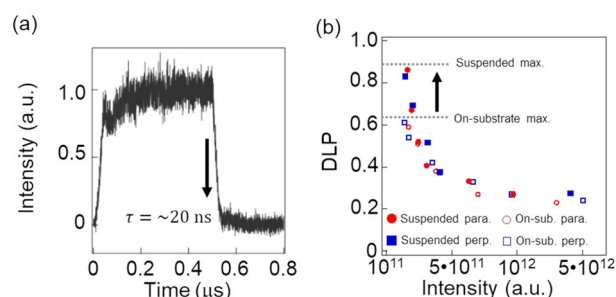


Figure 2 (a) Time-resolved light intensity of thermal emission from an aligned CNT film device. (b) Polarization degree of the thermal radiation from the on-substrate and suspended devices.

3. Conclusions

We found that an aligned CNT film can produce polarized radiation over a wide wavelength range. Additionally, we achieved high-speed modulation on the thermal radiation and polarization improvement by using a nano-fabrication process. These results suggest a new platform for light source development.

Acknowledgements

This work was supported by A-STEP, JST-Mirai Program, Greater Tokyo Innovation Ecosystem (GTIE), and SPRING from JST, KAKENHI and Partnerships for International Research and Education from JSPS, and the Keio University Doctorate Student Grant-in-Aid Program from Ushioda Memorial Fund. This work was technically supported by Spintronics Research Network of Japan, the Core-to-Core program from JSPS, and NIMS Nanofabrication Platform. J.K. acknowledges support from the Robert A. Welch Foundation, the Air Force Office of Scientific Research, the JST CREST program, Japan, the U.S. National Science Foundation, and the Carbon Hub of Rice University.

References

- [1] T. Mori *et al.*, *Nano Lett.* **14**, 3277–3283 (2014).
- [2] Y. Miyoshi *et al.*, *Nat. Commun.* **9**, 1279 (2018).
- [3] S. Matano *et al.*, *ACS Materials Lett.* **4**, 626–633 (2022).
- [4] X. He *et al.*, *Nat. Nanotechnol.* **11**, 633–638 (2016).
- [5] S. Matano *et al.*, *Nano Lett.* **23**, 9817–9824 (2023).
- [6] A. Zacheo*, S. Matano* *et al.*, *ACS Nano* **18**, 15769–15778 (2024). (*: co-first author)

High-performance bilayer selective solar absorber based on carbon nanotube membrane with a tailored optical response

Hengkai Wu¹, Taishi Nishihara^{1,2}, Takeshi Tanaka³, Hiromichi Kataura⁴, Yuhei Miyauchi^{1*}

¹ Institute of Advanced Energy, Kyoto University, ² Tokyo University of Science, ³ Research Institute of Core Technology for Materials Innovation, AIST, ⁴ Nanomaterials Research Institute, AIST

E-mail: miyauchi@iae.kyoto-u.ac.jp

Solar-thermal conversion plays a significant role in meeting the growing heat demand of human society in a sustainable approach. Spectral selective solar absorbers (SSAs), which can suppress thermal radiation loss while maintaining maximized sunlight absorption, are critical for achieving high operation temperature and high conversion efficiency without the reliance on the expensive, land-occupying optical concentrators. An ideal SSA requires broadband high absorptance across the sunlight region (mainly 300–2500 nm), minimal absorptance in the mid-infrared region (and hence minimal emittance according to Kirchhoff's law), an appropriately located cutoff wavelength in near-infrared where the transition of absorption feature occurs rapidly, and low sensitivity of these properties to the angle of incidence.

Since there is no intrinsic material that can simultaneously meet all the requirements mentioned above, many SSAs with composite structures have been designed. Absorber-reflector tandem is the simplest composite structure where the absorber layer (typically with a thickness larger than the light wavelength to be absorbed, **Fig.1 (a)**) determines the main absorption, while the reflector layer enhances the absorption by doubling the propagation distance [1, 2]. However, the performance of such SSAs is constrained by the limited intrinsic properties of the naturally existing absorber materials. Therefore, sophisticated structures such as antireflection layers, textured surface, cavity structures, or photonic crystal are usually needed to further improve the sunlight absorption, suppress thermal radiation, or create spectral selectivity [3, 4], which hinders the thermal energy transfer, complicates the manufacturing process, and increases production difficulty.

Here, we propose a carbon nanotube-based high performance selective solar absorber with the simple absorber-reflector tandem structure. The key concept in our design strategy is to place a sub-quarter-wavelength thickness, ultrathin semiconducting layer on a metal reflector. With tailored absorption characteristic, this layer can simultaneously function as absorber and antireflection dielectric layer (**Fig.1 (b)&(c)**). Although conventional semiconductors can hardly achieve the desired absorption characteristics, we demonstrate feasibility to achieve it using semiconducting single-walled carbon nanotubes (SWCNTs). SWCNTs are promising materials with strong light-matter interactions originating from their quasi-1D excitons, which are stable even at extremely high temperatures [5-7]. They exhibit

sharp absorption cutoff in the near-infrared regions depending on their structures (chirality) [8-10] and weak absorption in the mid-infrared region. By mixing selected chirality, we tailor the optical response of the SWCNT membrane to achieve the desired absorption characteristics.

As a proof-of-concept, we fabricated an ~100-nm thick absorber consisted of two SWCNT species and placed it onto a gold-coated substrate with area of 1 cm². We confirmed that it exhibits outstanding spectral selectivity (absorptance/emittance of 0.84/0.03). Furthermore, both simulations and measurements indicate that these properties are maintained at incident angles up to 60°. Under unconcentrated sunlight, the SWCNT-SSA reaches 190 °C, significantly exceeding the 100 °C recorded for a blackbody-like absorber under identical conditions. The details of the design concept and sample demonstration will be discussed.

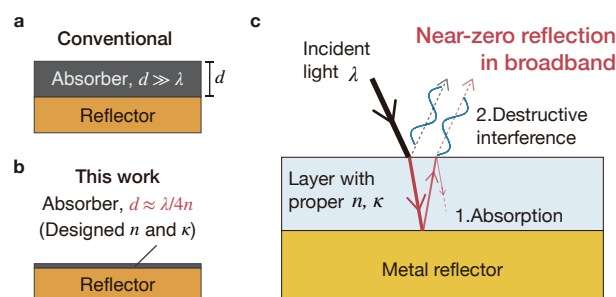


Fig. 1: Schematic of (a) conventional bilayer spectral selective solar absorber (SSA) and (b) proposed bilayer SSA. (c) Concept of the proposed structure. Near-zero reflection can be achieved by combining absorption and destructive interference with appropriate n and κ . This can be extended to broadband range with carefully designed $n(\lambda)$ and $\kappa(\lambda)$.

References

- [1] A. Donnadieu and B. O. Seraphin, J. Opt. Soc. Am. **68**, 292 (1978).
- [2] Mattox, D. M. and Kominiak, G. J. J. Vac. Sci. Technol. **12**, 182 (1975).
- [3] M. Bello and S. Shanmugan, J. Alloys Compd. **839**, 155510 (2020).
- [4] L. Feng *et al.*, Adv. Mater. **32**, 1903787 (2020).
- [5] T. Nishihara *et al.*, Nat. Commun. **9**, 3144 (2018).
- [6] S. Konabe *et al.*, Opt. Lett. **46**, 3021 (2021).
- [7] T. Nishihara *et al.*, Commun. Mater. **6**, 89 (2025).
- [8] K. Liu *et al.*, Nat. Nanotechnol. **7**, 325 (2012).
- [9] Y. Yomogida *et al.*, Nat. Commun. **7**, 12056 (2016).
- [10] T. Nishihara *et al.*, Nanophotonics **11**, 1011 (2022).

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演)：【CS.6】 4.5 Nanocarbon and 2D Materials、17 ナノカーボン・二次元材料のコードシェアセッション

[8a-N204-1~5] CS.6 4.5 Nanocarbon and 2D Materials、17 ナノカーボン・二次元材料のコードシェアセッション

[8a-N204-1]

Anisotropic Optical Response of Metastable Phase WS₂ Atomic Layers Probed by Polarized Raman Spectroscopy

○Mitsuhiro OKADA¹, Adlen Smiri¹, Tarojiro Matsumura¹, Yung-Chang Lin¹, Yuki Okigawa¹, Kazu Suenaga^{1,2}, Takeshi Nakanishi¹, Takatoshi Yamada¹ (1.AIST, 2.Osaka Univ.)

[8a-N204-2]

Study of Spin-Dark Excitons in 2D Semiconductors by time-resolved Momentum Microscopy

○(D)Xing Zhu¹, David R. Bacon¹, Vivek Pareek¹, Julien Madeo¹, Kenji Watanabe², Takashi Taniguchi², Michael K. L. Man¹, Mit H Naik³, Keshav M. Dani¹ (1.FSU, OIST, 2.NIMS, 3.UT Austin)

[8a-N204-3]

Semi-dry transfer of 2D materials via hydrophilic organic polymer layer delamination

○(P)Matej Sebek¹, Durgadevi Elamaram¹, Daisuke Kiriya¹ (1.University of Tokyo)

[8a-N204-4]

Tailoring PtSe₂ Monolayers via Se Vacancies and O Substitution for Efficient SF₆ and CH₄ Gas Sensing

○(DC)ROHIT KUMAR RAI¹, Neetu Raj Bharti¹, Neeraj Goel¹ (1.NSUT, New Delhi)

[8a-N204-5]

Pd Decoration on Basal and Edge Planes of Janus WSeTe for NO₂ Sensing: A DFT Study

○(DC)NEETU RAJ BHARTI¹, NEERAJ GOEL¹ (1.NSUT, Delhi)

Anisotropic Optical Response of Metastable Phase WS₂ Atomic Layers Probed by Polarized Raman Spectroscopy

Mitsuhiro Okada¹, Adlen Smiri¹, Tarojiro Matsumura¹, Yung-Chang Lin¹,
Yuki Okigawa¹, Kazu Suenaga^{1,2}, Takeshi Nakanishi¹, and Takatoshi Yamada¹

¹ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), ² Osaka University
E-mail: mi.okada@aist.go.jp

1. Introduction

The field of symmetry engineering in two-dimensional (2D) materials and their heterostructures has seen a surge in interest due to the emergence of moiré physics and the discovery of symmetry-induced exotic properties, such as the bulk photovoltaic effect [1-2]. Reducing the symmetry of a crystal causes anisotropy in its properties. Understanding the anisotropic response in symmetry-engineered 2D materials is also important. Additionally, some 2D material monolayers have an intrinsic anisotropic structure. For example, the metastable 1T'-phase of WS₂ belongs to space group $P2_1/m$ (C_{2h} in Schoenflies notation), indicating a different optical and electrical response when perturbation forces are applied along and perpendicular to the main axis. In the case of 1T'-phase WS₂, the main axis is the b-axis, which is parallel to the W-W zigzag chain structure. However, due to the difficulty of growing 1T'-phase WS₂, its anisotropic properties have not been fully understood. Here, we report on our investigation of the anisotropic optical response of CVD grown 1T'-phase WS₂ atomic layers [3] using polarized Raman spectroscopy. Our results will form the basis for understanding and applying the anisotropic properties of 1T'-phase WS₂ [4].

2. Methods

The 1T'-phase WS₂ was grown using the alkali-metal-assisted CVD method [3]. The sample was transferred to a SiO₂ substrate using a wet transfer method. Polarized Raman spectroscopy was then performed using a confocal Raman spectrometer with excitation wavelengths of 532 nm. Next, the sample was transferred onto a grid and checked its crystallographic orientation using STEM-ADF observation.

2. Results and discussion

We obtained polarized Raman spectra under parallel- (the incident laser polarization is parallel to the analyzer) and cross-polarized (the analyzer direction is perpendicular to the incident layer polarization) geometries by rotating the sample. Group theory predicted that the 1T' phase of WS₂ would show six A_g and three B_g peaks with rotation- and configuration-dependent intensity oscillations. We set 0° as the incident laser polarization was parallel to the W-W zigzag chain (*i.e.*, the **b**-axis), as confirmed by STEM-ADF observation.

Figure 1 shows the polarized Raman spectra measured under the parallel configuration with rotation angles of 0°, 40°, and

90°. As can be seen, the Raman peak intensity varies with the rotation angle, demonstrating the optical anisotropy of the 1T'-phase WS₂. Then, the peak intensity oscillation behavior was extracted by fast curve fitting method named EM-Peaks. Furthermore, by combining polarized Raman spectroscopy analyzed by EM-Peaks with changing the excitation wavelength, the group theory, and the peak position prediction by the density functional theory calculations, we successfully identified the Raman peaks of the 1T'-phase WS₂.

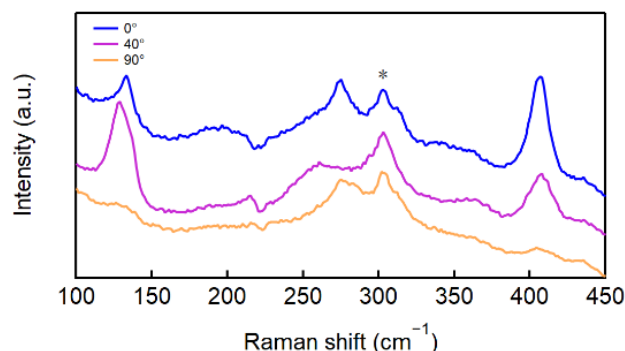


Figure 1. Polarized Raman spectra of 1T'-phase WS₂ under parallel-polarization configuration with 532 nm excitation. The peak with star (*) is from the Si substrate.

3. Conclusions

In summary, we used polarized Raman spectroscopy to study the anisotropic optical properties of 1T'-phase WS₂ atomic layers grown by CVD. Successful observation of the anisotropic optical response and Raman peak assignment would advance research on 1T'-phase WS₂ atomic layers.

Acknowledgements

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant No. 22K15403.

References

- [1] Y. Kao et al., Nature **556** (2018) 7699.
- [2] T. Akamatsu et al., Science **372** (2021) 68.
- [3] M. Okada et al., ACS Nano **16** (2022) 13069.
- [4] M. Okada et al., to be submitted.

Study of Spin-Dark Excitons in 2D Semiconductors by time-resolved Momentum Microscopy

Xing Zhu¹, David R. Bacon¹, Vivek Pareek¹, Julien Madéo¹, Kenji Watanabe², Takashi Taniguchi³, Michael K. L. Man¹, Mit H Naik⁴ and Keshav M. Dani^{*1}

¹ Femtosecond Spectroscopy Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Onna, Okinawa, Japan 904-0495

² Research Center for Functional Materials, National Institute for Materials Science; 1-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-0044, Japan

³ International Center for Materials Nanoarchitectonics, National Institute for Materials Science; 1-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-0044, Japan

⁴ University of Texas at Austin, Austin, Texas

*Email address: kmdani@oist.jp

1. Introduction

Excitons - quasiparticles formed by coulomb-bounded electron-hole pairs, plays key role on fundamental optical excitations of 2D semiconductors. For the prototypical 2D semiconductors 1L WS₂, a complex excitonic landscape exists, including a significant population of spin- or momentum- dark excitons. This landscape is closely connected with the spin and valley configuration of exciton constituents - electrons and holes [1-3]. While dark excitons are generally invisible to light limited by optical selection rule, time- and angle- resolved photoemission spectroscopy (TR-ARPES) has been successfully used to visualize the dark excitons [4-6]. In this talk, we will focus on the momentum resolved study of spin- and momentum-dark excitons in 2D semiconductors by TR-ARPES.

experimental setup, as employed in our previous studies [4-6], consists of a home-built table-top beamline used to generate a 21.7eV XUV probe. The electrons photoemitted by the XUV probe within selected 16×16 μm² area of 1L WS₂ are analyzed by the momentum microscope to map the 3D bandstructure (E, k_x, k_y).

To generate valley-polarized excitons, a circularly polarized pump pulse resonant with the A-exciton (2.1eV) is applied on the 1L WS₂. The initial A-excitons with high degree of valley polarization quickly decay into a complex landscape of dark excitons including momentum-dark and spin-dark excitons (Fig 1a). At later time delay (1ps), we observe the photoemission signal of the excited states lower than initial states at 0ps by 40 meV (Fig 1b), which shows the spin-split states of the exciton-bounded electrons are resolved. With this capability to access the valley and spin configuration of excitons, we can fully track the dynamics and extract the contribution of the bright and dark excitons, which allows us to further analyze the wave function of dark excitonic states.

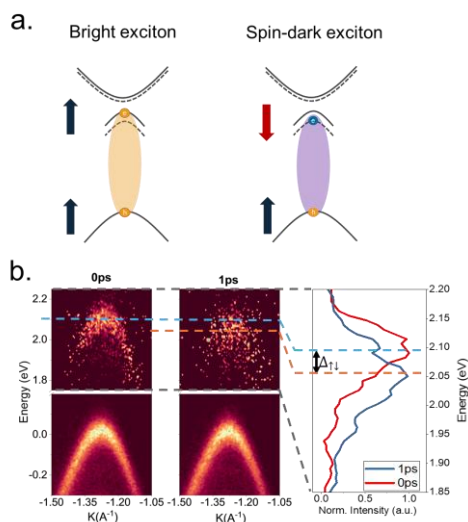


Figure 1. a. Schematics of the bright exciton and spin-dark exciton. **b.** Photoemission signal at 0ps and 1ps. The bright exciton by photoexcitation at 0ps. At 1ps the exciton-bounded electrons populate the lower states carrying opposite spin of the valence band in the same valley.

2. Experiment

We perform experiments on an exfoliated monolayer WS₂ stacked on an hBN buffer layer and a Si substrate. The

3. Conclusions

Using Tr-ARPES, we directly image bright and dark excitons with their wave function in momentum space, which provides understanding on how the electron-hole exchange interaction impacts on the internal structure of excitons.

Acknowledgements

*This work was supported in part by JSPS Kakenhi grant number 21H01020. Funding was also provided in part by the Femtosecond Spectroscopy Unit of the Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University. We thank the OIST engineering support section for their support.

References

- [1] G. Wang et al., Rev. Mod. Phys. 90, 021001 (2018).
- [2] D. Y. Qiu et al., Phys. Rev. Lett. 115, 176801 (2015).
- [3] Zhang, X.-X. et al. Nature Nanotech 12, 883–888 (2017).
- [4] J. Madéo et al., Science 370, 1199 (2020).
- [5] M. K. L. Man et al., Science Advances 7, eabg0192 (2021).
- [6] O. Karni et al., Nature 603 (2022) 247.

Semi-dry transfer of 2D materials via hydrophilic organic polymer layer delamination

¹Graduate School of Arts and Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

○Matej Sebek¹, Durgadevi Elamaram¹, Daisuke Kiriya¹

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

Transfer of two-dimensional (2D) materials such as graphene and MoS₂ is essential for the device realization, yet existing methods each introduce drawbacks. Conventional wet transfer, where polymethyl methacrylate (PMMA) is used as a support layer and potassium hydroxide etching removes the underlying substrate, leaves polymer and etchant residues and induces wrinkles and bubbles, whereas polydimethylsiloxane (PDMS)-based dry stamping avoids liquid etchants but often tears flakes and deposits adhesive residues. [1] Here we demonstrate a facile etch-free and acetone-free method with the use of a hydrophilic organic polymer layer.

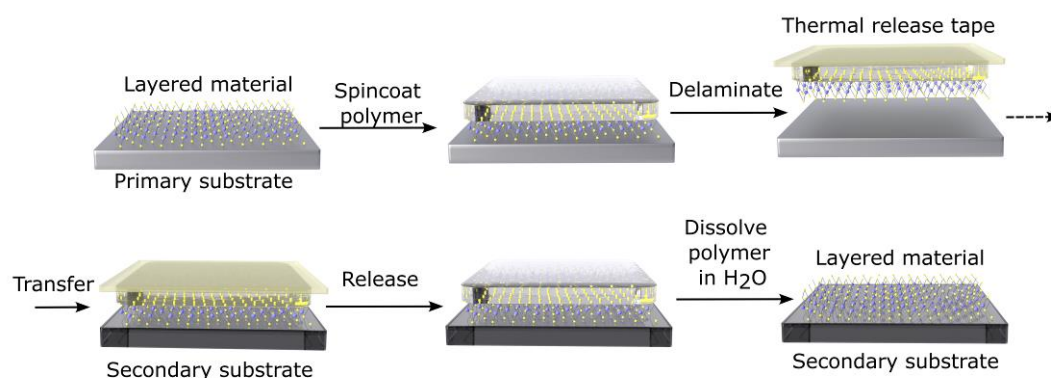


Fig. 1 Experimental scheme of the transfer

Figure 1 shows a schematic of the semi-dry transfer process. A hydrophilic organic polymer layer is spin-coated onto the substrate at 2 000 rpm for 10 s. After ambient drying for 1 min to remove residual moisture, thermal-release tape is laminated onto the polymer/flake stack and peeled away, carrying the polymer together with exfoliated 2D flakes. The stack is then aligned on the target substrate, heated to 135 °C on a hot plate under a cover to uniformly activate the release layer and pressed into conformal contact. Finally, immersion in deionized water dissolves the polymer, leaving the 2D materials adhered to the substrate without exposure of the buried interface to etchants or organic solvents.

We demonstrate that artificial folds in few-layer MoS₂ [2] survive our semi-dry transfer with preservation of both fold geometry and the strain, as confirmed by AFM scans and Raman mapping. Furthermore, we fabricate functional devices on polyvinyl chloride (PVC) substrates that swells or dissolves in acetone and thus cannot be processed by standard photolithography or PMMA-based transfer.

References:

- [1] Frisenda, Riccardo, et al., *Chemical Society Reviews* 47.1 (2018): 53-68.
- [2] Castellanos-Gomez, Andres, et al., *Nano letters* 13.11 (2013): 5361-5366.

Tailoring PtSe₂ Monolayers via Se Vacancies and O Substitution for Efficient SF₆ and CH₄ Gas Sensing

Rohit Kumar Rai, Neetu Raj Bharti¹, Neeraj Goel¹

¹Department of Electronics and Communication Engineering, Netaji Subhas University of Technology, Delhi, India

E-mail:rohit.rai.phd24@nsut.ac.in

1. Introduction

Greenhouse gases (GHGs) such as CH₄ and SF₆, primarily released from industrial and vehicular sources, absorb and emit long-wave radiation from the Earth's surface[1]. Efficient detection of these gases is essential. Approaches like vacancy defects, atomic doping, and atom substitution are commonly used to enhance sensing performance. Transition metal dichalcogenides (TMDs), particularly PtSe₂, are promising due to their layered structure, tunable bandgap, high carrier mobility, and strong excitonic effects[2]. This study employs density functional theory (DFT) to explore CH₄ and SF₆ adsorption on PtSe₂ monolayers with selenium vacancies, further modified by oxygen substitution at the defect sites.

2. Computational Detail

This study employed the DMol³ package in Materials Studio for DFT calculations. Geometry optimization was carried out using a 3×3×1 k-point grid and a global cut-off radius of 5 Å[3]. Convergence thresholds were set to 1.0×10⁻⁵ Ha for energy, 0.002 Ha/Å for maximum force, and 0.005 Å for displacement. The exchange-correlation was treated using the generalized gradient approximation (GGA) with the Perdew–Burke–Ernzerhof (PBE) functional and a double numerical plus polarization (DNP) basis set[4]. Adsorption energies were calculated using the Tkatchenko–Scheffler method with DFT semi-core pseudopotentials.

3. Results and Discussion

Figure 1 illustrates the 3×3×1 supercell structures of pristine PtSe₂, PtSe₂–Se–defect, and PtSe₂–O–sub, along with their corresponding bandgap values calculated using the DMol³ package. The calculated bandgaps are 1.349 eV for pristine PtSe₂, 0.215 eV for the Se-vacancy structure, and 1.239 eV for the O-substituted system. The sharp bandgap reduction in the defected structure suggests enhanced electronic conductivity, primarily due to the emergence of localized states within the band structure.

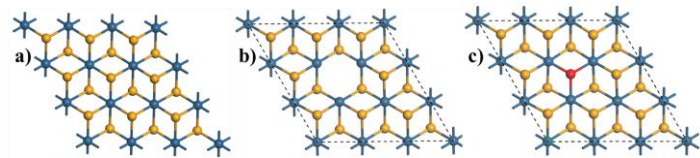


Fig.1 Supercell of (a) Pristine PtSe₂, (b) PtSe₂–Se–Defect, (c) PtSe₂–O–Substitute

Figure 2 shows the most energetically favorable configuration derived through structural optimization, as well as a schematic representation of the gas-sensing mechanism. Both SF₆ and CH₄ molecules operate as electron acceptors, removing charge from the PtSe₂ monolayer due to the Fermi level difference between the gas molecules and the substrate. The design presented in Figure 2 had the maximum thermodynamic stability of all those tested. Equation 1 was used to obtain the corresponding adsorption energy (E_{ad})[5].

$$E_{ad} = E_{Gas/System} - E_{System} - E_{Gas} \quad (5)$$

Here, $E_{Gas/System}$, E_{System} and E_{Gas} represent the total energies of the Gas-adsorbed configuration, the isolated substrate, and the NO₂ molecule, respectively. The calculated adsorption energies E_{ad} for CH₄ and SF₆ on Se defect are –5.92 eV, –3.62 eV, and on O substitution CH₄ and SF₆ are –5.81 eV and –3.72 eV respectively. Figure 3 illustrates the charge density difference (CDD) for NO₂ interaction with the sensor

surface. Mulliken population analysis reveals charge transfers of –0.08e (CH₄) and –0.938e (SF₆) at the Se-vacancy site, while at the O-substituted site, the values are –0.207e (CH₄) and –0.763e (SF₆). The greater electron

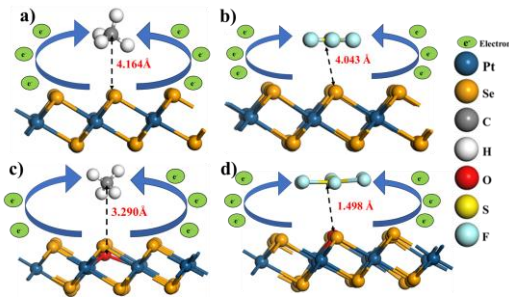


Fig 2. Schematic diagram of sensing mechanism of (a) CH₄–SeDefect, (b) SF₆–SeDefect, (c) CH₄–OSubstitute (d) SF₆–OSubstitute

withdrawal by CH₄ at both defect sites suggests enhanced sensing performance, attributed to increased catalytic activity, modified electronic structure, and improved charge carrier dynamics.

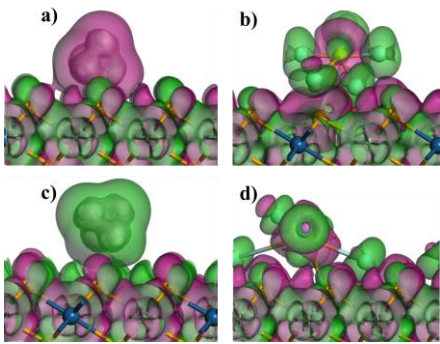


Fig.3 CDD of (a) CH₄–SeDefect, (b) SF₆–SeDefect, (c) CH₄–OSubstitute (d) SF₆–OSubstitute. Green and Yellow color depicts electron accumulation and depletion.

4. Conclusion

The PtSe₂ monolayer, modified with a selenium vacancy and further substituted with an oxygen atom, was studied for its sensing response against CH₄ and SF₆ molecules using density functional theory (DFT). The study found that CH₄ had better-sensing properties on both defect configurations than SF₆, suggesting a higher potential for gas detection.

References

- [1] L. Jeffry, M. Y. Ong, S. Nomanbhay, M. Mofijur, M. Mubashir, and P. L. Show, "Greenhouse gases utilization: A review," *Fuel*, vol. 301, p. 121017, 2021.
- [2] H. Cui, Y. Guo, Q. Zhao, and G. Zhang, "Pd-doped PtSe₂ monolayer with strain-modulated effect for sensing SF₆ decomposed species: a first-principles study," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 18, pp. 629–636, 2022.
- [3] D. Zhang, D. Wang, W. Pan, M. Tang, and H. Zhang, "Construction and DFT study of Pd decorated WSe₂ nanosheets for highly sensitive CO detection at room temperature," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 360, p. 131634, 2022.
- [4] Z. Lu, Y. Zhai, Q. Liang, and W. Wu, "Promoting sensitivity and selectivity of NO₂ gas sensor based on metal (Pt, Re, Ta)-doped monolayer WSe₂: A DFT study," *Chemical Physics Letters*, vol. 755, p. 137737, 2020.
- [5] Z. Chen *et al.*, "Dissolved gas analysis in transformer oil using Pt-doped WSe₂ monolayer based on first principles method," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 72012–72019, 2019.

Pd Decoration on Basal and Edge Planes of Janus WSeTe for NO₂ Sensing: A DFT Study

Neetu Raj Bharti¹, Neeraj Goel¹

¹Department of Electronics and Communication Engineering, Netaji Subhas University of Technology, Delhi, India

E-mail: neetu.bharti.phd23@nsut.ac.in

1. Introduction

Throughout human development, it remains essential to promote industrial advancement while ensuring the protection of the environment and public health. Among the numerous pollutants released from industrial activities, nitrogen dioxide (NO₂) is particularly harmful, posing serious risks to both human well-being and ecological balance[1]. Functionalizing Janus two-dimensional transition metal dichalcogenide (TMD) nanomaterials with noble metals can offer several advantages, including improved sensitivity, enhanced selectivity, and faster response times in sensing applications[2]. In this study, density functional theory (DFT) calculations were employed to investigate the sensing behavior of NO₂ on pristine WSeTe, as well as on the Janus WSeTe monolayer decorated with Pd atoms at both the basal and edge planes. To improve the sensitivity of WSeTe toward NO₂ gases, Pd atom decoration was proposed as a strategy to enhance the system's overall chemical reactivity and electron mobility.

2. Computational Methods

This study employed DFT calculations using the DMol³ package in Materials Studio. A 5×5×1 k-point grid and a 5 Å cutoff radius were used for geometry optimization[3]. Convergence criteria were set to 1.0×10⁻⁵ Ha (energy), 0.002 Ha/Å (force), and 0.005 Å (displacement). The GGA-PBE is functional with a double numerical plus polarization (DNP) basis set used for exchange-correlation[4]. Adsorption energies were calculated using the Tkatchenko–Scheffler method with DFT semi-core pseudopotentials.

3. Result and Discussion

Fig. 1 displays the 4×4×1 supercell structure of pristine WSeTe, SeWTe-T_{Se} (Pd above the Se atom), TeWSe-T_{Te} (above the Te atom), WSeTe-T_E (Pd atom decorated at the edge plane of the WSeTe Janus monolayer), and their bandgap calculation using DMol³ package, provided values are 1.335eV, 0.804eV, 1.021eV, 0.083eV respectively. This significant decrease in bandgap with Pd decoration suggests a substantial enhancement in conductivity.

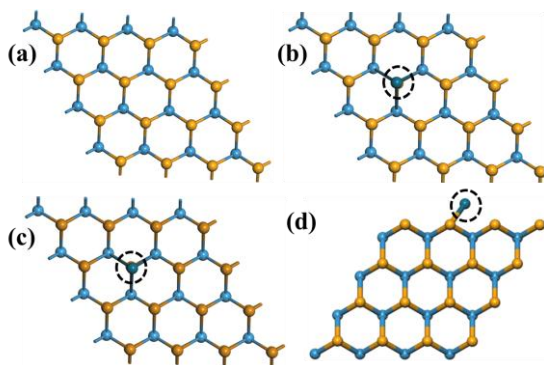


Fig.1 Supercell of (a) Pristine WSeTe, (b) SeWTe-T_{Se}, (c) TeWSe-T_{Te}, (d) WSeTe-T_E

Figure 2 illustrates the most stable configuration after optimization along with the sensing mechanism of the proposed Pd-decorated WSeTe structure. Pd atoms facilitate catalytic oxidation by drawing electrons from the WSeTe monolayer due to Fermi level differences. Upon NO₂ adsorption, electrons are further extracted from the Pd atom, enhancing the sensor's response. Notably, this configuration exhibits the highest stability among all proposed structures. The adsorption energy (E_{ad}) was calculated using eq 1 [5]:

$$E_{ad} = E_{Sys/Gas} - E_{Sys} - E_{Gas} \quad (1)$$

where, $E_{Sys/Gas}$, E_{Sys} , and E_{Gas} are the total energies of the NO₂ adsorbed system, isolated system, and NO₂, respectively. The E_{ad} for NO₂ on SeWTe-T_{Se}, TeWSe-T_{Te}, and WSeTe-T_E configurations were calculated as -1.693 eV, -1.655 eV, and -3.943 eV, respectively. Among these, the WSeTe-T_E configuration exhibits the strongest interaction with NO₂, as indicated by its most negative E_{ad} value. This enhanced sensing performance is further corroborated by charge density difference (CDD)

plots and Mulliken population analysis

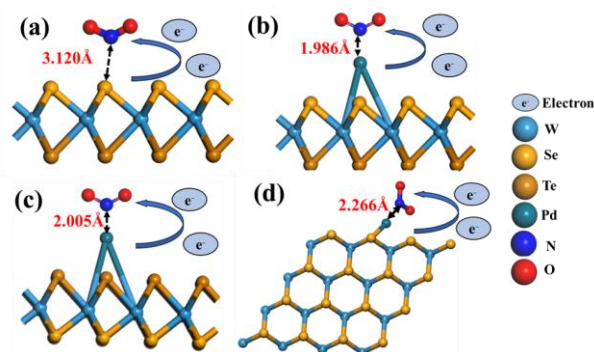


Fig 2. Schematic diagram of sensing mechanism of, (a) WSeTe (b) SeWTe-T_{Se}, (c) TeWSe-T_{Te}, (d) WSeTe-T_E

Figure 3 presents the charge density difference (CDD) between NO₂ and the sensing surface. Mulliken charge analysis reveals that the total charge on NO₂ is -0.376e for pristine WSeTe, -0.407e for SeWTe-T_{Se}, -0.388e for TeWSe-T_{Te}, and -0.422e for WSeTe-T_E. The WSeTe-T_E configuration demonstrates the highest electron withdrawal, indicating stronger interaction with NO₂. This enhanced charge transfer suggests superior gas sensing performance, attributed to improved catalytic activity, altered electronic structure, and effective modulation of charge carriers.

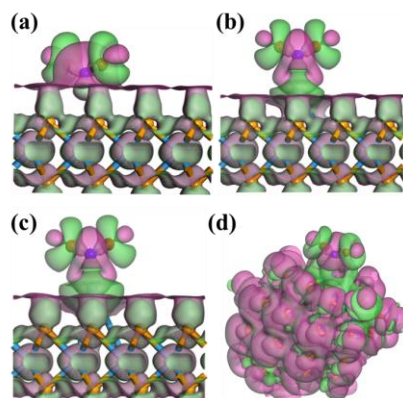


Fig.3 CDD of (a) SeWTe-T_{Se}, (b) TeWSe-T_{Te}, (c) WSeTe-T_E. The green and pink color depicts electron accumulation and depletion

4. Conclusion

Janus WSeTe and Pd-decorated WSeTe structures were investigated for NO₂ sensing using density functional theory (DFT). Among the studied configurations, WSeTe-T_E demonstrated the most promising performance for NO₂ detection. This configuration provides a higher density of active sites and exhibits stronger adsorption energy for NO₂ compared to other Pd-decorated WSeTe structures, indicating its enhanced sensing capability

References

- [1] A. Kushwaha and N. Goel, "Edge enriched MoS₂ micro flowered structure for high performance NO₂ sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 393, p. 134190, 2023.
- [2] Y. Sun, Z. Shuai, and D. Wang, "Janus monolayer of WSeTe, a new structural phase transition material driven by electrostatic gating," *Nanoscale*, vol. 10, no. 46, pp. 21629-21633, 2018.
- [3] A.-Y. Lu *et al.*, "Janus monolayers of transition metal dichalcogenides," *Nature nanotechnology*, vol. 12, no. 8, pp. 744-749, 2017.
- [4] R. Gao, Y. Yong, X. Yuan, S. Hu, Q. Hou, and Y. Kuang, "First-principles investigation of adsorption behaviors and electronic, optical, and gas-sensing properties of pure and Pd-decorated GeS₂ monolayers," *ACS omega*, vol. 7, no. 50, pp. 46440-46451, 2022.
- [5] W. An, X. Wu, and X. C. Zeng, "Adsorption of O₂, H₂, CO, NH₃, and NO₂ on ZnO nanotube: a density functional theory study," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 112, no. 15, pp. 5747-5755, 2008.

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.7】 6.1 強誘電体薄膜、13.3 絶縁膜技術、13.5 デバイス/配線/集積化技術のコードシェアセッション

[7p-N301-1~17] CS.7 6.1 強誘電体薄膜、13.3 絶縁膜技術、13.5 デバイス/配線/集積化技術のコードシェアセッション

[7p-N301-1]

Strain-Driven Solid Phase Epitaxy for Ferroelectricity and Uniformity Enhancement in $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ Thin Films

○(D)KuanMing Chen¹, Ming-Lun Tsai², Chia-Wei Hsu¹, Yuan-Chieh Tseng¹ (1.Department of Materials Science and Engineering, National Yang Ming Chiao Tung Univ., Taiwan, 2.Institute of Pioneer Semiconductor Innovation, National Yang Ming Chiao Tung Univ., Taiwan)

[7p-N301-2]

ZrO₂基固溶体薄膜における相形成および分極挙動のサイズ効果

栗林 優太¹、伊東 拓馬¹、横田 幸恵¹、○内田 寛¹ (1.上智大)

[7p-N301-3]

共添加HfO₂系強誘電体Y_{0.06}Nb_{0.06}Hf_{0.88}O₂の構造及び安定性評価

○浅沼 周太郎¹、右田 真司¹、太田 裕之¹、森田 行則¹、畑山 祥吾¹ (1.産総研 SFRC)

[7p-N301-4]

RFマグネトロンスパッタリング法を用いたSi直上でのY添加HfO₂薄膜の配向性及び強誘電性の制御

○近藤 真矢^{1,2}、小野 友慈²、澤木 陽向¹、村井 俊哉³、高 磊³、岡本 一輝⁴、舟窪 浩⁴、寺西 貴志²、岸本 昭²、山田 智明^{1,5} (1.名大、2.岡山大、3.産総研、4.科学大、5.科学大MDX)

[7p-N301-5]

配向制御した(100)配向希土類元素ドーピングエピタキシャルHfO₂薄膜の合成と評価

○(M2)土屋 裕太郎¹、胡 雨弦¹、岡本 一輝¹、山岡 和希子²、加賀谷 康永²、井上 ゆかり²、舟窪 浩¹ (1.東京科学大学、2.TDK株式会社)

[7p-N301-6]

電圧サイクリングに伴うAl:HfO₂薄膜の化学結合状態の変化

○三船 智哉¹、谷村 英昭^{1,2}、植野 雄守²、谷 勇佑²、藤沢 浩訓¹、中嶋 誠二¹、大坂 藍¹、高木 康多³、保井 晃³、唐 佳藝³、加藤 慎一²、三河 巧² (1.兵庫県大工、2.SCREEN、3.JASRI)

[7p-N301-7]

マルチショット・フラッシュランプアニールによるAl:HfO₂ 薄膜の分極特性向上

○谷 勇佑¹、植野 雄守¹、谷村 英昭¹、三船 智哉²、藤沢 浩訓²、中嶋 誠二²、大坂 藍²、加藤 慎一¹、三河 巧¹ (1.SCREEN セミコンダクターソリューションズ、2.兵庫県立大学)

[7p-N301-8]

HfO₂系強誘電体キャパシタの書き換え耐久性の電界依存

○糸矢 祐喜¹、更屋 拓哉¹、平本 俊郎¹、小林 正治^{1,2} (1.東大生研、2.東大d.lab)

[7p-N301-9]

極薄膜強誘電体Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂におけるwake-up物理機構モデルのシミュレーション検証

○伊藤 広恭¹、竹中 充¹、高木 信一^{1,2}、トープラサートポン カシディット¹ (1.東大院工、2.帝京大先端総研)

[7p-N301-10]

HfO₂系強誘電体MFMキャパシタにおける分極特性制御が物理リザーバー計算性能に及ぼす影響

○井上 颯太¹、請関 優¹、藤村 紀文¹、Kasidit Toprasertpong²、高木 信一²、吉村 武¹ (1.阪公大工、2.東大工)

[7p-N301-11]

強誘電体ゲートFETにおける分極特性が物理リザーバー計算性能に及ぼす影響

○請関 優¹、井上 颯太¹、藤村 紀文¹、横松 得滋²、神田 健介²、前中 一介²、Toprasertpong Kasidit³、高木 信一³、吉村 武¹ (1.阪公大工、2.兵庫県大工、3.東大工)

[7p-N301-12]

Investigation of Degradation in FeFETs Using Quasi-Static Split C-V Techniques: Significant Trap Generation under Cycling Stress

○Xuanhedong Gao¹, Zuocheng Cai¹, Zhenghong Liu¹, Zhao Jin¹, Xueyang Han¹, Yan-kui Liang¹, Yutong Chen¹, Eishin Nako¹, Shin-Yi Min¹, Mitsuru Takenaka¹, Shinichi Takagi¹, Kasidit Toprasertpong¹ (1.The Univ.of Tokyo)

[7p-N301-13]

Imprint Behaviors of Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ Ferroelectric Capacitors: Charge/Trap-site Dynamics during Write and Wake-up Cycles

○(D)Zhenhong Liu¹, Zuocheng Cai¹, Mitsuru Takenaka¹, Shinichi Takagi², Kasidit Toprasertpong¹ (1.Univ. Tokyo, 2.Teikyo Univ.)

[7p-N301-14]

Cycling induced imprint phenomenon at intermediate state used for multi-level operation in HfO₂-FeFET

○Viktoria Schlykow¹, Kunifumi Suzuki¹, Yoko Yoshimura¹, Hidesato Ishida¹, Kiwamu Sakuma¹, Kazuhiro Matsuo¹, Masumi Saitoh¹, Reika Ichihara¹ (1.Kioxia Corporation)

[7p-N301-15]

強誘電体薄膜分極特性のシミュレーション
—分極履歴特性と2次元格子モデルでの不活性サイトの影響—

○奥山 雅則¹ (1.阪大R3)

[7p-N301-16]

Landau-Khalatnikov方程式におけるρの意味について

○鳥海 明¹、右田 真司² (1.自由業、2.産総研)

[7p-N301-17]

強誘電体Hf_xZr_{1-x}O₂におけるC-V特性の掃引速度依存性の観察

○松川 浩之¹、竹中 充¹、高木 信一¹、トープラサートポン カシディット¹ (1.東大院工)

Strain-Driven Solid Phase Epitaxy for Ferroelectricity and Uniformity Enhancement in $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ Thin Films

Kuan-Ming Chen¹, Ming-Lun Tsai², Chia-Wei Hsu¹, and Yuan-Chieh Tseng¹

¹Department of Materials Science and Engineering, National Yang Ming Chiao Tung Univ., Taiwan

²Institute of Pioneer Semiconductor Innovation, National Yang Ming Chiao Tung Univ., Taiwan

E-mail: kmchen20424.en13@nycu.edu.tw

The discovery of ferroelectricity in hafnium oxide (HZO) thin films has enabled ultrathin, CMOS-compatible ferroelectric devices^[1]. Solid phase epitaxy (SPE) offers a powerful route to strain-engineer HZO grain growth and phase formation, thereby enhancing ferroelectric performance^[2-4]. Here, we demonstrate HZO MFM capacitors fabricated via a two-step SPE process. A 2 nm HZO seed layer was crystallized under tungsten (W) capping layers (3–50 nm) by rapid thermal annealing (500°C, 60 s), followed by cap removal, deposition of a 7 nm HZO layer and 30 nm W top electrode, and a second annealing step. Tensile strain from W capping layers is found to critically influence grain size and phase nucleation. An optimized 10 nm cap (W10) promotes homogeneous orthorhombic phase formation, maximizing ferroelectricity, while a 3 nm β -W cap (W3) suppresses non-uniform grain growth, enhancing device uniformity. Notably, W3 enables pristine ferroelectricity without wake-up, indicating stabilized phase formation during initial crystallization. This strain-driven SPE method yields high $2P_r$ and wake-up-free operation within a 500°C thermal budget, offering a promising path for BEOL-compatible HZO integration. The benchmark comparison highlights that our approach achieves both high $2P_r$ and wake-up free operation within a 500°C thermal budget, which is advantageous for BEOL-compatible HZO-based ferroelectric device integration. The work is supported by NSTC T-Star Center Project: Future Semiconductor Technology Research Center under NSTC 114-2634-F-A49-001, Taiwan.

Reference - [1] T. S. Böske et al., APL, **99**, 102903 (2011) [2] D. Zhang et al., TED, **70**, 6665-6672 (2023) [3] H. Y. Chen et al., CrystEngComm, **24**, 1731-1737 (2022) [4] J. H. Park et al., Nanoscale **17**, 10324-10333 (2025) [5] S. Hwang et al., IEDM, pp. 1-4 (2024) [6] B. W. Nie et al., EDL, **44**, pp. 1456-1459 (2023) [7] A. Senapati et al., EDL, **45**, pp. 673-676 (2024) [8] L. C. Teng et al., VLSI TSA, pp. 1-2 (2024) [9] J. W. Lee et al., TED, **71**, pp. 2690-2695 (2024) [10] Y. F. Chen et al., TED, **71**, pp. 3433-3438 (2024) [11] Y. K. Liang et al., EDL, **43**, pp. 1451-1454 (2022) [12] Y. J. Choi et al., EDL, **44**, pp. 713-716 (2023)

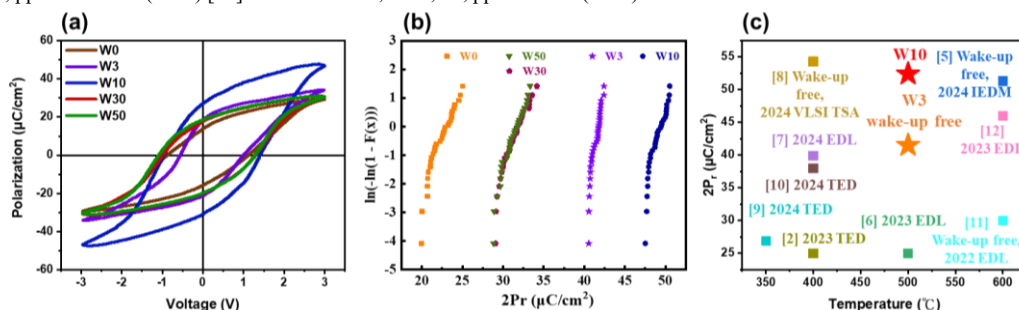


Fig. 1. (a) Polarization–voltage (P–V) characteristics after 10^4 cycles and (b) Weibull distribution of $2P_r$ for HZO under different W electrode conditions; (c) Benchmark comparison of $2P_r$ versus annealing temperature for W3 and W10 samples alongside reported data from literature.

ZrO₂ 基固溶体薄膜における相形成および分極挙動のサイズ効果

Size effects on phase-formation and polarization behavior of ZrO₂-based solid solution films

上智大学

栗林優太, 伊東拓馬, 横田幸恵, 内田 寛

Sophia University

Yota Kuribayashi, Takuma Ito, Yukie Yokota and Hiroshi Uchida

E-mail: uchidah@sophia.ac.jp

【はじめに】 各種強誘電体デバイスにおける回路素子の超小型集積化を阻害する問題であるサイズ効果を克服する材料として HfO₂ を基本組成とした蛍石型酸化物材料が近年注目されている。^{1,2)} この材料系においては、常温安定相である単斜晶(*m*)と高温安定相である正方晶(*t*)の相境界に強誘電性の直方晶(*o*)が準安定的に存在し、これが材料サイズの低減やドーパントの添加、熱履歴の調整などにより室温においても発現可能であることが報告されている。^{1,2)} 一方で HfO₂ の資源的希少性の問題から、比較的資源に富み同じく蛍石型結晶構造を有する ZrO₂ を基本組成とした材料を利用することができれば資源調達の観点から大いに有益であると判断される。本研究では ZrO₂ を主成分とした薄膜材料における強誘電性の発現を最終目標とし、今回の報告では ZrO₂ およびその固溶系における相形成のプロセスおよびそのサイズ効果に関する調査結果を報告する。

【実験】 Zr(O-*n*-C₄H₉)₄, Hf(O-*n*-C₄H₉)₄ および 2-メトキシエタノールを出発原料としての前駆体溶液 [組成: (1-*x*)HfO₂-*x*ZrO₂, *x* = 0~1.00, 濃度: 約 0.200 mol dm⁻³] を調製した。この溶液を Pt 電極付 Si 基板 [(111)Pt/TiO₂/(100)Si] 上にスピコートし、所望の膜厚を有する堆積物が得られるまでコーティングを繰り返した後、結晶化の熱処理 (700 °C, 5~120 min, vacuum) を施すことで薄膜試料を得た。

【結果と考察】 種々の膜厚で作製された ZrO₂ 薄膜 (*x* = 1.00) の XRD パターンを図 1 に示す。いずれの膜厚でも主相である *t*-*o*-相と副相の *m*-相が混合した状態で存在した。また格子面間隔による主相の分析結果より、膜厚の増大に伴った *t*-相から *o*-相への相転移の兆候が確認された。これらの薄膜試料での比誘電率の測定結果を図 2 に示す。膜厚~110 nm 以上の試料では約 25 の比誘電率 ϵ_r が計測された一方、それよりも膜厚サイズの小さい試料では比較的に高い比誘電率 (ϵ_r = ~40@1 MHz) が得られた。これらの値は図 1 で確認された薄膜材料を構成する結晶相から予想される ϵ_r 値^{1,3)} と合致しており、極薄膜化による ZrO₂ の相転移、ならびにそれに伴った誘電特性の変化が確認できた。当日の発表では固溶系における相形成および分極特性の評価結果についても報告する。

【参考】 1) Müller et al., *Nano. Lett.*, **12**, 4318 (2012). 2) Shimizu et al., *Sci. Rep.*, **6**, 32931 (2016). 他
3) Zhao et al., *Phys. Rev. B*, **65**, 075105 (2002).

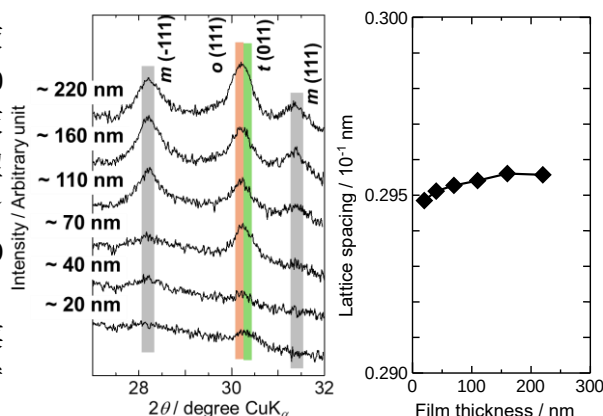


Fig. 1 XRD patterns and lattice spacings of ZrO₂ films with various thicknesses.

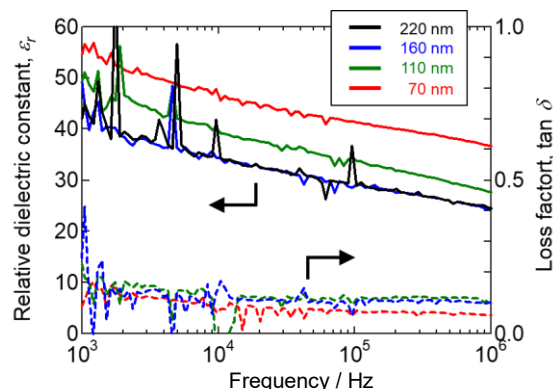


Fig. 2 *C-f* curves of ZrO₂ films with various thicknesses.

共添加 HfO₂ 系強誘電体 Y_{0.06}Nb_{0.06}Hf_{0.88}O₂ の構造及び安定性評価

Structural and stability evaluation of HfO₂-based ferroelectric Y_{0.06}Nb_{0.06}Hf_{0.88}O₂

産総研 SFRC、°浅沼 周太郎、右田 真司、太田 裕之、森田 行則、畑山 祥吾

SFRC AIST, °Shutaro Asanuma, Shinji Migita, Hiroyuki Ota, Yukinori Morita, Shogo Hatayama

E-mail: shutaro-asanuma@aist.go.jp

【研究背景】2011 年に報告された HfO₂系強誘電性は、半導体プロセスと相性がよく、かつ膜厚 10 nm 以下でも強誘電性を示すことからナノデバイスへの応用を目指した研究が盛んに行われている[1]。HfO₂系強誘電体は酸素空孔が強誘電性を担う準安定な Orthorhombic (*Pca2*₁) 相の安定化に寄与していることが知られている。しかし、一方で電界印加によって空孔が移動することで常誘電性の安定相 (monoclinic 相) と準安定相の体積比が変化して自発分極値が増減 (Wake-up 及び Fatigue) する他、絶縁破壊が促進されることも報告されている。このような自発分極値の不安定性や Endurance 特性の低さが HfO₂ 系材料の実用化における大きな課題となっていた。

我々は、この課題を克服するため、HfO₂ に Y³⁺ と Nb⁵⁺ を等モル共添加して物質内に電荷的な不均一性を導入することで酸素空孔に依存しない方法で強誘電相を安定化させることを目的とした研究を行って来た。この方法ならカチオンサイトの平均価数を+4 に維持することで酸素空孔の生成を抑えたまま結晶内に不均一な電荷分布に伴う歪みを導入することができると考えた。2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会では、Y_{0.06}Nb_{0.06}Hf_{0.88}O₂(YNHO)の多結晶薄膜が Ar+O₂(21%) 中で 10 分アニーリングしても Orthorhombic、Tetragonal、Cubic (o/t/c) のどれかの相になっていて常誘電性の monoclinic 相がほとんど生じていないこと、かつ Wake-up も Fatigue も生じず電圧印加回数 10¹⁰ 回まで自発分極値が安定した Endurance 特性を示すことを報告した。これらの結果は YNHO が安定相で強誘電性を示している可能性を示唆している。しかし、YNHO が o/t/c の内の何れの対称性を持っているか、及び強誘電相がどの程度安定なのかについては不明であった。

【研究目的】そこで、我々は、YNHO 膜の対称性の確認及び強誘電相がどの程度安定なのかの確認を目的として様々な条件で作製した YNHO 膜の構造解析を行った。

【実験方法】対称性の確認には透過型電子顕微鏡(TEM)観察及び電子線回折を用いた。これらの観察には、Ar+O₂(21%)中で 10 分アニーリングして 6°C/分で徐冷した YNHO 膜 (上部電極層なし) と N₂ 中で 10 分アニーリングして自然冷却した後に印加電圧 6V100kHz で 10⁹ 回電界印加を行った YNHO 膜 (上部 TaN 電極層あり) を用いた。安定性の確認には斜入射 X 線回折(GIXRD)による構造解析を用いた。これらの測定には大気 (N₂+O₂) 中、500-600°C で 10-100 時間アニーリングし、0.5°C/分で徐冷した YNHO 膜 (上部電極層なし) を用いた。

【実験結果】TEM 及び電子線回折の結果から YNHO の構造は空間群 *P4mm* の tetragonal 相であることが分かった。この解析結果については講演において詳述する。図 1 に大気中で長時間アニーリングした YNHO 膜の GIXRD プロファイルを示す。この結果から 100 時間大気中でアニーリングした試料でも tetragonal 相が monoclinic 相以上に残っていることが分かる。600°C で 10 時間アニーリングした試料と 100 時間アニーリングした試料の GIXRD プロファイルを比較すると、100 時間アニーリングした試料の方が tetragonal 相に対する monoclinic 相のピーク強度が増大していることからアニーリング時間に応じて徐々に monoclinic 相の割合が増大していることが分かる。また、500°C と 600°C で 100 時間アニーリングした試料の monoclinic 相と tetragonal 相のピーク強度比から温度上昇に伴い monoclinic 相の割合が増大していることが分かる。これらの結果から、YNHO の最も安定した熱力学的安定相は monoclinic 相と推定されるが、100 時間アニーリングしても消えないことから強誘電性を示す tetragonal 相もほぼ安定な相を形成していると考えられる。

[1] T. S. Böschke, et al., APL 99, 102903, 2011.

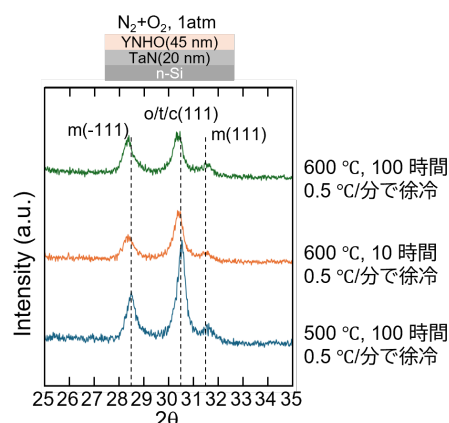


Fig. 1 GIXRD profile of YNHO films annealed in air

RF マグネトロンスパッタリング法を用いた

Si 直上での Y 添加 HfO₂ 薄膜の配向性及び強誘電性の制御Tuning ferroelectricity and crystallographic orientation of Y-doped HfO₂ thin films directly deposited on silicon via RF magnetron sputtering

名大¹, 岡山大², 産総研³, 科学大⁴, 科学大 MDX⁵ °近藤 真矢^{1,2}, 小野 友慈², 澤木 陽向¹,
村井 俊哉³, 高 磊³, 岡本 一輝⁴, 舟窪 浩⁴, 寺西 貴志^{2,4}, 岸本 昭², 山田 智明^{1,5}

Nagoya Univ.¹, Okayama Univ.², AIST³, Science Tokyo⁴, Science Tokyo MDX⁵

°Shinya Kondo^{1,2}, Tomoshige Ono², Hinata Sawaki¹, Toshiya Murai³, Rai Kou³, Kazuki Okamoto⁴,
Hiroshi Funakubo⁴, Takashi Teranishi^{2,4}, Akira Kishimoto², Tomoaki Yamada^{1,5}

E-mail: kondo.shinya.t8@f.mail.nagoya-u.ac.jp

【緒言】 データセンターを始めとする情報通信に関わる消費電力を削減するために、Si フォトニクスに集積可能な光変調器の開発が求められている。強誘電体 HfO₂ 基薄膜は CMOS プロセスと互換性があり、Si フォトニクスに適合可能な材料として期待される[1]。これまで単結晶基板上的エピタキシャル Y 添加 HfO₂ (YHO) 薄膜で電気光学 (EO) 効果を初めて報告し、最近では Zr 添加 HfO₂ 薄膜でも同等の EO 係数が報告されている[2-3]。一方で、これまでの報告では、Si 直上では極薄膜を除いて強誘電性を有する HfO₂ 基エピタキシャル薄膜の報告はない[4]。そこで本研究では、RF マグネトロンスパッタリング法を用いた非加熱成膜と極薄 Y-Hf バッファ層の導入による意図的な界面層制御により界面反応層の生成を抑制し、これらが Si 基板直上の YHO 薄膜の配向性及び強誘電性に与える影響について報告する。

【実験方法】 YHO 薄膜及び Y-Hf バッファ層は、Y を 7 mol% 添加した HfO₂ の焼結体 (豊島製) 及び Y 及び Hf の金属ターゲットをそれぞれ用いて n 型の Si(001) 及び(111) 基板上に非加熱で作製した。なお Si 基板は成膜の直前に HF 水溶液を用いて水素終端した。以後、この YHO ターゲットにより作製した薄膜を YHO7 膜と呼び、純アルゴン雰囲気中で、ターゲット基板間距離を 130 mm, RF 電力は 130 W, 全圧を 10 mTorr に設定し、成膜を行った。上部電極は、直径 100/200 µm, 厚さ 50 nm の円形 Pt 電極を電子ビーム蒸着法を用いて作製した。

【実験結果】 Fig.1-(a) に Y 組成の異なる膜厚 2 nm の Y-Hf 層を導入した YHO7 膜の X 線回折 (XRD) 測定の結果を示す。Si 直上で作製した YHO7 膜と比べると、Y-Hf 層を挿入することで、{00l} 方向の回折強度が 80% から最大 91% に増加し、配向性が大きく向上した。Si 直上に成膜した場合、ターゲットからの O₂ イオンの影響で界面層 (I.L.) が生成することで配向性及び結晶性の低下が予想される。一方で、極薄 Y-Hf 層を導入した場合、Si 基板への酸素拡散が抑制され、I.L. の形成が抑制されることで YHO7 膜の配向性及び電気特性が向上し、結果として明瞭な強誘電性を示した (Fig.1-(b)) と考えた。

【謝辞】 本研究の一部は、JSPS 科研費 23K13545, 25K17827 (S.K.), (公財)池谷科学技術振興財団 (S.K.), (公財)村田学術財団 (S.K.), JSPS 科研費 22K18307 (H.F., K.O.), 23K13364 (K.O.), 文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 JPJ011438 (H.F.), 文部科学省データ 創生・活用型マテリアル研究開発プロジェクト事業 JPMXP1122683430 (H.F., T.Y.) の助成を受けたものです。

【参考文献】 [1] K. Taki *et al.*, *Nat. Commun.* **15**, 3549 (2024). [2] S. Kondo *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, 070905 (2021). [3] A. Dastgir *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **126**, (2025) in press. [4] S.S. Cheema *et al.*, *Nature* **580**, 478 (2020).

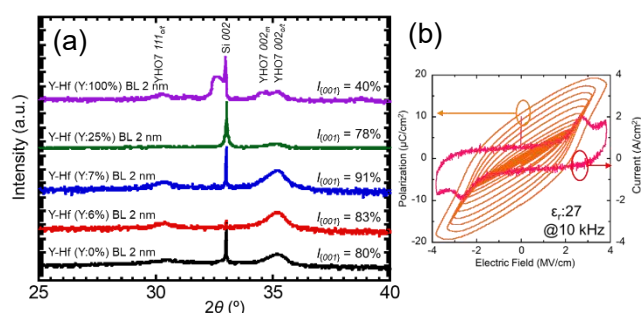


Fig. 1. XRD $2\theta/\omega$ patterns for 350-nm-thick YHO7 films on Si(001) substrates with Y-Hf buffer layer (BL) (Y: 0, 6, 7, 25, 100% BL). (b) P - E hysteresis loops measured at 10 kHz for 350 nm-thick YHO7 film with Hf-Y buffer layer (Y: 7% BL).

配向制御した(100)配向希土類元素ドーパエピタキシャル HfO₂ 薄膜の合成と評価 Growth of orientation-controlled (100)-oriented rare-earth-doped epitaxial HfO₂ thin films

東京科学大¹, TDK 株式会社² ○(M2) 土屋 裕太郎¹, 胡 雨弦¹, 岡本 一輝¹, 山岡 和希子²
加賀谷 康永², 井上 ゆか梨², 舟窪 浩¹

Science Tokyo¹, TDK corporation.², ○Yutaro Tsuchiya¹, Yuxian Hu¹, Kazuki Okamoto¹
Wakiko Yamaoka², Yasunaga Kagaya², Yukari Inoue², Hiroshi Funakubo¹
E-mail: tsuchiya.y.2605@m.isct.ac.jp

【背景】HfO₂ 基強誘電体は自発分極等の最も基礎的な強誘電特性が明らかになっていない問題を抱えている^[1]。自発分極値を実験的に確認するには、分極軸配向したエピタキシャル膜の作製が不可欠である。その第一歩として、まず分極軸を含む短軸を面外配向[(010)/(001)配向]させた膜の作製が必要になる。我々が行った(Hf_{0.93}Y_{0.07})O₂膜についての研究では、面内の長軸の格子を下層と格子整合させることで、面外方向に短軸を配向させることが明らかになった(Fig. 1 参照)^[2]。この結果を踏まえると、(100)YSZ を基板として用いる場合、(Hf_{0.93}Y_{0.07})O₂膜より長軸の格子定数が小さい場合は面外方向に短軸配向膜[(100)配向]が、逆に大きい場合は長軸配向[(010)/(001)配向]が得られることが期待できる。本研究では、イオン半径が異なり、格子定数の異なる膜の作製が期待できる種々のランタノイドをドーパした強誘電体 HfO₂ 膜を用いて、配向制御を試みた。

【実験方法】希土類元素を 6-8 mol% ドープした膜厚約 25 nm の HfO₂ 膜を、(100)YSZ 基板にパルスレーザー堆積法を用いて 700 °C で成膜した。結晶構造評価は X 線回折測定(XRD)で行った。

【実験結果】Fig.2(a)に XRD ω -2 θ の結果を示す。ドーパするイオンの半径が増加すると、(100)YSZ 上の HfO₂ 薄膜は短軸 (010) / (001) から長軸 (100) 配向へと変化する。Fig.2(b)には La、Y および Tm をドーパした膜の直方晶相の(220)面付近の XRD 逆格子マッピング測定結果を示す。イオン半径が大きくなると面外方向の配向が、短軸から長軸へと変化していることが確認できる。さらに、短軸配向膜において 2 つのスポットが確認され、面内方向に 90° 回転したドメインの存在が確認された。この結果から、コンセプト通り、配向制御が可能であることが明らかになった。

【参考文献】[1] I. Fina et al., *ACS Appl. Electron. Material*, **3**, 1530-1549(2021).

[2] Y. Maekawa et al., *ACS Appl. Electron. Material*, **6**, 5525-5535(2024).

【謝辞】本研究の一部は、科研費(23K13364, 24H00375, 25K17637)および文部科学省の次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業(JPJ011438)およびデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト事業(JPMXP1122683430)、JST 先端国際共同研究推進事業(ASPIRE)(JPMJAP2312)の支援を受けたものです。

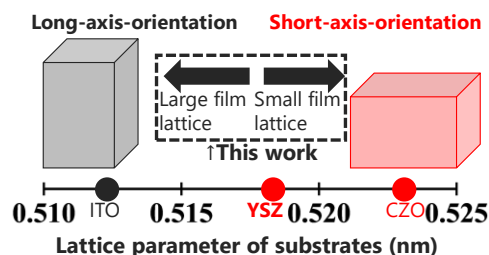


Fig. 1 The out-of-plane orientation of (Hf_{0.93}Y_{0.07})O₂ films as a function of the lattice parameter of underlying layer from Ref. [2]. The dashed box indicates the conceptual focus of this study.

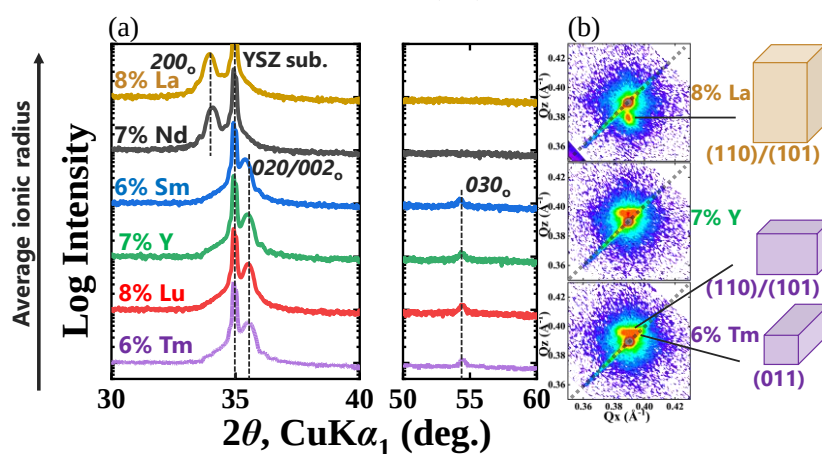


Fig. 2 (a) XRD ω -2 θ patterns of $x\text{LnO}_{1.5}-(1-x)\text{HfO}_2$ thin films and (b) XRD Reciprocal space maps for La-, Y-, and Tm-doped HfO₂ thin films grown on (100)YSZ substrates.

電圧サイクリングに伴う Al:HfO₂ 薄膜の化学結合状態の変化

Changes in the chemical states of Al-doped HfO₂ thin films induced by electric field cycling

○三船 智哉¹, 谷村 英昭^{1,2}, 植野 雄守², 谷 勇佑², 藤沢 浩訓¹, 中嶋 誠二¹,
大坂 藍¹, 高木 康多³, 保井 晃³, 唐 佳藝³, 加藤 慎一², 三河 巧²
兵庫県立大学¹ 株式会社 SCREEN セミコンダクターソリューションズ²
公益財団法人 高輝度光科学研究センター³
○T. Mifune¹, H. Tanimura^{1,2}, Y. Ueno², Y. Tani², H. Fujisawa¹, S. Nakashima¹,
Ai I. Osaka¹, Y. Takagi³, A. Yasui³, J. Tang³, S. Kato², and T. Mikawa²
University of Hyogo¹, SCREEN Semiconductor Solutions Co., Ltd.²,
Japan Synchrotron Radiation Research Institute³
E-mail: ei24i023@guh.u-hyogo.ac.jp

【序論】我々はフラッシュランプアニール(FLA)が直方晶の形成を促進し、分極値を向上させるなど、Al:HfO₂(HAO)薄膜の結晶化に適した熱処理法であることを示した^{1,2)}。ミリ秒オーダーの FLA では、化学結合状態や酸素空孔分布が、一般的な Rapid Thermal Annealing(RTA)による結晶化とは異なる可能性がある。本研究では、角度分解硬 X 線光電子分光法 (AR-HAXPES)を用いて、HAO 中の深さ方向の化学結合状態を評価した。さらに、電界サイクリングが化学結合状態に与える影響についても検討した。

【実験】Si 基板上に TiN/HAO/TiN キャパシタを作製した。その後、窒素雰囲気下、予熱温度は 400°C、ピーク温度は 1000°C、加熱時間は 5 ms の条件で FLA により HAO を結晶化させた。HAO 薄膜は ALD 法により 10 nm 成膜し、Al 組成比(=Al/(Al+Hf))は 2 at%である。三角波 (10 kHz, ±5 V) により 10⁰~10⁶ 回の電気ストレスを与えた後に、SPring-8 BL09XU において AR-HAXPES による化学結合状態測定を行った。エネルギー 7.94 keV の入射光を用いて、光電子放出角(Take-off Angle, TOA) 25~60°の範囲で、O 1s, Hf 3d, Hf 4f, Ti 2p のスペクトルを得た。

【結果と考察】Fig. 1 に、Hf4f ピークの積分強度のうち、酸素欠損を含むサブオキサイド(HfO_x)が占める割合を電界サイクル数に対して示した。HfO_xの割合は FLA 直後の 10⁰ 回が相対的に高く、10³ 回にかけて減少後、10⁵ 回以降に増加した。10³ 回にかけての減少は、電界サイクリングにより HAO 中の酸素が再分布したことに、10⁵ 回以降の HfO_x の増加は電界サイクリングによる酸素欠損の増加を示唆する。また TOA=25°では、上部 TiN/HAO 界面の情報を多く含んでいることを考慮すると、上部電極界面には酸素欠陥が多数存在することが示唆される。当日は電界サイクリングに伴う化学結合状態の変化について議論する。

【参考文献】

- [1] H. Tanimura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **63** (2024) 09SP10.
[2] H. Tanimura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **64** (2025) 01SP05.

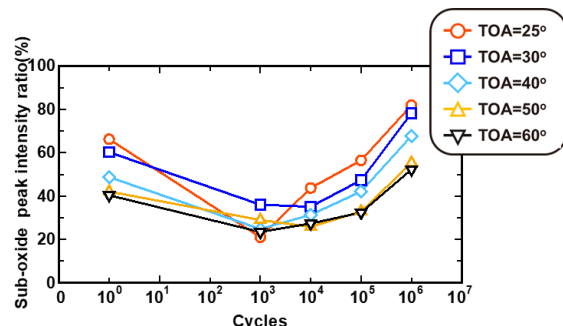


Fig.1 Peak intensity ratio of HfO_x as a function of electric field cycles (TOA = 25~60°).

マルチショット・フラッシュランプアニールによる Al:HfO₂ 薄膜の分極特性向上 Enhancement of Polarization Properties of Al:HfO₂ Thin Films through Multi-Shot Flash Lamp Annealing

○谷 勇佑¹, 植野 雄守¹, 谷村 英昭^{1,2}, 三船 智哉², 藤沢 浩訓²,

中嶋 誠二², 大坂 藍², 加藤 慎一¹, 三河 巧¹

SCREEN セミコンダクターソリューションズ¹, 兵庫県立大学²

○Y. Tani¹, Y. Ueno¹, H. Tanimura^{1,2}, T. Mifune², H. Fujisawa², S. Nakashima², A. I. Osaka², S. Kato¹, and T. Mikawa¹

SCREEN Semiconductor Solutions¹, University of Hyogo²

E-mail: yu.tani@screen.co.jp

【背景】強誘電性 HfO₂ 薄膜の分極特性は、結晶化の熱処理手法およびその条件に強く依存する^[1]。我々はこれまでに、ミリ秒加熱を特徴とするフラッシュランプアニール(FLA)を用いることにより、分極特性の改善を報告している^[2]。本研究では、更なる改善を目的として、マルチショット FLA(繰り返しの FLA)処理を実施しその効果を評価した。

【実験】Si 基板上に、TiN /Al:HfO₂ (HAO)/TiN の MFM キャパシタを作製した。HAO は ALD にて成膜し、膜厚は 10 nm、Al 組成比(= Al/(Hf+Al))は 2 at% である。400 °C に予熱したキャパシタに対し、900 °C、5 ms の FLA 処理を繰り返し行った。その後、分極特性および結晶性を評価した。

【結果】Fig. 1 に、FLA 処理を 1 回および 2 回行った HAO 薄膜の分極特性を示す。FLA の処理回数によらず、強誘電性を示すヒステリシスループが確認できる。残留分極値(2P_r)は、2 回処理の方が 16% 高く、値はそれぞれ 1 回処理で 24.5 μC/cm²、2 回処理で 28.3 μC/cm² である。また、エンデュランス特性を評価した結果、耐久性に明確に違いは見られなかった。以上より、マルチショット FLA 処理により、分極特性が向上することが分かった。Fig. 2 に、FLA 処理前後の XRD パターンを示す。FLA 処理により、31° 付近にピークが確認され、正方晶(t-)相および直方晶(o-)相を有する HAO の形成が確認できた。一方、ピーク強度に対する明確な処理回数依存性は認められない。当日は分極特性向上の要因について議論する。

【まとめ】マルチショット FLA 処理により、分極特性の改善を実証した。本処理手法は、高性能な強誘電体デ

バイスの実現に有効な手法であると考えている。

【参考文献】[1] B. Ku et. al., Appl. Surf. Science **601**, 154039 (2022). [2] H. Tanimura et al., Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 09SP10 (2024).

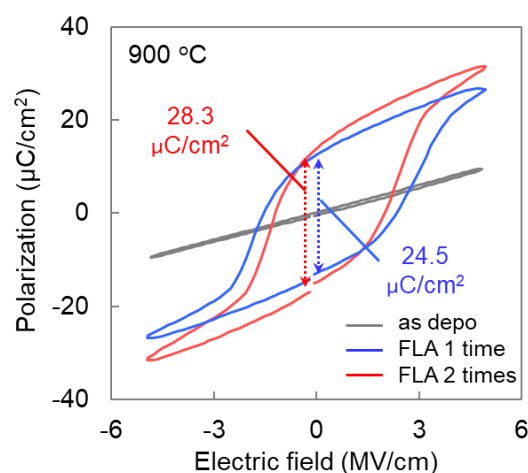


Fig. 1 Polarization properties after electrical stress of 10⁴ cycles.

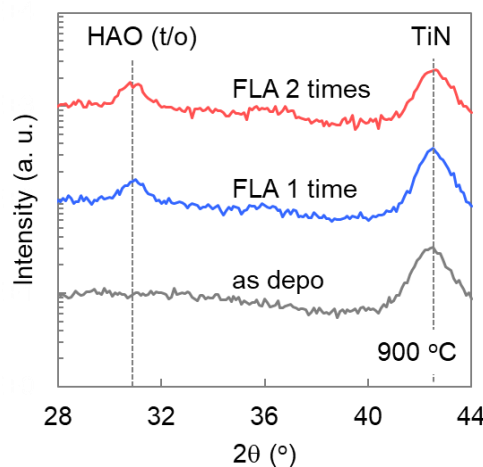


Fig. 2 XRD spectra of capacitors treated by multiple FLA.

HfO₂系強誘電体キャパシタの書き換え耐久性の電界依存

Electric field dependence of cycle endurance in HfO₂-based ferroelectric capacitors

°(D3)糸矢 祐喜¹, 更屋 拓哉¹, 平本 俊郎¹, 小林 正治^{1,2}
東大生産研¹, 東大 d.lab²

The Univ. Tokyo, °Yuki Itoya, Takuya Saraya, Toshiro Hiramoto, and Masaharu Kobayashi
E-mail: itoya@nano.iis.u-tokyo.ac.jp

背景と目的: HfO₂系強誘電体(FE-HfO₂)は、CMOSの微細化プロセスとの整合性やナノ薄膜での高い強誘電特性から高密度かつ低消費電力なメモリ材料として期待されている。FE-HfO₂は実用化に向け書き換えの耐久性に課題があり、耐久性向上に向け多くの研究が行われている[1]。強誘電体キャパシタの耐久性は絶縁破壊に制限される[2]。薄膜の絶縁破壊はいくつかのモデルが提案されている[3,4]。強誘電体も同様のモデルが用いられてきたが、分極反転特有の絶縁破壊進行のメカニズムも提案されており新たな耐久性モデルの構築が求められている[5]。そこで我々は、FE-HfO₂キャパシタのサイクル耐久性の電界依存について電極サイズ、膜厚、動作温度の影響を調べ耐久性モデルの構築を目指した。

実験条件: サンプルは強誘電体キャパシタで、Si基板にTiN、SiO₂を成膜し、SiO₂にコンタクトホールエッチングすることで下部電極を形成した。原子層堆積でHf_{0.5}Zr_{0.5}O₂(HZO)を成膜し上部電極にはTiNを用いた。結晶化アニールは500℃、30sで行った。HZO膜厚が7 nm、7.9 nm、8.5 nm、11.3 nmのサンプルを作製し、チップ内には電極サイズの異なるキャパシタを複数作製した。強誘電測定は3 V 10 kHzの三角波電圧で行い、ストレス電圧も同様の10 kHzの三角波電圧を印加した。

結果と考察: 作製したキャパシタのWake-up後の電荷-電圧特性から、膜厚が異なるサンプルでも同程度のE_cを確認した。7.9 nmのサンプルの書き換え耐久性の電界依存を図1に示す。これより、低電界側と高電界側において電界依存が大きいことがわかる。高電界側ではストレス電圧と同一の電圧で測定を行い、およそ5.0 MV/cm以上からストレス印加時のリーク電流が増加していることが示された。このことからリーク電流による絶縁破壊の加速が高電界側の電界依存の増加を引き起こしていると考えられる。

低電界側の電界依存の傾きや低電界と中電界の変曲点となる電界を解析するため、電極サイズ、HZO膜厚(図2)、動作温度(図3)を変えて測定を行った。電極サイズでは耐久性、動作温度ではE_cと耐久性が変化したけどどちらも電界依存の傾きや変曲点は変化しなかった。一方、膜厚が厚いほど傾きは緩やかで変曲点はより低電界側にシフトした。以上から書き換え耐久性の電界依存の傾きや変曲点を決める要素は膜厚依存する要素であると推測される。

まとめ: 本研究ではFE-HfO₂キャパシタのサイクル耐久性の電界依存は直線ではなくリーク電流や電界応答特性の変化により変化することが示された。この成果は強誘電体の絶縁破壊メカニズムの解明に貢献する。

References: [1] T. Schenk et al., ACS Appl. Mater. Interfaces 6, 19744 (2014). [2] Y. K. Chang et al., 2022 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pp. 3A.1-1-3A.1-5, (2022). [3] J. W. McPherson et al., J. Appl. Phys. 84, 3, 1513-1523 (1998). [4] Ernest Y. Wu et al., Microelectronics Reliability, 1809-1834, (2005). [5] K. Karda et al., IEEE Electron Device Letters, 37, 6, 801-804, (2016). [6] P. J. Liao et al., 2021 Symposium on VLSI Technology, pp. 1-2, (2021).

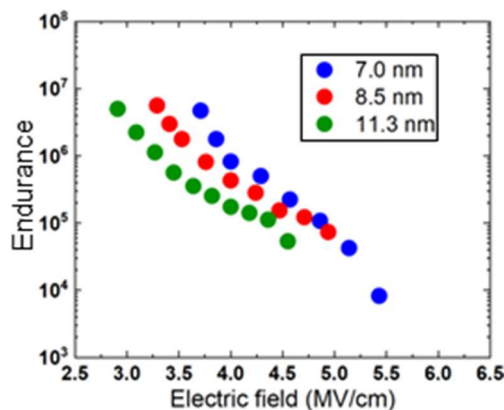


Fig.2: Thickness dependence

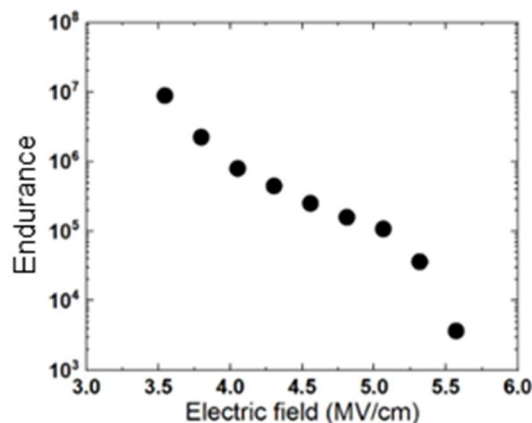


Fig.1: Electric field dependence of endurance.

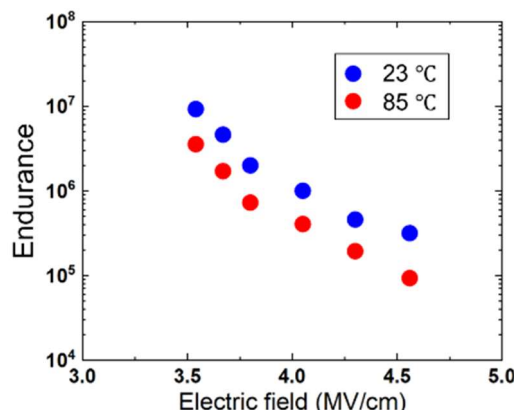


Fig.3: Temperature dependence

極薄膜強誘電体 $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ における wake-up 物理機構モデルのシミュレーション検証

Simulation-based Verification of the Physical Mechanism Model for Wake-up Effect in Ultrathin Ferroelectric $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$

東大院工¹, 帝京大先端総研² [○]伊藤 広恭¹, 竹中 充¹, 高木 信一^{1,2},
トープラサートポン カシディット¹

Univ. Tokyo¹, ACRO², [○]K. Ito¹, M. Takenaka¹, S. Takagi^{1,2}, K. Toprasertpong¹

E-mail: ito@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【背景】 HfO_2 系強誘電体は、スケーラビリティや CMOS プロセスとの親和性に優れた材料であり、次世代不揮発性メモリをはじめとする集積回路への応用が期待されている[1]。しかし、膜厚が 6 nm 以下となる極薄膜領域では、初期状態において反強誘電的な性質を示し、電界サイクリングによって安定した強誘電性が得られる「wake-up 効果」が顕著に表れる。この現象の物理機構としては、結晶相転移やドメインの de-pinning などが有力視されているが[2]、その詳細な理解には未だ至っていない。我々はこれまでに、膜厚 4 nm の強誘電 $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ (以下 HZO) における wake-up 挙動の詳細な評価を行い、酸素移動を組み込んだ物理モデルを提案してきた [3]。本研究では、このモデルの妥当性を検証するため、シミュレーションにより実験結果の再現性を確認した。

【シミュレーション手法】提案した wake-up モデルのメカニズムは以下の通りである[3]：

1. 初期状態 (pristine 状態) では、酸素空孔がドメインを pinning し、強誘電性が抑制されている。
 2. 電界サイクリングの過程で、HZO 膜中の酸素が移動する。
 3. 酸素の移動により空孔が消滅し、ドメインの de-pinning が生じ、強誘電性が発現する。
- このモデルの検証のため、以下の手順でシミュレーションを実施した (Fig.1)。

- HZO 膜を厚さ方向に一次元配列でモデル化。
 - 配列内に酸素を所定の分布に基づいて初期配置。
 - 各酸素の移動距離は dispersive transport モデル[4][5]に基づく分布関数から決定。
 - 電界 1 サイクルごとに酸素が通過したセルに対して、所定の確率で wake-up が発生するかを判定。
 - 上記の処理を所定のサイクル数繰り返し、wake-up が生じたセル割合を $2P_r$ として出力。
- 酸素の移動距離に関しては、Sibatov ら [6]に記載された dispersive transport の分布関数 $n(x, t)$ を使用した：

$$n(x, t) = \frac{Nt}{\alpha K} \left(\frac{x}{K} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} g^{(a)} \left(t \left(\frac{x}{K} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right)$$

ここで、

- x : 位置
- t : 時間
- a : 分布の指数 ($0 < a < 1$) であり、dispersive 性の度合いを表す。
- N, K : 定数

この関数に従い、モンテカルロ法で酸素の移動距離を乱数生成し、各サイクルの移動を再現した。

【結果・考察】Fig.2 に、実測データとシミュレーション結果を比較した結果を示す。同一の電界サイクリング時間条件下で得られる $2P_r$ ピークを高い精度で再現することができた。このことは、酸素移動を考慮した本モデルが、実際の wake-up 現象を適切に反映していることを示している。特に、サイクル数に対する $2P_r$ の増加傾向や、電界サイクリング時間条件によるピーク周波数のシフトといった定性的特徴が一致しており、モデルの有効性が支持された。

【結論】本研究では、膜厚 4 nm の HZO 強誘電膜における wake-up 効果の周波数依存性を、酸素移動に基づく物理モデルを用いて再現した。シミュレーション結果は、実測データと良好に一致しており、提案モデルの妥当性を支持するものである。本モデルは、今後のデバイス設計において wake-up 制御や信頼性評価への応用が期待される。

【謝辞】本研究は、JST-CREST (JPMJCR20C3)、JSPS 科研費 (23K20951)、TSMC 受託研究の支援を受けて実施された。

【参考文献】[1] J. Müller, et al., *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 4, N30 (2015). [2] M. Pešić, et al., *Adv. Funct. Mater.*, 26, 4601 (2016). [3] 伊藤広恭ほか、応用物理学会春季学術講演会、14p-K503-15 (2025). [4] O. L. Curtis, Jr., et al., *J. Appl. Phys.* 48, 3819 (1977). [5] H. Scher, et al., *Phys. Today* 44, 26 (1991). [6] R. T. Sibatov, et al., *Physica-Uspekhi*, 52, 1019-1043 (2009).

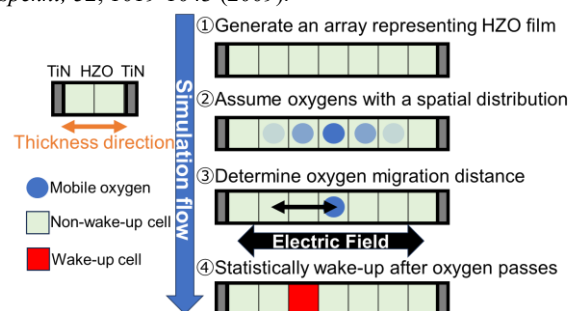


Fig. 1 Overview of the simulation flow.

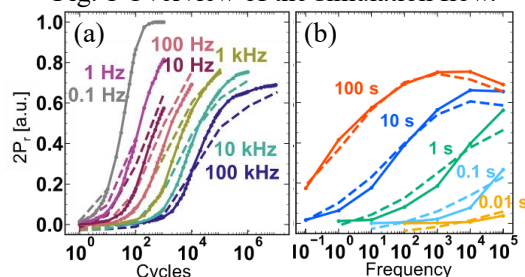


Fig. 2 Simulation results compared with measured data. (a) $2P_r$ -cycles and (b) $2P_r$ -frequency characteristics.

HfO₂系強誘電体 MFM キャパシタにおける 分極特性制御が物理リザーバー計算性能に及ぼす影響

Impact of polarization switching control on physical reservoir computing performance
in a HfO₂-based ferroelectric MFM capacitor

阪公大工¹, 東大工² ○井上 颯太¹, 請関 優¹, 藤村 紀文¹

Kasidit Toprasertpong², 高木信一², 吉村 武¹

Osaka Metro. Univ.¹, The Univ. of Tokyo², ○S. Inoue¹, Y. Ukezeki¹, N. Fujimura¹

K. Toprasertpong², S. Takagi², T. Yoshimura¹

E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

【はじめに】 生成 AI をはじめとする高負荷な情報処理応用の進展に伴い、省電力かつ高効率な脳型コンピュータの実現が強く求められている。強誘電体は記憶と演算の一体化を可能にする有望なハードウェア材料とされており、近年では物理リザーバー計算(PRC)への応用が注目されている[1]。PRC とは、物理デバイスの動的応答を利用して時系列データの分類や予測を行う手法である[2]。この応用には入力履歴に応じて多様な状態を形成できるアナログ記憶特性が求められ、強誘電体においては分極状態がアナログ的に変化することが重要となる。前回はアナログ記憶特性と印加電圧の関係を調べ、最適な印加電圧条件下において分極が本質的に双安定的であることに起因し、その特性の向上は限定的であることを明らかにした[3]。そこで今回は、コンデンサを直列接続して緩やかな分極反転を生じさせることで[4]、PRC の学習性能の向上を試みた。

【実験方法と結果】 TiN/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ (6.3 nm)/TiN 構造の金属-強誘電体-金属構造(MFM)キャパシタを実験に用いた[5]。MFM キャパシタ(55pF)にコンデンサ(90pF)を直列接続した際の分極-電圧(P-V 特性)を Fig.1 に示す。比較のため MFM キャパシタのみの結果も点線で示している。コンデンサを直列接続することにより、急峻な分極反転が緩和されていることがわかる。

PRC の学習性能評価のため、'1','0' の 250 個のランダムビットを三角波電圧パルス(3 V, 10 ms)の正と負に対応付けて MFM キャパシタに入力信号として印加した。印加後の直列接続されたコンデンサを経由して流れる電流を得た。1 パルスあたり 20 点取得した電流値を仮想ノード状態として、それらに重みづけを行うことで出力信号を生成した。この重みの値を線形回帰により学習させ、1-3 ステップ前($T_{\text{delay}}=1,2,3$)の入力信号を推論させた。その予測と目標との誤差については、各ステップにおける相関関係 R^2 を用いて評価した。MFM キャパシタ単体と MFM キャパシタにコンデンサを直列接続した場合の各 T_{delay} に対する R^2 の結果を Fig. 2 に示す。コンデンサを接続した場合、 $T_{\text{delay}}=2$ のとき相関係数が 0.93 となり高い相関が得られていることがわかる。これはコンデンサによる分圧制御によって分極反転の影響が緩やかになったことに加え、分極の保持特性が低下したことで分極状態が入力履歴に応じて多様な状態を形成できたためと考える。講演では P-V 特性および電流応答の詳細な評価を通し、アナログ記憶特性に寄与する要素について議論する。

【謝辞】 本研究は JST・CREST(JPMJCR20C3)および ASPIRE(JPMJAP2312)の支援を受けたものである。

【参考文献】

- [1] K. Toprasertpong et al, Commun. Eng. 1, 21 (2022).
- [2] G. Tanaka et al, Neural Networks. 115, 100 (2019).
- [3] 井上 他 第 72 回応用物理学会春季学術講演会 14p-K503-16.
- [4] S.L. Miller et al, J. Appl. Phys. 68.12, 6463-6471 (1990).
- [5] K. Toprasertpong et al, ACS Appl. Mater. Interfaces. 14,51137-51148 (2022).

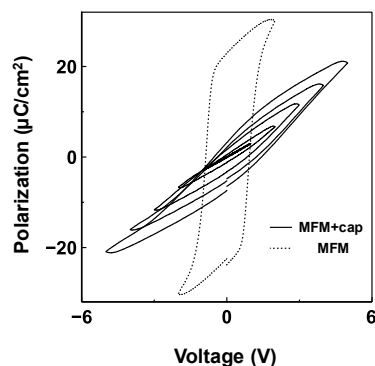


Fig.1 P-V characteristics with
MFM+cap and MFM

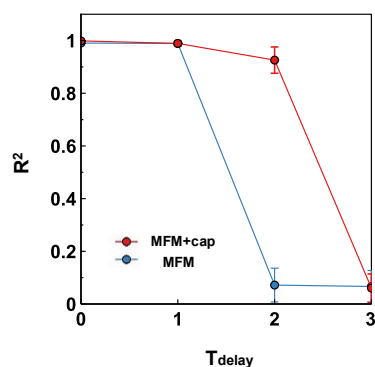


Fig.2 R^2 values of STM task as a
function of T_{delay} , which were
obtained by RC systems with
MFM+cap and MFM

強誘電体ゲート FET における分極特性が 物理リザーバー計算性能に及ぼす影響

Impact of polarization characteristics on computational performance of ferroelectric-gate FET-based physical reservoir computing

阪公大工¹, 兵庫県大工², 東大工³ ○請関 優¹, 井上 颯太¹, 藤村 紀文¹,
横松 得滋², 神田健介², 前中 一介², Kasidit Toprasertpong³, 高木信一³, 吉村 武¹

Osaka Metro. Univ.¹, University of Hyogo², The Univ. of Tokyo³, °Y. Ukezeki¹, S. Inoue¹,
N. Fujimura¹, T. Yokomatsu², K. Kanda², K. Maenaka², K. Toprasertpong³, S. Takagi³, T. Yoshimura¹
E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

【はじめに】人工知能の処理に要求される電力の増大を受け、より消費電力の少ない脳型計算が注目されている。特に物理リザーバー計算(PRC)は、物理系の時空間的な非線形性を計算に活用し、低学習コスト、低動作電力で実装可能性が高いとされる [1]。先行研究では、リザーバーと称されるこの物理系として、金属/強誘電体/絶縁体/半導体 (MFIS) 構造の強誘電体ゲート電界効果トランジスタ (FeFET) が用いられてきた。分極の履歴による記憶特性、非線形応答を利用することで、高い学習性能が実証されている [2]。本研究では、強誘電体の分極挙動と PRC における学習性能との関係の解明を目的としている。そのため、強誘電体薄膜への飽和領域までの電圧印加を可能にし、強誘電体ドメインの影響を排除して単純な分極反転挙動による学習性能評価を実現できる MFIS 構造の FeFET を採用した。前回は、最適動作電圧が、抗電圧以上かつ飽和電圧以下にあることを示したが [3]、FeFET のオフ領域での微小な電流の測定が困難であり、記憶性能の低下を招いた。本発表では、FeFET への入力に対し、オフセット電圧と呼ばれるバイアスを印加し、オン状態を誘導することによる学習性能および記憶特性への影響を調べた。

【実験方法と結果】ゲート絶縁膜の膜厚が約 10nm、チャネル幅、長さがそれぞれ約 50, 20 μm の n-MOSFET のゲート電極に、膜厚が約 10nm の $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ (HZO) を製膜した強誘電体キャパシタ [4] を直列接続することで FeFET を構成した。ゲート電圧の大半が HZO 薄膜に印加されるように素子間の容量比を調整し、キャパシタの上部電極と MOSFET のゲート電極の面積比は、1:13 とした。この FeFET へ振幅 5V、時間幅 5ms の二進数を表す正負がランダムな 990 個の三角波パルスを入力し、1 パルスあたり 10 点取得したドレインソース間電流(I_{DS})を用いて 10×990 のリザーバーの状態を表す行列 x を生成した。この際、0-3V までのオフセット電圧(V_{ctr})について、それぞれ I_{DS} を測定した。図 1 は、 $V_{\text{ctr}} = 0, 1, 2.5 \text{ V}$ における I_{DS} の波形を示しており、 V_{ctr} の増加に伴い、負パルスに対応する電流が明瞭となっている。 x について、線形学習器により 1-3 ステップ前の入力信号を推論させた。その予測と目標との誤差については、各ステップにおける相関係数の 2 乗和を表す、記憶容量(MC)という指標により評価した。結果的に、MC は V_{ctr} の増加に伴い、およそ 1.3 から 1.7 まで増加した。これは、MFIS 構造の FeFET が不完全ながらも 1-2 ステップ前の記憶を内包していることを示しており、オフセット電圧が予想通り、記憶容量の増強に作用していることが明らかとなった。講演では、非対称な電圧印加時における強誘電体の分極反転挙動も含めて報告する予定である。

【謝辞】本研究は、JST・CREST(JPMJCR20C3)および ASPIRE(JPMJAP2312)の支援を受けたものである。

【参考文献】[1] G. Tanaka et al. *Neural Networks* **115**, 100 (2019).

[2] K. Toprasertpong et al., *Comm. Eng.* **1**, 21 (2022).

[3] 請関 他 第 72 回応用物理学会春季学術講演会 14p-K503-17.

[4] K. Toprasertpong et al., *Appl. Phys. Lett.* **116**, 242903 (2020).

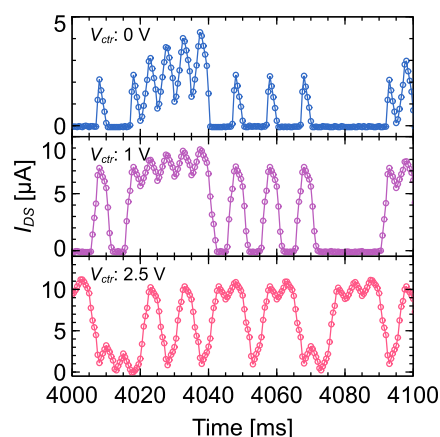


Fig. 1 I_{DS} waveforms of FeFET for V_{ctr} of 0, 1, 2.5 V.

Investigation of Degradation in FeFETs Using Quasi-Static Split C-V Techniques: Significant Trap Generation under Cycling Stress

[○] Xuanhedong Gao, Zuocheng Cai, Zhenghong Liu, Zhao Jin, Xueyang Han, Yan-kui Liang, Yutong Chen, Eishin Nako, Shin-Yi Min, Mitsuru Takenaka, Shinichi Takagi, and Kasidit Toprasertpong
The University of Tokyo, Faculty of Engineering,
E-mail: gaoxhd@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction: Hafnia-based ferroelectric field-effect transistors (FeFETs) are compatible with conventional CMOS processes and are regarded as promising candidates for non-volatile memory applications owing to their fast access speed and scalability [1,2]. However, silicon-based FeFETs suffer from poor endurance, primarily due to interface degradation and trap state generation [3]. Recently, FeFETs employing oxide-semiconductor (OS) channels have demonstrated improved endurance characteristics and back-end-of-line (BEOL) compatibility toward monolithic 3D integration [4,5]. Although many studies have reported robust memory windows (MW) and stable performance in OS FeFETs, the underlying mechanisms determining the difference in the endurance behaviors of FeFETs with Si and OS channels still need further investigation. Quasi-static split C-V (QSCV), also known as single-pulse charge pumping, has been widely adopted as a rapid characterization for trap state in various MOSFETs [6-10]. In this study, QSCV techniques were applied to investigate endurance behaviors and trap generation in Si and OS FeFETs.

2. Experiment: The device fabrication began with sputtered TiN gate formation, followed by thermal ALD of a 10 nm HZO ferroelectric layer. Subsequently, a 1 nm Al₂O₃ capping layer was deposited via ALD and then annealed at 400 °C to crystallize the HZO. Following this, a 4 nm In₂O₃-SnO₂ (ITO) channel layer was deposited by sputtering. Source/drain electrodes were formed by sputtering a 30 nm Ni / 20 nm Au stack. Fig. 1(a) illustrates I-V and P-V characteristics of MFIM representative capacitors on the FeFET sample and back-gate structure of fabricated ITO FeFETs was shown in subset. Fig. 1(b) shows DC I-V characteristics of ITO FeFET and a distinct memory window about 2.33V was observed. Fig. 2(a) illustrates the pulse scheme of voltage sequence for stress cycling and corresponding MW during cycling test. MW of Si FeFET is degraded to 0 V after around 10⁵ cycles of bipolar stress, whereas MW of ITO FeFET is comparatively stable under severer stress.

3. Results: To evaluate FeFET degradation, trap densities need to be extracted before polarization switching (pristine state) and after cycling stress (degraded state). As shown Fig. 2(b), QSCV measurements were performed with varying rising times, and the net charge was obtained by integrating I_{SD} from t₀ to t₃+(10μs). Fig. 3(a) illustrates the charge dynamics in OS FET during QSCV measurement. When V_G rapidly increases and off-state FET turns on, neutral acceptor-like states below the Fermi level capture electrons and become negatively charged, which causes a peak in corresponding transient S/D current, in addition to channel charging current. Then, following by decreasing V_G, the Fermi level of on-state MOSFET become lower and the acceptor-like states above the Fermi level emit electrons slowly, which can be observed in the broad tail of current during V_G falling. Fig. 3 (b) shows extracted N_{trap} during cycling test. The N_{trap} of ITO and Si FeFETs in the pristine state are comparably low, while after ferroelectric sweep N_{trap} of Si FeFET increases to 10¹³ cm⁻², indicating HZO/IL interface is severely degraded due to polarization-induced electrons trapping/recombination [3]. On the other hand, N_{trap} of ITO FeFET is comparably stable and does not evidently change after cycling test.

4. Conclusion: We have experimentally explored the potential to utilize QS split C-V as a powerful tool to examine generation of trap density before/after degradation of MW during cycling test. We examined the difference in trap generation and device operation of FeFETs between Si and OS channels that Si FeFETs undergo significant

degradation after ferroelectric switching, accompanied by considerable trap generation, while OS FeFETs exhibit better immunity.

Acknowledgments: This work was supported in part by Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) and by the Advanced Research Infrastructure for Materials and Nanotechnology (ARIM) of MEXT under Grant JPMXP1224UT1077. We thank Chia-Tsong Chen for kind discussions.

Reference: [1] T. Schenk, et al., Rep. Prog. Phys., 83, 8, (2020). [2] J. Müller et al., IEDM, 10.8.1, (2013). [3] K. Toprasertpong et al., Appl. Phys. A 128, 1114, (2022). [4] Y. -K. Liang et al., IEEE TED, 5788, (2024). [5] F. Mo et al., Symp. on VLSI Tech., 42, (2019). [6] L. Lin et al., IEEE TED, 1490, (2011). [7] M. Hori et al., Appl. Phys. Lett. 105, 261602 (2014). [8] K. Taniguchi et al., Appl. Phys. Lett. 113, 133505 (2018). [9] M. -C. Nguyen et al., IEEE TED, 3786, (2018). [10] S. Alghamdi et al., IEEE TED, 444, (2020). [11] Z. Cai et al., Symp. on VLSI Tech., 1-2, (2023).

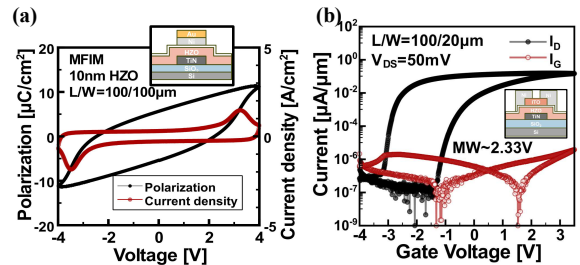


Fig. 1 (a) P-V and I-V curves of TiN/HZO/Al₂O₃/Ni/Au MFIM representative capacitors and (b) DC I-V characteristics of fabricated ITO FeFET. Ferroelectricity was confirmed.

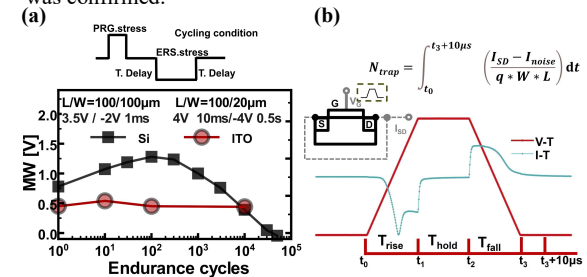


Fig. 2 (a) Endurance characteristics of ITO FeFET and Si FeFET under corresponding stress condition and (b) waveform and setup of QSCV in transient measurement. Details of Si FeFETs can be found in [11].

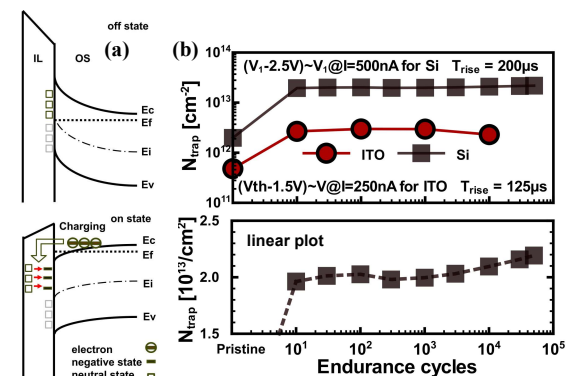


Fig. 3 (a) Schematic band diagram of OS FET with electron charging behaviors under voltage sweep and (b) extracted N_{trap} in the cycling test with log-scale and linear plots.

Imprint Behaviors of $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ Ferroelectric Capacitors: Charge/Trap-site Dynamics during Write and Wake-up Cycles

^o Zhenhong Liu¹, Zuocheng Cai¹, Mitsuru Takenaka¹, Shinichi Takagi², and Kasidit Toprasertpong¹
The University of Tokyo, Faculty of Engineering¹,
Teikyo University, Advanced Comprehensive Research Organization²
E-mail: liuzh@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction: The discovery of ferroelectricity in hafnia-based thin films has advanced non-volatile memory development due to their scalability and CMOS compatibility. [1] However, reliability issues remain critical, particularly imprint—a gradual shift in the P - E loop—causes retention loss and write failure. However, research groups employ varying methods for write pulses, coercive field extraction, and wake-up conditioning. [2-6] Since imprint's quantitative analysis is highly sensitive to these parameters, such inconsistency leads to difficulty comparing across studies. This work systematically investigates how voltage schemes influence the results and evaluates the underlying trap dynamics in the imprint.

2. Measurement: As depicted in Fig. 1(a), after several write cycles, a 10 kHz 3.5 MV/cm triangle wave is used for the initial state measurement, then a rectangular wave with duration time t_w is used for state write. After holding for t_h at $V = 0$ V, a similar triangle wave is used for the imprint state measurement. The imprint is evaluated by the difference in E_c between the initial and imprint states. This work focuses on the shift in the positive coercive field after negative write ($\Delta E_{c+}^{(-w)}$).

3. Results: As depicted in Figs. 1(b)(c), even without t_h , a clear shift of the P - V loop can be observed (blue cycle). This shift happened in the write step and is unrelated to the hold process. We defined it as a time-zero imprint $|\Delta_w E_{c+}^{(-w)}|$ to distinguish it from the time-dependent imprint related to t_h .

Then, it is worthwhile to investigate the influence of t_w on total imprint. As depicted in Fig. 2(a), longer t_w results in more serious total imprint, with a slower increase rate. To confirm the relationship between t_w and time-dependent imprint, $|\Delta_t E_{c+}^{(-w)}| = |\Delta E_{c+}^{(-w)}| - |\Delta_w E_{c+}^{(-w)}|$ is used to remove the time-zero imprint component $|\Delta_w E_{c+}^{(-w)}|$ and define the time-dependent imprint component $|\Delta_t E_{c+}^{(-w)}|$. A clever weakening of $|\Delta_t E_{c+}^{(-w)}|$ with the increase of t_w can be observed in Fig. 2(b).

Compared with the wake-up condition in Figs. 2(a)(b) (10^4 times), Figs. 2(c)(d) describes both time-zero and time-dependent imprints weaken after 10^7 cycles. Further analysis is necessary to understand their behavior.

4. Analysis: Previous studies have demonstrated that the imprint behavior is mainly contributed by charge injection induced by the interfacial electric field, leading to an asymmetric charge distribution within the device. [5] As depicted in Fig. 3(a), in the write process, the time-zero imprint is mainly determined by the local electric field caused by the externally applied voltage. During t_h , as depicted in Fig. 3(b), without the external bias, the interfacial field originates from the bound polarization charges in the FE layer and the screening charges at the electrodes, plays the leading role in the time-dependent imprint process. [5]

Meanwhile, after t_w , the accumulated charge partially fills trap states and screens the internal field. As a result, the charge injection during the t_h becomes more difficult, and the time-dependent component is reduced.

Finally, trap sites are redistributed during wake-up cycling, reducing their interface density. (Fig. 3(c)) This leads to a weaker injection charge-capturing target, suppressing time-dependent and time-zero imprint (Fig. 3(d)). [7]

5. Conclusion: The time-dependent and time-zero imprints are carefully studied by modulating the voltage schemes used for imprint measurement. The result shows that imprint behavior is highly related to the trap-site dynamics and charge redistribution. This work reveals the importance of proper voltage choice for accurate parallel comparison and imprint minimization.

Acknowledgments: This work was supported in part by Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) and by JSPS KAKENHI No. 23K20951.

Reference: [1] W. Banerjee, et al., Small. 18, 2107575 (2022) [2] P. Buragohain, et al., ACS Appl. Mater. Interfaces. 11, pp. 35115–35121. (2019) [3] I. A. Savichev, et al., IEEE Transactions on Electron Devices. 72(3), pp. 1104–1111. (2025) [4] P. Yuan, et al., Nano Res. 15, pp. 3667–3674. (2022) [5] Z. Liu, et al., SSDM. B-1-02, pp. 67–68. (2024) [6] T. Kim, et al., IEEE Transactions on Electron Devices. 71(11), pp. 6620–6626. (2024) [7] Z. Liu, et al., Appl. Phys. Lett. 125, 072904. (2024)

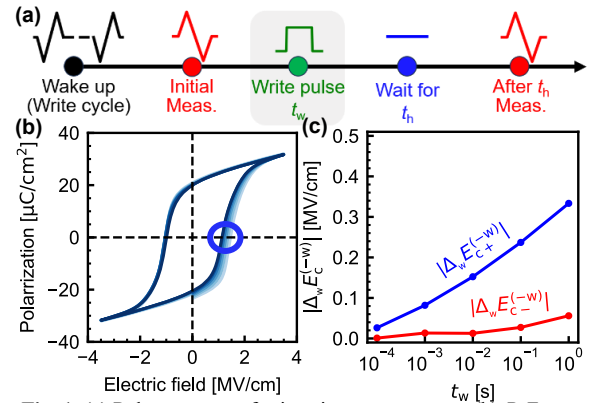


Fig. 1. (a) Pulse sequence for imprint measurement. (b) P - E curve after varying t_w , colors from dark to light represent 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , and 10^0 s following a negative write pulse. (c) Time-zero imprint, $|\Delta_w E_{c+}^{(-w)}|$ (blue line) and $|\Delta_w E_{c-}^{(-w)}|$ (red line) as a function of t_w while $t_h=0$ s.

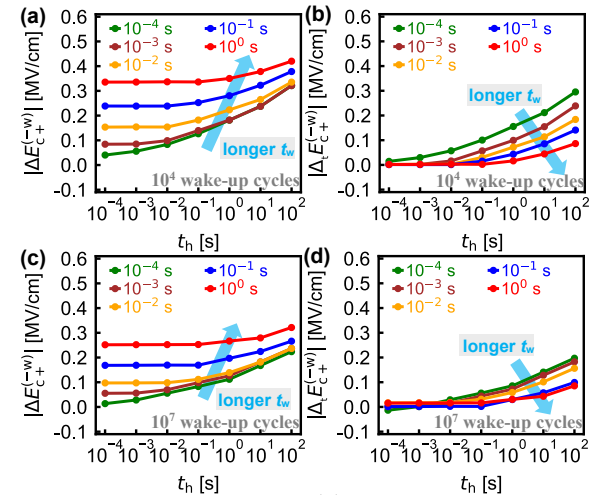


Fig. 2. (a)(c) Total imprint $|\Delta E_{c+}^{(-w)}|$ and (b)(d) time-dependent imprint $|\Delta_t E_{c+}^{(-w)}|$ as functions of t_h after different t_w (from 10^{-4} to 10^0 s) after (a)(b) 10^4 and (c)(d) 10^7 wake-up cycles, respectively.

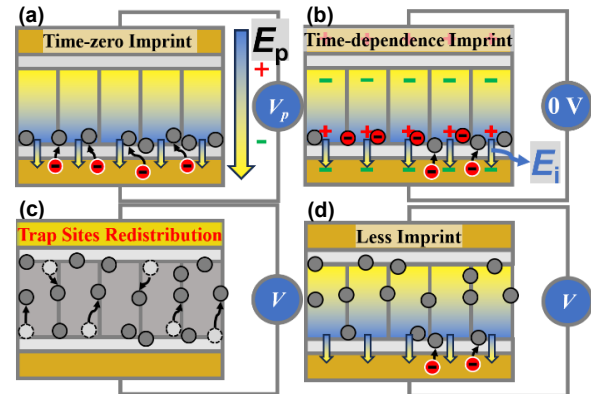


Fig. 3. To simplify, only negative charge behavior is illustrated. (a) During t_w , time-zero imprint is dominated by the local electric field from the externally applied voltage. (b) During t_h , the bound polarization charges and screening charges generate the interfacial field and cause time-dependent imprint. (c) Wake-up cycling leads to a more uniform trap-site distribution across the HZO layer. (d) The redistribution reduces the interface trap density, resulting in a weaker imprint.

Cycling induced imprint phenomenon at intermediate state used for multi-level operation in HfO₂-FeFET

°Viktoria Schlykow, Kunifumi Suzuki, Yoko Yoshimura, Hidesato Ishida, Kiwamu Sakuma, Kazuhiro Matsuo, Masumi Saitoh, and Reika Ichihara

Frontier Technology R&D Institute Kioxia Corporation, Yokohama, Japan
E-mail: viktoriadiana1.schlykow@kioxia.com

HfO₂-FeFET is a promising candidate for emerging memory, due to its high-speed/low-voltage operation and CMOS compatibility. Recently, excellent multi-level operation in HfO₂-based FeFET were demonstrated [1], utilizing intermediate states composed of mixed programmed and erased domains with various coercive voltage (V_c). However, imprint, which is a reliability issues specific to ferroelectrics, is still a challenge. Figure 1 (a) shows a possible scenario during multi-level operation, i.e. cycling between erased state and intermediate state, where high V_c erased domains (E) remain *fixed* even during cycling. These *fixed* domains could be affected by imprint, causing a change of the required operation voltage in the following full program operation. While imprint during retention is a well-known phenomenon, imprint during cycling has not been investigated in detail yet. In this study, to clarify imprint effect during cycling, the polarization reversal current in HfO₂-FeFET after cycling between erased state and intermediate state is analyzed. As shown in figure 1 (b), the asymmetric peak splitting in polarization reversal current between program and erase operation is observed, which is the evidence for cycling-induced imprint effect in each domain. As depicted in figure 2, only high V_c erased domains (dark grey) remain *fixed* and hence are affected by imprint. Therefore, the operation voltage of the following program (erase) shifts to positive along the right (left) side tail of the red dashed distribution, while the required operation voltage of the cycled low V_c programmed domains (light grey) is not changed, resulting in an asymmetric peak splitting. In fact, cycling induced imprint is more serious compared to imprint during retention (fig. 1(c)) and hence, has to be addressed to ensure reliable multi-level operation in FeFET. As shown in figure 3, we successfully demonstrated that cycling induced imprint can be avoided by performing full program/erase before programming the intermediate state.

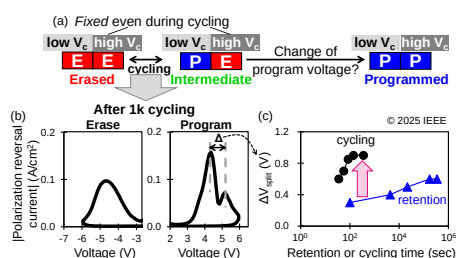


Fig. 1: (a) Possible scenario during multi-level operation. (b) Polarization reversal current- V_g characteristics after 1k cycling. (c) ΔV_{split} , indicator of imprint strength, caused by cycling and retention. [2].

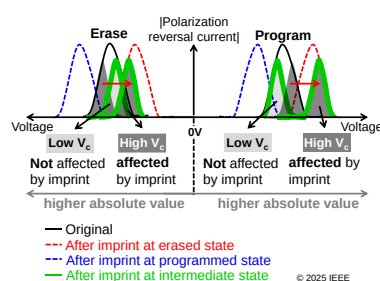


Fig. 2: Explanation for asymmetric peak splitting [2].

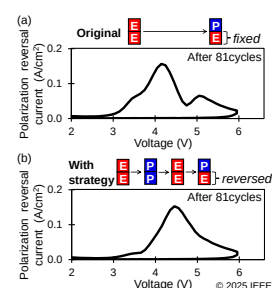


Fig. 3: Strategy for reliable multi-level operation [2].

[1] S. Yoon et al., VLSI, T7-2 (2023). [2] V. Schlykow et al. IEEE IRPS, p.1 (2025).

強誘電体薄膜分極特性のシミュレーション —分極履歴特性と2次元格子モデルでの不活性サイトの影響—

Simulation of Polarization Characteristics in Ferroelectric Thin Films

大阪大学エマージングサイエンスデザイン R³センター 奥山雅則

Osaka University, Institute for Newly-Emerging Science Design, Masanori Okuyama

E-mail: okuyama@insd.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

最近、不純物置換や応力印可した HfO_2 やウルツァイト ZnO , AlN 等の極薄の薄膜でも優れた強誘電性が見出され、薄膜の作製、微視的・結晶構造、分極特性等が精力的に調べられている。分極特性解析としては、第1原理計算、分極履歴は Landau model、反転過渡応答は核成長の KAT¹⁾、核発生、核生成・成長 model 等が知られている。本発表では、Landau 理論により強誘電体薄膜の分極履歴特性を解析し、また分極の不均一性を考慮した分極格子系の分極履歴特性および階段状電界下分極の過渡応答の計算を行った。

2. 方法と結果

1次相転移の Landau model で分極 P の時間 t 変化は Landau-Khalatnikov の式で表される。

$$\Gamma \frac{dP}{dt} = -\alpha P - \beta P^3 - \gamma P^5 + E \quad (1)$$

強誘電相で α , β は負, γ は正の定数、 Γ は粘性係数、 E は電界である。 AlScN や ZnMgO 膜の分極履歴特性とその温度依存性^{2,3)}より α , β , γ 値を求め⁴⁾、三角波の電界を印可した時の分極履歴特性を電場の scaling factor⁵⁾を考慮して計算した結果例を Fig. 1 に示す。さらに、薄膜内での隣接する分極同士の相互作用を入れた時の分極特性を検討した。40x40 の2次元格子系で、隣接分極の差の二乗と定数 k の積のエネルギーで相互作用する項^{1,6,7)}を(1)式右辺に加え、定数、変数を上記の結果を元に換算し変化させて数値解析した。薄膜内では欠陥や格子不整合によるミスフィット転位等の不完全性に起因する固定または不活性な分極が局在すると考えられる。その一例として周囲に線状の零分極を配置した時のエネルギーを γ で正規化し、 k を変化した時の分極履歴特性、階段状パルス電圧印加下の分極と電流の時間変化を Fig. 2 に示す。

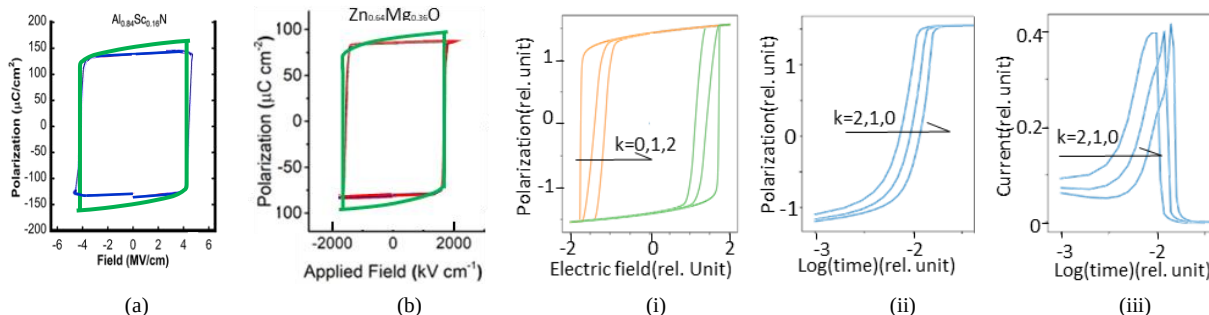


Fig.1. Experimental polarization hystereses of (a) $\text{Al}_{0.84}\text{Sc}_{0.16}\text{N}$ (blue)2) and (b) $\text{Zn}_{0.64}\text{Mg}_{0.36}\text{O}$ films(red) 3), and their simulated results(green).

Fig.2. Simulated results of (i) polarization hystereses, transient responses of (ii) polarization and (iii) current under step-pulse electric-field in 2-dimensional polarization lattice with zero polarizations of the sides. k :interaction coefficient.

[References]1)石橋,応用物理 67,1249(1999), 2)W.Zhu et al.,Appl.Phys.Lett.119,062901(2021), 3)L.Jacques et al., J. Appl. Phys,133,224102(2023), 4)S.Ducharme et al.,Phys.Rev.84,175(2002), 5)T.K.Song,J.Korea.Phy.Soc.,46,4(2005), 6)M.Omura, Y.Ishibashi et al., JJP, 9B, 2384(1991), 7).D.Ricinski, M.Okuyama, et al., J.Phys.:Condens.Matter 10, 477(1998).

Landau-Khalatnikov 方程式における ρ の意味についてPhysical meaning of ρ in L-K equation自由業¹, 産総研² ○鳥海 明¹, 右田 真司²Free Engineer¹, AIST², Akira Toriumi¹, Shinji Migita²

atoriumi3@gmail.com

前回の本講演会において Landau-Khalatnikov (L-K)方程式に現れる規格化時間定数について
の物理的な意味について少し議論したが [1], 何を言っているかわからないという意見を耳
にしたので, この中で現れる ρ という定数についての物理的意味についてもう少し考察し
てみる.

Landau 展開を分極の 4 次の項までとった $G = G_0 + 1/2\alpha P^2 + 1/4\beta P^4 - EP$ を基本にした
L-K 方程式を用いて考える. ここで P は原子変位を取り込んだ形での分極量である.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{dP}{dt} = -\frac{\partial G}{\partial P}, \quad p - p^3 + e = \frac{dp}{dt'}, \quad t' = \frac{t}{\tau_{LK}} \\ p = \frac{P}{P_S}, \quad \tau_{LK} = 2\rho \cdot \chi_{Fe,E=0}, \quad e = \frac{2\chi_{Fe,E=0}}{P_S}, \quad P_S: \text{飽和分極} \end{array} \right.$$

上記から分極反転時間に対する材料の個性は ρ と $\chi_{Fe,0}$ という中にすべて含まれているこ
とを示している. P - V 特性は微視的には分極反転時の強誘電体膜中のイオンの動きに伴う電
荷分布の変化に対応しているはずであるが, 実験では膜内部における電荷の変化を電極上
のスクリーニング電荷の変化として観測しているだけであり, 膜の内部で何が起きている
かわからない. $P \uparrow$ と $P \downarrow$ が時間とともに混ざっていく過程を分極反転過程と捉えているの
だから, 金属電極における電荷の応答は速くても, 膜内部にある個々の分極ユニットにおい
てはどのように電荷分布が変化していくか自明ではない. L-K eq. はそれを記述している.

実際の材料における正負の分極した状態というのは, それぞれの状態で原子同士がイオ
ン結合と共有結合が混じった状態で電荷分布が決定されているはずであるが, その状態が
反転した場合には結合状態が大きく変化することを強いられることになる. 図 1 に模式的
に示したように強誘電体の分極反転に伴って, 原子同士が近づくとも共有結合性が強くなり,
離れるとイオン結合性が強くなることは直感的にもっともらしい [2]. つまり分極ユニット
の一方 (電極ではないことに注意) では局在電荷が多くなるが, 他方では共有性に起因した
電荷の拡がりが見られるはずである. そうすると強誘電体の両端では図 2 のように電荷分布
状態が変化することになり, 分極ユニットの両端では電子の波動関数の組み替えを強いら
れることになる. その結果として本質的抵抗が生じるはずである. それが実効的に ρ で表さ
れていると考えられるのではないだろうか.

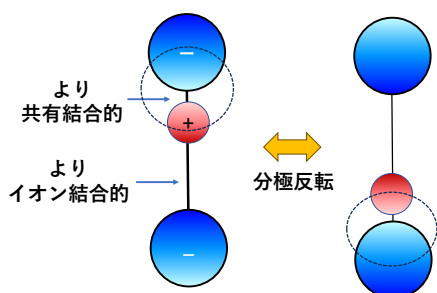


図 1. 分極反転に伴うイオン結合と共有結合の交換.
動いているのは中央の正の原子と仮定)

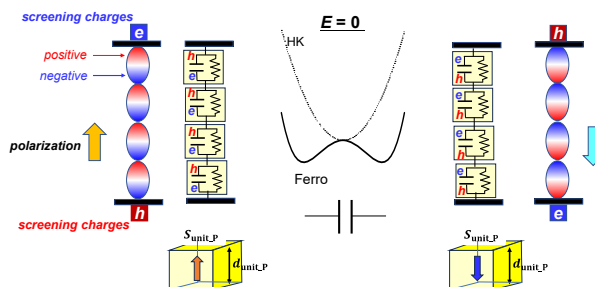


図 2. 膜中の分極反転過程の模式図 (e, h は電
荷の極性を意味している).

[1] 応物講演会 (2025 春). [2] W. A. Harrison 「固体の電子構造と物性」.

強誘電体 $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$ における C-V 特性の掃引速度依存性の観察

Observation of sweep-speed dependence of C-V characteristics in ferroelectric $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$

東大院工,[○](M1) 松川 浩之, 竹中 充, 高木 信一, トーブラサートポン カシディット

[○]H. Matsukawa, M. Takenaka, S. Takagi, K. Toprasertpong (U. Tokyo, School of Eng.)

E-mail: matsukawa@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【背景】強誘電体 $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$ (HZO)は強誘電分極に起因する高誘電率化が特徴であり、従来の high-k 材料よりも高い誘電率をもつことから高容量の電子デバイスへの活用が検討されている[1]。HZO の誘電率は C-V 測定で得られた容量から算出される[2]が、その C-V 測定条件は重視されておらず、報告されないことが多い。本研究では、C-V 測定条件のうち、特に掃引速度が結果に及ぼす影響について検証したので報告する。

【実験手法】測定したデバイスは、膜厚 5.7 nm の $\text{Hf}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{O}_2$ を用いた TiN/HZO/TiN の MFM キャパシタである。デバイスの詳細は[3]と同一である。本研究の C-V 測定では、-2 V から 2 V の範囲に 0.08 V ずつ電圧点を取り、各点について小信号容量を計測した。-2 V ~ 2 V 間で往復の掃引を行い、掃引周波数/掃引時間がそれぞれ 0.1 Hz/10 s、1 Hz/1 s、10 Hz/100 ms、100 Hz/10 ms となるように測定を行った。

Fig. 1 は、本研究で用いた小信号容量の測定手法を示している。小信号容量は、30 mV の小さい電圧 ΔV の矩形波電圧に応答した電荷量 ΔQ を用いて評価した。具体的には、電流波形が安定するまでの待機時間 (delay time) を設けた後、矩形波における電圧の立ち上がり/立ち下がり ΔV に応答して増加/減少した電流を積算することで応答電荷の量 ΔQ を求め、 $\Delta Q/\Delta V$ を小信号容量とした。矩形波の周波数は 200 kHz、入力時間は掃引速度に関わらず 10 μs (2 周期) であり、掃引速度に応じて変化する部分は delay time の長さのみである。

【結果と考察】各掃引速度における C-V 測定結果を Fig. 2 に示す。実線は -2 V から 2 V への掃引、破線は 2 V から -2 V への掃引を示す。掃引速度が上がるにつれ、計測される小信号容量が増加する様子が見られる。特に、誘電率がピークを迎える抗電圧付近において、掃引速度ごとの測定値の差が大きくなっており、掃引速度が強誘電分極の応答に影響を及ぼしていることを示唆している。

抗電圧付近 (0.48 V) において、各掃引速度における電流の矩形波応答の実測値を Fig. 3 に示す。Fig.4 は Fig. 3 の電流ピーク部分の拡大図であり、遅い掃引において、電圧変動に対する強誘電分極の応答が減少していることを示している。

この現象は、掃引速度が遅い場合に一点の電圧に印加される時間が長くなり、自発分極がより安定になることや、電極/強誘電体の界面に電荷が捕獲される[4]ことによって、小信号に対する強誘電分極の応答が鈍化することに起因する可能性があることが考えられる。

【結論】強誘電体 $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$ に対する C-V 測定の結果は掃引速度依存性を示し、誘電率の評価において測定条件に注意する必要があることが示唆される。

【謝辞】本研究は科学研究費(23K20951)の支援により実施した。

【参考文献】

- [1] M. Jung et al., *Nano Convergence*, 9:1: 44 (2022)
- [2] M. Park et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* 10, 42666–42673 (2018)
- [3] 松川他、応用物理学会春季学術講演会、14p-K503-14、2025
- [4] Z. Liu et al., *Appl. Phys. Lett.* 125, 072904 (2024)

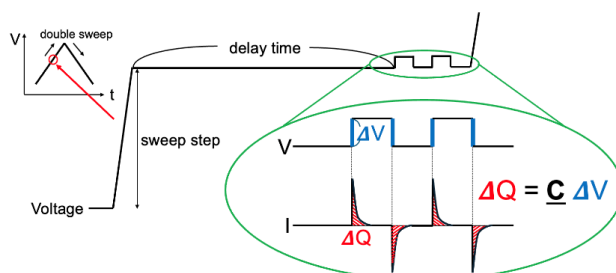


Fig.1 Description of the measurement process.

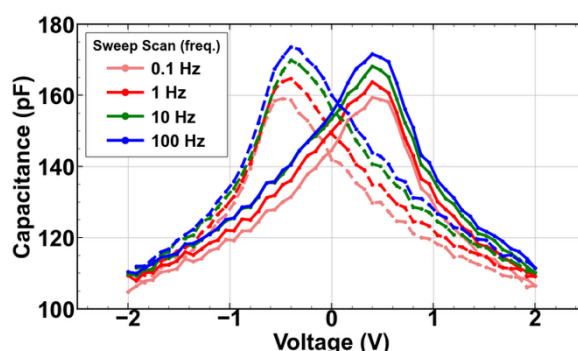


Fig.2 C-V characteristics and sweep-speed dependency.

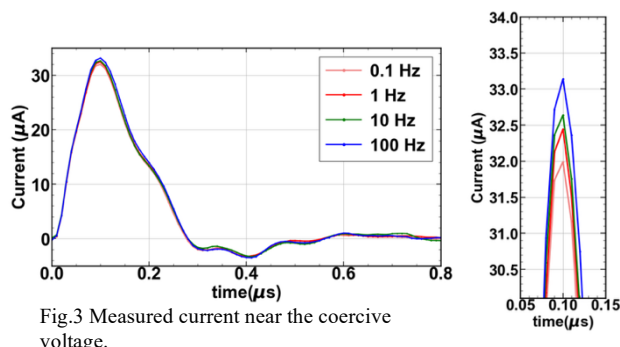


Fig.3 Measured current near the coercive voltage.

Fig.4 Enlarged view near the peak in Fig. 3.

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.8】 6.2 カーボン系薄膜、KS1 固体量子センサ研究会のコードシェアセッション

[10a-N205-1~9] CS.8 6.2 カーボン系薄膜、KS1 固体量子センサ研究会のコードシェアセッション

[10a-N205-1]

[分科内招待講演] ナノダイヤモンド量子センサの爆轟法による工業的合成と生体応用

○牧野 有都^{1,2} (1.ダイセル、2.阪大院基工)

[10a-N205-2]

生体量子センサ用ナノダイヤモンドへの電子線照射NVセンター形成³

○阿部 浩之¹、神長 輝一²、佐伯 誠一¹、五十嵐 龍治²、長田 健介³、大島 武^{1,4} (1.QST量子機能セ、2.QST量子生命研、3.QST量医研、4.東北大学)

[10a-N205-3]

パルス光検出磁気共鳴計測に向けたナノダイヤモンド中NVセンターの性能評価

○関口 顕¹、阿部 和実¹、野村 涼太¹、織田 有咲¹、安德 慶太郎¹、谷井 孝至¹ (1.早大理工)

[10a-N205-4]

近赤外域蛍光を有するダイヤモンド中の単一色中心の観測

○(M1)塩谷 諒¹、西川 哲理¹、森岡 直也^{1,2}、三木 茂人³、川瀬 凜久¹、川島 宏幸¹、水落 憲和^{1,2} (1.京大化研、2.京大CSR、3.情通機構)

[10a-N205-5]

六方晶窒化ホウ素中の炭素関連スピン欠陥の研究

○(D)中村 祐貴¹、渡邊 賢司²、谷口 尚²、佐々木 健人¹、小林 研介¹ (1.東大理、2.物材機構)

[10a-N205-6]

不均一緩和・LASER緩和の影響に着目したアンサンブルNV系における連続波電子スピン一重/二重共鳴信号の解析

○(D)鈴木 琉生^{1,2}、見川 巧弥^{1,2}、岡庭 龍聖^{1,2}、松崎 雄一郎³、徳田 規夫⁴、早瀬 潤子^{1,2} (1.慶大理工、2.慶大CSR、3.中大理工、4.金大ナノマリ)

[10a-N205-7]

NVセンターを用いた電子二重共鳴計測における最尤推定法の活用

○(M1C)小林 由佳¹、Chanuntranont Akirabha¹、太田 智基¹、関口 顕¹、織田 有咲¹、臼井 俊太郎¹、谷井 孝至¹ (1.早大理工)

[10a-N205-8]

最尤推定法を活用したNVセンターによる高速・高精度温度計測
最尤推定法を活用したNVセンターによる高速・高精度温度計測

○(DC)臼井 俊太郎¹、Akirabha Chanuntranont¹、太田 智基¹、野村 涼太¹、小林 由佳¹、谷井 孝至¹ (1.早大理工)

[10a-N205-9]

ダイヤモンドNV 中心における励起三重項ゼロ磁場分裂の圧力応答測定

○(DC)須田 涼太郎¹、瓜生 健心²、山本 航輝¹、佐々木 岬²、佐々木 健人¹、榮永 茉莉²、清水 克哉²、小林 研介^{1,3,4} (1.東大理物、2.阪大基極セ、3.東大知の物理、4.東大TSQS)

ナノダイヤモンド量子センサの爆轟法による工業的合成と生体応用

Industrial scale synthesis of nanodiamonds via detonation process

for biological nano quantum sensors

ダイセル¹, 阪大基工², °牧野 有都^{1,2}

Daicel Corp.¹, Univ. Osaka², °Yuto Makino^{1,2}

E-mail: yt_makino@jp.daicel.com

窒素一空孔中心やケイ素一空孔中心を含有したナノダイヤモンド (NV-ND, SiV-ND) は、細胞内に導入可能な上、周辺環境に応答する優れた光学およびスピン特性を示すことから、生体内で駆動する量子センサとして有望視されている [1]。近年では NV-ND および SiV-ND を用いた生細胞内の温度計測が実現されるなど、実用的な研究成果も報告されている [2,3]。これらの成果を踏まえ、ナノダイヤモンド量子センサの実用化に向けた期待が高まる中、大量合成法の開発が望まれるようになった。そこで注目されたのがナノダイヤモンドを工業規模で製造可能な爆轟法である。爆轟法は、爆薬を起爆させた際に生じる超高温高压 (>3500 K, >25 GPa) の爆轟波中で、爆薬分子の炭素を原料にナノダイヤモンドを瞬時に大量合成する手法である [4]。爆轟法で合成したナノダイヤモンドには、爆薬分子のニトロ基に由来した窒素原子が豊富に含まれており、これを利用した NV 中心の形成が可能である [5]。一方、SiV-ND の爆轟合成においては、ケイ素源を爆薬に添加する必要がある。過去にもケイ素化合物を混合した爆薬を用いて SiV-ND の合成が検討されたが成功例はなかった [4]。我々は爆轟波中におけるナノダイヤモンドの形成機構に適合した化学構造のケイ素化合物を選択することが重要と考え、まずは分子論的な形成機構を実験と計算の両面から推定した。推定機構に基づき芳香族ケイ素化合物を選定し、これを添加した爆薬を用いた実験を行った結果、得られたナノダイヤモンドの発光スペクトルには SiV 中心のゼロフォノン線が観察されたことから、SiV-ND の爆轟合成を確認した [6]。続いて我々は、爆轟合成した SiV-ND の量子センサとしての応用研究に着手し、生体内温度計測を指向した性能評価を行った。SiV-ND が示すゼロフォノン線のピーク位置の温度依存性を評価したところ、その温度感度は平均 $2.9 \text{ k Hz}^{-1/2}$ と見積もられた [7]。この SiV-ND の平均粒子径は約 20 nm であり、生体内で機能するナノサイズの量子センサとしての可能性が示された。

本講演では、上述の SiV-ND の研究に加え、同じく爆轟合成した NV-ND によるナノ空間の温度計測に関する取組を交えつつ [8]、最新の研究成果を紹介する。さらに、これらの爆轟合成したナノダイヤモンド量子センサの社会実装に向けた展望と課題を議論する。

[1] E. Moreva, *et al.*, APL Photonics 10, 010902 (2025). [2] H. Yukawa, *et al.*, Nanoscale Adv. 2, 1859 (2020). [3] W. Liu, *et al.*, Nano Lett. 22, 2881–2888 (2022). [4] J.-C. Arnault, Nanodiamonds: advanced material analysis, properties and applications (1st ed.), Elsevier, Amsterdam (2017). [5] D. Terada, *et al.*, ACS Nano 13, 6461–6468 (2019). [6] Y. Makino, *et al.*, Diam. Relat. Mater. 112, 108248 (2021). [7] M. Fujiwara, *et al.*, Carbon 198, 57–62 (2022). [8] F. T.-K. So, *et al.*, APL Materials 12, 051102 (2024).

生体量子センサ用ナノダイヤモンドへの電子線照射 NV センター形成 3

Electron Irradiation NV Center Formation on Nano-Diamonds for Quantum Biosensors

Part 3

QST 量子機能セ¹, QST 量子生命研², QST 量医研³, 東北大学⁴

○阿部 浩之¹, 神長 輝一², 佐伯 誠一¹, 五十嵐 龍治², 長田 健介³, 大島 武^{1,4}

QST QUARC¹, QST iQLS², QST iQMS³, Tohoku Univ.⁴, ○Hiroshi Abe¹, Kiichi Kaminaga²,

Saiki Seiichi¹, Ryuji Igarashi², Kensuke Osada³ and Takeshi Ohshima^{1,4}

E-mail: abe.hiroshi2@qst.go.jp

NVナノダイヤモンド(ND)中の窒素-空孔(NV)センターは、生体ナノ量子センサーとして有望であり、生命現象に伴う微小温度変化や細胞活性による磁気・電気的变化の検出を活用した生体内イメージング材料としての応用が期待されている。既に多細胞への導入試験や多様なセンシングが試みられている[1]。これらの応用においては、ダイヤモンド中へのNVセンター(NVC)のより効率的な導入に加え、スピン特性に優れた蛍光ナノダイヤモンド(FNDs)の形成が求められている。これまで高蛍光・高感度化FNDsの形成を目指し、電子線照射およびその後の熱処理条件の最適化に取り組んできた。室温(RT)での照射とその後のNV形成熱処理を組み合わせる従来手法と、高温(HT)での照射を行う手法の2つの照射モードによるNV形成量の比較[2]および量子計測精度の評価[3]を行ってきた。

本研究では平均粒径50 nmのNDに対し、2 MeV電子線照射量の依存性を検討した。電子線照射はダイヤモンド結晶格子中に空孔を導入する効果があり、これらの空孔がダイヤモンド中の窒素不純物と結合することでNVセンターが形成される。各照射モード (RT/HT) における電子線照射量の最適化をフォトルミネッセンス(PL)測定による蛍光強度評価、電子スピン共鳴(ESR)測定によるNV濃度評価、および光検出磁気共鳴(ODMR)コントラスト測定により行った。その結果、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 照射量のHT照射により作製したFNDsは、RT照射の場合と比較して蛍光強度が約2倍高強度になることが明らかになった(図参照)。この傾向は照射量 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ の場合においても同様であった。電子線照射はダイヤモンド中に導入された空孔の拡散を促進し、NVC形成に有利に働く可能性があることが示唆された。

これらの結果は、NVCを高効率に導入するための電子線照射条件の最適化に重要な指針を与えるものである。本研究で得られた知見は、高性能NVCデバイスの開発に貢献し、量子技術分野の進展に寄与することが期待される。

【謝辞】本研究は JSPS 科研費 JP24K03290、MEXT Q-LEAP (JPMXS0118067395)の助成を受けた。

【参考文献】

[1] T. Hamoya et al., Intravital microscopic thermometry of rat mammary epithelium by fluorescent nanodiamond, Nanoscale Horiz, 2024, **9**, 1938-1947.

[2] 阿部浩之 他, 生体量子センサ用ナノダイヤモンドへの電子線照射 NV センター形成, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 2023 年 9 月 19 ~ 23 日 (熊本市) .

[3] 阿部浩之 他, 生体量子センサ用ナノダイヤモンドへの電子線照射 NV センター形成 2, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 2024 年 9 月 16 ~ 20 日 (新潟市) .

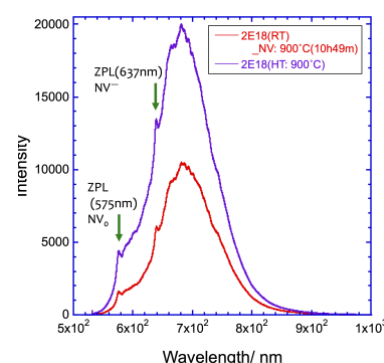


Fig. Correlation between irradiation dose and PL intensity by electron irradiation(HT/RT).

パルス光検出磁気共鳴計測に向けた ナノダイヤモンド中 NV センターの性能評価

Characterization of NV Centers in Nanodiamonds for Pulsed ODMR Measurements

早大理工¹ ○関口 顕¹, 阿部 和実¹, 野村 涼太¹, 織田 有咲¹, 安徳 慶太郎¹, 谷井 孝至¹,

Waseda Univ.¹ ○Ken Sekiguchi¹, Kazumi Abe¹, Ryota Nomura¹,

Arisa Oda¹, Keitaro Antoku¹, Takashi Tanii¹,

E-mail: sekiguchi@tanii.nano.waseda.ac.jp

【序論】ナノダイヤモンド中の窒素-空孔中心 (NV センター) は高い生体適合性を有するだけでなく、機能性分子の表面修飾による量子センシングエレメントとしても注目されている[1]。パルス ODMR 法はナノスケールでの高感度スピン検出を可能にするが、ナノダイヤモンド中の NV センターの場合、その電荷不安定性や短いコヒーレンス時間が制約となってパルス ODMR 計測に資する NV センターを見つけるのが難しい。酸処理やアニール処理による特性改善が試みられてきたが[2,3], 基準となる指標がなく、個々の処理の効果の比較や最適化が困難だったこともその一因と考えられる。本研究では、NV センター電子スピンをプローブとする DEER (Double Electron-Electron Resonance) 計測による近傍の P1 センター電子スピンの検出に向けて、酸素アニール処理やオゾン処理、酸素プラズマ処理の効果を実験的に評価し、最適条件下で P1 センター電子スピンの検出を試みた。

【実験方法】50~200 ppm の窒素を含む HPHT 合成ナノダイヤモンド (Element Six 製, 平均粒径 180 nm) に窒素アニール (800 °C, 2 h) を施し、NV センターを形成した(Fig.1(a))。続いて酸素アニール (465 °C, 2~16 h),

オゾン照射, 酸素プラズマ処理を実施した。得られた試料を石英基板上に配置し、Hahn エコー法により個々の NV センターのスピンコヒーレンス時間と電荷安定性を評価した(Fig.1(b))。最適条件下で DEER 測定を行い、P1 センターの超微細相互作用を検出した(Fig.2)。本発表では、一連の結果を総合してパルス ODMR 計測に資するかどうか判定基準を提示すると同時に、P1 センター電子スピンの検出結果について報告する。なお、本研究は科研費 (22H01921, 23H00169, 24H02333), ARIM, DEJI2MA の助成を受けた。

[1] Y. Wu and T. Weil, Adv. Sci. 9, 2200059 (2022). [2] J. Tisler et al., ACS Nano 3, 1959 (2009).

[3] R. Tsukahara et al., ACS Appl. Nano. Mater. 2, 3701 (2019).

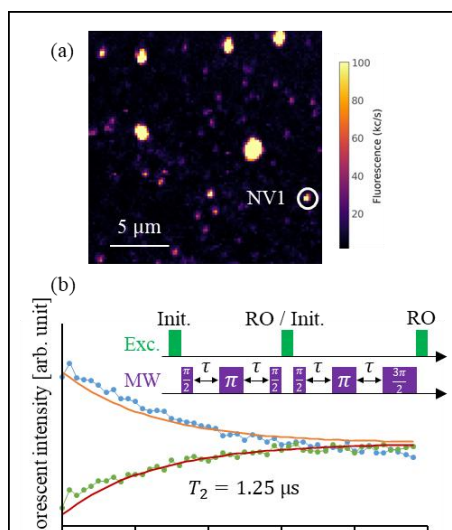


Fig. 1 (a) NV センター含有ナノダイヤモンドの共焦点顕微鏡像
(b) Hahn エコー測定結果

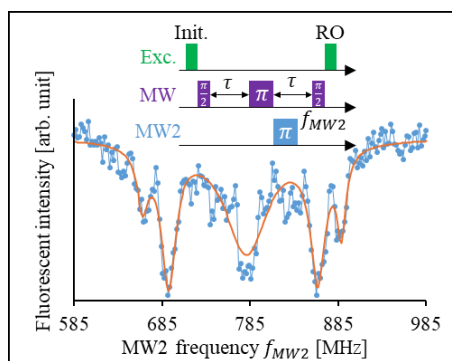


Fig. 2 NV センターによる P1 センターの DEER 測定結果

近赤外域蛍光を有するダイヤモンド中の単一色中心の観測

Observation of near-infrared single color centers in diamond

京大化研¹, 京大 CSRN², 情通機構³ ○(M1)塩谷 諒¹, 西川 哲理¹,

森岡 直也^{1,2}, 三木 茂人³, 川瀬 凜久¹, 川島 宏幸¹, 水落 憲和^{1,2}

Kyoto Univ.¹, CSRN Kyoto Univ.², NICT³ ○Ryo Shiotani¹, Tetsuri Nishikawa¹, Naoya Morioka^{1,2},

Shigehito Miki³, Riku Kawase¹, Hiroyuki Kawashima¹, Norikazu Mizuochi^{1,2}

E-mail: shiotani.ryo.38d@st.kyoto-u.ac.jp

【緒言】ダイヤモンド中の色中心は量子情報素子や量子センサなどへの応用が期待されている。特に、近赤外光は、光ファイバや生体内での光損失が少ないため、量子通信や生体内センシングに適している。しかし、近赤外域に蛍光を有するダイヤモンド中の色中心の報告例は依然として少なく、さらなる探索が求められる。本研究では、(111)高温高压合成 Ib 型ダイヤモンド基板上に化学気相成長 (CVD) 膜が合成されている試料で、近赤外域に蛍光を有する単一色中心を観測したので報告する。

【実験と結果】ダイヤモンド試料は共焦点レーザー顕微鏡装置(励起波長 730 nm, 対物レンズ NA=1.35)で観察した。発光(PL)イメージ測定において、HPHT 基板中に孤立した PL スポットが観測された。このスポットは、自己相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ 測定より、単一の色中心であることが確認された (Fig. 1(a))。この色中心について、シリコン検出器を用いて PL スペクトルを室温で測定したところ、870 nm 付近に鋭いピークを持つ近赤外域の発光が観測された (Fig. 1(b))。次に、同様のスペクトルを有する色中心について、励起偏光依存性測定を行った。その結果、 $[1\bar{2}1]$ 軸および $[\bar{2}11]$ 軸に一致する方位を持つ色中心 (緑実線、橙鎖線) と、いずれの結晶方位にも一致しない方位を持つ色中心 (青破線、赤点線) が存在することが分かった (Fig. 1(c))。また、いくつかの色中心では、通常の二準位系電気双極子遷移モデルでは説明できない偏光依存性も見られた。本発表では、これらの結果の詳細について議論を行う。

本研究は、MEXT QLEAP (No. JPMXS0120330644)、科研費 (25H00845) の支援を受けた。また、部分的に JST さきがけ (No. JPMJPR245C)、科研費 (25K01262)、ASPIRE (JPMJAP24C1) の支援を受けた。

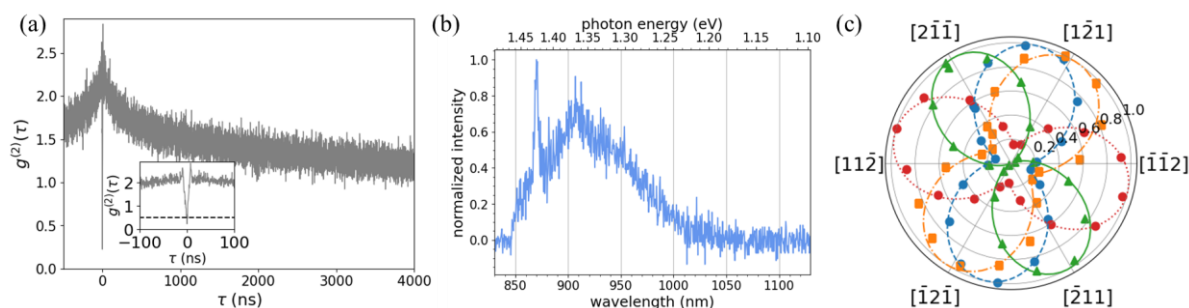


Fig. 1 (a) Autocorrelation function $g^{(2)}(\tau)$ after background correction. (b) Background-subtracted photoluminescence spectrum of a color center in the substrate with 730 nm excitation. (c) Excitation polarization dependence of the normalized photoluminescence intensity.

六方晶窒化ホウ素中の炭素関連スピン欠陥の研究

Study of carbon-related spin defects in hexagonal boron nitride

東大理¹, 物材機構² ○(D3)中村 祐貴¹, 渡邊 賢司², 谷口 尚², 佐々木 健人¹, 小林 研介¹

Univ. Tokyo¹, NIMS.², °Yuki Nakamura¹, Kenji Watanabe², Takashi Taniguchi², Kento Sasaki¹,

Kensuke Kobayashi¹

E-mail: yuki.nakamura@phys.s.u-tokyo.ac.jp

ワイドギャップ半導体中のスピン欠陥は、量子センサ・量子通信・量子シミュレータを始めとした様々な量子技術を実現するためのプラットフォームとして研究されてきた。その代表例はダイヤモンド中の窒素空孔(NV)中心であるが、近年では、六方晶窒化ホウ素(hBN)中のホウ素空孔(V_B^-)が新たなスピン欠陥として注目されている[1]。とりわけ、量子センサ応用における hBN 中のスピン欠陥の最もユニークな性質は、hBN が 2 次元物質であることである。hBN を測定対象に直接貼り付けると、センサである V_B^- との距離は数原子スケールで近接する。この近接効果による信号検出感度の向上を念頭に置いた、 V_B^- を用いた量子センシングが研究されている[2]。

しかし現状では、 V_B^- を用いた量子センシングの感度は NV 中心に及ばない。 V_B^- は発光を伴う光学遷移が禁制遷移であるため、単一の V_B^- が検出できないほど発光強度が著しく弱い[3]。また、hBN は構成元素のすべてが核スピンを持つため、光検出磁気共鳴(ODMR)スペクトルの不均一線幅が広がることも感度低下の要因となっている。これらの欠点を持たないスピン欠陥を見出すことは、センサが 2 次元物質であることに由来する近接の利得を最大化するために重要である。

そこで我々は、最近新たに発見された hBN 中の炭素関連スピン欠陥[4]に注目する。特筆すべきは発光強度が V_B^- の 200 倍以上強い(すなわち、NV 中心よりも強い)点であり、すでに単一・アンサンブルの両方について室温下での ODMR が確認されている[4]。このように優れた性質を持つ一方で、発見されて間もないため、欠陥構造や ODMR の詳細なメカニズムを始めとした最も基本的な物性が不明であることが最大の課題である。

本発表では、hBN 中の炭素関連スピン欠陥に関する我々の研究結果を報告する。高温高压合成によって作製した炭素ドーパ hBN(C:hBN)結晶を剥離し、得られた薄膜をシリコン基板上に転写したのち、酸素雰囲気下でアニールした。アニール後の C:hBN 薄膜は、先行研究で報告された炭素関連スピン欠陥[4]と同様の ODMR スペクトルを示した。発表当日までにさらなる進展があれば、同位体濃縮した C:hBN 中の炭素関連スピン欠陥に関する実験結果も報告する予定である。これらの実験の目標は、炭素関連スピン欠陥と隣接核スピンの間の超微細相互作用を測定することで、第一原理計算との比較による欠陥構造の予測を行うことである。

[1] A. Gottscholl, *et al.*, Nat. Mater. **19**, 540 (2020).

[2] J. Zhou, *et al.*, Sci. Adv. **10**, 18 (2024).

[3] T. Clua-Provost, *et al.*, Phys. Rev. B **110**, 014104 (2024).

[4] I. O. Robertson, *et al.*, arXiv:2407.13148 (2024).

不均一緩和・LASER 緩和の影響に着目したアンサンブル NV 系における連続波電子スピン重/二重共鳴信号の解析

Analysis of continuous wave electron spin single / double resonance signals of ensemble NV systems focusing on effect of inhomogeneous and LASER relaxation

慶大理工¹, 慶大 CERN², 中大理工³, 金大ナノマリ⁴
 ○(D) 鈴木 琉生^{1,2}, 見川 巧弥^{1,2}, 岡庭 龍聖^{1,2}, 松崎 雄一郎³, 徳田 規夫⁴, 早瀬 潤子^{1,2}
 Keio Univ.¹, Keio CERN², Chuo Univ.³, Kanazawa Univ.⁴
 °Rui Suzuki^{1,2}, Takumi Mikawa^{1,2}, Ryusei Okaniwa^{1,2},
 Yuichiro Matsuzaki³, Norio Tokuda⁴, Junko Ishi-Hayase^{1,2}
 E-mail: rui.0322@keio.jp

1. 背景・目的

ダイヤモンド中の窒素空孔中心 (NV センター) に局在する電子スピンは、室温・大気圧下で長いコヒーレンス時間を有し、スピン状態を光学的に読み出せることから基礎・応用問わず研究が行われている。実験操作が簡便で、かつ 2 次元イメージング等との相性も良いスピン状態の読み出し手法として連続波電子スピン共鳴(CW-ESR)法が挙げられるが、典型的な測定条件である平行バイアス磁場下では交流磁場による上 2 準位 ($|m_s = \pm 1\rangle$) 間の駆動が起これら、3 準位を活かした量子系設計を制限したり、交流磁場(MHz 帯; RF)の測定を困難にするという問題があった。そこで、我々のグループでは通常とは異なる垂直バイアス磁場を印加することで、MW, RF による 3 準位間の駆動が起こる量子系を設計し、RF-Dressed 状態の CW-ESR 法による観測(連続波電子スピン二重共鳴; CW-ESDR)に成功した¹。しかし、既存の CW-ESDR 解析モデル²は共鳴周波数は正しく再現できるものの、現実的な励起(MW)強度条件下で信号形状を再現できないという問題があった。そこで本研究ではこれまで、励起(MW)強度に実用上の制限を課さない CW-ESDR 解析モデルを構築し、広い測定条件範囲で信号解析を行ってきた。本発表では、定量性向上のためアンサンブル系の不均一分布、及び LASER 緩和に関する調査を行ったため、報告する。

2. 原理・方法、及び結果

CW-ESDR 信号は NV センターの配向軸に垂直に静磁場を印加し、上 2 準位に共鳴する RF を照射しながら連続波 MW, LASER を照射し、発光強度を読み出すことで得られる(Fig. 1(a))。

○ 解析モデル

CW-ESDR 解析モデルを構築するため、理論的に緩和を取り扱える Lindblad 型の方程式³を用いた。また、本研究における解析対象は「連続波」ESR 信号であるため、LASER 照射下での定常状態を扱う必要がある。そこで、非共鳴 LASER(532 nm)によるダイナミクスを 8 準位

間の縦緩和でモデル化し、定常状態においてこれらの影響を取り込んだ 3 準位の有効モデルを構築した(Fig. 2(a))。Fig. 2(b)に 8 準位、及び有効 3 準位モデルで計算した CW-ES(D)R 信号の例を示す。この結果から、有効 3 準位モデルは正しい定常解を与えることが確認された。本モデルは、非共鳴 LASER に誘起されたダイナミクスの影響の理解を助けるものとなる。

○ 歪電場の不均一分布

歪電場の不均一分布は零磁場下の CW-ESR 信号から得られるが、この信号は分布が等方/異方的いずれの可能性も示唆している。本研究では、実験的にこれらを見分けるため、零磁場下直線偏光 MW 励起の CW-ESR 信号を用いた。本信号の解析から、歪電場分布は等方的であることが示されたため、分布幅のみを抽出し、解析モデルに組み込むこととした(Fig. 1(b))。

CW-ES(D)R 信号の定量的な解析には、3 重項の特性のみならず、環境(スピン)との相互作用、LASER 誘起ダイナミクス、系の不均一分布等多くの要素を考慮する必要がある。当日の発表では、上述の有効モデルや分布抽出法を踏まえた詳細な信号解析結果について報告する。

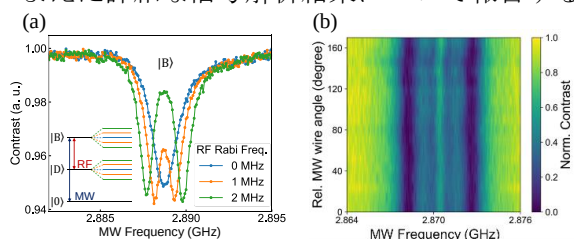


Fig. 1 (a) Energy diagram and spectra of CW-ES(D)R (b) MW polarization direction dependence of CW-ESR spectra under zero magnetic field

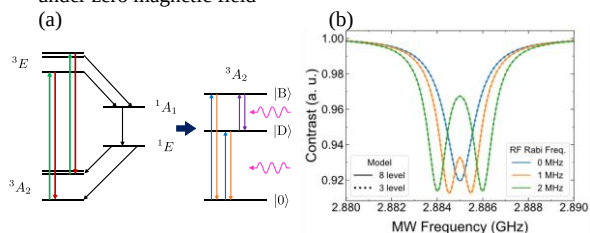


Fig. 2 (a) Energy diagrams and relaxation properties of 8 and 3 level model (b) Calculation results of CW-ES(D)R spectra

[1] S. Saijo, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **113**, 082405 (2018).

[2] T. Yamaguchi, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 100901 (2019).

[3] G. Lindblad, Commun. Math. Phys., **48**, 119-130 (1976).

本研究の一部は、Q-LEAP (JP-MXS0118067395)、科研費 (JP20H05661, JP22H01558, JP25K01292)、JST CREST (JPMJCR24A5, JPMJCR23I5)、卓越研究員事業 (JPMJPR1919, JPMJPR245B)、J-PEAKS、JSPS 特別研究員奨励費 (JP24KJ1964)、JST Moonshot R&D (JPMJMS226C)、慶大次世代研究プロジェクト推進プログラム、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (JPMJSP2123)の支援を受けて行われた。

NV センターを用いた電子二重共鳴計測における最尤推定法の活用

Application of maximum likelihood estimation method to
Double Electron-Electron Resonance measurements using nitrogen-vacancy centers

早大理工 ○小林 由佳, Akirabha Chanuntranont, 太田 智基,

関口 顕, 織田 有咲, 白井 俊太郎, 谷井 孝至

Waseda Univ. °Y. Kobayashi, A. Chanuntranont, T. Ota,

K. Sekiguchi, A. Oda, S. Usui, T. Tanii

E-mail: yuka@tanii.nano.waseda.ac.jp

【研究背景と目的】ダイヤモンド中の単一 NV センター(窒素-空孔中心)を活用した NMR/ESR 計測が期待されている [1, 2]。しかしながら、実測定では一般に多数回(例えば 10 万回以上)の蛍光光子検出を必要とするため、十分な周波数精度を保证するために十数時間を必要とすることも珍しくない。前回、私たちは最尤推定法(maximum likelihood estimation; MLE)を用いると、およそ 10 分の 1 程度の短時間で共鳴周波数を推定できることを報告した[3]。そこでは、予想範囲内の個々の周波数に対して NV センターが時刻 t に発する蛍光光子数の期待値を計算し、光子が 1 つずつ検出されるたびに周波数の尤度を更新・比較して最確値を求めた[4, 5]。しかしながら、前回の報告では、設定したパルスシーケンスに対する NV センター電子スピンの蓄積位相を簡略化した数式で表したので、標的核/電子スピンを直接操作した際に、磁気双極子-双極子相互作用を介して、標的核/電子スピンの NV センター電子スピンのどのような作用を及ぼすかを表現することができなかった。例えば、電子二重共鳴(double electron-electron resonance, DEER)計測では、標的電子スピンの状態がマイクロ波照射により直接的に操作され、相互作用の結果としての NV センターの電子スピン状態が計測される。今回、DEER 計測に対しても最尤推定法を適用できるように、設定したパルスシーケンスに対して NV センター電子スピンのハミルトニアンを逐一解くシステムを構築し、NV センターと標的電子スピンの相対位置を推定できるようにしたので、その結果を報告する。

【実験方法と結果】はじめに、DEER 測定実施下での NV センター量子状態の時間発展を計算し、放出される光子数の期待値を求めた。この際に使ったハミルトニアンには、距離 r を NV センターとスピンラベルの磁気双極子-双極子相互作用の項に、角度 θ を超微細相互作用項に変数として組み込んだ。これにより標的電子スピンの位置に応じた光子数期待値を求めることができる。次に、求めた光子数期待値と測定により得られた光子数を、Poisson 分布を確立分布関数とした最尤推定法で照らし合わせることで、標的電子スピンの位置をパラメータとした対数尤度を導いた (Fig. 1)。発表では従来法である光子数の積算と最尤推定法による結果を照らし合わせることで実用性を議論する。なお、本研究は科研費(22H01921, 23H00169)の助成を受けた。

参考文献: [1] S. Schmitt *et al.*, *Science* **356**, 832 (2017). [2] T. Staudacher *et al.*, *Science* **339**, 561 (2013). [3] 谷井孝至 他, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-K502-1. [4] A. Chanuntranont *et al.*, *physica status solidi (A)* **222**, 2400307 (2025). [4] T. Ota *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **64**, 030904 (2025).

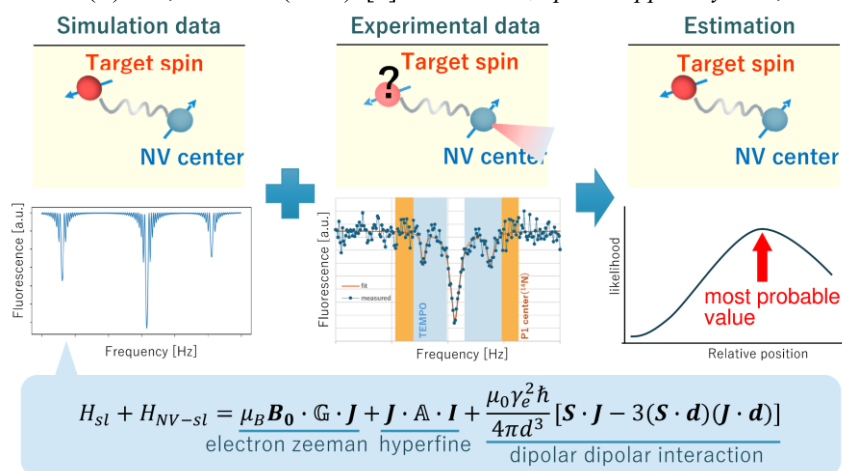


Fig. 1 Estimation of the relative position of the target spin

最尤推定法を活用した NV センターによる高速・高精度温度計測

High-speed, high-precision temperature measurement with nitrogen-vacancy centers using maximum likelihood estimation

早大理工 ○臼井 俊太郎, Akirabha Chanuntranont, 太田 智基,

野村 涼太, 小林 由佳, 谷井 孝至

Waseda Univ. °S. Usui, A. Chanuntranont, T. Ota, R. Nomura, Y. Kobayashi, T. Tanii

E-mail: usui@tanii.nano.waseda.ac.jp

【研究背景と目的】近年、ナノダイヤモンド中の単一 NV センター（窒素-空孔中心）を用いた極微小領域（例えば、細胞内）の温度計測に注目が集まっている[1]。温度が変化すると、ゼロ磁場分裂による NV センター電子スピンの共鳴周波数が変化するため、この周波数シフトを計測することで極微小領域の温度が計測される。高精度の温度計測には Ramsey シーケンスを基本とするパルス型光検出磁気共鳴 (pulsed-ODMR) がよく用いられる[2,3]。しかしながら、この手法は、多数回の観測を通して温度を推定するため、計測時間が長くなるという欠点を有していた。そこで本研究では、最尤推定法 (MLE) の導入により、温度計測の高速化と高精度化の両立を試みた。

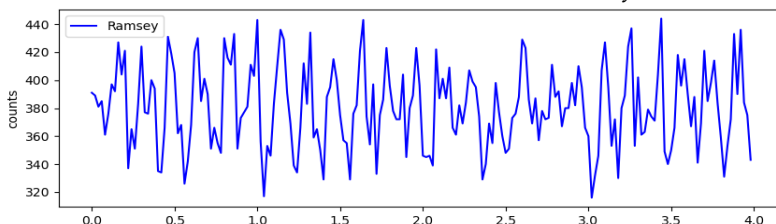
【実験方法と結果】本研究では、温度依存パラメータとして設定した共鳴周波数 f_0 とコヒーレンス時間 T_2^* に基づき、理想的な Ramsey 振動を

$$\varphi(t) = \cos(2\pi f_0 t_i) e^{-t_i / T_2^*}$$

で規定した。それを基に、得られた量子状態ごとに最大値を 1 とする蛍光強度 $I(t)$ を割り当て、ここに背景揺らぎを重ねることで平均光子数 $\lambda(t_i)$ を構築した後、各計測点 t_i についてポアソン分布から一回の測定で得られる光子数を繰り返しシミュレートすることで疑似データセットを作成した。非線形最小二乗法と最尤推定法を用いてこの疑似データセットから共鳴周波数 f_0 の推定を行い、 f_0 のシフト量から NV センター周囲の温度を推定した (Fig. 1)。本発表では、各総測定時間における推定値の変化などから最尤推定法による高速・高感度温度計測性能向上の可能性について議論する。なお、本研究は科研費 (22H01921, 23H00169) の助成を受けた。

参考文献： [1] Kucsko, G. et al. Nature 500, 54–58 (2013). [2] S. Choe, J. et al. Curr. Appl. Phys. 18, 1066–1070 (2018). [3] P. Neumann. et al. Nano Lett. 13, 2738–2742 (2013).

シミュレーション：共鳴周波数 2866MHz の Ramsey 測定

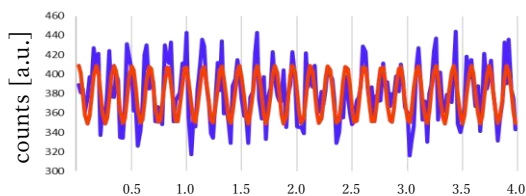


非線形最小二乗法：

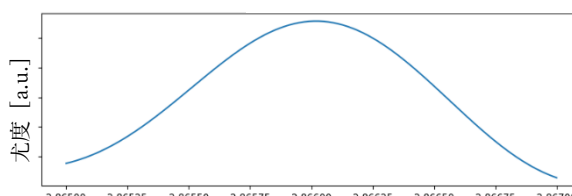
2866.259 MHz

最尤法：

2866.019 MHz



Time [μs]
およそ 3°C の誤差



周波数 [GHz]
およそ 0.3°C の誤差

Fig.1 Differences in results based on analysis methods

ダイヤモンド NV⁻ 中心における励起三重項ゼロ磁場分裂の圧力応答測定

Pressure Dependent Zero-Field Splitting in the Excited Triplet State of Diamond NV⁻ Centers



東大理物¹, 阪大基極セ², 東大知の物理³, 東大 TSQS⁴

○(DC)須田 涼太郎¹, 瓜生 健心², 山本 航輝¹, 佐々木 岬²,

佐々木 健人¹, 榮永 茉莉², 清水 克哉², 小林 研介¹³⁴

Dept. Phys. UTokyo¹, KYOKUGEN UOsaka², IPI UTokyo³, TSQS UTokyo⁴

○(DC)Ryotaro Suda¹, Kenshin Uriu², Kouki Yamamoto¹, Misaki Sasaki²,

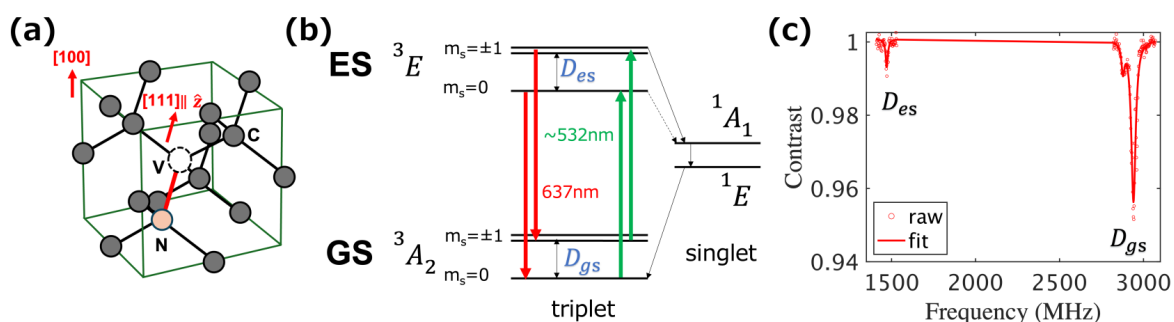
Kento Sasaki¹, Mari Einaga², Katsuya Shimizu² and Kensuke Kobayashi¹³⁴

E-mail: ryotaro.suda@phys.s.u-tokyo.ac.jp

ダイヤモンド中の欠陥である窒素-空孔 (nitrogen-vacancy, NV) 中心 (図 (a)) は、光検出磁気共鳴 (optically detected magnetic resonance, ODMR) を利用して磁場および圧力を高空間分解能で平面的に計測出来る量子センサとして物性物理実験に広く用いられている。とりわけ高压物性の分野では、ギガパスカル (GPa) 級圧力下における磁化ならびに圧力分布の可視化手段として有効に活用されてきた[1,2,3,4]。

ODMR では、532 nm 光励起下で NV⁻ 中心のスピン依存非輻射遷移(³E → ¹A₁)を利用し、マイクロ波共鳴を蛍光強度のディップとして検出する (図 (b,c))。常圧下の三重項準位のゼロ磁場分裂は、基底状態 (ground state, GS) で、 $D_{gs} \approx 2.87$ GHz、励起状態 (excited state, ES) で $D_{es} \approx 1.42$ GHz であり、磁気量子数 $m_s = 0$ と $m_s = \pm 1$ の間の遷移に対応する (図(c))。高压下では D_{gs} が 14.6 MHz GPa⁻¹ の勾配で線形に増加することが複数グループにより報告されており[2,5,6]、この周波数シフトを指標として圧力を定量化できる [2, 4]。しかし、励起状態ゼロ磁場分裂 D_{es} の圧力依存性について測定例は未だない。

本研究では、未測定であった D_{es} の圧力依存性を実測し、励起状態 ODMR に基づく NV 中心の圧力センサとしての有用性を定量的に評価する。さらに、励起状態寿命測定を通じて非輻射遷移 ³E → ¹A₁ の遷移速度の圧力依存性を解明し、高压下 ODMR 計測の最適化指針となる知見を提示することを目的とする。



図(a):NV 中心の模式図 (b): NV 中心の光学遷移系 (c):ES,GS の ODMR 蛍光ディップ(7GPa,実測)

- [1] Yip, K. Y. et al., Science 366, 1355 (2019).
- [2] Hsieh, S. et al., Science 366, 6471 (2019).
- [3] Bhattacharyya, P. et al., Nature 627, 73 (2024).
- [4] Suda, R. et al., arXiv:2506.09058 (2025).
- [5] Doherty, M.W. et al. Phys. Rev. Lett. 112, 047601 (2014).
- [6] Barson, M. S. J. et al. Nano Lett. 17, 1496 (2017).

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.8】 6.2 カーボン系薄膜、KS1 固体量子センサ研究会のコードシェアセッション

[10p-N205-1~6] CS.8 6.2 カーボン系薄膜、KS1 固体量子センサ研究会のコードシェアセッション

[10p-N205-1]

[分科内招待講演] 量子応用を目指したワイドギャップ半導体光ナノ構造形成技術の開発

○岩本 敏^{1,2}、石田 悟己¹、松清 秀次²、池 尚玖²、大槻 秀夫²、西岡 政雄²、Pholsen Natthajuks²、石原 照也²、神野 莉衣奈¹、飯嶋 航大¹、全 濟旭¹、豊島 慶大¹ (1.東大先端研、2.東大生研)

[10p-N205-2]

カラーセンタのスピン制御のための小型マイクロ波導波路の開発

○遠山 晴子¹、田原 康佐¹、池田 太郎¹、田中 宏哉¹、三浦 篤志¹、田村 伸一¹、Villamin Maria Emma²、沼田 敏典²、岩田 直高²、山崎 雄一³、大島 武^{3,4}、朽木 克博¹、飯塚 英男¹ (1.豊田中研、2.豊田工大、3.量研、4.東北大)

[10p-N205-3]

近赤外吸収型ダイヤモンド量子磁気センサに向けた集積光共振器系の検討

○高田 晃佑^{1,2}、勝見 亮太^{1,2}、八井 崇^{1,2} (1.豊橋技科大、2.東大院工)

[10p-N205-4]

ソリッドイマージョンレンズによるダイヤモンドの中の鉛-空孔センターの蛍光強度増強

○平井 紅陽¹、陳 溢暘¹、谷口 尚²、宮川 仁²、小野田 忍³、波多野 睦子¹、岩崎 孝之¹ (1.東京科学大、2.NIMS、3.QST)

[10p-N205-5]

誘電体共振器-マイクロストリップライン結合系のマイクロ波共鳴の制御とラビ振動

○(M2)塙 和真¹、東 勇佑¹、渡邊 幸志²、柏谷 聡³、野村 晋太郎¹ (1.筑波大数理物質、2.産総研、3.名古屋大工)

[10p-N205-6]

ダイヤモンド色中心とスローライト導波路の光結合の実現

○車 一宏^{1,2}、W. Ding Sophie¹、Jin Chang¹、Guo Xinghan³、Haas Michael¹、Li Zixi³、Korzh Boris⁴、Beyer Andrew⁴、Shaw Matt⁴、A. High Alexander^{3,5}、Lončar Marko¹ (1.Harvard University、2.東大先端研、3.Univ. of Chicago、4.California Inst. of Tech.、5.Argonne Natl. Lab.)

量子応用を目指したワイドギャップ半導体光ナノ構造形成技術の開発

Development of Fabrication Technologies for Photonic Nanostructures Based on Wide-Bandgap Semiconductors toward Quantum Applications

東大先端研¹, 東大生研² ○岩本敏^{1,2}, 石田悟己¹, 松清秀次², 池尚玫², 大槻秀夫²,
西岡政雄², Pholsen Natthajuks², 石原照也², 神野莉衣奈¹, 飯嶋航大¹, 全濟旭¹, 豊島慶大¹
RCAST, Univ. Tokyo¹, IIS, Univ. Tokyo², °Satoshi Iwamoto¹, Satomi Ishida, Hidetsugi Matsukiyo,
Sangmin Ji, Hideo Otsuki, Masao Nishioka, Natthajuks Pholsen, Teruya Ishihara, Riena Jinno,
Koudai Iijima, Jewook Jeon, and Keidai Toyoshima
E-mail: iwamoto@iis.u-tokyo.ac.jp

固体中の色中心は、良質な固体量子光源、量子ビットとして機能し得るため、広く研究されている。なかでも、ワイドギャップ半導体は、その大きなバンドギャップに起因して安定した色中心の電子状態、スピン状態が得られやすいこと、半導体としての特徴を活かした制御も可能であることから、量子応用に適した色中心のホスト材料として有望である[1]。これまでに、ワイドギャップ半導体であるダイヤモンド[2]や SiC[3]などがもつ色中心について、精力的に研究されてきた。また、最近では、1.3 μm 帯で発光する色中心を有する酸化ガリウム[4]も注目を集めつつある。

これらの色中心を、高機能・高性能な量子光源あるいは量子ビットとして活用するためには、微小共振器をはじめとする各種フォトニックナノ構造の活用が重要となる。また、これらのフォトニック構造は、量子応用に限らず、集積フォトニクス技術の観点からも必須の基本要素である。しかし、ワイドギャップ半導体の高精度ナノ加工は一般に容易ではなく、高品質なフォトニックナノ構造の実現は課題の一つとなっている。特に国内では、一部においてその技術開発が進んでいる[5,6]ものの、その研究は限定的であり、更なる技術開発とその活用の拡がりが期待される。

我々のグループでは、シリコンや GaAs などについて培ってきたフォトニックナノ構造形成技術を基礎に、多くのメンバーが携わり、ワイドギャップ半導体フォトニックナノ構造の形成技術開発を進めている。これまでにダイヤモンドフォトニック結晶ナノビーム共振器の実現に成功し、共振器 Q 値 $\sim 2,000$ を達成している[7]。また、酸化ガリウムを用いた光導波路の実現[8,9]、フォトニック結晶構造の作製[10]なども報告している。本講演では、ワイドギャップ半導体の高精度ナノ加工の難しさ、我々のアプローチと最新の成果を紹介するとともに、量子技術における加工技術の重要性を議論する。

謝辞: 本研究は、JST Moonshot R&D (JPMJMS2062)、総務省グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発 (JPMI00316)、科研費 (22H00298, 22H04962, 22K14286, 25K17958)、上廣 UTokyo 先端研支援プログラムなどの支援により実施されたものである。ダイヤモンドに関しては、横浜国立大学・小坂英男氏、馬場俊彦氏、産業技術総合研究所・牧野俊晴氏、加藤宙氏をはじめ、多くの方々から貴重なご助言とご支援をいただいた。また、酸化ガリウムに関しては、東京大学・深津晋氏、NIMS・大島孝仁氏より有益なご助言と示唆をいただいた。

参考文献: [1] J. R. Weber, *et al.*, PNAS **107**, 8512 (2010). [2] C. Bradac *et al.*, Nat. Commun. **10**, 5625 (2019). [3] S. Castelletto and A. Boretti, J. Phys. Photonics **2**, 022001 (2020). [4] J. E. Stehr, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **124**, 042104 (2024). [5] R. Katsumi *et al.*, Commun. Mater. **6**, 49 (2025). [6] B.-S. Song *et al.*, Opt. Express **19**, 11084 (2011). [7] Ji 他、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-A32-8 (2024). [8] 飯嶋他、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-A22-12 (注目講演に選出)(2024). [9] 豊島他、本応物講演会(2025). [10] 全他、本応物講演会(2025).

カラーセンタのスピンの制御のための小型マイクロ波導波路の開発

Development of a compact microwave waveguide

for manipulating spin states of color centers

豊田中研¹, 豊田工大², 量研³, 東北大⁴ ○遠山晴子¹, 田原康佐¹, 池田太郎¹, 田中宏哉¹,
三浦篤志¹, 田村伸一¹, Maria Emma Villamin², 沼田敏典², 岩田直高², 山崎雄一³, 大島武^{3,4},
朽木克博¹, 飯塚英男¹

Toyota Central R&D Labs., Inc.¹, Toyota Technological Institute², QST³, Tohoku Univ.⁴, ○Haruko

Toyama¹, Kosuke Tahara¹, Taro Ikeda¹, Hiroya Tanaka¹, Atsushi Miura¹, Shin-ichi Tamura¹,

Maria Emma Villamin², Toshinori Numata², Naotaka Iwata², Yuichi Yamazaki³, Takeshi

Ohshima^{3,4}, Katsuhiro Kutsuki¹, Hideo Iizuka¹

E-mail: Haruko.Toyama.zd@mosk.tytlabs.co.jp

近年、ダイヤモンド窒素空孔 (NV) センタをはじめとする固体結晶中のカラーセンタを応用した量子センシングが精力的に研究されている。カラーセンタのスピンの状態を精密に操作するためには、マイクロ波を所望の向きに効率的に印加する技術が重要である。これまでに、広範囲イメージングに適した空間均一性の高いアンテナ構造[1]や、広周波数帯域で使える平面導波路構造[2]が提案されてきた。しかし、これらの平面型マイクロ波印加機構では、カラーセンタの光学測定ができる領域ではマイクロ波磁場の向きがほぼ面直となり、ダイヤモンド(111)中の NV センタやシリコンカーバイド SiC(0001)中のシリコン空孔 (V_{Si}) など、スピン量子化軸が面直方向のスピンの効率的な操作が困難であった。さらに、カラーセンタによる量子センサを半導体デバイスに内蔵させるといった実用的な応用のためには、小型化と実装の容易性が求められる。

本研究では、線路幅が数 100 μm まで小型化できるコプレーナ導波路において、信号線路中に細いスリットを設けることで、面内方向を向いたマイクロ波磁場を有効に印加し、カラーセンタのスピン操作ができることを実証した[図 1(a)]。電磁界シミュレーションの結果、スリットはマイクロ波の実効波長に対して十分に小さいため、マイクロ波の電磁場分布が受ける影響は少なく、スリット内部でマイクロ波磁場が面内方向を向くことが分かった。このスリットは励起光と発光のパスとして機能するため[図 1(b)]、カラーセンタ観察位置でマイクロ波磁場の面内方向成分が得られる点が、従来の平面導波路との大きな相違点である。設計した導波路の性能評価のため、4H-SiC(0001)基板表面にスパッタ成膜で導波路を設け、He イオン注入により V_{Si} を形成した SiC デバイスを作成し、光学測定を行った。講演では、光検出磁気共鳴 (ODMR) とラビ振動の測定結果についても詳細に説明する。

本研究は、内閣府 SIP プログラム「先進的量子技術基盤の社会課題への応用促進」(管理法人: 量研) によって実施された。

[1] K. Sasaki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 053904 (2016). [2] G. Fuchs *et al.*, Science **326**, 1520 (2009).

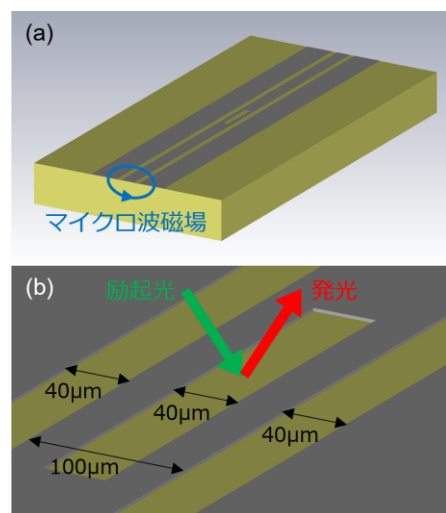


図 1, スリットを設けたコプレーナ導波路の概略。(a) 全体像と(b) スリット近傍の拡大像。

近赤外吸収型ダイヤモンド量子磁気センサに向けた 集積光共振器系の検討

Integrated diamond photonic cavities for absorption-based quantum magnetometry

¹豊橋技科大, ²東大院工 [○]高田晃佑 ^{1,2}, 勝見亮太 ^{1,2}, 八井 崇 ^{1,2}

¹TUT, ²UT, [○]K. Takada^{1,2}, R. Katsumi^{1,2}, and T. Yatsui^{1,2}

E-mail: takada.kosuke.wu@tut.jp

ダイヤモンド中に点欠陥として存在する窒素－空孔（NV）中心はコヒーレンスの高いスピン状態を有しており、高感度な磁気センシングを可能とする¹。スピン状態の読み出しに近赤外でのレーザー光吸収を活用する場合、従来の可視蛍光検出を通じた方式と比較して高い光強度での読み出しが期待され²、さらに光共振器の導入により 100 %近いコントラストの実現が提唱されている³。しかし Fabry-Perot 型を採用した従来の系においては近赤外プローブ光と共振器との結合制御が難しい他、マイクロ波磁場の空間的不均一性などから、理論提唱にあるコントラストを実験的に達成するのは困難であった。そこで本発表では、ダイヤモンドから成る微小共振器とバス導波路とのエバネッセント結合に注目をし、高コントラストな光吸収ベースのスピン読み出し方式を検討する。同方式では集積フォトニクスに倣ったセンサーのコンパクト化も可能である⁴。

図 1(a)に従来の Fabry-Perot 型共振器系を、図 1(b)に集積光共振器系をそれぞれ示す。プローブ光－共振器間の共鳴を仮定し、両者の入出力比を結合モード理論で記述すれば次式となる。

$$\left| \frac{I_{out}}{I_{in}} \right| = \left(\frac{\gamma_{cav} + \gamma_{abs}(\Omega) - \gamma_{wg}}{\gamma_{cav} + \gamma_{abs}(\Omega) + \gamma_{wg}} \right)^2 \quad (1)$$

このとき、NV 中心の近赤外吸収損失レート $\gamma_{abs}(\Omega)$ はマイクロ波周波数 Ω の掃引に対してスピン共鳴($\Omega = \Omega_{res}$)と対応した箇所でピークを示す。例えばスピン共鳴時に臨界結合条件が満たされると仮定すれば($\gamma_{wg} = \gamma_{cav} + \gamma_{abs}(\Omega_{res})$)、コントラスト 100 %の光検出磁気共鳴スペクトルが期待される³。図 1(b)の集積光共振器系では図 1(a)に対して入出力が物理ポートで切り分けられ、バス導波路の透過パワーを通じた方式によりデバイス実装が容易である。実験的なレートモデルを元に $\gamma_{abs}(\Omega)$ を導出し、Q 値 10^6 ・体積 $1 \mu\text{m}^3$ の共振器に対してサブnT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の感度が得られた(図 1(c))。吸収飽和による高感度化の限界や光共振器の数値計算等、その他詳細は当日報告する。

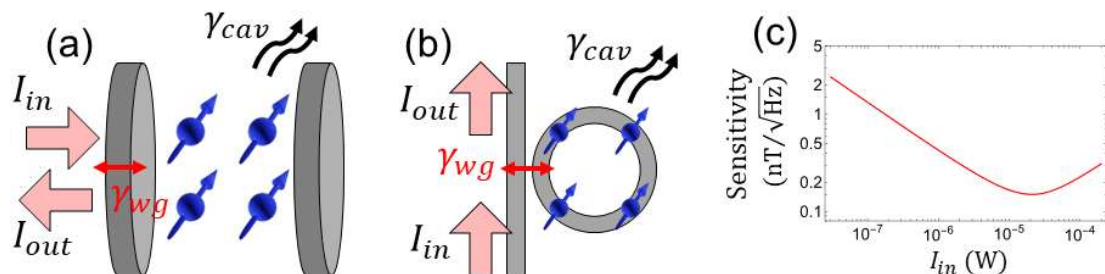


Fig. 1 (a) Fabry-Perot, and (b) integrated cavity systems. (c) Calculated sensitivity to magnetic fields.

参考文献 ¹J. F. Barry, *et al.*, Phys. Rev. Appl. **22**, 044069 (2024). ²V. M. Acosta, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 174104 (2010). ³Y. Dumeige, *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 155202 (2013). ⁴R. Katsumi, *et al.*, Commun. Eng. **4**, 85 (2025). **謝辞** MEXT Q-LEAP (JPMXS0118067395)、科研費(23K22795, 23KK0268, 25K01261, 25K01693, and 25KJ1447)、さきがけ(JPMJPR24F1)、旭硝子財団、内藤科学技術振興財団、丸文財団研究助成金、日比科学技術振興財団、日本板硝子材料工学助成会、村田学術振興財団、天野工業技術研究所

ソリッドイマージョンレンズによるダイヤモンドの中の鉛-空孔センターの蛍光強度増強

Enhancement of fluorescence intensity from a lead-vacancy center in diamond using SIL

東京科学大¹, NIMS², QST³ ○平井紅陽¹, 陳溢暘¹, 谷口尚², 宮川仁²,

小野田忍³, 波多野睦子¹, 岩崎孝之¹

Science Tokyo¹, NIMS², QST³ ○K. Hirai¹, Y. Chen¹, T. Taniguchi², M. Miyakawa²,

S. Onoda³, M. Hatano¹, T. Iwasaki¹

E-mail: hirai.k.01b8@m.isct.ac.jp

量子ネットワークの実現には優れた光学・スピン特性を持つ単一光子光源が必要であり、その有力候補の一つがダイヤモンド中のカラーセンターである。窒素-空孔センター (NV) では、ソリッドイマージョンレンズ (SIL) をダイヤモンド表面上に形成することで蛍光強度の増強が報告されている[1]。近年IV族-空孔センターが注目を浴びるようになり、その中でもより高温においても優れた特性を示すことが報告されている鉛-空孔センター (PbV) [2]は、量子ネットワークの応用にとって重要な量子系である。しかしながら、PbV センターに関して蛍光強度を増強させた報告はされていない。本研究では、PbV センターを内包した SIL を作製することで、PbV センターで初めて蛍光強度の大幅な増強を観測した。

IIa(001)単結晶ダイヤモンド基板に鉛イオンを 4.5 MeV で注入後、2200℃の高温高压アニール処理を行うことで高品質な PbV サンプルを作製した。その後、集束イオンビーム (FIB) を用いてサンプル表面上に SIL を形成することで、蛍光収集効率の向上を図った。試料をクライオスタット内に設置することにより約 6 K で光学測定を行った。

Fig. 1 は 32° の角度から観察したダイヤモンド SIL の走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像であり、本研究では 1 つの領域に 63 個の SIL を配列させた。ダイヤモンド SIL の高さは約 500 nm であり、これは 4.5 MeV で注入される鉛イオンの飛程をもとに設計されている。直径は約 1100 nm であり、半球状に近づけるために決定された値となっている。Fig. 2 は、SIL 内の高輝度な PbV に対して、HBT 測定を行った結果である。 $g^{(2)}(0)$ は 0.5 を下回っており、この PbV が単一光子光源であることがわかる。さらに、この PbV について飽和励起レーザーパワーを測定することで、蛍光強度の増強を調査した (Fig. 3)。Fig. 3 の結果は SIL のない先行研究[2]に比べ数倍の蛍光強度であり、SIL による蛍光収集効率の改善を示唆している。

本研究は、JSPS 科研費 JP22H04962、文部科学省 Q-LEAP フラッグシッププログラム (No. JPMXS0118067395)、JST ムーンショット型研究開発事業(JPMJMS2062)の助成により行われた。また、本結果は東京科学大学 CFC 分析部門の設備提供により得られた成果である。

[1] M. Jamali, et al., Rev. Sci. Instrum. 85, 123703 (2014). [2] P. Wang, et al., ACS Photonics. 8, 2947 (2021).

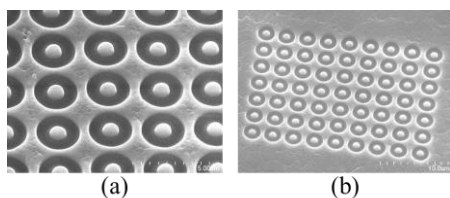


Fig. 1. SEM image of diamond SILs in 32° view. The SILs were fabricated in 9 × 7 arrays.

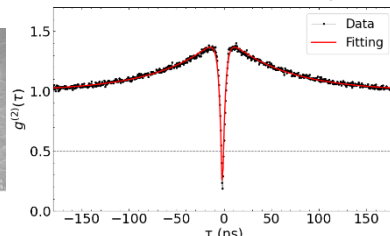


Fig. 2. HBT measurement of PbV in SIL.

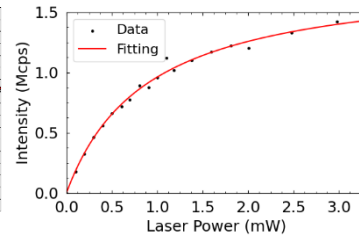


Fig. 3. Saturation curve for the target PbV. The background is not subtracted.

誘電体共振器-マイクロストリップライン結合系の マイクロ波共鳴の制御とラビ振動

Rabi oscillations in a dielectric resonator-microstrip line coupled system for the control of microwave resonance

筑波大数理物質¹, 産総研², 名古屋大工³

○(M2) 塙 和真¹, 東 勇佑¹, 渡邊 幸志², 柏谷 聡³, 野村 晋太郎¹

Univ. of Tsukuba¹, AIST², Nagoya Univ.³

○(M1) Kazuma Hanawa¹, Yusuke Azuma¹, Hideyuki Watanabe², Satoshi Kashiwaya³,
and Shintaro Nomura¹

E-mail: s2420189@u.tsukuba.ac.jp

ダイヤモンドNV中心電子スピン状態の制御のためにマイクロ波共振器が広く用いられている。私たちはこれまでにマイクロストリップライン平面マイクロ波共振器を用いてマイクロ波振幅を増強し、高いラビ振動数を得られることを示してきた[1]。本講演では、前回の講演[2]で報告した誘電体共振器-マイクロストリップライン結合系をラビ振動測定によって評価した結果について報告する。誘電体共振器では、大きな比誘電率、低損失のドーナツ型の誘電体により電場を閉じ込め、中央の空洞に磁力線を集中させ、高い Q 値の共振器を構成することができる。外部からマイクロストリップラインを通じてマイクロ波を印加する。(図1) この誘電体共振器-マイクロストリップライン結合系とダイヤモンドNV中心電子スピンを結合させ、広い体積でマイクロ波が増強されていることを確認した。この系は非エルミートなハミルトニアンによって記述される量子系として取り扱われ、高いDC磁場感度をもつセンサーの構築に寄与することが期待されている。

誘電体共振器-マイクロストリップライン結合系の誘電体共振器上にシリコン板を設置した。ダイヤモンドチップの中心と誘電体共振器のドーナツ状の穴の中心とが一致するように、シリコン板の上にダイヤモンドチップを置いた。(図1)。この系においてダイヤモンド NV 中心電子スピンのラビ振動測定を行い、マイクロ波の振幅を観測した。その結果、マイクロストリップラインを通じて印加されたマイクロ波が誘電体共振器において増強され、誘電体共振器上に設置したダイヤモンド NV 中心アンサンブルのスピン制御に寄与していることが示された。当日は、これらの結果について議論する。

[1] G. Mariani et al., Sci. Rep. **10**, 4813 (2020).

[2] 塙和真他、第72回応用物理学会春季学術講演会, 17a-K502-8.

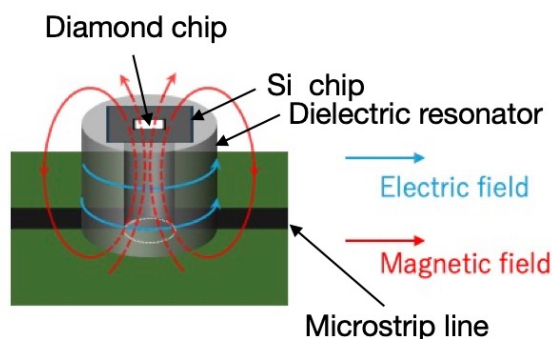


Fig. 1 Schematics for controlling the electron spin of diamond NV centers using a dielectric resonator coupled with a microstrip line.

ダイヤモンド色中心とスローライト導波路の光結合の実現

Demonstration of optical coupling of diamond color centers to slow-light waveguides

Harvard Univ.¹, 東大先端研², Univ. of Chicago³, California Inst. of Tech.⁴ Argonne Natl. Lab.⁵,

○車一宏^{1,2}, Sophie W. Ding¹, Chang Jin¹, Xinghan Guo³, Michael Haas¹, Zixi Li³, Boris Korzh⁴,

Andrew Beyer⁴, Matt Shaw⁴, Alexander A. High^{3,5}, and Marko Lončar¹

Harvard Univ.¹, RCAST, Univ. of Tokyo², Univ. of Chicago³, California Inst. of Tech.⁴, Argonne Natl. Lab.⁵,

○K. Kuruma^{1,2}, S. W. Ding¹, C. Jin¹, X. Guo³, M. Haas¹, Z. Li³, B. Korzh⁴, A. Beyer⁴, M. Shaw⁴,

A. A. High^{3,5}, and M. Lončar¹

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

Diamond color centers are a promising platform as spin-photon interfaces in various quantum applications, including quantum memories and single-photon sources. To boost the optical performance of color centers, their integration into photonic nanostructures such as nanocavities has been demonstrated [1]. Slow-light waveguides are also a promising photonic platform, as they enable broadband optical coupling with color centers while enhancing their spontaneous emissions via the slow-light effect. Here, we experimentally demonstrate optical coupling between diamond color centers and slow-light photonic crystal (PhC) waveguides. We fabricate fully suspended 2D PhC waveguides on thin-film diamond [2] and observe Purcell-enhanced emissions from color centers coupled to the waveguide modes [3].

Figure 1(a) shows a scanning electron microscope (SEM) image of a PhC waveguide fabricated in a thin-film diamond containing silicon-vacancy (SiV) centers. The slab thickness, lattice constant, and hole radius are 160 nm, 261 nm, and 65 nm, respectively. We performed photoluminescence (PL) measurements on the SiV centers in the fabricated waveguide. Figure 1(b) shows the measured PL spectrum of one of the SiV centers, exhibiting four optical transition peaks around 737 nm (A–D). We then conducted time-resolved PL measurements for the SiV center in the waveguide. The observed lifetime of the SiV center in the waveguide is shorter than that of typical bulk SiVs (~1.7 ns), suggesting that spontaneous emission is enhanced due to the slow light effect. Figure 1(d) summarizes the measured PL lifetimes for SiV centers in waveguides and in the slab. The PL lifetimes in waveguides tend to be shorter than those in the slab, indicating the observation of Purcell-enhanced emissions from the SiV centers by the optical coupling with slow-light waveguide modes.

References [1] A. Faraon *et al.*, Nat. Photonics 5, 301 (2011). [2] S.W. Ding *et al.*, Nat. Commun. 15, 6358 (2024). [3] S.W. Ding *et al.*, arXiv:2503.01149 (2025).

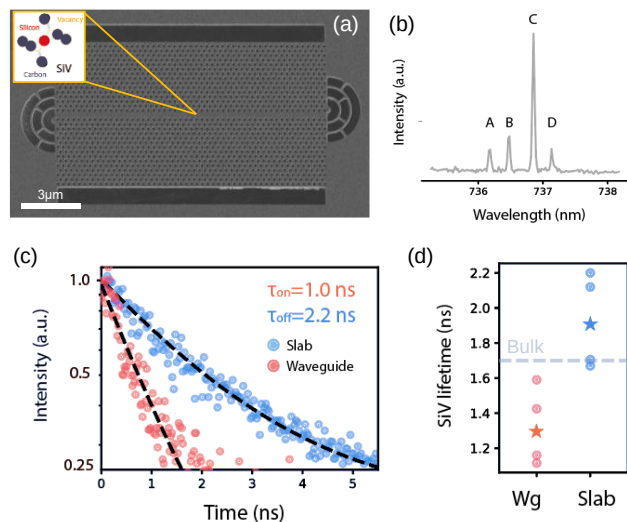


Fig.1. (a) SEM image of a fabricated PhC waveguide with single SiV centers. (b) Measured PL spectrum of a SiV center in a waveguide. (c) Time-resolved PL spectra of SiV centers in a waveguide (red) and in a slab (blue). (d). Summary of measured SiV lifetimes in the waveguide (red) and slab (blue), respectively.

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.9】 6.5 表面物理・真空、7.5 原子・分子線およびビーム関連新技術のコードシェアセッション

[9a-N401-1~11] CS.9 6.5 表面物理・真空、7.5 原子・分子線およびビーム関連新技術のコードシェアセッション

[9a-N401-1]

価電子帯HAXPESによる酸化物中のサブパーセント量の酸素欠損の分析

中村 雅基¹、住田 弘祐²、○鈴木 哲¹ (1.兵庫県立大、2.マツダ(株))

[9a-N401-2]

AFMリソグラフィーと二次元炭素材料アシストエッチングを利用したシリコンナノ構造体の作製

○(M2)三浦 有貴¹、宇都宮 徹¹、一井 崇¹ (1.京大院工)

[9a-N401-3]

Ni(111)表面上の単層h-BN膜におけるCOとH₂Oの反応性

○安藤 雅晃¹、Carraro Giovanni²、Savio Letizia²、Bracco Gianangelo^{2,3,5}、Rocca Mario^{2,3}、岡田 美智雄^{1,4}、Vattuone Luca^{2,3,5} (1.阪大院理、2.IMEM-CNR Genoa Unit、3.DIFI University of Genoa、4.阪大放射線機構、5.INAF Genoa Unit)

[9a-N401-4]

SiC(0001)表面上のSiNエピタキシャル超薄膜

○小野田 稔¹、安藤 寛²、Wolkow Robert³、Pitters Jason⁴、中川 剛志⁵、Viscovskiy Anton⁶、田中 悟⁶ (1.福岡教育大、2.光科学イノベーションセンター、3.アルバータ大、4.カナダ国立研究評議会、5.九大総理工、6.九大院工)

[9a-N401-5]

Si表面の協奏酸化反応機構:

少数キャリア捕獲過程のp-Si(001)/n-Si(001)比較

○(M1)岡部 優希¹、津田 泰孝²、Wen Hengyu¹、吉越 章隆²、高桑 雄二³、小川 修一¹ (1.日大生産工、2.原子力機構、3.東北大)

[9a-N401-6]

紫外線照射による多層カーボンナノチューブの欠陥形成

○(M2)荒木 一慶¹、前島 尚行¹、滝沢 優¹ (1.立命館大理工)

[9a-N401-7]

ペンタセン重合における原子状水素の効果

○中山 美咲¹、住友 弘二¹、部家 彰¹ (1.兵庫県立大)

[9a-N401-8]

光電子制御プラズマCVDによる窒素ドーパDLC合成: 放電様式依存

○(M1C)焉 域霖¹、関 理志¹、小川 修一¹ (1.日大生産工)

[9a-N401-9]

Siナノドット多重集積構造における電荷輸送特性

○(M1)窪田 遥斗¹、白 鍾銀¹、今井 友貴¹、田岡 紀之²、牧原 克典¹ (1.名大院工、2.愛知工大)

[9a-N401-10]

XPS Si 2pスペクトルと電気特性の相関から推定されるPECVD-SiO₂/Siの成長様式と界面準位低減の要因

○武田 さくら¹、Emilia Hashamova²、長谷川 菜¹、上沼 睦典³、宮尾 知幸¹、小野 直亮¹、浦岡 行治¹、船津 公人¹ (1.奈良先端大、2.カールスルーエ工科大、3.産総研)

[9a-N401-11]

超音速窒素分子・一酸化窒素分子ビーム照射によるハフニウム堆積Si(111)表面界面の窒化・酸窒化反応機構

○垣内 拓大¹、大浦 吉乃¹、高城 陽菜¹、津田 泰孝²、吉越 章隆² (1.愛媛大学理学部、2.原子力研究開発機構)

価電子帯 HAXPES による酸化物中のサブパーセント量の酸素欠損の分析

Analysis of Subpercentage Oxygen Vacancies in Oxides by Valence Band HAXPES

兵庫県立大高度研¹, マツダ (株)² 中村 雅基¹, 住田 弘祐², °鈴木 哲¹

LASTI, Univ. of Hyogo¹, Mazda Motor Corp.², Masaki Nakamura¹, Hirosuke Sumida²,

°Satoru Suzuki¹

E-mail: ssuzuki@lasti.u-hyogo.ac.jp

【緒言】金属酸化物の微量な酸素欠損の定量は一般に容易ではなく、これは光電子分光法を用いる場合にも例外ではない。本研究では、酸素欠損に伴って占有される金属の外殻電子を価電子帯硬 X 線光電子分光 (HAXPES) によって直接観測する方法を提案する。ここでは、HAXPES の金属の外殻軌道に対する感度が相対的に非常に大きくなることを利用している。SnO₂ および WO₃ に生成したサブパーセント量の酸素欠損の分析結果について報告する。¹⁾

【実験】市販の SnO₂ および WO₃ 粉末を試料とした。~1000 Pa の O₂ および 1% H₂ (N₂ ベース) ガス雰囲気中の HAXPES 測定 (励起光エネルギー: 8 keV) を SPring-8 の BL24XU に設置された準大気圧 HAXPES ステーションを用いて行った。

【結果と考察】SnO₂ の Sn は基本 4 価であるが、酸素欠損が生じると 2 価の Sn 成分が生成すると考えられる。300°C に加熱した SnO₂ の Sn 3d および 4d スペクトルを O₂ および H₂ 雰囲気中で測定したが、いずれも 2 価の Sn 成分は検出限界以下であった。ところが図 1 に示すように、価電子帯スペクトルには、還元性の H₂ 雰囲気でのみ 2 価の Sn で占有される Sn 5s 成分が観測された。ここで我々の HAXPES 測定条件では、Sn 5s に対する感度が価電子帯を主に形成する O 2p に対して ~2700 倍大きいことを利用している。観測された Sn 5s と Sn 3d 強度と Yeh ら²⁾ による励起断面積の計算値から H₂ 雰囲気中での酸素欠損率を求めると ~0.3% という値が得られた。Sn 3d に代えて Sn 4d 強度を用いて求めた酸素欠損率もほぼ同じ ~0.3% となった。また励起断面積の計算値は報告によって異なるが、Trzhaskovskaya ら³⁾ の計算結果を用いても 0.4~0.6% とサブパーセントの酸素欠損率が得られた。当日は WO₃ の結果についても報告する。

1) M. Nakamura et al., Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 055505 (2025).

2) J. J. Yeh et al., At. Data Nucl. Data Tables **32**, 1 (1985).

3) M. B. Trzhaskovskaya et al., At. Data Nucl. Data Tables **119**, 99 (2018).

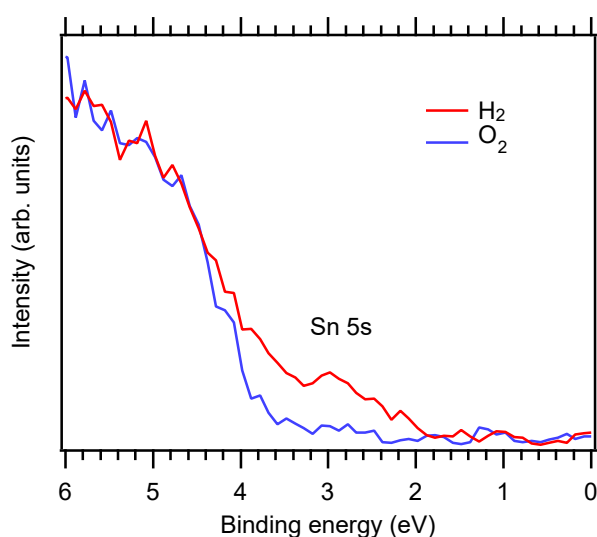


図 1 O₂ および H₂ 雰囲気中の SnO₂ の価電子帯 HAXPES。

AFM リソグラフィーと二次元炭素材料アシストエッチングを利用したシリコンナノ構造体の作製

Fabrication of Silicon Nanostructures Using AFM Lithography and 2-Dimensional Carbon Materials Assisted Etching

京大院工, °(M2) 三浦 有貴, 宇都宮 徹, 一井 崇

Kyoto Univ., °Yuki Miura, Toru Utsunomiya, Takashi Ichii

E-mail: miura.yuki.88c@st.kyoto-u.ac.jp

シリコン表面微細加工技術の1つとして貴金属や炭素材料を触媒として用いたアシストエッチングが知られている。当研究室では酸化グラフェン (Graphene Oxide: GO) を利用したシリコンナノ構造の作製手法としてマイクロコンタクトプリンティング法を利用した GO パターンの作製と気相エッチングによるマイクロピラー作製を報告した¹。この手法では, GO の正確な転写が実現せず, ピラーの形状が歪になるなどの問題点が挙げられた。

グラフェンなどの炭素材料の微細加工法の1つに AFM リソグラフィーが存在する。電子ビームリソグラフィーと異なり, 高価な装置を必要としない点や常温で実行可能な点が利点として挙げられる。現在はグラフェンナノデバイス作製への応用を目指し, 微細加工を行った研究が報告されている²。AFM リソグラフィーにはプローブ先端に電圧を印加することで局所的に電気化学反応を起こす手法と AFM プローブ探針で機械的にスクラッチする手法の2種類が存在する。今回我々は, より選択的なパターンニング技術としてこれら2種類の AFM リソグラフィーを用いて二次元炭素材料のパターンを作製し, パターンエッチングを行ったので報告する。

(100) 配向の p 型シリコン基板にグラファイトや GO シートを担持し, これらの一部を AFM リソグラフィーによって除去した。形状加工したシートを担持したシリコン基板をエッチング液の蒸気に暴露することでアシストエッチングを進行させ, シリコンナノ構造の作製を試みた。Fig. (a) はグラファイトシート面内に局所的に電気化学的反応を起こして 500 nm 四方の除去領域を形成したのちに気相エッチングを行ったシリコン基板の, Fig. (b) は GO シートの一部を直線状にスクラッチしたのちに気相エッチングを行った後のシリコン基板の SEM 像である。それぞれナノピラー構造, フィン構造の形成が確認できることから AFM リソグラフィーを用いた炭素材料の微細加工によってシリコンナノ構造体の作製が可能であることが示唆された。

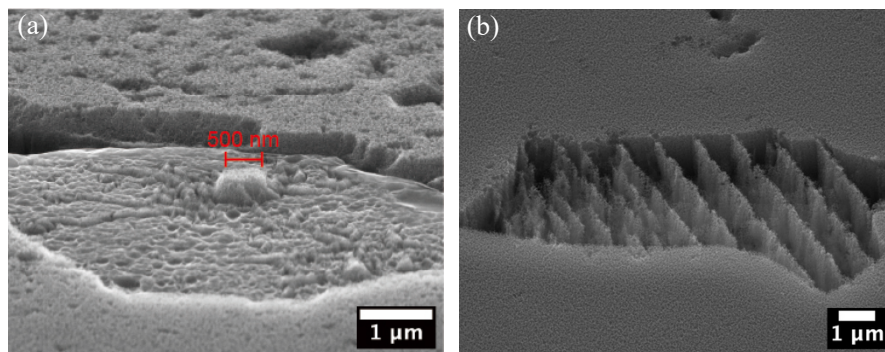


Fig. SEM images of Si substrate loaded lithographed (a) graphite (b) GO after vapor phase etching for 16 h.

参考文献 (1) Y. Goto, *et al.*, *Jpn.J.Appl.Phys.* **64**, 03SP60 (2025) (2) D-H. Lee, *et al.*, *Carbon* **96** 223(2016)

Ni (111) 表面上の単層 h-BN 膜における CO と H₂O の反応性

Reactivity of monolayer h-BN on Ni(111) with CO and H₂O

阪大院理¹, IMEM-CNR Genoa Unit², DIFI University of Genoa³, 阪大放射線機構⁴, INAF Genoa Unit⁵ ○(D)安藤 雅晃¹, G. CARRARO², L. SAVIO², G. BRACCO^{2,3,5}, M. ROCCA^{2,3}, 岡田 美智雄^{1,4}, L. VATTUONE^{2,3,5}

○(D)Masaaki ANDO¹, G. CARRARO², L. SAVIO², G. BRACCO^{2,3,5}, M. ROCCA^{2,3}, Michio OKADA^{1,4}, L. VATTUONE^{2,3,5}

U. Osaka¹, IMEM-CNR Genoa Unit², DIFI University of Genoa³, U. Osaka IRS⁴, INAF Genoa Unit⁵

E-mail: andom22@chem.sci.osaka-u.ac.jp

Monolayer films are of interest both as protective coatings of metals against oxidation as well as 2D catalysts[1]. Furthermore, they can be used to create a nano-reactor where intercalated species can react with lower activation barriers. Hexagonal boron nitride (h-BN) is one of such films exhibiting graphene-like structure but having larger thermal stability. Reactivity of h-BN on metal surfaces with simple molecules has mainly been the subject of computational studies[2] while experimental studies are rare. In this study, h-BN was produced on Ni(111) using ammonia borane and the adsorption of H₂O and CO was investigated. The experiments were performed in a UHV chamber with X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and high-resolution electron energy loss spectroscopy (HREELS).

No CO adsorption was detected both at -140 °C and at room temperature. Following exposure to H₂O ($p \approx 10^{-7}$ mbar) at -140 °C and annealing to RT oxygen adsorption was detected indicating water dissociation at the surface. For a closed film, the thermal stability of the so obtained oxygen species depends on the amount of oxygen present before the water uptake. For clean h-BN/Ni(111) only weakly adsorbed oxygen is found and the initial film state can be recovered after annealing to 700 °C.

On the contrary, in presence of pre-adsorbed oxygen, water dissociation leads to formation of oxygen species (possibly hydroxyls and boron oxide) which are stable up to at least 700 °C. As shown in fig. 1, the amount of oxygen increases performing further low temperature H₂O adsorption and annealing cycles.

For a not completely closed film for which edges are present, H₂O dissociation and boron oxide formation occur after H₂O adsorption at low temperature and annealing also in absence of pre-adsorbed oxygen.

<reference>

[1] W. Auwarter *Surf. Sci. Rep.* 2019, **74**, 1 [2] Y. Guo. *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015, **17**, 16428

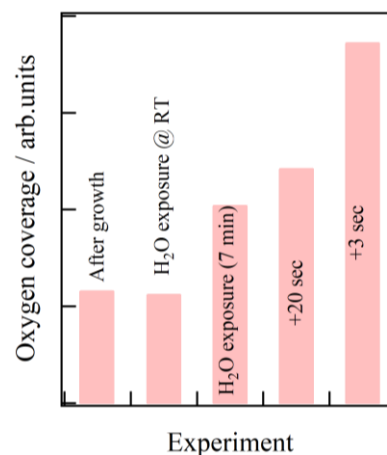


Fig. 1. Oxygen coverage in subsequent H₂O uptake at LT followed by annealing to RT and annealing cycles starting with an oxygen pre-covered h-BN layer.

SiC(0001)表面上の SiN エピタキシャル超薄膜

Epitaxial crystalline SiN layer on SiC(0001)

福岡教育大¹, 光科学イノベーションセンター², アルバータ大³, カナダ国立研究評議会⁴,九大総理工⁵, 九大院工⁶,○小野田 穰¹, 安藤 寛², Robert Wolkow³, Jason Pitters⁴,中川 剛志⁵, Anton Viskovskiy⁶, 田中 悟⁶UTEF¹, PhoSIC², Univ. Alberta³, NRC⁴, Kyushu Univ. IGSES⁵, Kyushu Univ. Eng.⁶○Jo Onoda¹, Hiroshi Ando², Robert Wolkow³, Jason Pitters⁴,Takeshi Nakagawa⁵, Anton Viskovskiy⁶, Satoru Tanaka⁶

E-mail: onoda-j@fukuoka-edu.ac.jp

SiC 基板はワイドギャップ半導体であることから、長年、パワーデバイスとして研究開発が進められてきた。特に、SiC 基板表面にエピタキシャル成長したシリコン酸窒化(SiON)超薄膜は 8.3 eV のバンドギャップと大気中での化学的な安定性から注目を集めている[1, 2]。この構造は、上層の SiO 層(Si₂O₃)が Si-O-Si 架橋を介して下層の SiN 層(Si₂N₃)と結合している。我々は、この SiON 超薄膜の SiN 層と構造的に同型の SiN 超薄膜を SiC(0001)表面上にエピタキシャル成長させる方法を見出した。この表面では、最表面の Si 原子のダングリングボンドがハニカム格子状に並んでいるため、グラフェンのような興味深い物性が期待できる。

本講演では、SiN 薄膜の作製法、低速電子回折(LEED)による表面構造解析、および、走査トンネル顕微鏡(STM)による原子分解能観察の結果を報告する。図 1(a)は表面構造が既知の($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30°-Si($\sqrt{3}$ -Si と表記)と、本研究で見出した($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30°-SiN($\sqrt{3}$ -SiN と表記)の LEED パターンの比較であり、スポット強度の入手電子エネルギー依存性が異なることが分かる。LEED *I-V* 解析により構造決定したモデルを図 1(b)に示す。最表面の Si 原子は特徴的なハニカム格子を組んでおり、この特徴は STM によっても確認することができた(図 1(c))。

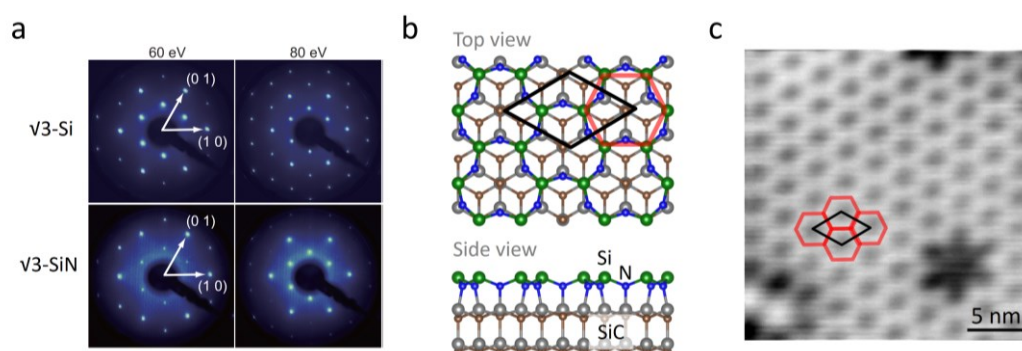


図 1. (a) $\sqrt{3}$ -Si と $\sqrt{3}$ -SiN の LEED パターン(入射電子エネルギーはそれぞれ 60 eV と 80 eV)、(b)構造決定した SiN 薄膜のモデル図、(c) SiN 薄膜の STM 像($V_s = 3.2$ V, $I = 20$ pA)

[1] T. Shirasawa et al., *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 136105. [2] B. G. Shin et al., *ACS Nano* **13** (2019) 6662.

Si 表面の協奏酸化反応機構： 少数キャリア捕獲過程の p-Si (001)/n-Si (001) 比較

Cooperative Oxidation Reaction Mechanism on Si surfaces: Comparison of Minority Carrier Trapping Processes between p-Si(001) and n-Si(001) Surfaces

日本大学¹, 日本原子力研究開発機構², 東北大学³

○(M1) 岡部 優希¹, 津田 泰孝², Hengyu Wen¹, 吉越 章隆², 高桑 雄二³, 小川 修一¹

Nihon Univ.¹, JAEA², Tohoku Univ.³

○(M1)Y. Okabe¹, Y. Tsuda², H. Wen¹, A. Yoshigoe², Y. Takakuwa³, S. Ogawa¹

E-mail: ciyu25010@g.nihon-u.ac.jp

Si 表面の協奏酸化反応モデルは(1)表面と界面の未結合手での O₂ 解離吸着の協奏[1]、(2)酸化誘起欠陥サイトでの一段階酸化 (Loop A) と二段階酸化 (Loop B) の協奏[1-3]、(3)一次反応 (Loops A/B) と 0 次反応 (Linear-Parabolic growth) の協奏[4]から構成され、酸化膜厚 X_O は式(1)となる。

$$X_O = A_A(1 - e^{-k_A t}) + A_B(1 - e^{-k_B t}) + \frac{1}{2} \left[-A + \sqrt{A^2 + 4B(t + \tau)} \right] \quad (1)$$

この協奏酸化反応モデル (Loops A/B & L-P growth) では、空孔サイトの活性化のため多数キャリア捕獲、SiO₂ 成長での電気的中性保持のために少数キャリア捕獲が必要とされる (過剰少数キャリア再結合)。さらに Loop A は少数キャリア捕獲なしで Loop B に分岐できる。そのため Loop A での SiO₂ 成長律速は少数キャリア捕獲となる。本研究では p-Si(001)と n-Si(001)表面の酸化過程をリアルタイム XPS で観察し、電子と正孔を比較して少数キャリア捕獲過程を解明した。

室温酸化による X_O を式(1)で解析すると、Loop A の飽和膜厚 A_A は n-Si で大きく、Loop B の A_B は p-Si で大きい (Fig. 1)。その結果分岐比 $A_A/(A_A + A_B)$ は p-Si で 0.54、n-Si で 0.59 となる。協奏酸化反応モデルによれば、この結果は正孔捕獲係数が電子捕獲係数より大きいことを意味する。多数キャリアを捕獲した V^+ は分子状吸着酸素 O₂²⁻(chem)と結合しており、これが少数キャリアの電子捕獲を低頻度とする原因である。その結果 p-Si では Loop A での成長よりは Loop B への分岐がもたらされる。L-P growth の開始オフセットと傾きは p-Si と n-Si でほぼ同じ値で、過剰少数キャリア再結合が関与しないことを意味している。その原因として Si-O 切断による未結合手の関与が考えられる。

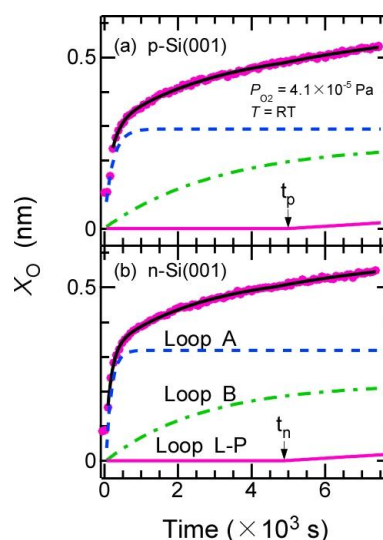


Fig. 1. Curve-fitting analysis of X_O by using a Loops A/B & L-P growth model: (a) p-Si(001) and (b) n-Si(001).

- [1] S. Ogawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, SM0801 (2020). [2] Y. Tsuda *et al.*, J. Chem. Phys. **157**, 234705 (2022). [3] Y. Tsuda *et al.*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **21**, 30 (2023). [4] H.M. Massoud *et al.*, J. Electrochem. Soc. **132**, 2685 (1985).

紫外線照射による多層カーボンナノチューブの欠陥形成

Defect Formation in Ultraviolet-Irradiated Multi-walled Carbon Nanotubes

立命館大理工, ○(M2)荒木 一慶, 前島 尚行, 滝沢 優

Ritsumeikan Univ. ○Ikkei Araki, Naoyuki Maejima, Masaru Takizawa

E-mail: rp0097xi@ed.ritsumei.ac.jp

カーボンナノチューブ (CNT) は優れた電気・機械特性を持ち、官能基や欠陥を導入することで活性を高め、ガス分子との結合力や電氣的応答性を向上させる手法が注目されている。グラフェンでは種々の雰囲気下での紫外線照射によって欠陥が発生することが分かっており[1]、紫外線照射という簡便な手法で機能的欠陥を導入できることは、CNT の応用拡大に向けた有効なアプローチであると考えられる。そこで本研究では、多層 CNT (MWCNT) に対し、紫外線を大気中で照射することで欠陥を導入し、その構造変化を X 線吸収微細構造 (XAFS) により解析した。

実験は立命館大学 SR センターBL-8 にて行った。市販の MWCNT シートに波長 172 nm のエキシマランプを用いて大気中で紫外線照射を行い、作製した試料の C K-edge および O K-edge XAFS 測定を行った。図 1 に紫外線照射を行っていない MWCNT 試料と、紫外線照射を 1 分間行った MWCNT 試料の C K-edge XAFS スペクトルを示す。紫外線照射を行っていない試料では $\sigma^*(\text{C}-\text{H})$ 遷移に由来する 287.2 eV のピークが確認されたが、紫外線照射を行った試料ではそのピークが消失し、新たに 288.1 eV に $\pi^*(\text{C}=\text{O})$ 遷移に由来するピークが出現した。さらに図 2 に示した紫外線照射前後の O K-edge XAFS スペクトルの変化から紫外線照射によって、試料中の酸素原子の量が増加したことがわかる。これらの結果より大気中での紫外線照射によって MWCNT を酸化して、 $\text{C}=\text{O}$ 基を導入できたことが分かった。

[1] G. Imamura and K. Saiki Chem. Phys. Lett., **587** (2013) 56.

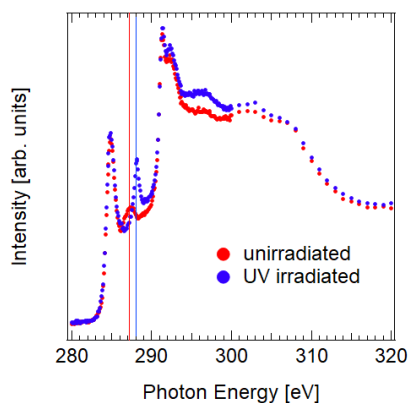


Fig.1 紫外線照射前後の MWCNT の C K-edge XAFS スペクトル

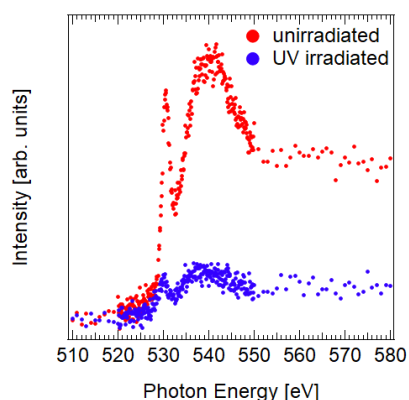


Fig.2 紫外線照射前後の MWCNT の O K-edge XAFS スペクトル

ペンタセン重合における原子状水素の効果

Effects of Atomic Hydrogen on Pentacene Polymerization

兵庫県立大工, [○]中山 美咲¹, 住友 弘二¹, 部家 彰¹

Univ. of Hyogo¹, Misaki Nakayama¹, Koji Sumitomo¹, Akira Heya¹

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

グラフェンナノリボン (GNR) は、グラフェンの熱伝導性や電子移動度などの優れた物性を引き継ぐと期待されており、GNR を半導体材料として利用することを試みている。我々は加熱触媒体と水素を用いたホットメッシュ堆積 (HMD) 法を採用し、ペンタセン (Pn) を重合させることによる GNR 合成技術の確立を目指している[1]。また、Pn が水素化して生成されるジヒドロペンタセン (DHP) は Pn が重合するために必要であり、Pn から DHP への過程において、Pn と原子状水素が気相中で反応する可能性を見出している[2]。本研究では、重合を促進する目的で、成膜中に Pn 供給箇所とは別箇所からも追加で原子状水素を供給し、そのときの膜質変化を評価した。

Fig. 1 に示す HMD 装置内で Pn (60 mg) を昇華させ、水素雰囲気中でチャンバー中央の加熱触媒体 W_P の温度を変えながら成膜を行った。別箇所の原子状水素供給用の加熱触媒体は 1700°C とした。HMD 法で作製した有機薄膜の光吸収スペクトルピーク位置の触媒体温度依存性を Fig. 2 に示す。別箇所から追加で原子状水素の供給を行っていない試料は、 W_P が 1400°C を超えると Pn が水素と反応し、DHP の生成が確認できた。一方、原子状水素の供給を追加した試料は、目視やラマンスペクトル形状の違いから W_P が低温 ($1200\sim 1400^{\circ}\text{C}$) の場合でも Pn とは異なる物質が生成されていることが分かった。また、別箇所から追加で原子状水素を供給した $W_P=1200^{\circ}\text{C}$ の試料からは、マトリックス支援レーザー脱離イオン化法 (MALDI) で Pn と DHP 以外に主に 360 付近と、僅かながら 890 付近の分子量の信号が検出された。

追加で原子状水素の供給を行うことで W_P が低温 ($1200\sim 1400^{\circ}\text{C}$) でも Pn の水素化が起こった。このように、原料 (Pn) の供給箇所とは異なる箇所から原子状水素を供給することで、Pn の水素化や Pn の前駆体の生成に影響を与えていることが示唆された。

[1] A. Heya, and N. Matsuo, Jpn. J. Appl. Phys, **57**, 04FL03 (2018).

[2] A. Heya, and N. Matsuo, Jpn. J. Appl. Phys, **51**, 110204 (2012).

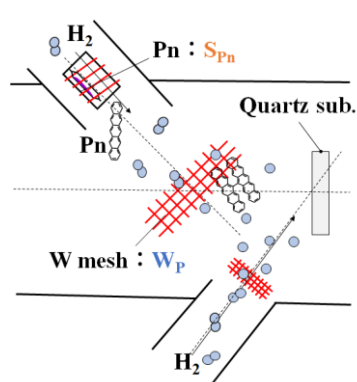


Fig. 1 Schematic of the HMD apparatus. Besides Pn supplying point, atomic hydrogen was supplied from another point.

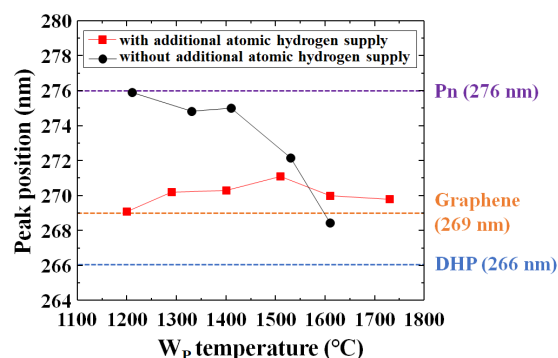


Fig. 2 W mesh temperature dependence of peak positions in light absorption spectra. A difference in dependence is observed with and without the supply of additional atomic hydrogen supply.

光電子制御プラズマ CVD による窒素ドーピング DLC 合成：放電様式依存

Synthesis of N-doped DLC using Photoemission Assisted Plasma CVD



日本大学, °(M1C) 焉 域霖, 関 理志, 小川 修一

Nihon Univ., °(M1C) Yulin Yan, Satoshi Seki, Shuichi Ogawa

E-mail: ciik25006@g.nihon-u.ac.jp

グラフェンは高いキャリア移動度を持つことからトップゲート FET のチャンネル応用が期待されている。グラフェン FET のゲート絶縁膜としてグラフェンへのダメージを抑制しながら成膜できる光電子制御プラズマ CVD で成膜した DLC 膜が検討されている[1]。一方で、ゲート絶縁膜には誘電率やバンドオフセット、絶縁耐性など制御すべきパラメータが多く存在し、これらを変調する方法として DLC への異種元素の導入が考えられる[2]。本研究では窒素ドーピングした DLC (N-DLC) を成膜することを目的とし、光電子制御プラズマにおける N-DLC の成膜条件探索を行った。また光電子制御プラズマはグロー放電とタウンゼント放電の 2 種類の放電モードがあるが、成膜条件の放電モード依存を比較した。

N-DLC の成膜は光電子制御プラズマ CVD 装置を用いて行った。原料ガスとして Ar、CH₄、N₂ の混合ガスを用いて N₂ 流量を 1~13 sccm の範囲で変化させた。Ar および CH₄ の流量は 85 sccm および 15 sccm で固定とし、圧力 200 Pa、基板設定温度 100℃で成長させた。成膜基板である Si ウェハに波長 172 nm の Xe*エキシマ紫外光を照射し、Si ウェハから放出される光電子をトリガとして光電子制御グロー放電およびタウンゼント放電を発生させた。

光電子制御グロー放電で Si 基板上に成膜させた N-DLC のラマンスペクトルを図 1(a)に示す。成膜中の放電電流は 7.5mA 程度であり、30 分間の成膜で十分な膜厚の DLC が成膜できていることを示す。一方、タウンゼント放電で成膜した基板のラマンスペクトルを図 1(b)、(c)に示す。両者において N₂ 流量が異なるため放電電流も異なるが、放電電流を成膜時間で積分した電荷量はほぼ同一に揃えた。N₂ 流量 7 sccm 相当のときはほとんど成膜されていない一方、N₂ 流量 1 sccm 相当のときはうっすらと DLC 由来の G バンドが観察できる。これは、タウンゼント放電領域の電子エネルギーでは CH₄ の解離衝突断面積よりも N₂ の電離衝突断面積の方が大きく、効率的な CH₄ 解離ができずに成膜速度が低下したためと考えられる。

[1] S. Takabayashi, *et al.*, *Diamond Relat. Mater.*, **22**, 118–123 (2012). [2] N. Urgan et al, *Physica B*, **698**, 416753 (2025).

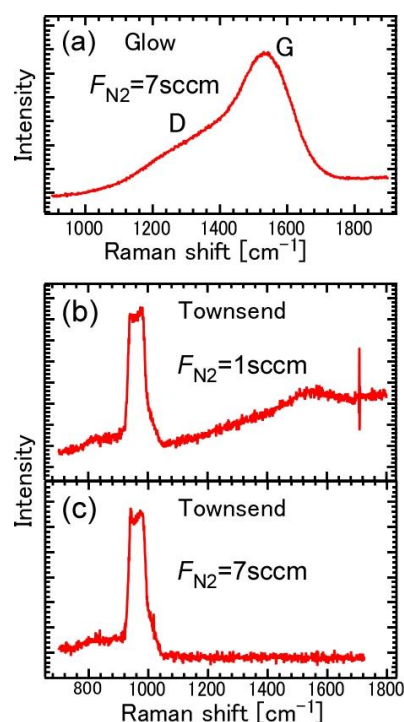


Fig.1. (a) Raman spectra of N-DLC grown by glow discharge, and (b)(c) Townsend discharge.

Si ナノドット多重集積構造における電荷輸送特性

Charge Transport Properties Through Multiple-Stacked Si Nano-Dots

¹名大院工,²愛知工大 ^{○1}窪田 遥斗,¹今井 友貴,¹白 鍾銀 ²田岡 紀之,¹牧原 克典¹Nagoya Univ., ²Aichi Inst. Tech. ^{○1}Haruto Kubota, ¹Imai Yuki, ¹Jongeun Baek,²Noriyuki Taoka, ¹Katsunori Makihara

E-mail: kubota.haruto.w5@s.mail.nagoya-u.ac.jp

序 Si ナノドット (Si-NDs) は、少数キャリアおよび少数フォトンの相互作用を高度な演算処理に活用可能なため、物理系リザーバーの候補として注目されている。これまでに我々は、熱酸化 SiO₂ 表面に SiH₄ ガスを用いた LPCVD により形成した Si-NDs の面内電子輸送特性を評価した結果、電荷保持・放出に起因したヒステリシスが明瞭に認められることを報告してきた[1]。本研究では、サイズを精密制御した Si-NDs の多重集積構造において電荷の過渡応答特性を評価した。

実験 1000 °C のドライ熱酸化によって p-Si(100)基板上に膜厚~35nm の SiO₂ 膜を形成した。その後、SiH₄-LPCVD により Si-NDs を自己組織化形成した。ドット形成後、800°C ドライ酸化によりドット表面を~1.8nm 酸化し、これらのプロセスを5回繰り返すことで、多重集積構造を形成した。LPCVD 時のガス圧力は100Pa、基板温度は580°Cおよび700Pa、490°Cとすることで、異なるサイズのドットを形成した。尚、SiH₄-LPCVD 後の表面形状像観察から、平均ドット高さは~16nm および~6.0nm であり、どちらの場合も Si ナノドットが高密度 (~10¹¹cm⁻²) に形成されていることを確認している。多重集積構造を形成した後、コプラナー型の Al 電極を真空蒸着法により形成した。電気伝導特性では、入力として 20V の矩形波を印加後に 1V に減少させた際の出力電流の時間変化を評価した。

結果および考察 平均ドットサイズ 6nm の試料に関する *I*-*t* 特性の結果から、暗状態では入力電圧の減少に対応して緩やかな減衰傾向が認められるものの、白色光照射時には電圧変化直後の急峻な減衰の後、暗状態と同じく緩やかな減衰が認められた (Fig.2(a))。一方、ドットサイズが 16nm の場合、暗状態および光照射時のいずれの場合においても 6nm の場合と比較して緩やかな減衰が認められた。尚、これらの減衰特性は速い過程と遅い過程の2成分に分離できることから、Double-exponential 関数によるフィッティング解析を行った。尚、時定数 τ_1 および τ_2 は、ドット内の量子準位を介して流れる電流 (捕獲電流) および隣接ドット間を流れる電流 (変位電流) に起因すると仮定した。捕獲電流成分については、非光照射時にはドットサイズに依らず τ_1 は概ね一定値を取るものの、光照射時にはドットサイズの増大による τ_1 の増大が認められた。これは、光励起キャリアがドット内に保持されることでドットの帯電エネルギーが増大とサイズの減少に伴うエネルギー不安定性の増大がバランスした結果、ドットからの放電が促進されたと解釈できる。変位電流成分については、非光照射時にはドットサイズの増大に伴う τ_2 の減少が認められた。また、光照射時には~6nm サイズのドットにおける τ_2 の顕著な減少が認められた。これは、サイズの小さいドットでは注入キャリアに対する電子捕獲率が低い一方、電子捕獲時の帯電エネルギーの増大に起因した電子のクーロン散乱により電子伝導が抑制された結果として考えられる。

結論 Si ナノドット多重集積構造の過渡電流応答特性から、ドットサイズの縮小化により応答性を改善できることが明らかとなった。

文献 [1] 窪田 他、第72回春季応用物理学会学術講演会、16p-P07-7 (2024)。

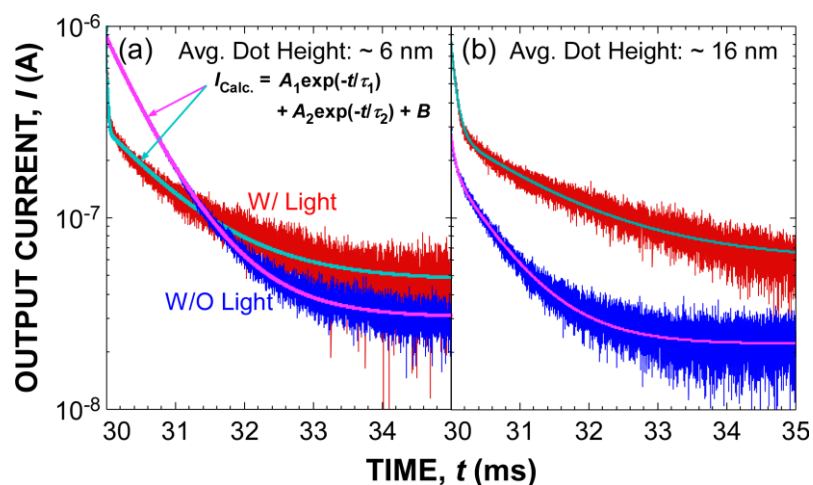


Fig. 1 Decay characteristics of output current with and without white light irradiation in the sample structures of multiple-stacked Si-NDs with average dot height of (a) ~6 nm and (b) ~16 nm.

XPS Si 2pスペクトルと電気特性の相関から推定されるPECVD-SiO₂/Siの成長様式と界面準位低減の要因

Growth Mode and Mechanism of Interface Trap Suppression in PECVD-SiO₂/Si

Deduced from Correlation between XPS Si 2p Spectra and Interface Trap Density

奈良先端大¹, カールスルーエ大², 産総研³ ○武田 さくら¹, Emilia Hashamova², 長谷川 菜¹,
上沼 睦典³, 宮尾 知幸¹, 小野 直亮¹, 浦岡 行治¹, 船津 公人¹

NAIST¹, KIT², AIST³, ○Sakura N. Takeda¹, Emilia Hashamova², Sai Hasegawa¹,

Mutsunori Uenuma³, Tomoyuki Miyao¹, Naoaki Ono¹, Yukiharu Uraoka¹, Kimito Funatsu¹

E-mail: sakura@ms.naist.jp

【背景と目的】PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) SiO₂/Si は低温プロセスとの親和性から、半導体デバイスへのさらなる応用が期待されている。近年、機械学習により、成膜パラメータの迅速な最適化が可能となったが^{1),2)}、その物理的背景は未解明である。本研究では、SiO₂/Si 界面の化学状態と電気的特性の相関から、最適化の物理的背景を抽出したので報告する。【実験】最適化過程で用いた4つの成膜条件で作製した10片のTEOS-PECVD-SiO₂ (50 nm) /Siを傾斜エッチングし、傾斜面上の異なる膜厚位置で、X線光電子分光(XPS)を行った(図1)。得られたデータをクレンジングし、C-V測定による界面準位密度(D_{it})と相関を持つ特徴量を調べた。【結果】Si 2p 4価(Si⁴⁺)と0価(Si⁰)のXPSピーク(図2)のエネルギー差(ΔE)は、膜厚の増加に伴って増加した後、1 nm付近で減少した。この減少はPECVD膜に特有のもので、熱酸化膜ではみられない。4 nmでのΔEは、D_{it}と負の相関を示し(図3)、D_{it}が大きい試料では4 nm以降、ΔEが再び増加に転じた。ΔEの変化は膜中の正負電荷に起因し、XPSの結果は、D_{it}が大きい試料では、界面近傍に高密度の負電荷が存在することを意味する。負電荷のシート電荷密度は、静電場解析から10¹²cm⁻²程度と推定され、PECVD SiO₂/Si界面で報告されている負電荷の値と同程度であった^{3),4)}。このため観測された負電荷は、既報^{3),4)}と同様にプラズマ酸化が支配的な膜中の過剰酸素によると考えられる。本研究で見いだされた、D_{it}と負電荷層の相関を、活性酸素の侵入長^{5),6)}と成長機構から考察する(図4)。1) K. Matsunaga, *et al.*, ACS Omega **8**, 27458 (2023). 2) S. Terai, *et al.*, SSDM 2020. 3) A. Boogaard, *et al.*, ECS Trans. **35**, 259 (2011). 4) N. M. Terlinden, *et al.*, J. Appl. Phys. **115**, 033708 (2014). 5) N. You *et al.*, Vacuum **207**, 111689 (2023). 6) S. Nunomura, *et al.*, Appl. Phys. Express **18**, 026002 (2025).

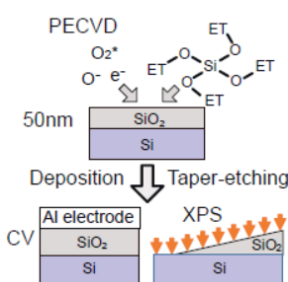


図1. 試料模式図

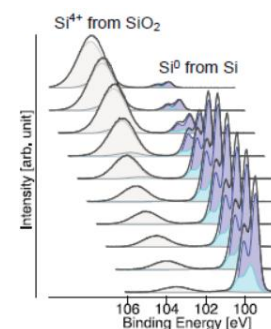


図2. XPS測定例

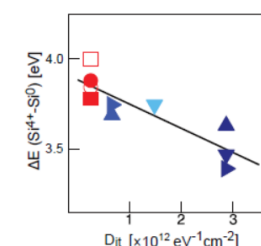


図3. ΔEとD_{it}の相関

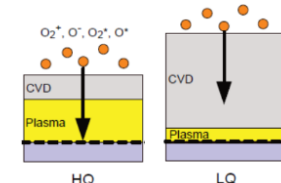


図4.成長模式図

超音速窒素分子・一酸化窒素分子ビーム照射による ハフニウム堆積 Si(111) 表面界面の窒化・酸窒化反応機構

Nitridation and Oxynitridation Mechanisms at Interface and Surface of Hf-Deposited Si(111) Induced by Supersonic Molecular Beams of N₂ and NO

愛媛大学理学部¹, 日本原子力研究開発機構²

○垣内 拓大¹, (B)大浦 吉乃¹, (B)高城 陽菜¹, 津田 泰孝², 吉越 章隆²

Ehime Univ.¹, JAEA.²,

○Takuhiko Kakiuchi¹, Yoshino Oura¹, Hina Takashiro¹, Yasutaka Tsuda², Akitaka Yoshigoe²

E-mail: kakiuchi.takuhiko.mc@ehime-u.ac.jp

シリコン (Si) 単結晶基板と二酸化ハフニウム (HfO₂) 超薄膜のデバイス積層構造の界面に窒化膜層を導入することは、誘電定数の劣化やリーク電流を抑制できると注目されている [1]。また、HfO₂ 中に僅かに窒素 (N) 原子を導入することで常誘電体から強誘電体への変化が報告されており、精密な窒素 (N) と酸素 (O) の濃度を調整した製膜技術が新たな材料科学の展開を切り開き得る [2]。本研究では、ハフニウム (Hf) が堆積した Si(111) 表面 [Hf-Si(111)] に対し、超音速窒素分子ビーム (SN₂B) および超音速一酸化窒素分子ビーム (SNOB) をそれぞれ照射し、窒化および酸窒化反応機構と表面界面の酸窒化物について放射光光電子分光法を用いて明らかにした。

実験は SPring-8 の BL23SU で行った。試料は、超高真空槽内で Si(111)-7×7 の清浄表面に対して電子線加熱法で発生させた Hf 蒸気を 2 ML (monolayer: 1 ML = 2.4 Å) 相当曝露して作製した。これに超高純度の N₂ および NO ガスを不活性ガスで希釈し超音速分子ビームとし、断続的に照射して反応させた。反応ガスを導入するたびに N 1s、O 1s、Si 2p、Hf 4f 内殻準位と価電子帯の光電子スペクトル (PES) を測定した。

FIG は、Hf-Si(111) に SN₂B (並進エネルギー = 2.0 eV) を照射した後に得られた (a) N 1s 内殻準位 (ピーク : 397.3 eV)、および (b) 価電子帯の PES である。 (b) には Si(111)-7×7 清浄表面の結果も示した。照射した窒素分子数は、最小 3.2×10^{18} ~ 最大 1.6×10^{19} 個/cm² である。これらの結果は、解離した窒素原子が Hf-Si(111) の Si 基板とのみ反応し、電荷移動を伴わず進行したことを示す。当日は、SNOB 照射による Hf-Si(111) の酸窒化反応についても報告する。

[1] R. Gupta *et al.*, *Solid State Sci.* **59**, 7 (2016)., [2] L. Xu *et al.*, *Appl. Phys. Express* **9**, 091501 (2016).

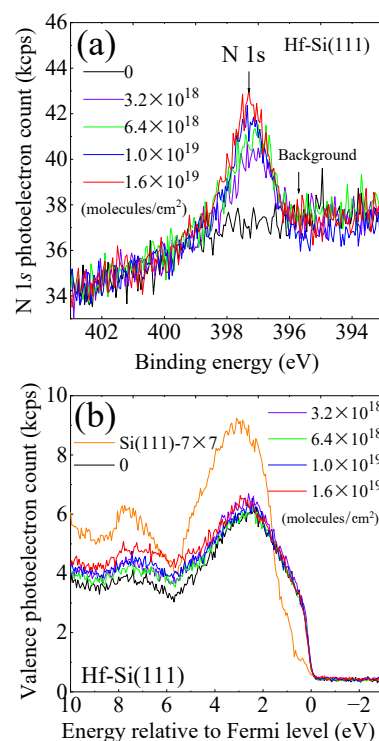


FIG. (a) N 1s and (b) valence photoelectron spectra obtained from Hf-Si(111) surface after irradiation with supersonic N₂ molecular beam.

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.9】 6.5 表面物理・真空、7.5 原子・分子線およびビーム関連新技術のコードシェアセッション

[9p-N401-1~15] CS.9 6.5 表面物理・真空、7.5 原子・分子線およびビーム関連新技術のコードシェアセッション

[9p-N401-1]

大気圧プラズマエッチングによるガラス表面ナノ構造制御と超撥水化

○(D)峰雪 序也^{1,2}、安田 興平²、林 泰夫²、東 清一郎¹ (1.広大院先進理工、2.A G C (株))

[9p-N401-2]

プラズモニックAuナノ粒子を用いたCO₂光還元触媒の最適化研究

○(M1C)野口 尚暉¹、内田 建¹、豊島 遼¹ (1.東大工)

[9p-N401-3]

Ag(111)面上における鎖状ナノカーボン物質生成の生成過程の検討

○(M2)倉敷 一真¹、黒川 修¹ (1.京大工)

[9p-N401-4]

水素プラズマ誘起ナノ構造がSi表面の撥水性に与える影響

○小林 幹太郎¹、坂本 健¹、尾上 潤¹、垣内 弘章¹、大参 宏昌¹ (1.阪大院工)

[9p-N401-5]

極薄a-Si/Ni/SOI積層構造の急速熱処理によるSiO₂上単結晶NiSi₂の形成

○今井 友貴¹、谷田 駿¹、山本 裕司^{2,1}、田岡 紀之³、牧原 克典^{1,2} (1.名大院工、2.IHP、3.愛工大工)

[9p-N401-6]

IV族系二次元原子層含有Ca(Ge_{1-x}Sn_x)₂ 結晶のSi基板上へのエピタキシャル成長

○寺田 吏¹、吉崎 高士¹、石部 貴史^{1,2}、中村 芳明^{1,2} (1.阪大院基礎工、2.阪大OTRI)

[9p-N401-7]

低速原子散乱分光法によるCoO薄膜の表面観察

○譚 ゴオン¹、福田 浩昭¹、金子 健太²、松田 晃史²、梅澤 憲司¹ (1.大阪公立大、2.東京科学大)

[9p-N401-8]

[分科内招待講演] 4H-SiC表面に対するNラジカル窒化過程の表面N密度飽和現象決定因子の実験的考察

○吉田 遥希¹、女屋 崇¹、田村 敦史¹、喜多 浩之¹ (1.東大院新領域)

[9p-N401-9]

新デバイス開発に向けた超高効率・微細領域分解の光電子顕微分光による世界先導研究

○菅 滋正¹ (1.阪大産研)

[9p-N401-10]

ダブルデッカー型イットリウム(III)—フタロシアニナト錯体カチオンの吸着に伴う基底状態変化に関する密度汎関数理論に基づく検討

○廣田 陸哉¹、多田 幸平^{1,2}、岸 亮平^{1,2,3}、北河 康隆^{1,2,3,4} (1.阪大院基礎工、2.阪大ICS-OTRI、3.阪大QIQB、4.阪大OTRI-Spin)

[9p-N401-11]

水素終端C(111)薄膜の誘電特性

○小林 隼人¹、住吉 晶¹、Betancourt Ranferi Cancino¹、佐藤 翔太¹、中村 淳¹ (1.電通大情報理工)

[9p-N401-12]

2次元多層構造におけるプラズモンの理論

○市川 昌和¹ (1.東大院工)

[9p-N401-13]

光の入射方向で変わるルチルTiO₂酸素空孔の2光子吸収確率

○加藤 弘一¹、福谷 克之¹ (1.東大生研)

[9p-N401-14]

チャープした放射光電場波形の測定

○藤 貴夫¹、田中 隆次²、金安 達夫³、貴田 祐一郎⁴、今村 慧⁴、橋本 智⁵、後長 葵⁵、金島 圭佑⁵、田中 義人⁵、加藤 政博^{6,3} (1.豊田工大、2.理研、3.分子研、4.高輝度光科学研究センター、5.兵庫県立大学、6.広島大学)

[9p-N401-15]

真空中での金属と絶縁体の摩擦帯電の計測と低減の研究

○三浦 崇¹ (1.安衛研)

大気圧プラズマエッチングによるガラス表面ナノ構造制御と超撥水化

Nanostructure control of glass surfaces via atmospheric-pressure plasma etching and fabrication of superhydrophobic glass

広大院先進理工¹, AGC (株)² ○(D)峰雪 序也^{1,2}, 安田 興平², 林 泰夫², 東 清一郎¹

Hiroshima Univ.¹, AGC.², ○Nobuya Mineyuki^{1,2}, Kohei Yasuda², Yasuo Hayashi², Seiichiro Higashi¹

E-mail: nobuya.mineyuki@agc.com

【緒言】自動運転のセンサーやカメラのカバーガラスなどにおいて雨や汚れの付着は重要な課題とされる中、超撥水ガラスへのニーズが高まっている。ガラス表面に適切な微細構造を作製し、撥水膜を塗布することで超撥水を発現できることは知られているが、従来の作製法である湿式エッチングや真空プラズマを用いた手法では、環境負荷の高さや真空チャンバー使用による基板サイズの制限が課題となっている。本研究では、大気圧 CF₄プラズマエッチング中の表面状態をモニタリングすることで反応を制御し、より簡易に超撥水性を実現する新しい手法を提案する。

【実験】ソーダライムガラスを基板として使用し、大気圧 CF₄プラズマジェットを用いてエッチングを行った(Fig.1)。光学干渉非接触温度測定法(OICT)[1]を用い、エッチング中にリアルタイムで表面温度及び表面に形成するフッ化物残渣層の厚みを計測した。エッチング後にはフッ化物残渣層を除去した後の表面微細構造を SEM で観察した。さらに撥水膜を塗布した後、水滴接触角を測定して撥水性を評価した。

【結果と考察】プラズマエッチング中の表面微細構造形成過程を調査することで、基板表面温度と処理時間によってガラスの表面微細構造が制御可能であることが明らかになった。エッチング中に生成するフッ化物残渣層の形状がガラス表面微細構造に影響していると考えられる。プラズマ処理条件を最適化することにより、ガラス表面に所望の粗さを付与することに成功した。この結果、ガラスの表面粗さを自在に変えることで撥水膜成膜後の水滴接触角を制御することができた(Fig.2)。特に Ra の大きいものでは水滴接触角 150.4°を達成し、超撥水性の発現に成功した。また、その際の反応時間は 1 秒未満であり、従来の真空プラズマエッチングに比べて大幅に短い反応時間で表面構造制御可能であることが示された。本手法は環境負荷を低減しつつ、基板サイズにとらわれない表面改質技術として多様な応用が期待される。

[1]T. Okada, S. Higashi, H. Kaku, N. Koba, H. Murakami, S.Miyazaki, Thin Solid Films, **515** (2007) 4897.

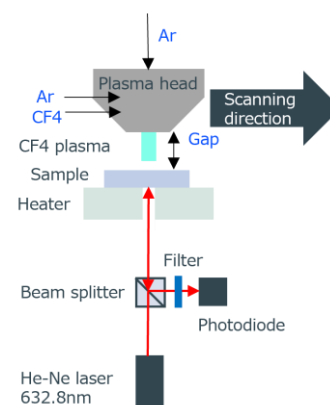


Fig. 1 Experimental setup for plasma etching and OICT.

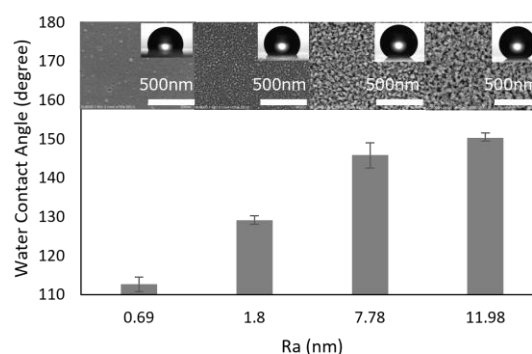


Fig.2 Effect of surface roughness for hydrophobicity.

プラズモニック Au ナノ粒子を用いた CO₂ 光還元触媒の最適化研究

Optimization study of plasmonic Au nanoparticles as catalysts for CO₂ photoreduction

東大工¹, ^{○(MIC)}野口 尚暉¹, 内田建¹, 豊島遼¹

The Univ. of Tokyo¹, ^{○(M1C)}Naoki Noguchi¹, Ken Uchida¹, Ryo Toyoshima¹

E-mail: noguchi@ssn.t.u-tokyo.ac.jp



【背景および目的】地球温暖化の主要因である CO₂ を削減する手法とし、太陽光エネルギーを利用した光還元による CO₂ の資源化が注目されている。近年、局在表面プラズモン共鳴を利用した光還元反応が確認された[1]。Au ナノ粒子担持 p 型窒化ガリウム (Au/p-GaN) 触媒において、共鳴波長は金属ナノ粒子のサイズや形態に依存するため、触媒活性の向上にそれらの制御が重要な要素となる。本研究では、異なるアニール温度によって得られるナノ粒子の形状とその触媒活性を評価し最適化を目指した。

【実験方法・結果】共鳴波長のサイズ依存性を調べるため、有限差分時間領域法(FDTD)を用いて、球状 Au ナノ粒子の直径と共鳴波長の関係を解析した。その結果を Fig. 1 に示す。直径 45 nm 付近を境にして、それより直径が小さなおとときには共鳴波長は直径にほとんど依存しないことがわかる。

表面洗浄した p-GaN 基板上に約 2 nm 厚の Au 薄膜をスパッタ蒸着した。その後 200 °C, 300 °C, 400 °C の各条件で 1 時間アニールし、Au 薄膜をナノ粒子化した。Fig. 2 に作製した試料の原子間力顕微鏡(AFM)観察の結果を示す。アニールによって粒子化したことが確認され、また粒子の数密度・粒径は 300 °C で最大となった。次に作製した試料の触媒活性評価として、CO₂ を飽和させた水溶液中で、サイクリックボルタンメトリー(CV)を行った。アニール温度の異なるサンプルを比較した結果を Fig. 3 に示す。ただし暗条件(dark)でのデータは 300 °C の試料のものであり、その他の条件では白色光を照射した。光を照射することで還元電流が流れたことがすべての試料で確認され、電流密度が最大となったのは 300 °C の試料であった。還元電流が最も大きいことから、CO₂ の還元能力も高いと考えられる。

【考察】AFM より 300 °C でアニールしたときの粒子の平均高さは 8 nm、最大高さは 17 nm であるが、FDTD の結果よりどちらも共鳴波長は 570 nm 付近に収まっている。300 °C でアニールした試料を紫外可視分光法で測定したところ、吸収スペクトルのピークは 570 nm となったので、おおよそ一致している。太陽光の利用という観点からも、太陽光スペクトル強度の大きい波長であり、狙いの波長である。

AFM において 300 °C アニールの試料で数密度と粒径の両方が最大となったのは、200 °C の試料では粒子化しきっておらず膜が残っているためで、400 °C の試料では粒子の高さが小さくなり、全体的に不鮮明となっているので、Au が GaN 中へ拡散し合金化が進行したためだと考えられる[2]。

【まとめ】Au/p-GaN 触媒の作製にあたって最適なアニール温度が 300 °C であることを CV 特性から示し、その高い還元能はナノ粒子の形状に由来することを示した。今後は、形状効果をさらに議論するために、リソグラフィなどで Au ナノ構造物を規定して作製したときの還元能力の変化を調べる。

謝辞: 本研究の一部は天野工業技術研究所、池谷科学技術振興財団、みずほ学術振興財団および科研費(23K20034)の支援を受けた。

[1] J. Prakash *et al.*, *Appl. Mater. Today*, **11**, 85 (2018). [2] Y. Kang *et al.*, *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, 7, 607 (2003).

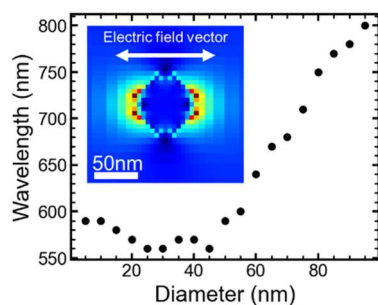


Fig. 1: FDTD analysis of resonance wavelength for Au nanospheres of different diameter

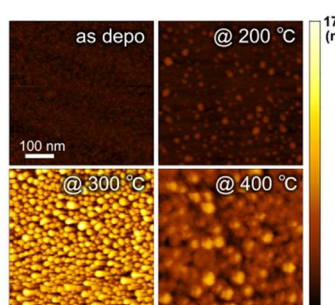


Fig. 2: AFM of Au/p-GaN catalysts annealed at different temperature

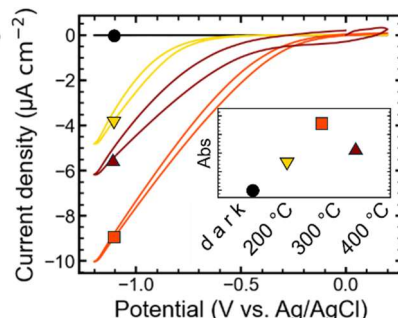


Fig. 3: CV of Au/p-GaN catalysts annealed at different temperature

Ag(111) 面上における鎖状ナノカーボン構造生成の生成過程の検討

Exploring the Growth Mechanism of One-dimensional Nanocarbon Materials on

Ag(111)

京大工, °(M2)倉敷 一真, 黒川 修

Kyoto Univ. °Kazuma Kurashiki, Shu Kurokawa

E-mail: kurashiki.kazuma.53e@st.kyoto-u.ac.jp

我々の先行研究において、超高真空中でアークプラズマガン (APG) を用いて Ag(111)面に炭素を蒸着することで、表面に鎖状ナノカーボン構造が生成されることが確認された。理論計算から求められた C_{20} 一次元重合体の結合間隔と Ag[110] 方向の原子間隔が近い値 (約 0.57 nm) をとること、それが STM 像の繰り返し周期ともおおよそ一致することから、この鎖状ナノカーボンは C_{20} 一次元重合体である可能性があり、このことは FT-IR による解析によっても支持されている[1]。 C_{20} フラーレンの鎖状構造は電子をドープすることで超伝導性や磁性を持つことが報告されている[2]が、複雑な化学合成の例を除いて実際の合成例はないことから、この鎖状ナノカーボンの生成プロセスの調査はカーボン構造体の制御技術の進歩の一助となる可能性がある。

今回の研究では、鎖状ナノカーボンの生成プロセスについて解明することを目的とした。生成プロセスの初期段階について、STM 観察の結果、C 蒸着後に発生する Ag ピットが構造体の形成の起点であることを確認した[Fig 1]。我々の計算により、subsurface 中の炭素原子がダイマーを形成すると、直上 Ag 原子が比較的容易に脱離する可能性のあることが明らかになった。これがピットの形成メカニズムである可能性がある。現在、成長過程の解明を目指して、詳細な STM 観察を続けるとともに、機械学習ポテンシャルを使った大規模なシミュレーションを検討しており、当日はこれに関しても報告する。

[1] S. Kurokawa, D. Yamamoto, K. Hirashige, and A. Sakai, *Apex*, **9**, 045102, (2016).

[2] Y. Miyamoto, and M Saito, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* **63**, 1–4 (2001).

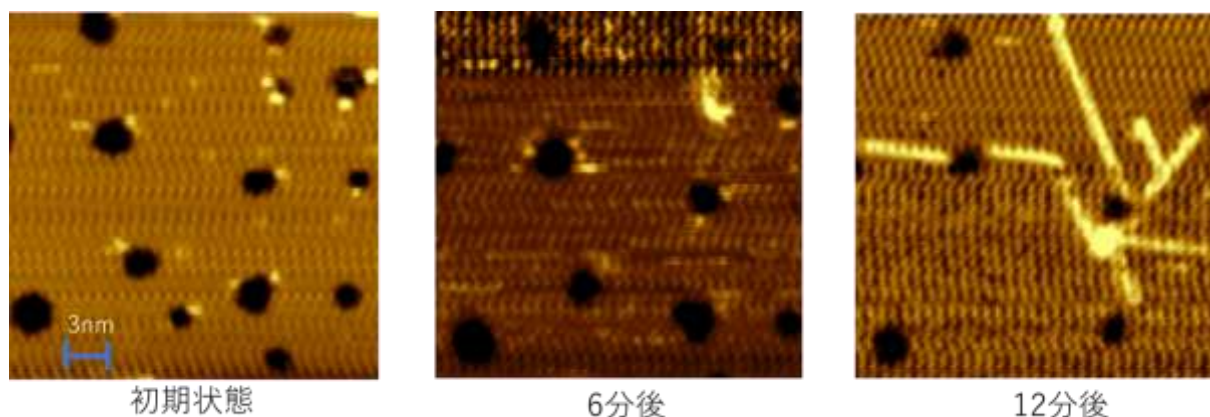


Fig 1. Nanocarbon structures growing from the Ag pit

水素プラズマ誘起ナノ構造が Si 表面の撥水性に与える影響

Effect of hydrogen plasma-induced nanostructure on hydrophobicity of Si surface

阪大院工, [○]小林 幹太郎, 坂本 健, 尾上 潤, 垣内 弘章, 大参 宏昌

the Univ. of Osaka, [○]K. Kobayashi, K. Sakamoto, J. Onoe, H. Kakiuchi, and H. Ohmi

E-mail: kobayashi@ms.prec.eng.osaka-u.ac.jp / ohmi@prec.eng.osaka-u.ac.jp

1. 緒 言

シリコン(Si)表面に形成されたナノからマイクロスケールの円錐構造(ナノコーン構造)は、固体表面の濡れ性に対し影響を与えるため、超撥水性や超親水性等の固体/液体の接触界面制御という観点から注目が集まっている[1]。これまで我々は、水素プラズマ曝露により Si 表面にナノコーン構造の形成が可能なことを見出し[2]、水素中に僅かな酸素、窒素などの不純物導入がナノ構造の創成に必要なこと[3]を報告してきた。今回は、水素プラズマによりナノ構造が付与された Si 表面の濡れ性に着目し、種々のナノ構造表面における水接触角を評価した。また、さらなる撥水性の向上を目指しマイクロピラミッド構造にナノコーン構造を複合した構造を作製し、その表面における接触角を評価したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

試料作製には、p 型 Si(100)基板を用い、基板を試料ステージ上に固定した。ステージ温度を 200℃ に昇温し、チャンバ内圧力が 3.3 kPa となるまで水素を導入した後、プラズマ電極に 2.45 GHz のマイクロ波を投入することで、電極基板間の放電ギャップにプラズマを生成した。プラズマによるナノ構造の作製では、マイクロマスク形成のため、水素中に極微量の乾燥空気を混入している。マイクロピラミッド構造とナノ構造の複合構造は、KOH 溶液によってマイクロピラミッド構造を作製し、その後水素プラズマ加工によりナノコーン構造を作り込むことで作製した。加工後の各試料を、HF 洗浄、もしくはフッ素系表面処理剤(フロロサーフ)への浸漬により表面処理し、水接触角を測定した。各試料の表面形態は、走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope : SEM)で評価した。

3. 結果及び考察

Fig. 1 に複合構造が付与された Si の断面 SEM 像を示す。Fig. 1 より、高さ 20 μm 程度のマイクロピラミッド構造の斜面に、高さ 700 nm 程度のナノ構造が、ピラミッド斜面の法線方向ではなく、元の基板の法線方向に形成されていることが確認される。また、各試料で得られた水接触角を Fig. 2 に示す。鏡面 Si に比べてナノ構造の付与により、いずれの場合も接触角が増大することが分かる。ナノ構造を作製した Si 表面では、フッ素系処理剤で表面処理後に水濡れ角が 150°以上となり、超撥水性を示すことが分かった。さらに複合構造試料の水接触角は、フッ素系表面処理後に 167.8°となり超撥水性を示すと同時に、水滴が超撥水領域から容易に転落するセルフクリーニング効果も確認された。

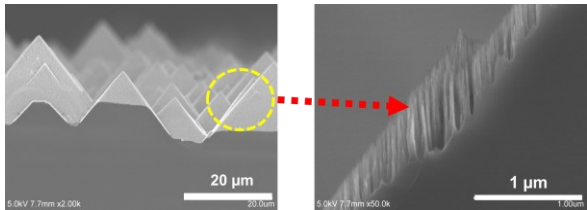


Fig.1 Cross sectional SEM images of hybrid structure. (a)low magnification (b)high magnification.

4. 結 言

Si 表面に付与したナノ構造が撥水性に与える影響を評価した結果、ナノ構造の付与により濡れ性は増強され、複合構造の導入およびフッ素系処理剤での表面の被覆によりセルフクリーニング効果を持つ超撥水表面が得られた。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(20H02049, 24K00778)、ならびに (公財) 岩谷直治記念財団 (2023G5019) からの支援により行われた。ここに謝意を示す。

参考文献

[1] Schneider, L. et al., *Sci. Rep.* 6, (2016) 21400.
[2] T. Nomura et al., *J. Vac. Sci.& Technol. B* 40, (2022) 032801.
[3] T. Nomura et al., *Phys. Scr.* 98, (2023) 115609.

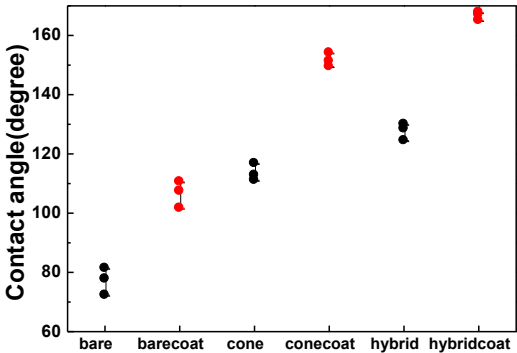


Fig. 2 Water-contact angle of each sample

極薄 a-Si/Ni/SOI 積層構造の急速熱処理による SiO₂ 上単結晶 NiSi₂ の形成 Formation of Single-Crystalline NiSi₂-On-Insulator Through Rapid Thermal Annealing of Ultrathin a-Si/Ni/SOI Stacked Structures

¹名大院工,²IHP,³愛工大工 ○¹今井 友貴,¹谷田 駿,^{2,1}山本 裕司,³田岡 紀之,
^{1,2}牧原 克典

¹Nagoya Univ., ²IHP, ³Aichi Inst. Tech. ○¹Yuki Imai, ¹Shun Tanida,
^{1,2}Yuji Yamamoto, ³Noriyuki Taoka, and ^{1,2}Katsunori Makiyara
E-mail: imai.yuki.t2@f.mail.nagoya-u.ac.jp

序 トランジスタのスケールングに伴い、シリサイド/Si 界面におけるコンタクト抵抗が全ソース/ドレイン抵抗成分の 80%以上にまで増大してしまうことから [1]、微少コンタクト領域に低抵抗な極薄シリサイド膜を形成する必要がある。また、コンタクト抵抗の低減には、Schottky 障壁高さの制御が求められるが、シリサイド内粒界あるいは界面の欠陥に起因した Si 中のバンドギャップ中に生じる準位 (DIGS) を抑制する必要がある [2]。本研究では、熱的安定性の観点から NiSi₂ に着目し、SiO₂ 上へと単結晶 NiSi₂ の超薄膜形成を試みた。

実験 SOI 基板 (Si 活性層: ~82 nm、BOX 層: ~145 nm) の熱酸化と HF によるエッチバックを繰り返し行うことで、Si 活性層を ~4.5 nm まで薄層化した後、厚さ ~1.2 nm の Ni 膜を電子線蒸着した。尚、Ni 膜厚は、Ni と Si の原子率が 1:2 になるように設計した。その後、RTA により窒素雰囲気の下で基板温度 400 °C および 600 °C で 1 分間の熱処理を行った。

結果および考察 AFM 表面形状像から算出した Ni 堆積後における RMS ラフネスは、薄層化した SOI 表面と同程度であり、極めて平坦な薄膜形成が確認できた [Fig.1(a)]。また、400 °C 熱処理後においても RMS ラフネスに顕著な差は認められなかったが、600 °C 熱処理後では僅かに RMS ラフネスが増大するものの、Ni 原子の表面拡散および凝集は認められなかった [Figs. 1(b), (c)]。化学結合状態を XPS により調べた結果、熱処理前において Ni-O 信号が殆ど認められないと同時に、Si-O 信号が認められることから、蒸着直後の Ni が下地 Si と反応し、Si が最表面に析出していると考えられる [Figs.1(d),(e)]。また、熱処理後のスペクトルにおいては Si-Si または Si-Ni および Ni-Ni 結合成分のピークシフトが認められ、僅かなブロードニングが認められる。通常、Ni_{1-x}Si_x では Si リッチ相の形成に伴い、Ni 3d 軌道と Si 3p 軌道の混成に起因して Ni-Si 間に共有結合が形成される。従って、観測されたメタリック成分のピークシフトは熱処理によるシリサイド化反応の進行を示唆している。また、Ni 2p 信号を波形分離解析した結果、Ni リッチ相と Si リッチ相の二成分に分離でき、600 °C 熱処理では Si リッチ相の形成が顕著であることが分かった。そこで、酸化犠牲層としての Si キャップ層 (~0.3 nm) を形成し、同様の 600 °C 熱処理を行った結果、Si キャップ層導入による表面ラフネスの顕著な変化は認められない一方、Ni リッチ相の形成が大幅に抑制されるのと同時に Si リッチ相の形成が促進されることが分かった。これは、Si キャップ層を形成することで下層 Si の表面拡散による酸化が抑制された結果として説明できる。また、Raman 散乱スペクトルにおいて、Si キャップ層の導入による明瞭な NiSi₂ 相の信号が認められた [Fig. 2(a)]。さらには、SEM-EBSD 測定を用いた結晶方位評価の結果、単結晶 NiSi₂ が支配的に形成されていることが分かった [Fig. 2(b)]。

結論 Si 活性層を薄層化した SOI 基板上に極薄 Ni および a-Si 膜を連続堆積した後、600 °C 熱処理を行うことで、単結晶極薄 NiSi₂ 超薄膜を SiO₂ 上に形成できることが分かった。

文献 [1] Q-T. Zhao *et al.*, Microelectron. Eng. **107**, 190 (2013). [2] C. C. Matthai *et al.*, Appl. Surf. Sci. **56**, 525 (1992).

謝辞 本研究の一部は、東北大学電気通信研究所 共同研究プロジェクトによる支援を受けて行われた。

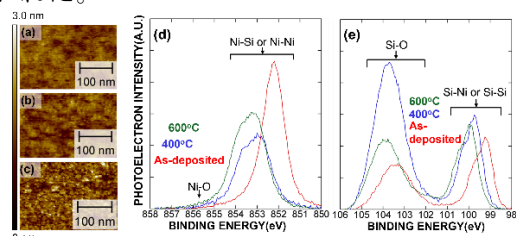
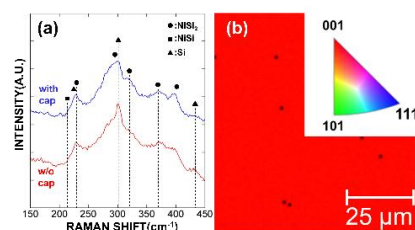


Fig. 1: AFM topographic images of (a) ~1.2 nm-thick Ni-film deposited on SOI, (b) after annealing at 400 °C, and (c) 600 °C for 1 min. (d) Ni 2p_{3/2} and (e) Si 2p_{3/2} spectra of the ~1.2 nm-thick Ni-films deposited on SOI before and after annealing at 400 °C, and 600 °C for 1 min.

Fig. 2:



Raman scattering spectra of Ni/SOI with and without a-Si cap layer after annealing at 600 °C. (b) SEM-EBSD image of the a-Si/Ni/SOI after annealing at 600 °C.

IV 族系二次元原子層含有 $\text{Ca}(\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x)_2$ 結晶の Si 基板上へのエピタキシャル成長

Epitaxial growth of $\text{Ca}(\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x)_2$ including IV-group two-dimensional atomic layer on Si substrate

阪大院基礎工¹, 阪大 OTRI² °寺田 吏¹, 吉崎 高士², 石部 貴史^{1,2}, 中村 芳明^{1,2},

Eng. Sci. Univ. Osaka¹, OTRI²,

°Tsukasa Terada¹, Takashi Yoshizaki¹, Takafumi Ishibe^{1,2}, Yoshiaki Nakamura^{1,2}

E-mail: terada.tsukasa.es@osaka-u.ac.jp

【背景】 超高移動度を示すグラフェンの発見に伴い、様々な二次元層状物質の探索が行われている。Ge 元素のみで構成された二次元原子層ゲルマネンはグラフェン以上のキャリア移動度を示すことが予測され、実現が期待されている[1]。さらに、ゲルマネンはグラフェンにはないバックリングした結晶構造を有し、バックリング高さを制御することでバンドギャップなどの様々な物性が制御可能である。しかしながら、ゲルマネンは大気中での安定性が低く、安定した形成が困難であるため、バックリング構造制御による物性制御の実験的な観測例はない。近年、ゲルマネン層間に金属元素を挿入し、化学安定性を向上した層状物質 CaGe_2 が注目を浴びている[2]。これまで我々は、Ge 基板上に CaGe_2 薄膜の形成に成功したが、バックリング構造の制御法は未確立であった[3]。我々はバックリング構造制御を狙って、 CaGe_2 の Ge をより大きい Sn 元素で置換することに注目した。本研究では、応用に適した Si 基板の上に新規の IV 族系二次元原子層含有結晶である $\text{Ca}(\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x)_2$ 薄膜を創製し、バックリング構造制御を実現することを目的とする。

【方法】 弗酸処理により水素終端された Si(111)基板上に、真空蒸着装置を用いて Sn 薄膜 (5, 10 原子層) を室温で堆積した。その後、分子線蒸着法を用いて 98-108 原子層の Ge を室温で堆積し、その上に 54 原子層の Ca を室温で堆積した。真空中で 750 °C、30 分加熱することで $\text{Ca}(\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x)_2$ 結晶を形成した。作製した薄膜の構造評価を、反射高速電子回折法 (RHEED)、X 線回折法 (XRD)、走査型電子顕微鏡 (SEM)、原子間力顕微鏡 (AFM)、二次イオン質量分析法 (SIMS) を用いて実施した。

【結果】 RHEED 及び XRD より、Si(111)基板上に $\text{Ca}(\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x)_2$ ($x = 0.0, 0.05, 0.10$) 結晶がエピタキシャル成長していることが分かった。また、 $006_{\text{Ca}(\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x)_2}$ の XRD 回折ピーク位置が Sn 導入量に伴い、低角側にシフトしていることから、層間距離が増大していることが判明した。これは、ゲルマネンのバックリング高さが大きくなっている可能性を示唆している。本講演では、 $\text{Ca}(\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x)_2$ の形成方法と構造評価の詳細について述べる。

【謝辞】 本研究の一部は科研費 基盤研究 A (JP23H00258) の支援により行われた。

【参考文献】 [1] A. Acun, *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **27**, 443002 (2015)., [2] N. Liu, *et al.*, Small **15**, e1805147 (2019). [3] Y. Uematsu, *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 055503 (2020).

低速原子散乱分光法による CoO 薄膜の表面観察

Surface observation of CoO thin films using low energy atom scattering spectroscopy

大阪公立大¹, 東京科学大² °譚 (タン) 廣 (ゴオン)¹,

福田 浩昭¹、金子 健太²、松田 晃史²、梅澤 憲司¹

Osaka Metropolitan Univ.¹, Institute of Science Tokyo²,

°G. Tan¹, H. Fukuta¹, K. Kaneko², A. Matsuda², K. Umezawa¹

E-mail: tan@omu.ac.jp

【緒言】 従来、電子線やイオンビームなどの荷電粒子線を用いた表面解析は、チャージアップのため絶縁体の表面を測定することは困難であった。そこで電氣的に中性で 100 kHz にパルス化された 3 keV-⁴He⁰ を入射プローブとする低速原子散乱分光法を利用することで、絶縁体の酸化物表面の観察を行った。我々は以前、応用物理学会で岩塩型構造 ($a=4.26$ Å) を有する酸化コバルト CoO(111)単結晶基板の表面について報告した[1]。CoO は、触媒やガスセンサとしての応用が期待されており、最表面の原子構造を調べることは非常に重要である。一方、表面改質の研究においては、真空紫外 (VUV) 光を CoO 表面に照射することで、岩塩型 CoO からスピネル型 Co₃O₄ へ結晶関係を保持したトポタクティック相変化が報告されている[2,3]。本研究では、VUV 光照射が及ぼす CoO 薄膜の表面構造の変化を明らかにすることを目的にし、VUV 光照射した CoO 薄膜について低速原子散乱分光法を用いた表面観察を行った結果を報告する。

【実験・結果】 PLD 法により SrTiO₃ (STO)基板上のエピタキシャル CoO 薄膜を作成した。得られた CoO 薄膜に対して、キセノンエキシマランプ ($\lambda=172$ nm) を用いて大気中で 2 時間 VUV 光照射を行った。その後、低速原子散乱分光法により超高真空中で CoO 薄膜試料の表面観察を実施した。入射粒子であるパルス化された 3 keV-⁴He⁰ を薄膜試料に衝突させ、180° 後方散乱された粒子を MCP で検出した。得られたスペクトルは、飛行時間分解型である。

Fig. 1 に VUV 照射したエピタキシャル CoO(111)薄膜に対して、入射角の全方位スキャンにより得られた Co 原子からの信号強度を測定した極点図を示す。VUV 照射をしたことにより、挿入図に示す Co₃O₄ の表面構造に対応した 6 回回転対称性を持っていることが確認された。この結果は、VUV 光照射により表面近傍において、岩塩型 CoO からスピネル型 Co₃O₄ へ結晶相変化が起きたことを示している。講演では、異なる面方位のエピタキシャル CoO 薄膜の結果やシミュレーションとの比較についても報告する。

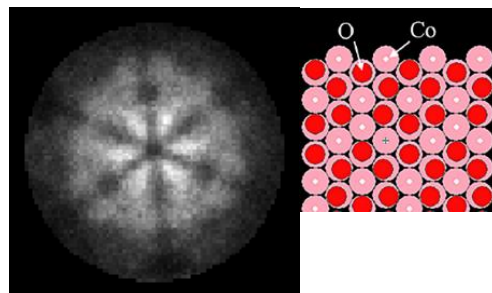


Fig. 1 Mapping pattern of scattered intensity arising from impact collision on Co atoms in the CoO(111) film surface.

【謝辞】 本研究の実施にあたり、株式会社パスカル及び長澤裕樹氏に感謝いたします。

【参考文献】

- [1] 譚 廣、福田 浩昭、松田 晃史、吉本 護、梅澤 憲司、第 82 回応用物理学会 10p-N204-16.
- [2] G. Tan, H. Fukuta, K. K. H. De Silva, A. Matsuda, M. Yoshimura, M. Yoshimoto and K. Umezawa, *J. Vac. Sci. Technol. A* **40**(6) (2022).
- [3] K. Kaneko, Y. Qiao, S. Kaneko, and A. Matsuda, *J. Phys. Chem. C* 2025, **129**, 3264–3271.

4H-SiC 表面に対する N ラジカル窒化過程の 表面 N 密度飽和現象決定因子の実験的考察

Consideration of the Determining Factors of Surface N Density Saturation
during N-Radical Nitridation of 4H-SiC surfaces

東大院新領域 物質系専攻 ○(M2) 吉田 遥希, 女屋 崇, 田村 敦史, 喜多 浩之

Dept. of Adv. Mater. Sci., The Univ. of Tokyo,

○Haruki Yoshida, Takashi Onaya, Atsushi Tamura and Koji Kita

E-mail: yoshida-haruki3840@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

[序論] SiC MOSFET の特性向上のためには SiC MOS 界面に形成される多量の界面欠陥の終端技術が欠かせない。そのためには SiC 表面第一層の C を N で置換することが有効である。SiC 表面の窒化手法として NO アニールのような熱的反応を利用する手法[1]について N 導入の速度論的理解が進んでいる一方、N ラジカルのような活性種によって SiC 表面に N を導入させる手法についての速度論的理解は未だ成されていない。本研究ではその理解を目的とする。我々は前回の応用物理学会にて、NO アニール窒化と同様に、N ラジカル窒化において長時間の窒化で表面の N 密度が飽和挙動を示すことを報告した(図 1)[2]。NO アニール窒化においては、N 導入反応が表面酸化による N 脱離反応と釣り合うことがその原因であり、表面 N 密度を $A_N(t)$ 、N 導入速度を N_r 、N 脱離反応の速度定数を k_d 、窒化時間を t とした反応速度式は $dA_N/dt = N_r - k_d A_N$ で表される[3]。一方、N ラジカル窒化過程においては、NO アニール窒化と比較して酸化はごく僅かにしか進行しないので、酸化による脱離反応は飽和挙動を決定する因子ではないことに注意されたい。

[実験方法] 4H-SiC(0001)Si 面基板を化学洗浄した後、チャンパー内の圧力を 6×10^{-3} Pa に保ち、基板温度を 500 °C または室温として 500W の高周波プラズマで生成した N ラジカルを距離 200 mm の位置から照射して窒化を行った。窒化後の表面 N 密度は XPS 測定から得られた Si2p と N 1s 内殻準位スペクトルのピーク面積比の変化から相対的に決定した。また、予め ^{15}N 同位体を用いて 500 °C で 2 h の ^{15}N ラジカル窒化を行った試料に対して昇温脱離スペクトル(TDS)分析を行った。

[結果と考察] TDS 分析では $m/z=31$ の脱離が、450 °C 以下の温度域全体に渡って観測されたことから SiC 表面の ^{15}N が 500 °C 以下の比較的低温で主に ^{15}NO ガスとして脱離することが示唆された。そこで窒化後基板を ~500 °C の真空チャンパー中で加熱し、XPS により測定された N 1s/Si 2p の変化から N 脱離反応の速度定数 k_d を実験的に決定したところ $k_d \sim 6 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ 程度であった。前出の式によると飽和 N 密度は N_r/k_d で決まるが、実験的に観察された 500 °C における飽和 N 密度を与えるためには $N_r \sim 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 程度でなければならない。一方、反応初期の N_r は図 1 の初期の直線的な傾きから $N_r \sim 4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ と求めることができる。従って N_r は窒化の進行とともに大きく低下していると考えるのが妥当である。そこで、SiC 表面に存在する N の反応サイトが有限で $M \text{ cm}^{-2}$ の面密度でしか存在せず、そのうちの割合 θ が N に占有されているときには、ラングミュアの吸着等温式のように N 導入反応の速度は未占有サイトの表面密度に比例し、 $N_r = k_i M(1 - \theta) \text{ cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ と表されると考えた。このとき、 $M \sim 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、窒化時間 2 h 以降の表面 N 密度飽和時の占有サイト割合が $\theta_{\text{max}} = 0.7$ 程度と仮定すると実験データは再現できた(図 1)。以上のように、N ラジカル窒化では比較的低温でも生じる N 脱離反応と、表面反応サイト数の減少による N 導入反応速度の減衰を考慮することで表面 N 密度飽和挙動を説明できる。

[参考文献] [1] 佐々木 他、第 71 回応用物理学会春季学術講演会 (2024). [2] 吉田 他、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 (2025). [3] T.

Yang and K. Kita, Solid-State Electronics **210**, 108815 (2023).

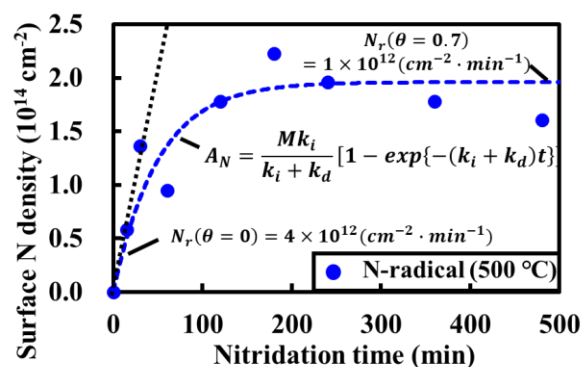


Fig.1 The time dependence of the surface N density on nitridation time and fitting results considering N-desorption and attenuating N introduction reactions.

キーワード

スピン分解光電子運動量顕微鏡

Spin Resolved Photoelectron Momentum Microcopy

高分解能高信頼度

High resolution and high reliability

新デバイス開発に向けて

Contribution to new device development

ダブルデッカー型イットリウム(III)ーフタロシアニナト錯体カチオンの吸着に伴う基底状態変化に関する密度汎関数理論に基づく検討

Density Functional Theory Study on the Ground State Change of Double-decker

Yttrium(III)-phthalocyaninato Complex Cation by Surface Adsorption

阪大院基礎工¹, 阪大 ICS-OTRI², 阪大 QIQB³, 阪大 OTRI-Spin⁴

○(M1) 廣田 陸哉¹, 多田 幸平^{1,2}, 岸 亮平^{1,2,3}, 北河 康隆^{1,2,3,4}

Osaka Univ.¹, ICS-OTRI, Osaka Univ.², QIQB, Osaka Univ.³, OTRI-Spin, Osaka Univ.⁴,

○Rikuya Hirota¹, Kohei Tada^{1,2}, Ryohei Kishi^{1,2,3}, Yasutaka Kitagawa^{1,2,3,4}

E-mail: rikuya.hirota@cheng.es.osaka-u.ac.jp

単分子磁石は、その大きな磁気異方性と長いスピン緩和時間から次世代の大容量記録媒体としての利用が期待されている。ダブルデッカー型ランタノイド(III)ーフタロシアニナト錯体(LnPc₂)は単分子磁石材料の一つであり、配位子が電子スピンを持つため、単分子磁石性能の向上が期待できる。実装にあたっては、単分子磁石材料を基板上に吸着させて用いることが想定される。

いくつかの先行研究は、LnPc₂を金属基板に直接吸着させると配位子のラジカル電子が基板へ非局在化し分子が酸化されることを報告している^{1,2}。これは分子磁性の弱化あるいは消失をもたらす。この問題に対処するために、我々のグループは YPc₂ の Au 基板吸着モデルを用いて DFT+U/plane-wave 法 (DFT-D3, 交換相関汎関数: GGA-PBE) による計算を行い、吸着状態において配位子酸化を抑えるための分子設計・表面エンジニアリングの指針を示した。

さらなる研究により、YPc₂が基板に吸着し配位子のラジカル電子が酸化されても、配位子が $S = 1/2$ の電子スピンを持つことが可能であることがわかってきた。気相中では YPc₂ カチオンの $S = 1$ 状態は励起状態である。この結果は、表面吸着は単分子磁石材料を酸化還元するだけでなく、表面場によって基底スピン配置を別の配置へと変化させる可能性を示すものである。

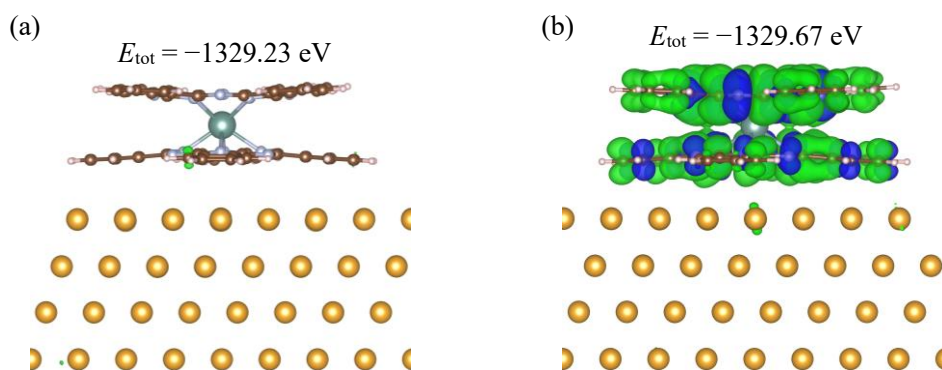


Fig.1 (a) $S = 0$ state and (b) $S = 1/2$ state of YPc₂ absorbed onto Au substrates. The isosurfaces are $2 \times 10^{-4} e^-$; yellow and cyan represent an increase and decrease in the number of electrons in (a), and green and blue represent up and down spins. E_{tot} represents the calculated total energy (convergence is 10^{-6} eV).

[1] K. Tada and Y. Kitagawa, *AMTC letters*, **6**, 216-217 (2019).

[2] S. Marocchi, et al. *ACS Nano*, **10**, 9353–9360 (2016)

水素終端 C(111) 薄膜の誘電特性

Dielectric properties of hydrogen-terminated C(111) thin films

電通大院情報理工¹

○(M1) 小林 隼人, 住吉 晶, Ranferi Cancino Betancourt, 佐藤 翔太, 中村 淳

The Univ. of Electro-Communications,

°Hayato Kobayashi, Akira Sumiyoshi, Ranferi Cancino Betancourt, Shota Sato, Jun Nakamura

E-mail: jun.nakamura@uec.ac.jp

Modern Theory of Polarization (MTP)の確立は、周期系の分極の計算を可能にした[1,2]。一方、界面や表面における 2 次元薄膜などの低次元系における分極は、スラブモデルに有限の静電場を印加する手法を用いて評価されてきた。これらの手法は、表面近傍における誘電率の振る舞いに関する理解を深めてきた[3-6]。過去に我々は、有限電場印加手法を用いて Si(111)-H 薄膜の誘電率を評価している[5,6]。その結果、水素終端 Si(111)表面近傍では誘電率が低下すること、また薄膜の誘電率は膜厚の減少とともに減少すること報告されている。この現象は、印加された静電場によって表面近傍に誘起される電荷密度の有限な空間分布に起因すると考えられる。一方、次世代半導体として注目を浴びているダイヤモンド (C) の(111)面は同じ IV 族である Si(111)とは表面の電子状態が大きく異なることが理論的に報告された[7]。そこで本研究では、静電場下の第一原理計算を用いて局所誘電率を評価し、Si(111)-H 表面と C(111)-H 表面の電子状態の違いが誘電率プロファイルに与える影響を調べることを目的とする。

スラブモデルに静電場を印加することで誘起される電荷に対する Poisson 方程式を逆空間で解くことによってスラブモデル内の内部電場を計算し、真空とスラブ内の電束密度一定の条件から誘電率の空間分布を評価した。

Fig.1 は水素終端された C と Si の(111)-10BL モデルの表面垂直方向の面平均誘電率プロファイルを示す。C(111)-H 薄膜の誘電率は Si とは異なり表面近傍で増加することわかる。C(111)-H 薄膜のバンド構造計算により、C(111)-H 薄膜の伝導帯端には Si(111)-H 薄膜とは異なり Nearly Free Electron (NFE) 状態が存在することが明らかになった。この NFE 状態の波動関数は、薄膜表面に局在しており、この状態の存在が表面近傍の誘電率増加の原因であると考えられる。

- [1] R. Resta, Rev. Mod. Phys. **66**, 899 (1994)
- [2] R. D. King-Smith *et al.*, Phys. Rev. B **47**, 1651 (1993)
- [3] F. Giustino *et al.*, Phys. Rev. B **71**, 144104 (2005)
- [4] N. Shi *et al.*, Phys. Rev. B **74**, 045318 (2006)
- [5] J. Nakamura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 053118 (2006)
- [6] J. Nakamura *et al.*, J. Appl. Phys. **99**, 054309 (2006)
- [7] Lu N. J *et al.*, Phys. Chem. C **2009**, 113, 16741–16746.

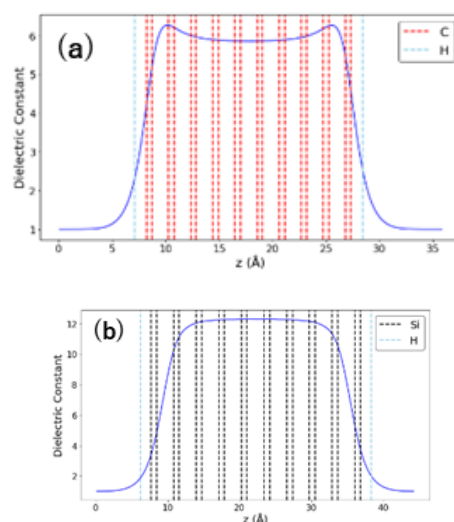


Fig. 1 Planer-averaged dielectric constant profile along the z axis perpendicular to the surface: (a)C(111)-H, (b)Si(111)-H

2次元多層構造におけるプラズモンの理論

Theory of Plasmons in Two-Dimensional Multilayer Structures

東大院工 ○ 市川 昌和

University of Tokyo, °Masakazu Ichikawa

E-mail: ichikawa@ap.t.u-tokyo.ac.jp

本発表では、シュレーディンガー型の電子状態を示す2次元多層構造におけるプラズモンの理論について引き続き報告する。

電磁場の遅延効果を無視したとき、Random Phase 近似 (RPA)および高周波数（プラズモン周波数領域）近似において、有効スカラーポテンシャル $\varphi_{\text{eff}}(\mathbf{r}, \omega)$ と外部スカラーポテンシャル $\varphi_{\text{ext}}(\mathbf{r}, \omega)$ は、2次元多層構造における局所電子密度を $n_{3D}(\mathbf{r}) \approx \sum_m n_m \delta(z - z_m)$ と近似し、面内方向の波数 $\mathbf{k}$ を用いてフーリエ変換すると、以下の方程式が得られる [1]。

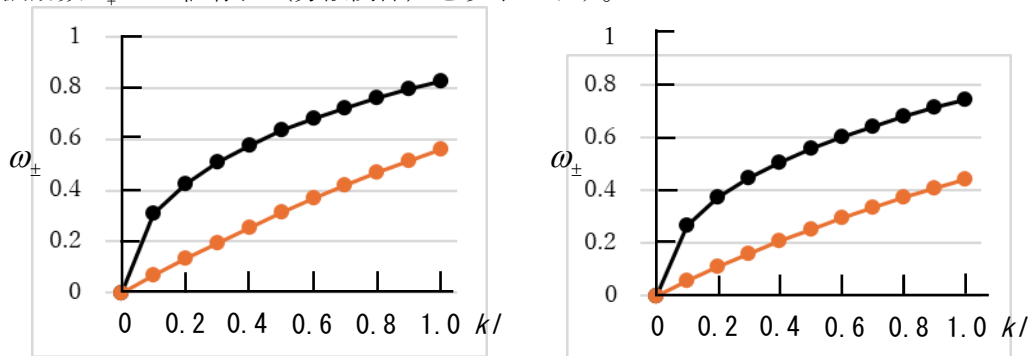
$$\varphi_{\text{eff}}(\mathbf{k}, z, \omega) = \varphi_{\text{ext}}(\mathbf{k}, z, \omega) + \frac{2\pi e^2 k}{m_e \omega^2} \sum_{z_m} n_m \varphi_{\text{eff}}(\mathbf{k}, z_m, \omega) \exp[-(k + \kappa)|z - z_m|] \quad (1)$$

m_e , $-e$ はそれぞれ電子の質量と電荷, n_m は m 層の二次元電子密度である。ここでは、一様な二次元物質が厚さ z 方向に積層する場合を考え、電子間相互作用として面内方向はクーロン型、 z 方向は層間相互作用が異なるとして湯川型を考えた。

二次元電子密度が異なる2層の場合、 $z = z_1, z_2$ とすると式(1)の極値は ω^2 に関する二次方程式となり、層間距離を l とすると、プラズモン共鳴振動数は以下のような2つの値を持つ。

$$\omega_{\pm}^2 = \frac{\pi e^2 (n_1 + n_2) k}{m_e} \pm \sqrt{\left[\frac{\pi e^2 (n_1 + n_2) k}{m_e} \right]^2 - \left(\frac{2\pi e^2 k}{m_e} \right)^2 n_1 n_2 \{1 - \exp[-2(k + \kappa)l]\}} \quad (2)$$

上式において、2層の二次元電子密度が等しく ($n_1 = n_2$)、2層間の相互作用としてクーロン型 ($\kappa=0$) を考え、波数 k が小さいとき、 $\omega_{\pm} \propto k$ となる音響(acoustic)プラズモン共鳴振動数[1, 2]が得られた。式(2)により計算した $\kappa=0$ の場合の $n_1 = n_2$ (左図) と $n_2 = n_1/2$ (右図) における規格化プラズモン共鳴振動数 $\omega_{\pm}$ の kl 依存性 (分散関係) を以下に示す。



$n_1 = n_2$ と $n_2 = n_1/2$ において、音響プラズモン共鳴振動数 $\omega_{\pm} \propto k$ と、単層の場合の共鳴振動数 $\omega_{\pm} \propto \sqrt{k}$ が近似的に得られる。また、 $n_2 = n_1/2$ の場合の共鳴振動数は、 $n_1 = n_2$ の場合のそれより小さいことが分かる。

当日は、3層以上の多層構造の場合についても報告する。

[1]市川昌和：2025 年春季学術講演会 14p-K507-16.

[2] A.A. Husain et al.: Nature **621**, 66 (2023).

光の入射方向で変わるルチル TiO₂ 酸素空孔の 2 光子吸収確率

Polarization direction-dependent 2-photon absorption in the rutile TiO₂ O vacancies

○加藤 弘一、 福谷克之 (東京大学、生産研)

○K. Kato, K. Fukutani (Univ. Tokyo, Institute of Industrial Science)

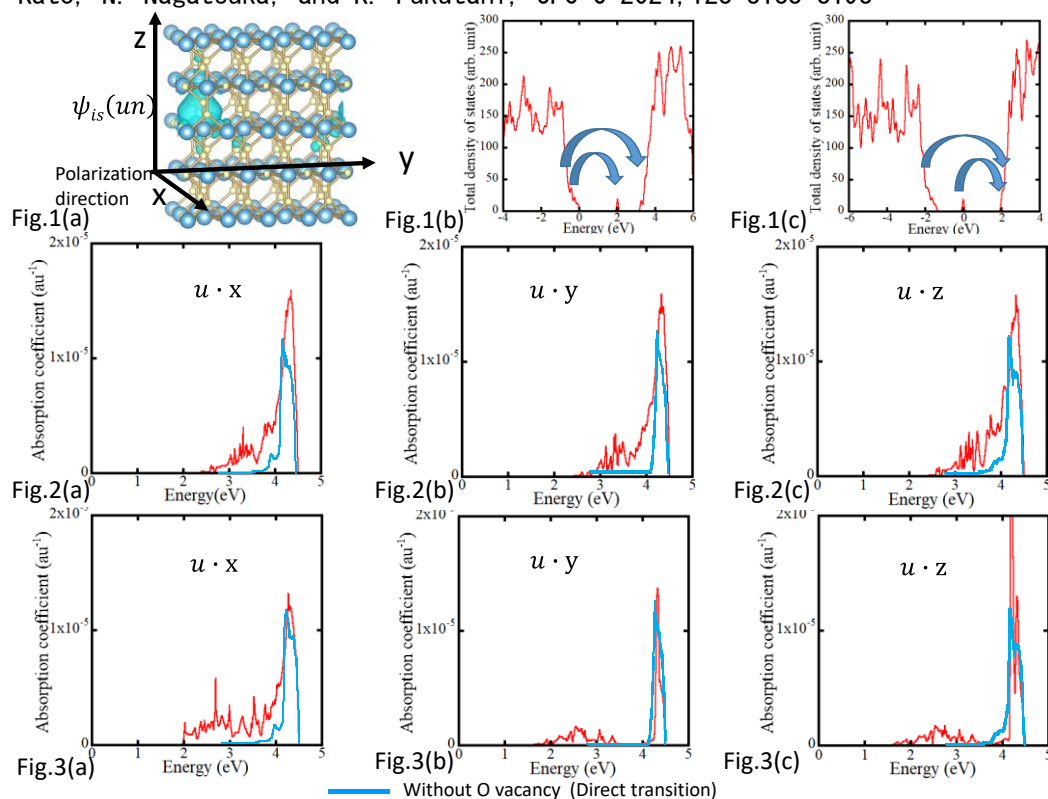
E-mail: k-kato@iis.u-tokyo.co.jp

前回、光触媒で^[1]2光子吸収の1光子目と2光子目の吸収確率がほぼ等しい、1光子目は吸収後の電子構造緩和により準位が下がるものの再結合による励起前への収束が起きにくい、光吸収励起が2光子目の吸収によって律速されることを理論から明らかにした。また、酸素空孔が数パーセント以上あれば、太陽光で1光子による直接遷移よりも高いことも示してきた。これまでルチル TiO₂ の x 軸方向への分極のみ議論してきた。しかし、実際には光は様々な方向から入射するため、y 軸、z 軸方向へ分極する場合には変化も予想され、これら合わせて比較・議論したい。

図 1(a) に示された酸素空孔を含む系に対して、各軸方向に電場が偏光した場合を考えた。1光子目の入射を考える。図 1(b) はこの時の状態密度に対応しており、⇒は状態間の遷移を表す。光の入射方向はこれらの軸に垂直面内にある。酸素軌道の価電子帯は非占有の酸素空孔の影響を受けず、各軸方向に面内で一様に整列した軌道となる。また、伝導帯は Ti 軌道からなるが、非占有の酸素空孔準位の影響を受けない。各軸方向の面内に変化がなく、一様に整列した軌道となる。これらから1光子目の吸収確率を求めると、各偏光軸方向に $u \cdot r$ と分極した場合に、図 2(a)、(b)、(c) となった。ほぼ軸方向による差がない。青は酸素空孔がない場合の直接吸収を示す。

次に2光子目の入射を考える。図 1(c) はこの時の状態密度に対応しており、⇒は状態間の遷移を表す。光の入射方向は同様にこれらの軸に垂直面内にある。価電子帯の酸素軌道は酸素空孔占有の影響はほぼ受けず、各軸方向に変化がなく、一様に整列した軌道となる。ところが、Ti 軌道の伝導帯は、占有された酸素空孔準位による影響を強く受ける。伝導帯は各軸方向に大きく歪み、整列した軌道が大きく壊れる。これから2光子目の吸収確率を求めると、各軸方向に分極した場合にそれぞれ、図 3(a)、(b)、(c) となる。x 軸方向の分極に比べて、y、z 軸方向の分極では吸収確率は、1光子直接遷移共に大きく変化し、2光子目は特に影響が大きいことを表している。

[1] K. Kato, N. Nagatsuka, and K. Fukutani, JPC C 2024, 128 8188–8198



チャープした放射光電場波形の測定

Measurement of the Electric-Field Waveform of Chirped Synchrotron Radiation

豊田工大¹、理研²、分子研³、高輝度光科学研究センター⁴、兵庫県立大学⁵、広島大⁶

○ 藤貴夫¹、田中隆次²、金安達夫³、貴田祐一郎⁴、今村慧⁴、

橋本智⁵、後長葵⁵、金島圭佑⁵、田中義人⁵、加藤政博^{3,6}

TTI¹, RIKEN², IMS³, JASRI⁴, Univ. Hyogo⁵, Hiroshima Univ.⁶

○ Takao Fuji¹, Takashi Tanaka², Tatsuo Kaneyasu³, Yuichiro Kida⁴, Kei Imamura⁴, Satoshi Hashimoto⁵, Aoi Gocho⁵, Keisuke Kaneshima⁵, Yoshihito Tanaka⁵, and Masahiro Katoh^{3,6}

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

近年、多くの放射光施設では、永久磁石を交互に並べたアンジュレータを用いて電子を蛇行させ、擬単色光を放射する手法が一般的となっている。アンジュレータの磁極間隙 (ギャップ) を進行方向に沿って徐々に変化させるテーパアンジュレータを用いると、擬単色光よりも広いスペクトルを持つ光を放射させることができる。このテーパアンジュレータから発生する光波束は、時間的に周波数が変化 (チャープ) していると予想される。しかしこれまで、その周波数が時間的に変化する様子を直接測定する簡便な手法がなかったため、詳細な観測は行われてこなかった。

発表者は、2023 年に放射光の光電場波形を計測する新しい手法を提案した [Optica **10** 302]。これは、超短光パルスのスペクトル位相計測に用いられる SPIDER 法を放射光に応用したものである。本手法では、直列に並んだ 2 台のアンジュレータ (タンデムアンジュレータ) を使い、一方のギャップを調整してわずかに周波数をシフトさせた光波束を生成し、もう一方の光波束と干渉させることで SPIDER のインターフェログラムを測定する。この手法により、発生した光パルスのスペクトル位相を計測し、光パルスが理論どおりに矩形波の包絡線を持ち、その内部でアンジュレータの周期に対応した光波が振動する様子を再現することに成功した。

本研究では、上記の手法をテーパアンジュレータから放射される光パルスに適用した。実験は、兵庫県立大学が運用する放射光施設 NewSUBARU の電子加速器 [J. Synch. Rad. **28** 404] において行った。時間的に周波数が変化した、すなわちチャープした光電場波形に対しても SPIDER 法が有効であることを実証し、本手法の有用性を示した (図 1)。

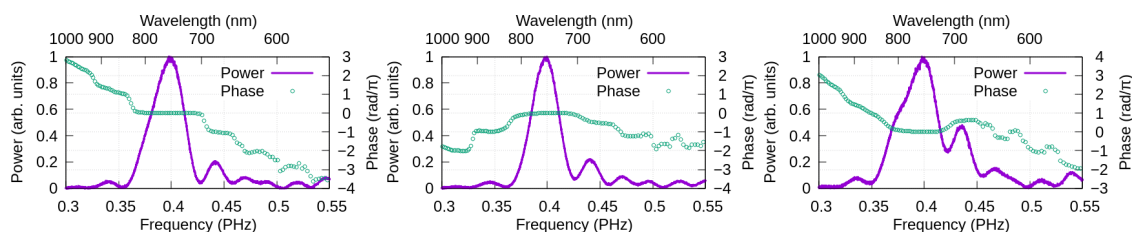


図1 アンジュレータから放射された光波束のパワースペクトルとスペクトル位相。左から、テーパなし、ダウンチャープ、アップチャープの順に並んでいる。

真空中での金属と絶縁体の摩擦帯電の計測と低減の研究

Measurement and reduction of triboelectric charging between metals and insulators in a vacuum

労働安全衛生総合研究所研 〇三浦 崇

National Institute of Occupational Safety and Health, °Takashi Miura

E-mail: miurat@s.jniosh.johas.go.jp

固体を接触したり摩擦したときに発生する静電気について、様々な場面で固体表面が帯電する現象とその放電現象を目にすることがあるが、その原因は解明されていない。電荷が移動するメカニズムを考察する上で、帯電の極性或帯電量についての実験結果も十分ではないと考えている。

現実的には、静電気現象は様々な場面で応用され、また問題になることもある。応用や利用では摩擦に頼らずとも、電圧を印加したりイオンを照射したりする方法で能動的に表面帯電を発生させる方法がとられることが多いが、静電気障害など静電気が不要で問題になる場合は、ほとんどが表面間の摩擦によって発生する静電気である。身の回りでは大気中で静電気現象が起こるため、大気中での摩擦帯電の計測については歴史もあり、表面帯電を除去する方法も様々に開発されてきた。しかし、近年では、半導体製造プロセスや宇宙空間での帯電問題などが指摘されており、真空中での静電気の計測やその除去についての技術開発は重要性を増している。

学術的な面でも、真空中で固体を摩擦し、その静電気量を測定することは、静電気の発生メカニズムを解明するために重要であると考えている。通常、摩擦によって発生した静電気は、その後の放電や漏洩によって緩和されるため、大気中での表面帯電量は真の電荷分離の大きさではなく、桁違いに小さいことが分かっている。真空中では放電や漏洩は大気中よりも起きにくいいため、真の電荷分離を測定することにつながる。様々な物質間の摩擦帯電の極性或静電気量などの特性は少なくとも真空中で測定されなければならないと考えている。

真空中で金属と絶縁体を摩擦し、発生する静電気量をその場で測定するために、真空チェンバーの中で回転するディスク状の絶縁体平板にエレクトロメータに接続した金属試料を接触させて発生した静電気量をモニターする実験装置を開発した。様々な絶縁体と金属の組み合わせで静電気量を測定し、基礎的な実験を行っている。

また、応用的な面では、金属ステージとガラス面の接触や摩擦においてガラス表面が帯電し、その静電気力の発生や気体放電が原因となってガラス基板上の電気回路形成における集塵や破壊による不良が発生し、工業生産性の低下をもたらす問題を解決するため、ガラスの摩擦帯電について、表面改質と金属の選定による静電気量の低減について研究を進めている。

本講演では、真空中での摩擦帯電の測定方法と静電気特性について、また、ガラスの表面改質と金属の種類による真空中での摩擦帯電の低減に関する研究成果と今後の課題を報告する。

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.10】 6.6 プローブ顕微鏡、12.2 評価・基礎物性のコードシェアセッション

[9a-N307-1~11] CS.10 6.6 プローブ顕微鏡、12.2 評価・基礎物性のコードシェアセッション

[9a-N307-1]

Cu(111)基板上ヘキサブロモトリフェニレン分子の形成する構造に原子状水素が与える影響

○葛山 智也¹、坂上 弘之¹、富成 征弘^{2,3}、田中 秀吉²、鈴木 仁¹ (1.広島大院、2.情通研機構、3.産総研)

[9a-N307-2]

光STMと伝導計測による有機分子の動的制御

○本永 健¹、Lukas Gerhard²、Wulf Wulfhekel²、堀江 正樹³、山田 豊和¹ (1.千葉大院工、2.KIT、3.北大)

[9a-N307-3]

リチウム内包C₇₀-CPP超分子の超原子分子軌道(SAMO)計測

○(M2)河野 優輝¹、宗澤 祐紀¹、鶴田 諒平¹、上野 裕²、山田 洋一¹ (1.筑波大数理、2.東北大)

[9a-N307-4]

還元されたRutile TiO₂(110)上のPentacene薄膜の分子配向分析

○(M2)堀 凜太郎¹、長谷川 友里²、前島 尚行¹、滝沢 優¹ (1.立命館大理工、2.筑波大数理)

[9a-N307-5]

界面構造が分子接合における量子干渉効果に与える影響

○藤井 慎太郎¹、山根 蒼志¹、後藤 晴紀¹、西野 智昭¹ (1.科学大院理)

[9a-N307-6]

Ag(111)上のCO単層膜のAFMによる構造解析

木村 光男¹、國貞 雄治²、○杉本 宜昭¹ (1.東大新領域、2.北大院工)

[9a-N307-7]

g-C₃N₄/MoS₂ヘテロ接合界面における光誘起表面電位の時間変化

○鈴木 雄登¹、野田 啓¹ (1.慶應大理工)

[9a-N307-8]

フッ素含有単分子膜における摩擦帯電現象

○中山 優弘¹、三島 直也¹、三坂 朝基¹、山田 剛司¹、大山 浩¹、松本 卓也¹ (1.阪大院理)

[9a-N307-9]

HOPG 基板上に形成した極薄 PDMS 膜の FM-AFM 観察

○大江 弘晃¹、新井 豊子² (1.横浜市大、2.金沢大)

[9a-N307-10]

金属材料の液中における腐食挙動観察

○寶 雄也¹、小澤 敬祐¹ (1.神戸製鋼)

[9a-N307-11]

液中AFMを用いた半導体銅微細配線用防食膜のサブナノスケール構造解析

○岡 大輝¹、林 海斗¹、宮田 一輝¹、宇野 恵²、高東 智佳子²、福岡 剛士¹ (1.金沢大、2.荏原製作所)

Cu(111)基板上ヘキサブロモトリフェニレン分子の形成する構造に 原子状水素が与える影響

Influence of atomic hydrogen on the structure formed by hexabromotriphenylene on a Cu(111) surface

広島大院¹, 情通研機構², 産総研³, ○(M1)葛山 智也¹, 坂上 弘之¹, 富成 征弘^{2,3},
田中 秀吉², 鈴木 仁¹

Hiroshima Univ.¹, NICT², AIST G-QuAT³, ○Tomoya Katsurayama, Hiroyuki Sakaue,
Yukihiro Tominari^{2,3}, Shukichi Tanaka², Hitoshi Suzuki

E-mail: katsu-tmy525@hiroshima-u.ac.jp

我々のグループでは、ウルマン反応を用いたボトムアップ的な製法で周期的に穴の並んだグラフェンであるグラフェンナノメッシュの作製を試みている[1,2]. 473Kに加熱したCu(111)基板に蒸着したヘキサブロモトリフェニレン(HBTP)分子は穴の間隔が0.8nmのメッシュ構造を形成し、その周囲の基板表面には解離したBr原子が吸着し、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} - R30^\circ$ の超構造を形成すること報告した[1]. この基板に吸着したBr原子は分子の拡散を阻害し、構造形成を妨げている可能性がある[3]. 一方、原子状水素の導入によりAu(111)基板上に吸着したBr原子が脱離することが報告されている[4]. 本研究では、Cu(111)基板上でHBTP分子が形成した構造に原子状水素を導入し、その影響を調べた。

HBTP分子を473Kに加熱した状態のCu(111)基板に蒸着した後、原子状水素を導入した。原子状水素は、約2000Kに加熱したWフィラメントにバリアブルリークバルブを通して導入した水素(2×10^{-4} Pa)を接触させ生成した。基板表面上の構造は77KでSTMを用いて観察した。

HBTP分子を473Kに加熱した状態のCu(111)基板に蒸着した試料のSTM像をFig 1, その試料に原子状水素を120秒間導入した試料のSTM像をFig 2に示す。蒸着後は穴の間隔が1.1nmのメッシュ構造とその周囲の基板表面のBr原子の配列が観察された(Fig1)が、原子状水素を導入した試料ではメッシュ構造およびテラス上に吸着したBr原子は消滅し、新たに粒子の配列構造が観察された(Fig2). 粒子の配列は $\sqrt{2} \times \sqrt{2} - R30^\circ$ であり、吸着したBr原子の配列とは異なっていた。

これらの結果は、原子状水素によってメッシュ構造が破壊され、吸着していたBr原子が基板から脱離したことを示している。

本研究の一部は JSPS 科研費 21K04844, 23K04536 の助成を受けた。

[1] Y. Nagatomo, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 59 (2020) SDDA16.

[2] S. Shingae, et al., Chem. Phys. Lett. 849 (2024) 131317.

[3] T. A. Pham, et al., Chm. Eur. J. 2016, 22, 5937-5944

[4] R. Zuaak, et al., J. Phys. Chem. Lett. 2020, 11, 10290-10297

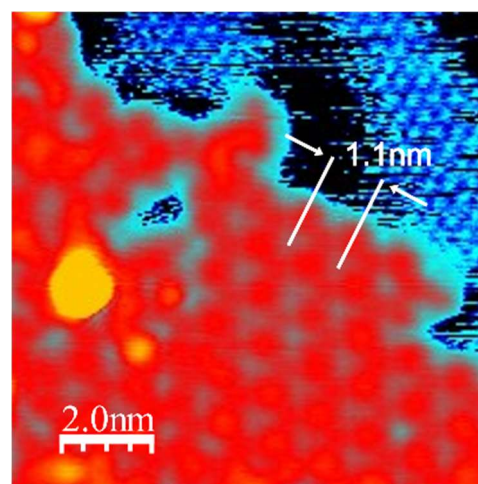


Fig 1. STM image of the molecules deposited on Cu(111) surface.

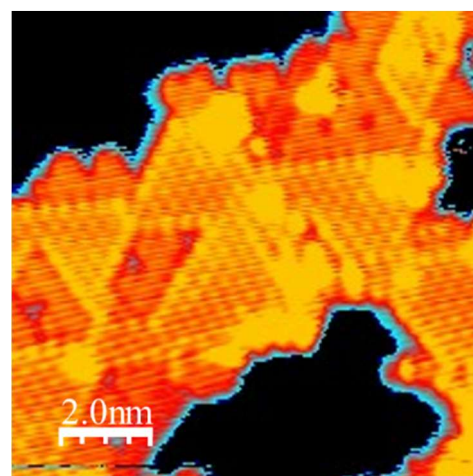


Fig 2. STM image of the structures on Cu(111) surface by the application of atomic hydrogen 120s.

光 STM と伝導計測による光異性化分子の動的制御

Control of Molecular Motion using Photons

千葉大院工¹, KIT², 北大³ °本永 健¹, L. Gerhard², W. Wulfhekel², 堀江 正樹³, 山田 豊和¹

Chiba Univ.¹, KIT², Hokkaido Univ.³

°Ken Motonaga¹, Lukas Gerhard², Wulf Wulfhekel², Masaki Horie³, Toyo Kazu Yamada¹

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

光・電界・電荷といった外的要因で分子の「動き」を自在に制御できれば、分子マシンとして機能する [1]。一例として、光応答で動く分子膜を作製しこれに薬分子をトラップする。特定の場所で光照射した際、薬分子が放出できれば薬デリバリーが実現する。我々は、固体表面上の光応答二次元有機分子膜の開発に挑戦している。

(1) 光異性化分子の合成と光照射走査トンネル顕微鏡(STM)の開発

アゾベンゼン誘導体の前駆体分子 1,2-Bis(4'-chloro[1,1'-biphenyl]-4-yl)-diazene(BCD)を鈴木カップリング反応により合成した。この分子は Fig.1 左図に示すベンゼン環が 2 個ずつ結合しその中心に N=N 二重結合がある。末端に塩素原子がある。この BCD 分子に 365nm 光を照射するとシス体に、445 nm 光を照射するとトランス体に可逆的に変化することを吸光スペクトルで確認した。BCD 単分子が Fig.1 のように三量体を形成すれば図のようなキラリティ変化も期待できる。我々は、超高真空・低温 STM を改造し照射用と検出用の二本光ファイバーを導入した。365nm 光を STM 試料基板表面に照射し、反射光をとりだし分光器に直接入力し 365nm ピークを観察した。

(2) 真空スプレー法によるシストランス単分子の STM 観察

STM によるシストランス分子の観察には、基板表面に分子を壊すことなく吸着する必要がある。その手法として真空昇華法と真空スプレー法がある。Fig.1 右図に我々が Au(111)基板上に吸着し観察したトライポッド型シストランス分子の STM 形状像を示す。真空スプレー法の結果と共に真空昇華法の結果も示す。なお、真空昇華法は加熱を伴うため昇華前に壊れるリスクがある。

(3) 走査電子顕微鏡(SEM)付きプローブ伝導計測機構の開発

STM では Fig.1 のように探針を用いて各分子と基板との面直方向の伝導を計測している。一方で、分子膜は二次元膜である。Fig.1 のようなソース(S)、ドレイン(D)、ゲート(G)を作製し、面内伝導を計測するため SEM 付きプローブ伝導計測機構を立ちあげた。この表面に真空スプレーにて光異性化分子膜を作製し、光による分子の「動き」を伝導で計測できる事に挑戦している。

参考文献: [1] F. Nishino, M. Horie, T. K. Yamada, *et al.*, **Small**, 21, 2408217 (2025).

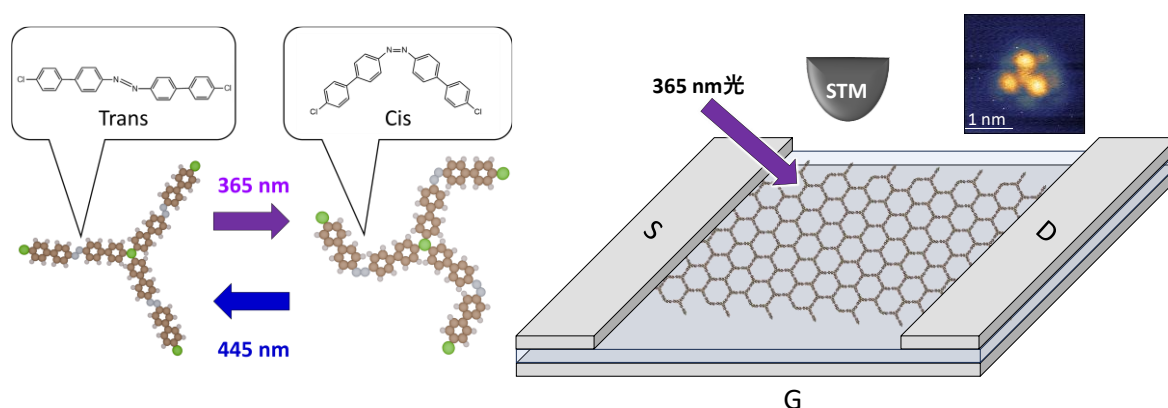


Fig.1. 二次元シストランス光異性体二次元分子膜の模式図とトライポッド単分子 STM 像($2.5 \times 2.5 \text{ nm}^2$, $I_t = 20 \text{ pA}$, $V_s = 1.2 \text{ V}$).

リチウム内包 C₇₀-CPP 超分子の超原子分子軌道 (SAMO) 計測

Electronic Structure of Superaatom Molecular Orbitals of Li⁺@C₇₀-CPP Supramolecules

筑波大数理¹, 東北大² ○(M2)河野 優輝¹, 宗澤 祐紀¹, 鶴田 諒平¹, 上野 裕², 山田 洋一¹

Univ. Tsukuba¹, Tohoku Univ.² ○Y. Kono¹, Y. Munezawa¹, R. Tsuruta¹, H. Ueno², Y. Yamada¹

E-mail : s2420287@u.tsukuba.ac.jp

【はじめに】 分子の周囲に広がる超原子分子軌道(Superaatom Molecular Orbitals: SAMO)は、固体中で非局在化したバンドを形成できるため注目されている。しかし、SAMO はエネルギーが高く、応用にはその安定化が求められる。Li@C₆₀、Li@C₇₀ 等の内包フラーレンでは、内包された Li⁺の存在により SAMO のエネルギーが低下することが知られている。我々はこれまで、Li@C₆₀ 及び Li@C₇₀ の SAMO の自由電子的なバンドの直接観察に取り組んできたが^[1]、応用には更なるエネルギーの低下が必要である。SAMO のエネルギーは Li⁺の位置にも依存するため、その制御が重要であるが難易度が高い。Li@C₆₀ とシクロパラフェニレン(CPP)の超分子

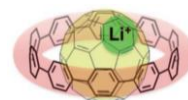


Fig.1 Structure of

Li@C₆₀-CPP complex

(Fig.1)では Li⁺の位置を CPP 付近に束縛できることが報告されている^[2]。そこで本研究では、Li@C₇₀-CPP 超分子薄膜を作製し、Li⁺の位置を制御することで、SAMO の状態変化を直接評価することを目的とした。

【実験及び結果】 清浄化した Cu(111)基板上に[8]CPP を真空蒸着し、単分子膜を作製した。その後、[Li⁺@C₇₀] NTF₂塩から Li@C₇₀ を真空蒸着し、複合薄膜を作製し、STM により直接観察した。

[8]CPP 単分子膜の STM 像を Fig.2(a)に示す。この像から、[8]CPP のリングは Cu(111)上に平行に吸着し、一次元的な列構造を形成することが分かる。次に、[8]CPP 薄膜上に Li@C₇₀ を蒸着した STM 像を Fig.2(b)に示す。この像では球状分子が表面全体に吸着しており、一部には[8]CPP の列構造に起因した分子の配列も確認できる。Fig.2(b)の STM 像の高さに対するヒストグラムを Fig.2(c)に示す。この結果では、直径 2 nm、高さ 0.7 nm 程度の「分子①」、直径 1 nm、高さ 0.3 nm 程度の「分子②」の 2 種類が主に観察された。分子①は[8]CPP 上に吸着した Li@C₇₀ であると考えられる。一方、分子②は[8]CPP の列構造の隙間に入り、基板に吸着した Li@C₇₀ であると考えられる。この複合薄膜では、[8]CPP の内径が小さく、Li@C₇₀ と安定的な超分子は形成できなかったと推察される。現在、より大きな内径を持つ[10]CPP を用いた同様の薄膜を作製し、薄膜の電子状態の計測を進めており、その結果についても議論する予定である。

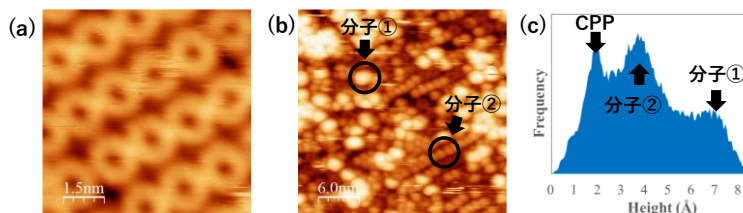


Fig.2 (a)STM image of [8]CPP

(b)STM image of Li@C₇₀/[8]CPP (c)Height histogram of (b)

[1] Y. Yamada, et al., J. Phys. Chem. Lett. 12, 7812 (2021)

[2] H. Ueno, et al., Angew. Chem. Int. Ed. 54, 3707-3711 (2015)

還元された Rutile TiO_2 (110) 上の Pentacene 薄膜の分子配向分析

Molecular orientation analysis of pentacene thin film on reduced rutile TiO_2 (110)

立命館大理工¹, 筑波大数理², [○](M2) 堀 凜太郎¹, 長谷川 友里², 前島 尚行¹, 滝沢 優¹

Ritsumeikan Univ.¹, Univ. of Tsukuba², [○](M2) R. Hori¹, Y. Hasegawa², N. Maejima¹, M. Takizawa¹

E-mail: rp0079xh@ed.ritsumei.ac.jp

柔軟性や軽量性、デザイン性の高さから、次世代エレクトロニクス材料として有機半導体が注目されている。有機半導体デバイスの高効率化には分子配向制御が不可欠である。Pentacene は高いキャリア移動度を有しており、有機半導体デバイスに広く使用されている。Pentacene は一般に、 SiO_2 などの絶縁体基板上では基板に対して垂直に、Au などの貴金属基板上では水平に配向することが知られている。一方、酸化チタンとの組み合わせは、色素増感太陽電池材料として注目されているが、分子配向については十分には検討されていない。Rutile TiO_2 (110)は原子レベルで平坦な面であり、還元処理により触媒活性が異なることが報告されているが、有機半導体分子の分子配向への影響に関する研究はほとんどない。本研究では、還元された Rutile TiO_2 (R- TiO_2) 上に蒸着した pentacene の分子配向や電子構造を吸収端近傍 X 線吸収微細構造 (NEXAFS) 測定と走査型トンネル顕微鏡 (STM) によって調べた。

NEXAFS 測定は、立命館大学 SR センター-BL-8 で行った。Fig. 1 に R- TiO_2 上に蒸着した Pentacene (1ML) のスペクトルを示す。283, 285 eV には C 1s から π^* への遷移に、288 eV 付近には C=O 結合に対応するピークがそれぞれ確認された。後者は酸化された Rutile TiO_2 上の pentacene では観察されず[1]、還元表面の影響が示唆される。膜厚の増加に伴い、LUMO のピーク位置の変化、および 288 eV のピークの減衰が見られた。Fig. 2 に R- TiO_2 (110)および、その上に作製した Pentacene 単層膜の STM 像を示す。R- TiO_2 (110)表面は、[001]方向に沿った Ti 原子列と、その原子列間に酸素欠陥由来の輝点が存在する。Pentacene 単層膜では、分子は基板に水平に吸着しており、Ti 原子列方向と分子長軸がほぼ平行となっている様子が観察された。この分子配向に基づき、NEXAFS のピーク強度の角度依存性および偏光依存性を詳細に解析した結果、単層膜では分子は水平に吸着する一方で、多層膜では吸着角が増加し、膜厚の増加に伴い基板から影響が弱まることが示唆された。

[1] V. Lanzilotto *et al.*, J. Phys. Chem. C 115, 4664 (2011).

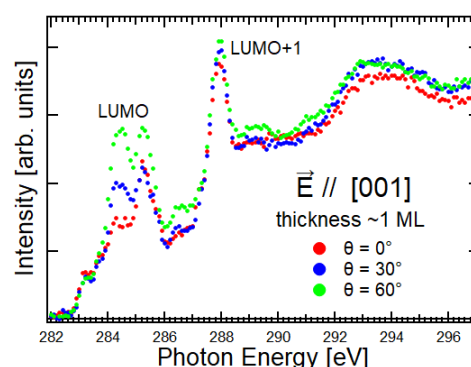


Fig. 1 C K-edge NEXAFS spectra of pentacene on R- TiO_2 .

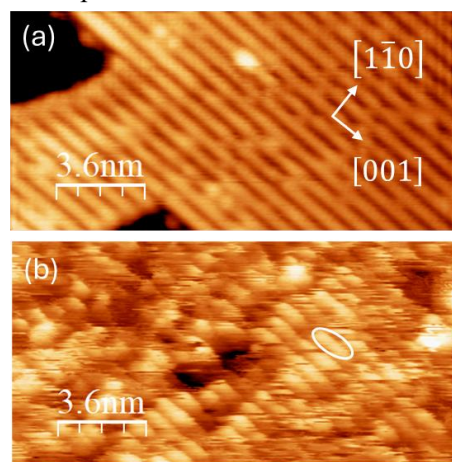


Fig. 2 STM image of (a) Rutile TiO_2 (110) and (b) pentacene on Rutile TiO_2 . Pentacene is indicated by white oval.

界面構造が分子接合における量子干渉効果に与える影響

Impact of Molecule–Electrode Interaction on Quantum Interference Effect in Molecular Junctions

科学大院理¹ ○藤井 慎太郎¹, 山根 蒼志¹, 後藤 晴紀¹, 西野 智昭¹

Institute of Science Tokyo¹, [○]Shintaro Fujii¹, Aoshi Yamane¹, Haruki Goto¹, Tomoaki Nishino¹

E-mail: fujii.s.e8cc@m.isct.ac.jp

量子干渉 (quantum interference, QI) は、単分子スケールにおける電子輸送特性に顕著な変調をもたらす量子現象として注目されている。特に、分子軌道を経由する電子波の干渉により、透過確率が特定のエネルギーで打ち消される破壊的干渉 (destructive QI, DQI) は、伝導度を数桁抑制する効果を持ち、分子素子の伝導性制御や熱電変換性能の向上に寄与することが期待されている。従来、メタ接続ベンゼンや交差共役系の分子において DQI による伝導度低下が報告されているが、分子–電極間の界面構造、とりわけ電極へのアンカー基の種類や結合様式が DQI の顕在化に与える影響については十分に明らかにされていない。

本研究では、共通のナフタレン骨格を有しつつ、異なるアンカー基 (チオール: NDT、ニトリル: NDCN) を導入した分子について、それぞれ 2,6-および 2,7-置換体からなる位置異性体の組を用い (Fig. 1)、分子–電極界面構造が破壊的量子干渉 (DQI) の発現に与える影響を、実験および理論の両面から体系的に検討した。ブレイクジャンクション法を用いた分子接合伸長時の電気伝導度測定の結果、2,7-位に置換された NDT では、2,6-置換体と比較して約 2 桁低い伝導度が観測され、DQI の顕在化が確認された。一方、NDCN では 2,6-置換体と 2,7-置換体で伝導度に顕著な差は見られず、DQI の顕在化による伝導度抑制が生じていないことが示唆された。

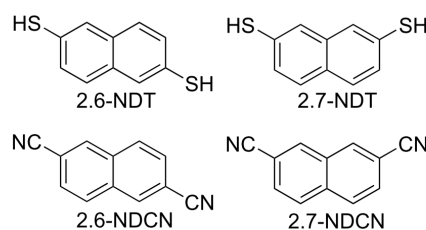


Fig. 1 Chemical structure of molecules studied in this study.

さらに、分子接合の破断距離の解析およびフリッカーノイズ計測の結果、NDCN ではナフタレン骨格と電極との空間的重なりが大きく、through-space トンネリングの寄与が支配的であることが判明した。加えて、DFT-NEGF (density functional non-equilibrium Green's function) 法による輸送計算からも、NDCN においては電極間の距離が短い場合は、 π 骨格と電極の強い重なりが生じ、DQI に基づく伝導抑制が失われることが確認された。

これらの結果は、単分子接合における量子干渉効果の制御において、アンカー基の種類のみならず、接合構造全体としての分子–電極界面の設計が極めて重要であることを示している。今後、分子軌道と電極との電子的カップリングを精密に制御することで、量子干渉を活用した分子素子設計への展開が期待される。

Ag(111)上のCO単層膜のAFMによる構造解析

Structure Identification of CO Monolayer on Ag(111) Using AFM

東大新領域¹ 北大院工² 木村 光男¹、國貞 雄治²、[○]杉本 宜昭¹

Univ. of Tokyo¹, Hokkaido Univ. ² Mitsuo Kimura¹, Yuji Kunisada², [○]Yoshiaki Sugimoto¹

E-mail: ysugimoto@k.u-tokyo.ac.jp

基板表面に物理吸着した分子系は、分子—分子相互作用、分子—基板相互作用が小さいため、その構造を決定することが難しいことが多い。触媒化学や宇宙化学において重要な CO 分子を例にとっても、Ag(111)表面に吸着した CO 単分子層の構造モデルについては、先行研究の STM の結果[1]と LEED の研究[2]の間で矛盾が生じている。

本研究では、4.5 K の超高真空 AFM と DFT 計算を組み合わせることで、Ag(111)表面上の CO 単分子層の吸着構造を明らかにした[3]。4.5 K に冷却された Ag(111)表面に、CO 分子を吸着した後、20 K 程度に昇温して単層膜の試料を作製した。その試料表面を AFM によって観察したところ、個々の CO 分子が明瞭に可視化された。STM 像を元にした先行研究のモデルとは異なり、CO 分子が最密充填構造をとることが示された。さらに、AFM 画像の FFT 解析により、4×4 の超格子パターンが明確に確認された。これにより、Ag(111)基板の $\sqrt{31}\times\sqrt{31}$ 格子と CO 単層膜の 4×4 格子とが高次整合していることがわかった。この超構造は、AFM 画像の CO 分子のコントラストにも表れている。図 1 に示すように、明るい（高い位置の）CO 分子と暗い（低い位置の）CO 分子が確認できる。DFT 計算の結果、CO 分子は Ag(111)表面のトップサイトに吸着することが最も安定であることがわかった。また一部の CO 分子が、分子軸を表面に対して傾斜させることで系のエネルギーが下がることがわかった。DFT の計算を元にしたモデルは、AFM で観測されたコントラストをよく説明した。さらに、4.5 K という低温下においても CO 分子の熱ゆらぎが AFM および STM の両方で観測された。CO 分子のホッピングレートから算出されたエネルギー障壁（約 13 meV）は、DFT 計算による推定値（15 meV-18 meV）と良く一致した。

以上の結果は、低温 AFM と DFT 計算が、物理吸着系の原子レベルでの構造解析に有用であることを示している。

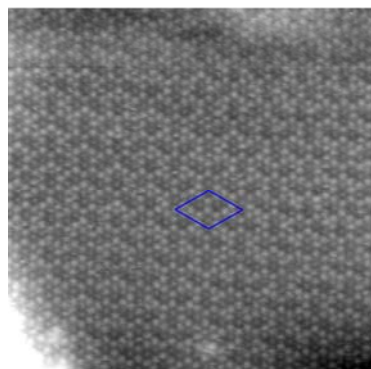


図 1 Ag(111)上の CO 単層膜の AFM 像

[1] M. Kulawik, et al., Phys. Rev. B 71, 153405 (2005).

[2] G. S. Leatherman, R. D. Diehl, Langmuir 13, 7063 (1997).

[3] M. Kimura, Y. Kunisada, and Y. Sugimoto, Adv. Mater. Interfaces 12, 2400904 (2025).

$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{MoS}_2$ ヘテロ接合界面における光誘起表面電位の時間変化

Time-resolved tracking of surface potential at the $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{MoS}_2$ heterojunction interface using

Kelvin probe force microscopy

慶應大・理工, ○鈴木雄登, 野田啓

Keio Univ., ○Yuto Suzuki, Kei Noda

E-mail: yutosuzuki0808@keio.jp

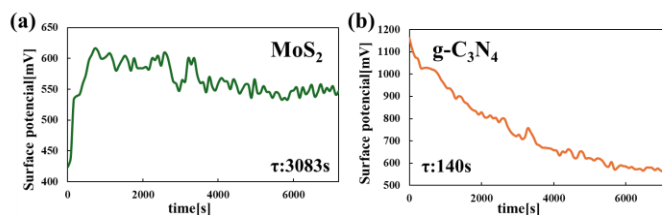
【背景と目的】二硫化モリブデン (MoS_2) と高分子状窒化炭素 ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) からなるナノ構造ヘテロ接合体は、優れた電荷分離性能により、半導体光触媒としての応用が注目されている。一方で、これまでの研究は主にバルク試料を用いたマクロスケールの構造・物性評価に依拠しており、接合界面におけるキャリア挙動の局所的かつ時間依存的な特性は十分に解明されていないのが現状である。そこで本研究では、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 薄膜上に MoS_2 ナノシートを転写することでモデルヘテロ接合系を構築し、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KPFM) を用いて、光照射停止後の表面電位の時間変化を観測し、 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{MoS}_2$ 界面が光誘起電荷の再結合過程に与える影響について考察を行った。

【実験】 Si 基板上に DC スパッタリングで堆積させた Pt 薄膜表面に、管状炉を用いた熱化学気相成長法[1]により $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 薄膜を堆積した。その際、前駆体としてメラミンを使用した。その後、 MoS_2 単結晶に対しスコッチテープを用いた剥離を繰り返し、ナノシート化した後で、前述した $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 薄膜表面に転写を行った。その後、 200°C の条件下で真空アニール処理を行った試料に対して、大気下で KPFM による表面電位計測を行った。

【結果】 KPFM を用いて作製した $\text{MoS}_2/g\text{-C}_3\text{N}_4$ ヘテロ接合界面の表面電位の時間変化を評価した。暗時（基底状態）から紫外光照射により定常励起状態に至るまで保持した後、光照射を停止した時点をも $t=0$ として、そこから 80 秒間隔で計 90 枚の表面電位像を取得した。各像より MoS_2 および $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 領域におけるピーク電位を抽出し、時間変化としてプロットした結果、時定数は MoS_2 で約 140 秒、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ で約 3100 秒と算出された。一方、各単体試料に対して同様の測定を行ったところ、 MoS_2 では光照射終了後の表面電位に顕著な変化は見られず、キャリアの再結合が速やかに進行していることが確認された。 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 単体では、約 1000 秒の時定数が得られた。

このように、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ と MoS_2 の接合界面を形成することで、それぞれの層における表面電位変化の時定数が大幅に増大しており、本接合界面の形成が、光誘起電荷の空間的分離に寄与し、キャリア再結合の抑制につながったと推察される。

【参考文献】 [1] K. Ito et al., ACS Materials Au, 5, 299–307 (2025) doi:10.1021/acsmaterialsau.4c00084.



図(a) MoS_2 表面電位経時変化 ($t=0$ で光照射停止)、図(b) $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 表面電位経時変化 ($t=0$ で光照射停止)

フッ素含有単分子膜における摩擦帯電現象

Triboelectric charging phenomena in fluorine-containing monolayer

阪大院理¹, [○]中山 優弘¹, 三島 直也¹, 三坂 朝基¹, 山田 剛司¹, 大山 浩¹, 松本 卓也¹

Osaka Univ.¹, [○]Masahiro Nakayama¹, Naoya Mishima¹, Tomoki Misaka¹, Takashi Yamada¹,

Hiroshi Ohoyama¹, Takuya Matsumoto¹,

E-mail: nakayamam21@chem.sci.osaka-u.ac.jp

摩擦帯電は古くから知られる帯電現象の一つであり、そのメカニズムはいくつか提案されているが、いまだ未解明である。近年、誘電体のひずみ勾配により自発分極が生じるフレキシエレクトリック効果(FE 効果)を摩擦帯電の起源とする説が提案されているが、多くはシミュレーションに基づいており実験的な研究は少数にとどまっている^[1,2]。さらに、ほとんどの研究はバルク材料を対象としており、分子論的見地からの研究はほとんど行われていない。本研究では、摩擦帯電が生じやすいフッ素含有分子(F-DT) “1H,1H,2H,2H-Perfluorodecanethiol”の自己組織化単分子膜(SAM)に注目し、振幅フィードバック周波数変調原子間力顕微鏡(AM-FMAFM)^[3,4]を用いて中真空・常温下で摩擦帯電現象を周波数シフトで検出した。参照実験として摩擦帯電が生じにくいヘキサチオール(6-HT) 自己組織化単分子膜についても同様の測定を行った。試料作製において、マイカ表面上に真空蒸着した Au(111)基板を作製し、UV-オゾン処理をした。次に F-DT のエタノール溶液に 2 時間浸漬させ、F-DT SAM 膜を作製した。6-HT 膜についても同様に作製した。

AM-FMAFM による周波数シフト測定において F-DT のみで、間欠的にスパイクが観測された(Fig. 1)。また、サンプル電圧の有無にかかわらずスパイクが発現することが分かった。一方で、スパイク現象はカンチレバーのローディングフォース (LF) に強く依存し、LF の増加に伴いスパイク頻度が増加することが分かった。更に、スパイク発生頻度の LF 依存性は、FE 帯電モデルの予測と良い一致を示した^[1,2]。また、DFT 計算により F-DT の構造歪みに伴い電子状態が変化し、LUMO エネルギーが低下することが分かった(Fig. 2a)。これらの結果から、周波数シフトに見られた間欠的スパイクの発生は、カンチレバーからの LF により F-DT が歪むことで LUMO エネルギーが低下し、チップと F-DT 単分子膜間の電子移動が誘起されること (FE 帯電) に起因することが示唆された(Fig. 2b)。今回の結果は、単一単分子層上でのナノスケールにおける FE 帯電の観察の初めての例である。

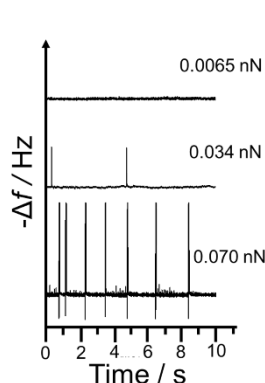


Fig.1 Loading force dependence of spike phenomenon

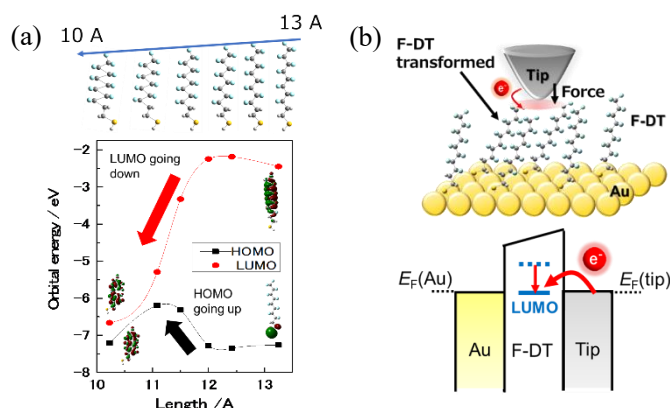


Fig.2 (a) Energy changes in electronic states due to structural strain based on DFT calculations (b) Mechanism of electron transfer associated with triboelectric charging

- [1] C. A. Mizzi, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 116103 (2019). [2] H. Qiao *et al.*, *Adv. Sci.* **8**, 2101793 (2021).
[3] T. Misaka *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**, 090906 (2020). [4] M. Nakayama *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **15**, 47704 (2023).

HOPG 基板上に形成した極薄 PDMS 膜の FM-AFM 観察

PDMS ultrathin film formed on HOPG observed by FM-AFM

横浜市大¹, 金沢大² [○]大江 弘晃¹, 新井 豊子²Yokohama City Univ.¹, Kanazawa Univ.², [○]Hiroaki OOE¹, Toyoko ARAI²

E-mail: hiroooo@yokohama-cu.ac.jp

薄膜による固体のコーティングは、表面構造の保護に加えて、摩擦や濡れ性などの表面物性を制御する上でも重要な技術である[1]。近年、無色透明で耐熱性・化学的安定性を兼ね備えたコーティング材料として、シロキサン結合(Si-O-Si)を主鎖にもつ無機ポリマーである polydimethylsiloxane (PDMS, 図 1) が注目されている。PDMS は、既に潤滑剤や揚げ油の消泡剤として利用されている他、シリカガラスや金属酸化物に塗布すると撥水効果を示すことが知られている[2-4]。しかしながら、PDMS 膜の研究は数百 nm-数 μm 厚が主であり、ナノメートル厚の PDMS 膜は未だ十分に調査されていない。そこで我々は、HOPG 基板上に極めて薄い PDMS 膜を形成し、その表面を大気環境と液中環境の両方で高い空間分解能が得られる自作の周波数変調原子間力顕微鏡(FM-AFM)で調べた。

PDMS は、信越化学工業製の KF-96-50cSt (動粘度 50cSt) を使用した。薄膜の形成は、トルエンで 2 vol% に希釈した PDMS 溶液を 10×10mm の HOPG 基板上に 10 μL 滴下し、試料ホルダーごと傾けることで基板全体を溶液で覆った後、300°C で 10 分間の焼き付け処理を施した。その後、試料を室温に冷やして FM-AFM 観察を行った。さらに、PDMS 溶液の濃度と加熱温度を変化させ、薄膜の形成条件の影響も検討した。

図 2 は、300°C で焼き付け処理した PDMS/HOPG 表面の AFM 像である。全体がランダムな構造で覆われている一方で、HOPG 基板のステップテラス構造も透けて見えている。AFM 像の解析から、これらの構造の高さは大半が 1.0-1.4 nm であり、PDMS 単分子膜の形成が示唆されることがわかった。この PDMS 膜の形成前後で、光学顕微鏡では明確な表面の違いは見られなかった。しかし、図 3 のように接触角が大きくなっており、試料表面の疎水性が向上した。この結果から、HOPG 表面の濡れ性が単分子レベルの PDMS 膜の影響を受けたことが明らかになった。当日は、高分解能 AFM 解析の結果に加えて、液中環境でみられた HOPG 基板上での PDMS の自己組織化についても報告する。

References

- [1] S. R. Quake et al., *Science* **290** (2000) 1536. [2] M. Liu et al., *J. Micromech. Microeng.*, **19** (2009) 035028.
[3] E. J. Park et al., *Langmuir* **30** (2014) 10256. [4] L. Chen et al., *Polymer Testing* **101** (2021) 107281.

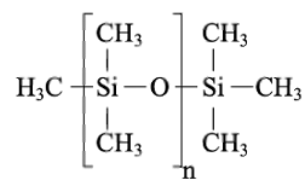


図1. PDMSの化学構造。

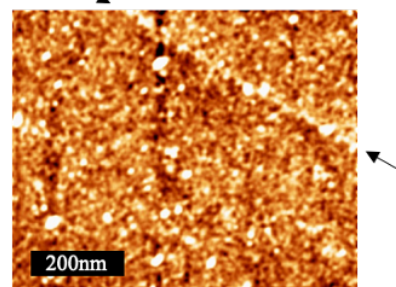


図2. PDMSを焼き付けたHOPGのFM-AFM像。黒矢印はHOPG基板のステップエッジ。

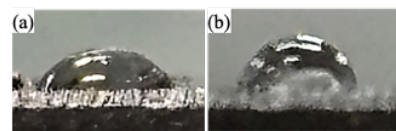


図3. PDMS膜を形成する前後の接触角の比較。(a) 清浄なHOPG、接触角 65° (b) 300°Cで焼付処理したPDMS/HOPG、接触角95°

金属材料の液中における腐食挙動観察

In-situ Observation of Corrosion Behavior of Metallic Materials

株式会社神戸製鋼所¹, °寶 雄也¹, 小澤 敬祐¹

KOBE STEEL, LTD.¹, °Yuya Takara¹, Takahiro Ozawa¹

E-mail: takara.yuya@kobelco.com

鉄鋼材料やアルミニウム合金はそれぞれの特性を活かしてインフラ設備や輸送機等に使用されているが、予期しない腐食が進行することで機械的特性が劣化しトラブルを引き起こすことがある。金属材料の腐食は特定の組織や不純物、金属間化合物といった不均一的な要因を起点として進行することが知られており、材料組織の観点から腐食を加速、もしくは抑制する要因を明らかにすることは耐食性向上や予期しない腐食の防止に向けて重要となる。筆者らはアルミニウム合金の耐食性向上アイデア抽出において合金材料組織内で生じている電位差が腐食の駆動力となることに着目し、KFM および EPMA により取得した表面電位分布と元素分布の対応付けを行うことで金属間化合物の成分と母相との電位差には相関があること、さらに電位差を予測できる可能性があることを見出した^[1]。これにより電位差を狙いの値まで低減させる化合物制御指針の抽出が可能になった一方、腐食挙動に与える要因として電位差以外に化合物のサイズや形状があることが知られており^[2]、腐食進行のメカニズム理解に向けて複合的な要因を考慮したうえで実際の腐食挙動を把握することが重要となる。Figure 1 に示すアルミニウム合金の NaOH による腐食例をみると、観察範囲内の左下に存在する金属間化合物が最も電位差が大きい一方で、優先的に腐食が進行するのはそれより電位差が小さい中央、左上付近の金属間化合物の周囲となっており、必ずしも電位差と腐食挙動とは一致するわけではないことがわかる。当日は液中で金属材料が腐食する挙動を観察し、材料組織が腐食に及ぼす影響について分析した結果を報告する。

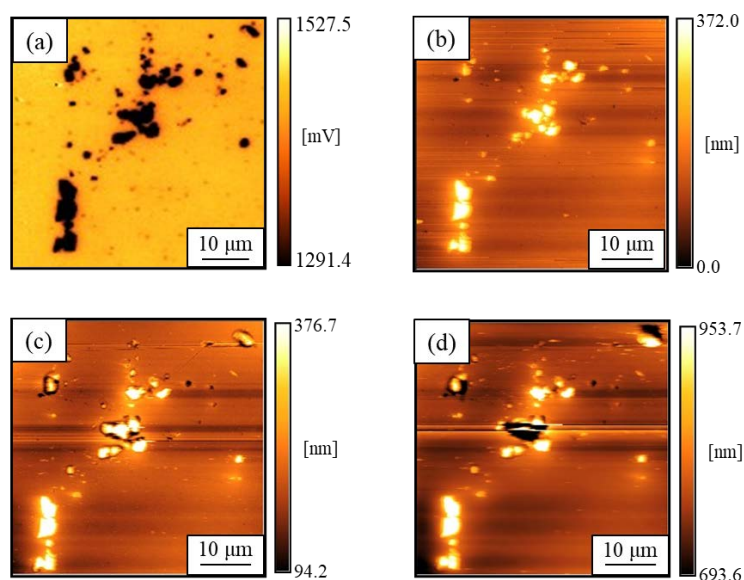


Figure 1 (a) Potential image of aluminum alloy. (b) Topographic image before corrosion. (c)-(d) Topographic images after corrosion in NaOH solution.

【参考文献】

- [1] Y. Takara, T. Ozawa and M. Yamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, SL1008 (2022).
- [2] C. Peng, G. Cao, T. Gu, C. Wang, Z. Wang and C. Sun, *Corros. Sci.*, **210**, 110840 (2023).

液中 AFM を用いた半導体銅微細配線用防食膜の サブナノスケール構造解析

Sub-nanoscale structural analysis of corrosion protection film for copper fine wires on semiconducting devices by in-liquid AFM

金沢大¹, 荏原製作所² °岡 大輝¹, 林 海斗¹, 宮田 一輝¹,
宇野 恵², 高東 智佳子², 福間 剛士¹

Kanazawa Univ.¹, EBARA Corp.², °Daiki Oka¹, Kaito Hayashi¹, Kazuki Miyata¹,

Megumi Uno², Chikako Takatoh², Takeshi Fukuma¹

E-mail: okguitar@stu.kanazawa-u.ac.jp

半導体集積化技術の急速な発展を支える重要な要素の一つに、Cu 配線の微細化がある。Cu 配線はダマシン法で形成されるが、その工程は大きく 3 つの段階に分けられる。第一に、絶縁膜上の配線溝形成、第二に Cu の埋め込み、そして第三に化学的機械研磨 (CMP) による余剰な Cu の除去である。この中でも、CMP は Cu 配線の品質を左右する重要な工程とされている。Cu-CMP のスラリー液には、溶解剤や研磨剤、酸化剤に加え、ベンゾトリアゾール (BTA) のような Cu に対して防食作用を持つ有機物質が含まれており、それらの競争反応の中で研磨が進む。BTA は Cu 表面に防食膜を形成することが知られている。しかし、現在の半導体製造において深刻な局所腐食が発生するケースがあり、その起源として防食膜の欠陥が指摘されている。その局所腐食の起源を明らかにするためにも、BTA 防食膜の構造や形成過程、欠陥の存在を分子スケールで解明することが求められている。そこで、我々は液中周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM)、3 次元走査型力顕微鏡 (3D-SFM) を用いて防食膜形成過程や 3 次元構造の分子スケール計測を行った。

本研究では、第一に Cl で終端された Cu(111)基板上に BTA 溶液をフローさせつつ FM-AFM 計測を行った。ここでは表面構造変化を捉えるため、希薄な溶液を緩やかにフローさせて反応の進行を制御し、これにより BTA 膜の形成過程をその場観察することに成功した (図 1)。初期状態 (0 秒) では、Cu(111)-Cl 再構成表面が観察されたが、858 秒後には BTA 分子膜と考えられる規則性の低い構造に徐々に置き換わり、910 秒後には表面が完全に覆われた。また、この状態で 3D-SFM 計測を行ったところ、XZ 断面像において表面近傍に斜めのストライプ状構造が確認された (図 2)。これは BTA 分子そのものもしくはその上に形成された水和構造を可視化していると考えられる。今後は第一原理計算等によるシミュレーションと比較することで構造を詳細に解析する。

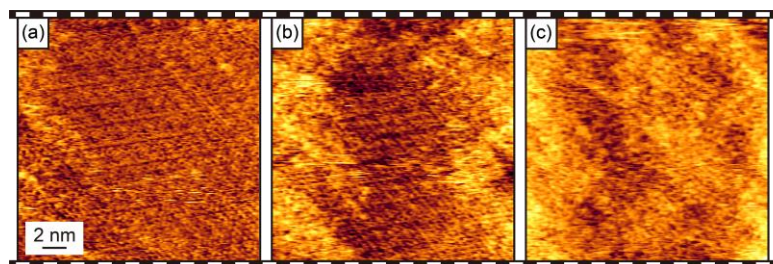


Fig. 1: FM-AFM images showing BTA film formation on Cu(111) surface. (a) 0 s. (b) 858 s. (c) 910 s.

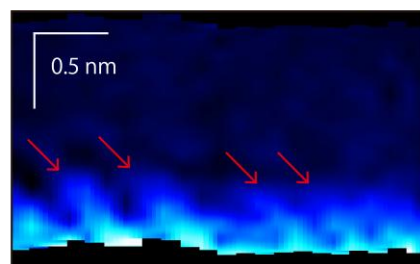


Fig. 2: XZ slice taken from the 3D Δf image of BTA/Cu(111).

CS コードシェアセッション | 一般セッション(口頭講演): 【CS.11】 12.6 ナノバイオテクノロジー、12.7 医用工学・バイオチップのコードシェアセッション

[10a-N305-1~11] CS.11 12.6 ナノバイオテクノロジー、12.7 医用工学・バイオチップのコードシェアセッション

[10a-N305-1]

ペプチド配列決定にむけたジペプチド鎖の1分子トンネル計測・解析法の開発

○大城 敬人¹、小本 祐貴¹、谷口 正輝¹ (1.阪大産研)

[10a-N305-2]

ナノヒータ集積ナノポアによる局所熱制御と1分子センサ応用

○筒井 真楠¹、Hsu Wei-Lun²、横田 一道³、小本 祐貴¹、大宮司 啓文²、川合 知二¹ (1.阪大産研、2.東大工、3.産総研)

[10a-N305-3]

多波長共鳴SEIRAデバイスを用いたノナナルガス分子の検出

○(M2)古市 勝寛¹、党 棠¹、丁 彦¹、田畑 仁¹、松井 裕章¹ (1.東大工)

[10a-N305-4]

Elucidation of plasma-induced effects on single cell using nanopipette and scanning ion conductance microscopy

○(D)Nguyen Gia Han¹, Linhao Sun², Shinji Watanabe², Shunya Kumagai³ (1.Grad.Sch.Nano Life Sci., Kanazawa Univ., 2.WPI-NanoLSI, Kanazawa Univ., 3.Meijo Univ.)

[10a-N305-5]

Enhancing the Electromagnetic Shielding of Soft Contact Lenses

○Saman Azhari¹, Lunjie Hu¹, Hanzhe Zhang¹, Yuki Matsunaga², Jun Hirotsu², Atsushige Ashimori³, Kazuhiro Kimura³, Takeo Miyake¹ (1.Graduate School of Information Production and Systems, Waseda University, 2.Department of Micro Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3.Department of Ophthalmology, Yamaguchi University)

[10a-N305-6]

腸管の構造と動態に基づくon-chipハイドロゲル運動素子の設計と構築

○高橋 陸¹、檜森 匠吾¹、田中 あや¹ (1.NTT物性基礎研・BMC)

[10a-N305-7]

血流感染症向け迅速遺伝子検出技術の多項目化に向けた検討

○清水 沙彩¹、柳川 善光¹、武田 健一¹、坂井 友幸¹ (1.日立製作所)

[10a-N305-8]

MEMS触覚センサを用いた毛髪キューティクル診断システムの開発

○追風 寛歳¹、松井 康訓¹、川越 竜成²、高尾 英邦² (1.パナソニック株式会社、2.香川大学)

[10a-N305-9]

ペプチド-rGO複合体を用いた化学抵抗型水蒸気センシング

○(M2)高須賀 大勢¹、早水 裕平¹ (1.東京科学大)

[10a-N305-10]

熱延伸プロセスによる高効率「ねじれ型」マイクロミキサーの開発

○加藤 駿典¹、ダネシア ザン²、トーエン スー³、リカルド・アルトゥロ ロペス・デ・ラ・クルス⁴、エイミー シェン⁴、郭 媛元¹ (1.東北大学際研、2.ジョージア工科大、3.長庚大、4.沖縄科学技術大)

[10a-N305-11]

窒化チタン電極を形成したCMOSアレイセンサのイオン応答特性とバイオセンシングへの応用

Chew Zhi Shun¹、○土井 英生¹、堀尾 智子¹、崔 容俊¹、高橋 一浩¹、野田 俊彦¹、澤田 和明¹ (1.豊橋技科大)

ペプチド配列決定にむけた
ジペプチド鎖の 1 分子トンネル計測・解析法の開発
Development of Single-Molecule Tunneling Measurement and Analysis Method for
Dipeptide Chains towards Peptide Sequence Determination

阪大産研¹ ○大城敬人¹, 小本祐貴¹, 谷口正輝¹
ISIR-SANKEN, Osaka Univ.¹○Takahito Ohshiro¹, Yuki Komoto¹, Masateru Taniguchi¹

E-mail: toshiro@sanken.osaka-u.ac.jp

1. 緒言

ペプチドは、アミノ酸のユニットからなる生体高分子で、様々な機能発現することからシーケンシングの開発に近年興味が高まってきた。これまで、我々はトンネル電流を指標として 1 分子ごとのコンダクタンスの高速計測可能なセンサー開発を行ってきた。そこで我々は、高速リードが可能なシーケンサーとして、1 分子量子シーケンサーをもちいたペプチドシーケンシング法を提案する。

1 分子量子シーケンサーとは、ナノギャップ電極間を通過する一本鎖生体高分子の各モノマー種の違いを、トンネル電流を指標としたシグナルの違いによって配列決定をする方法である [1-4]。我々の方法では複数のエピ修飾をターゲット分子内で直接観察することができる。

本研究では、ペプチド配列決定に向けたアミノ酸の 1 分子トンネル計測・解析法の開発を行った。ペプチドの N 端と C 端の識別は重要であり、ジペプチド計測を通じてその識別の可能性を検討した。この方法により、1 分子レベルでペプチド鎖の配列解析において重要な情報を得ることができ、より高精度な解析が可能となる。これにより、1 分子トンネル計測を用いたペプチドシーケンシング技術が実現に向けて期待される。

2. 計測・実験条件

計測に用いる nano-MCBIJ デバイスは、シリコン基板に金ナノ接合を形成するこの金細線を熱振動による自己破断後、ピエゾ素子をもちいて電極間距離を最適化し、電気計測を行った。金細線には酸化シリコンのナノ流路を重ね書きした。このときナノ流路とサンプルチャンバーの間の部品を接続するテーパー状の集束部を配置した。この流路を PDMS カ

バーで覆った上、電気泳動で核酸塩基鎖を電気泳動により分子制御し、高速電気計測 (10kHz-100kHz) を行った。測定時にはギャップ電極間には直流 0.1V でバイアス電圧を印加した。ジペプチドとして、Phe-Glu と Glu-Phe を $1\mu\text{M}$ の濃度にしたものを試料溶液として用いた。

3. 結果・考察

ペプチドは、ジペプチドとして、Phe-Glu と Glu-Phe を計測した。得られたシグナルを、機械学習を用いて分子種を識別可能な学習を作成した。得られたシグナル波形を時間方向に分解し、シグナルの平均波形、コンダクタンスのピーク値、平均電流値、シグナル持続時間などの特徴量を基に機械学習モデルの学習と評価を行った。

その結果、65 % のシグナルで識別することが成功した。今回得られた識別能は、シグナル数を重ねることで、識別することが示唆される。この識別は、結合末端の違いによるもの出ることが計算結果より示唆される。

関連論文 [1] Ohshiro T. et al., Nat. Nanotech. (2014), 9, 835 [2] Ohshiro T. et al., Sci.Rep., (2019), 9, 3886 [3] Ohshiro T. et al., Sci.Rep. (2018), 8, 8517. [4] Ohshiro T. et al., Sci. Rep. (2021), 11, 19304. [5] Ohshiro T. et al., Anal. Biochem. (2022), 114645. [6] Ohshiro T. et al., Sci.Rep, (2022), 12, 6945.

ナノヒータ集積ナノポアによる局所熱制御と 1 分子センサ応用 On-site unzipping of single-molecule DNA using a nanoheater-embedded nanopore

阪大産研¹, 東大工², 産総研³, ○筒井 真楠¹, Wei-Lun Hsu², 横田一道³, 小本祐貴¹,

大宮司 啓文², 川合 知二¹

Osaka Univ.¹, Univ. Tokyo², AIST³ ○Makusu Tsutsui¹, Weil-Lun Hsu², Kazumichi Yokota³,

Yuki Komoto¹, Hirofumi Daiguji², Tomoji Kawai¹

E-mail: tsutsui@sanken.osaka-u.ac.jp

固体ナノポアは、半導体技術で量産可能な 1 分子シークエンサーとしての応用が期待されているナノセンサデバイスである。これまで、超極薄膜中に加工したナノポアを用いて、DNA 塩基分子¹やアミノ酸の 1 分子識別²が実証されてきた。しかし、ナノポア法で長鎖 DNA の塩基配列を解読しようとする、二本鎖 DNA をナノポアに通す前に一本鎖化する必要がある。そこで、電解質液を強アルカリ性に調整し、DNA を変性させる手法が試されてきたが、DNA の凝集や、イオン電流ノイズの増大を伴ったことから、一本鎖化された長鎖 DNA の検出は実現されてこなかった³。そこで本研究では、ナノポアのごく近傍だけを昇熱させることで、ナノポアに引き込まれる直前で DNA を一本鎖化させる新たな手法を開発した。

この動作を可能にするのは、固体ナノポアの周囲に集積させたナノヒータである。ナノヒータは、電子線描画法と高周波マグネトロンスパッタ法による金属蒸着により作製する白金ナノコイルで構成され、当該コイルを通電加熱することで、ナノポア周囲の局所温度の自在制御が可能になった。測定対象として λ DNA と pBR322 プラスミドを用い、ナノヒータを加熱した状態で、これらの DNA を一本鎖化させた上で、イオン電流計測による 1 分子検出できるか検証を行った。

まず、リン酸緩衝液中で計測を実施したところ、デバイスの限界までナノヒータ温度を昇温させても λ DNA は一本鎖化されず、二本鎖のまま検出された。一方、DNA の変性を促すためにグリセロールを 40 vol.% の比率で混合すると、 λ DNA と pBR322 プラスミドのどちらも、ある温度以上になると一本鎖化された状態で検出できた。この新しいナノポアデバイス技術は、DNA や RNA の塩基配列解析だけでなく、たんぱく質の 1 分子シーケンシングにも応用可能な原理を備えたものである。

[参考文献]

¹ J. Feng et al., Nat. Nanotechnol., 10, 1070 (2015).

² F. Wang et al., Nat. Commun, 14, 2895 (2023).

³ S. W. Kowalczyk et al., Nano Lett., 10, 1414 (2010).

多波長共鳴 SEIRA デバイスを用いたノナナルガス分子の検出 Detection of Nonanal Gas Molecules Using a Multi-wavelength Resonant SEIRA Device

東大工 〇(M2)古市 勝寛¹, 党 棠¹, 丁 彦¹, 田畑 仁¹, 松井 裕章¹

Tokyo Univ. 〇Katsuhiro Furuichi¹, Tang Dang¹, Yan Ding¹, Hitoshi Tabata¹, Hiroaki Matsui¹

E-mail: furuichi@bioxide.t.u-tokyo.ac.jp

近年、表面増強赤外吸収(SEIRA: Surface Enhanced Infrared Absorption)が微量な生体関連分子の高感度検出に向けて重要なプラットフォームとなる。特に、赤外域 SPR (表面プラズモン共鳴) は分子振動・回転共鳴モードを分子指紋(自己標的マーカー)として用いた分子認識可能なバイオセンシングデバイスとして期待されている。それは従来の可視 SPR と大きく相違する [1][2]。更に、可視 SPR は、分子と金属表面間の誘電率変化に依存するため、低分子(分子量の小さい分子)を用いたバイオセンシングに課題がある。我々の研究グループでは、高感度な赤外 SEIRA デバイスを目指して、Au クロスバー構造に着目する。赤外域は $2.5\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ と幅広い波長帯を持ち、多様な振動共鳴モードが存在する。故に、異なる振動共鳴モードを同時に観測するために、サイズの異なる Au クロスバー構造を一つの基板上に組み込むことで異なる波長で SPR 共鳴を持つ多波長 SEIRA デバイスの構築を行った[1-2]。

本研究では、肺がんマーカーとして知られるノナナル分子に着目し、多波長 SEIRA デバイスを用いた分子認識を実証する。ノナナル分子の吸着に向けて、触媒活性がある ZnO 表面に注目する。ZnO は特異的な表面触媒活性を利用して、高感度なガスセンシングが電気抵抗変化(chemo-resistive)によって実現されてきた。本課題では、電子線リソグラフィーにより作製された多波長 SEIRA デバイス上に ZnO を原子層堆積(ALD)法を用いて積層させ、ノナナル分子の吸着(Wan der Waals 力)を行った。図1に、Au クロスバー構造体の表面 SEM 像を示す。3種類のサイズの異なる Au クロスバーを2次的に配置し、表面プラズモニック格子共鳴(surface plasmonic-lattice resonances)に基づいて、赤外域に3種類の共鳴ピークが形成された(図1a)。異なる共鳴ピークは、 2800 cm^{-1} 、 1600 cm^{-1} 及び 1100 cm^{-1} を中心に持つ(図1b)。それは、メチル基(CH_2 , CH_3)やアミド($\text{C}=\text{O}$)及び PO_4 基の振動共鳴の同時検出に寄与する。図1cに、ノナナル分子の吸着後の SEIRA 信号を示す。ノナナル分子の CH_3 及び COO 基に関する振動ピークが明瞭に観測された。一般的に、ノナナル分子はカルボキシル基を持ち $\text{C}=\text{O}$ 振動を示す(溶液試料の ATR 分光から)。しかし、ZnO 表面上のノナナル分子は 1720 cm^{-1} の $\text{C}=\text{O}$ 振動は見えない。これは ZnO がノナナル分子を表面酸化させた結果による。更に、我々は、ガス吸着した SEIRA デバイスに温度印加させることで、ZnO 表面からガス離脱過程を観測した。室温から温度上昇に伴い、SEIRA 信号は徐々に弱くなり、 175°C 以上でノナナル分子に帰属する SEIRA 信号は消失した。ノナナル分子は 180°C 近傍で熱分解することが知られ、ノナナルの熱離脱と熱分解に関係すると思われる。

References

- [1] T. Dang et al., “Label-free measuring biomolecular interactions using plasmonic metasurfaces with dual bands on surface lattice resonances in the mid-infrared range”, *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 417, 136230 (2024).
- [2] T. Dang et al., “SEIRA control using of mid-infrared metasurfaces with multiple wavelength resonances” to be presented at the 85th Autumn Meeting of the Japan Society of Applied Physics, Presentation No. 19p-A33-15, September 2024.

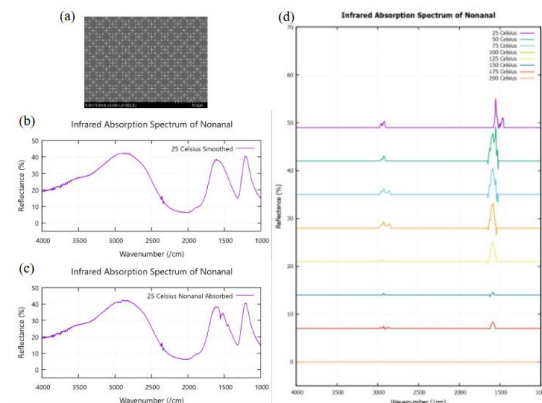


図1. (a) 多波長共鳴に向けた Au クロスバー構造体. (b), (c) ガス吸着前後における SEIRA スペクトル. (d) ガス吸着離脱過程の SEIRA 信号

Elucidation of plasma-induced effects on single cell using nanopipette and scanning ion conductance microscopy

Grad. Sch. Nano Life Sci., Kanazawa Univ.¹, WPI – NanoLSI, Kanazawa Univ.², Meijo Univ.³

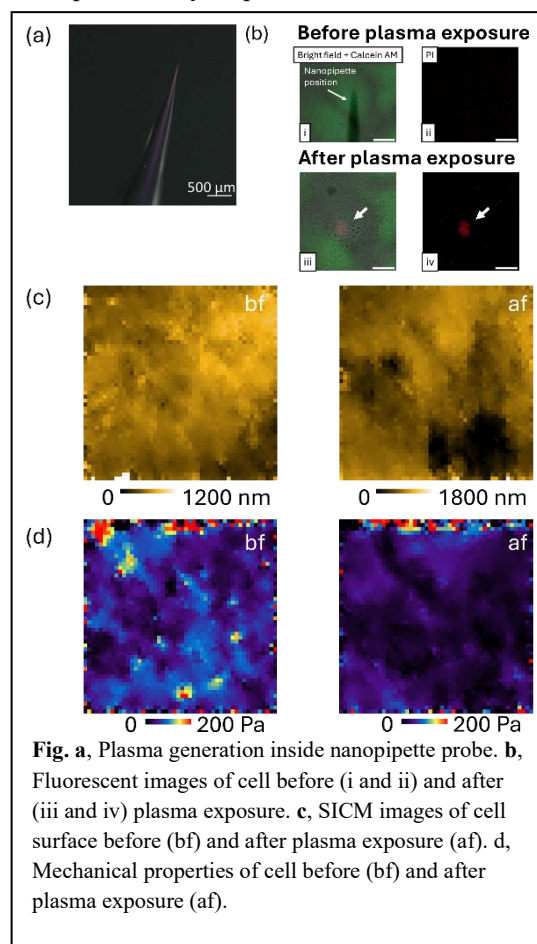
o (D3) Han Gia Nguyen¹, Linhao Sun², Shinya Kumagai³, Shinji Watanabe²

Cold atmospheric plasma (CAP) has used in the studies of life science and medicine for applications including sterilization [1], selective killing of cancer cells [2], gene transfections [3], and more. However, the mechanisms by which CAP affects the cell surface remain unclear. We tried to figure out this phenome by integrating conventional CAP with a home-built scanning ion conductance microscopy (SICM) system [4], a powerful technique for visualizing cell surfaces topography. By this, we observed pore-like patterns [5] and morphological changes on the cell surface [6] after plasma exposure. These findings suggest that CAP-induced modifications may enhance cell permeability. Nevertheless, evaluating CAP effects on cells submerged in liquid remains challenging, due to the rapid spatiotemporal decay of plasma and its inherent instability, which reduces reproducibility.

To address this, we developed a novel CAP probe using a nanopipette (Fig. a), aiming for localized plasma delivery for single-cell stimulation, thereby improving reproducibility of CAP's effects on cells. The effectiveness of this system was assessed using LIVE/DEAD fluorescent dyes (Calcein AM as living cell indicator and Propidium Iodide, PI as the damaged/dead cell indicator) and SICM imaging. Preliminary results showed that the nanopipette-CAP system can target single cells (Fig. b, [7]) and induce surface modifications (Fig. c, [8]) as well as changes in mechanical properties of cell (Fig. d, [8])

Though we successfully established the nanopipette-CAP platform, further optimization is needed. In this study, we aim to determine the optimal plasma exposure conditions and investigate the mechanisms underlying CAP-induced changes in cell mechanics and surface topography, using a combination of SICM and fluorescence-based assays. Our efforts will be presented at the conference.

References: [1] E. Takai et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 295402. [2] S. Iseki et al., Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 113702. [3] M. Jinno et al., J. Photopolym. Sci. Technol. 27 (2014) 399e404. [4] Watanabe S et al., Rev. Sci. Instrum. 90, 123704 (2019). [5] N. G. Han et al., The 69th JSAP Spring Meeting 2022, 25p-E105-4, (2022). [6] N. G. Han et al., The 83rd JSAP Autumn Meeting 2022, 20a-A106-4, (2022). [7] N. G. Han et al., The 85th JSAP Autumn Meeting 2024, 20a-P03-16, (2024). [8] N. G. Han et al., The 72nd JSAP Spring Meeting 2025, 16a-K402-3, (2025).



Enhancing the Electromagnetic Shielding of Soft Contact Lenses

Graduate School of Information Production and Systems, Waseda Univ.¹, Department of Micro

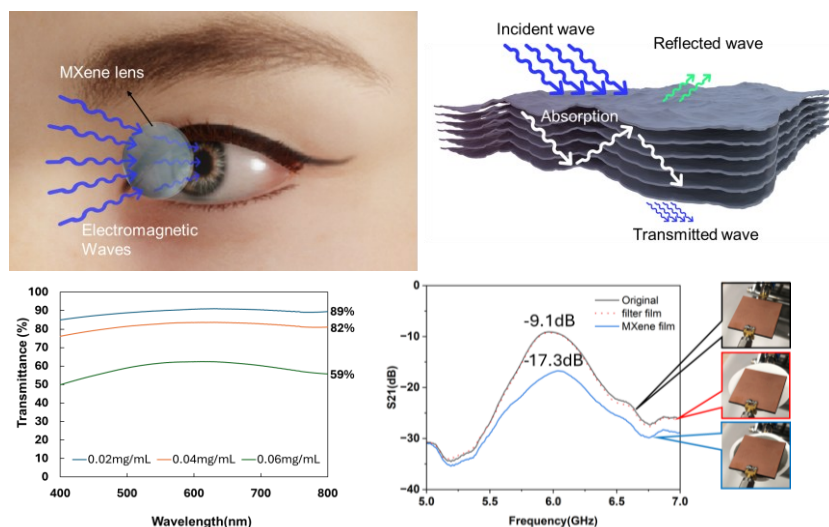
Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.², Department of Ophthalmology,

Yamaguchi Univ.³ ◦Saman Azhari¹, Lunjie Hu¹, Hanzhe Zhang¹, Yuki Matsunaga², Jun Hirotani²,

Atsushige Ashimori³, Kazuhiro Kimura³, Takeo Miyake¹

E-mail: saman@aoni.waseda.jp

The rapid increase in the number of wireless devices is impossible to ignore. We are surrounded by wireless devices, and the number of these devices is increasing daily. Wireless charging, IoT, Bluetooth, GPS, 5G, etc., are just a few examples of how our lives are becoming more and more dependent on such technologies. Although it is still the beginning, the impact of these expansions on the body and health should not be overlooked. Cataract, the cloudy area in the lens of the eye that leads to a decrease in vision, often develops slowly and can affect one or both eyes, is one of the outcomes of being surrounded by electromagnetic radiation (EMR). Cataract can arise due to exposure to various types of radiation. For instance, X-rays may damage the DNA of lens cells; Ultraviolet light has been shown to cause cataracts; Microwaves may cause harm by denaturing protective enzymes or by damaging lens cells. Here we report a simple yet effective approach to tackle the influence of EMR on the eye by transferring a few micron-thick MXene film onto a commercially available soft contact lens. The results confirm the effectiveness of the transfer method in fabricating a transparent and conductive film that can shield more than 80% of the EMR at the GHz range while preventing MXene oxidation. In addition, the contact lens is able to protect the porcine eye against microwave radiation during in vitro measurement. This technique could potentially protect us in the inevitable future, which is filled with wireless devices and the resulting EMR.



References

Hu, Lunjie, et al. "MXene - Integrated Contact Lens: A Breakthrough in Wearable Eye Protection and Healthcare." *Small Science* (2025): 2400628.

腸管の構造と動態に基づく on-chip ハイドロゲル運動素子の設計と構築

Design and construction of an on-chip hydrogel actuator based on intestinal structure and dynamics

NTT 物性基礎研・BMC, °高橋 陸, 檜森 匠吾, 田中 あや

NTT BRL & BMC, °Riku Takahashi, Shogo Himori, Aya Tanaka

E-mail: ri.takahashi@ntt.com

【緒言】生体腸管における蠕動・分節運動は、滑らかな管状構造内で発生するダイナミックな生体運動であり、その再現はバイオミメティックマイクロデバイスにおける重要な設計課題である。我々はこれまでに、光応答性ハイドロゲルで構成された座屈流路を用い、光刺激によって流路を局所的に収縮させることで、腸管運動の一部を再現可能な運動素子を展開してきた[1,2]。しかし、先行研究における Telephone cord 型の座屈構造は、外観上は腸管の蛇行と類似するものの、流路のねじれや複雑な曲率により、運動解析や再現性に課題があった。そこで本研究では、より腸管の機能的形状に近い直線軸+緩曲率を有する Varicose 型の座屈構造に着目し、その形成条件と制御手法を理論および実験の両面から検討した。

【実験・考察】本研究で対象とする座屈構造は、支持基板上へ選択的に接着されたハイドロゲル薄膜が、吸水膨潤によって基板面から浮き上がる過程で、力学的不安定性により立体的な波状変形を呈する現象により形成される[3]。この時の座屈モード（Telephone cord 型 / Varicose 型）は、ゲルの機械特性や接着領域に依存して分岐的に決定される。本形成機構に基づき、我々はまず、ハイドロゲルの弾性率、膨潤率、および基板との剥離幅をパラメータとした有限要素法（FEM）シミュレーションを実施し、座屈モードの条件依存性を解析した。その結果、柔軟な膨潤性ゲルにおいて、剥離幅が広いとより不安定な Telephone cord 型が形成されやすく、剥離幅が小さい場合に直線的な Varicose モードが優勢となることが分かった (Fig.1)。続いて、生体温度範囲 (37~41℃) で駆動可能な光応答性ハイドロゲルを用いて、流路接着パターンを設計・制御することで、シミュレーションに基づいた Varicose 構造の形成を実証した (Fig.2)。得られた構造の波長や高さは計算結果と良好に一致し、設計妥当性が示された。本研究によって設計・作製された座屈流路は、腸管を模倣した運動素子として、今後さらなる応用が期待される。

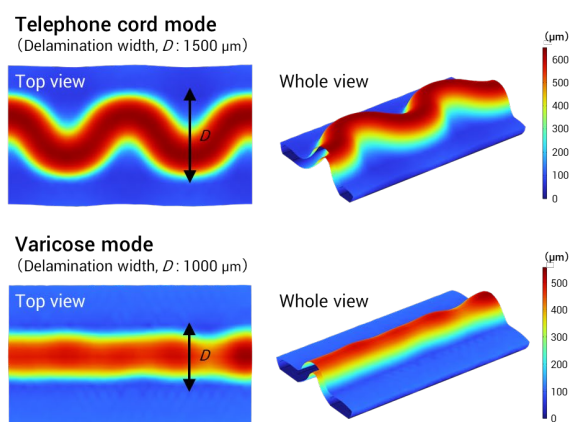


Fig.1: FEM simulation results of buckling structures with varying delamination width (1000 or 1500 μm).

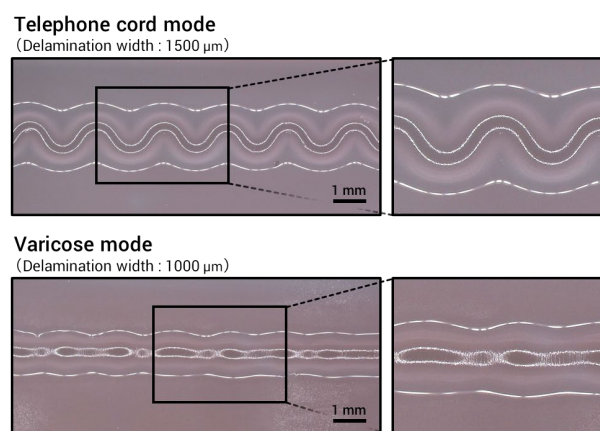


Fig.2: Experimental results of hydrogel buckling structures fabricated under the same parameters as the simulation.

- [1] R. Takahashi, *et al. Adv. Funct. Mater.*, 2023, **33**, 2370148. [2] 高橋他, 春季第 70 回応物, 17a-E102-8.
[3] R. Takahashi, *et al. ACS AMI.*, 2019, **11**, 28267.

血流感染症向け迅速遺伝子検出技術の多項目化に向けた検討 Investigation of Gene Detection for Multiplex test of Bloodstream Infection

清水沙彩¹, 柳川善光¹, 武田健一¹, 坂井友幸¹

Hitachi, Ltd.¹ E-mail: saaya.shimizu.un@hitachi.com

【背景】 薬剤耐性菌による死者数は、2050 年には世界で 1,000 万人/年に達すると推定され、世界的な問題となっている[1]。血流感染症は血液中に細菌が侵入する重篤な感染症であり、発症から 1 時間以内の投薬が必要である。従来の細菌培養ベースの検査には 2~3 日を要するため、治療初期は経験に基づき広域抗菌薬を使わざるを得ず、薬耐性菌蔓延の原因の一つとなっている。血流感染症の細菌検査を 1 時間まで短縮できれば、薬剤耐性菌まん延防止に貢献できると期待される。

【目的】 我々は、Fig. 1 に示す 4 段階からなる遺伝子ベースの迅速検査手法を考案し、マイクロ流体デバイスに統合した”sample-to-answer”システムの実現をめざしている。(4) DNA 検出を 5 分以内に行うため、流路型マイクロアレイを採用した。前回[2]、樹脂製の流路型マイクロアレイを作製し、検出目標 (10^{10} コピー) の標的 DNA の検出を 3.5 分で達成した。感染症の原因菌は多岐にわたり、40 項目程度の多項目性が求められる。このため、(2) DNA 増幅は 40 セット (40-plex) のプライマー存在下で行われ、結果として、大量の未反応プライマー存在下で(4) DNA 検出が行われることになる。本発表の目的は、40-plex 相当量のプライマー存在下での、流路型マイクロアレイの DNA 検出性能を明らかにすることである。

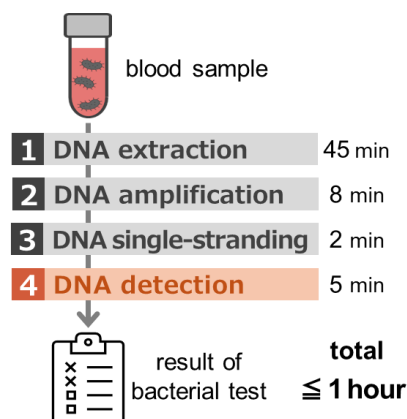


Fig. 1 Gene-based rapid test for bloodstream infection

【方法と結果】 既報[2]では、標的 DNA の標識には蛍光プライマーを用いることを想定していた。そこではじめに 40-plex 相当量の蛍光プライマー (模擬サンプルとして 20nt ランダムオリゴ DNA 使用) 存在下で、流路型マイクロアレイを用いた DNA 検出を検討した。その結果、蛍光プライマーがデバイス表面に非特異吸着しバックグラウンドが上昇、 $S/N=1.5$ と標的 DNA を特異的に検出できなかった。そこで次に、バックグラウンド低減のため、標的 DNA の標識手法の選定を行った。候補となった各手法で使用する標識分子の非特異吸着量を評価し、蛍光ストレプトアビジン (SA) では蛍光プライマーと比較して約 87% 吸着を抑制できることを見出した。よって蛍光 SA を用いる標識手法を採用した。

蛍光 SA による標識反応時の、非特異吸着と標識シグナルの相関関係を明らかにし、 S/N を最大化する反応条件を確立した。本手法を流路型マイクロアレイによる DNA 検出に適用し、40-plex 相当量のプライマー存在下で標的 DNA 10^{10} コピーの検出を評価した。その結果、目標時間内の 4.5 分で標的 DNA (配列 A) を $S/N=13.7$ で検出した (Fig. 2)。



Fig. 2 DNA detection with 40-plex primers

A : Spot with probe sequence A (target)
B, C : Spot with probe sequence B or C (non-target)
N : Negative control spot (w/o probe)

[1] JIMO' NEILL et al., Tackling Drug-resistant Infections Globally (2016)

[2] 清水沙彩, 柳川善光, 坂井友幸 「血流感染症向け迅速遺伝子検出技術の開発」

第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 18p-C31-12 (2024)

MEMS 触覚センサを用いた毛髪キューティクル診断システムの開発

Development of a Hair Cuticle Diagnostic System with a MEMS Tactile Sensor

パナソニック株式会社¹, 香川大学² [○]追風 寛歳¹, 松井 康訓¹, 川越 竜成², 高尾 英邦²

Panasonic Corp.¹, Kagawa Univ.², [○]Hirotooshi Oikaze¹, Yasunori Matsui¹, Ryusei Kawagoe², Hidekuni Takao²

E-mail: oikaze.hirotooshi@jp.panasonic.com

1. はじめに

普段、我々は指先で毛髪表面の手触り感の判別が可能である。そしてこの手触り感の違いによって毛髪健康状態を判別していることから、毛髪の手触り感を取得し毛髪健康状態を客観的に評価する手法を確立することへの需要が高まっている。これに対し我々は 42nm の高さ分解能と、12μN の摩擦力分解能を有する高分解能 MEMS 触覚センサ^[1] (以下、触覚センサ)を搭載したハンディ型毛髪スキャナ(図 1)で毛髪表面の微細構造を可視化することに成功している。

しかし本スキャナでは①手作業による測定バラつきや、②触覚センサの汚れや摩耗による長期的な測定値変動、③触覚センサの出力から毛髪健康状態を診断するアルゴリズム構築という課題があった。そこで本研究では測定再現性の確保と、毛髪専門パネルの官能評価に基づきダメージを定量化する機械学習モデルを搭載した毛髪キューティクル診断システムを新たに開発し、上記課題解決に取り組んだ。

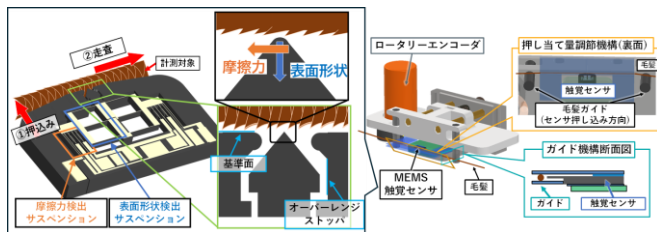


図 1. MEMS 触覚センサ搭載毛髪ハンディスキャナ

2. 毛髪キューティクル診断システムの開発

本研究で開発した毛髪キューティクル診断システムの構成を図 2 に示す。本システムには 3 つの自動ステージを搭載しており、①毛髪の張力が一定になるように毛髪固定端の距離を調整し、②触覚センサと毛髪の接触量が一定になるように触覚センサの高さを調整し、③触覚センサを一定速度で 50mm 領域を 1 往復走査する。これらの動作を自動実行する制御プログラムにより測定バラつきを抑制した。また、触覚センサ用ケースをワンタッチで取り外して定期的な洗浄や交換を可能にすることで長期的な測定値変動を抑制した。

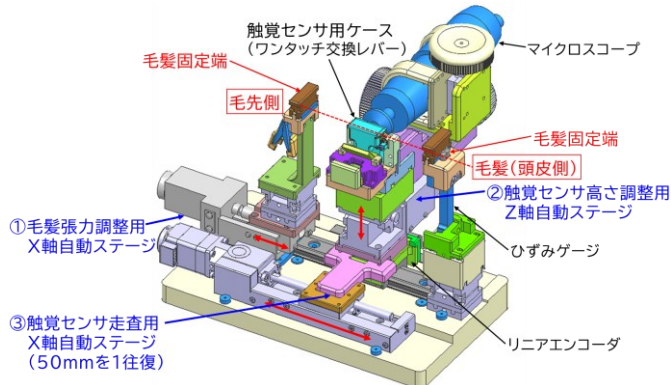


図 2. 毛髪キューティクル診断システム

3. キューティクル枚数定量化アルゴリズムの開発と評価

本システムは触覚センサがキューティクルエッジを乗越える際に生じる摩擦ピークを検出し、そのピーク数からキューティクル枚数を定量化するアルゴリズムを搭載している。精度検証のためキューティクルに類似した鋸歯状の微細周期構造を有するブレード回折格子(Edmund Optics, #64-397, 格子周期 150 本/mm)を測定した結果、検出した平均ピーク間隔は 6.69μm (149.5 本/mm) となり公称値との差異 0.3%と実用上十分な精度を確認した(図 3)。さらに本システムは SEM や AFM の視野を大幅に超える 50 mm 領域を一括計測できるため、キューティクル枚数の局所的変化を定量化し、その分布を可視化することで、従来機器ではとらえきれなかったわずかな損傷までも検出可能となった。

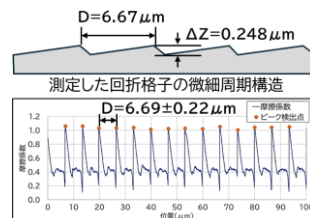


図 3. 回折格子測定結果

4. 毛髪ダメージ定量化アルゴリズムの開発と評価

本研究では毛髪ダメージ定量化アルゴリズムを以下の手順で開発した。①様々な条件でダメージを付与した 648 本の毛髪に対し、施術条件と専門パネルの官能評価に基づき教師データを作成、②本システムで上記毛髪を測定し摩擦特性など 53 の特徴量を抽出、③CatBoost でモデル学習し 5-fold 交差検証で精度を評価、④モデル精度を維持可能な範囲で特徴量を削減した(53→5)。その結果得られた最終モデルの精度は平均 $R^2=0.87$ となり実用水準に到達したと判断した。

本システムによる評価結果例を表 1 に示す。ヒトの 1 本の毛髪(長さ約 500mm)から根元・中間・毛先と部位を変えて各 50mm 領域のキューティクル枚数とダメージレベルを評価した。本毛髪を採取した対象者は過去 4 年間ブリーチやカラー施術を受け続けており、本システムにより根元から毛先へとダメージが蓄積していく過程を定量化できた。

表 1. 同一毛髪の部位別評価結果例

部位	代表毛髪画像とキューティクル枚数測定値	ダメージレベル
根元	 4262枚	78.2点
中間	 2708枚	53.6点
毛先	 683枚	18.7点

本研究では測定の難しい毛髪のキューティクルを高精度かつ広範囲に測定し、健康状態を診断するシステムを実現した。なお本発表では各種毛髪評価結果についても報告する。

文 献

- (1) M. Komatsubara, T. Nakashima, K. Terao, F. Shimokawa, Y. matsui, H. Takao, IEEE MEMS2022, pp.699-702, 2022

ペプチド-rGO 複合体を用いた化学抵抗型水蒸気センシング

Peptide-rGO composites enabling chemoresistive humidity sensing

東京科学大学¹, [○](M2) 高須賀大勢¹, 早水裕平¹

Institute of Science Tokyo¹, (M2) Taisei Takasuka¹, Yuhei Hayamizu¹

E-mail: takasuka.t.c64a@m.isct.ac.jp

ペプチドは比較的短いアミノ酸配列から構成され、化学合成が容易で設計自由度も高いことから、機能性材料の開発において大きな注目を集めている。なかでも、わずか2つのアミノ酸から成るジペプチドは、導電性、圧電性、蛍光性、ハイドロゲル形成など、分子構造に依存した多様な機能を示すことから、近年広く研究が進められている。特に、アミノ酸の組み合わせを変えることで物性を自在に制御できる点は、分子デザイン上の大きな利点である。

本研究では、芳香族アミノ酸と親水性アミノ酸から構成されるジペプチドを用い、 π - π 相互作用を介してグラフェンとの界面制御を実現するとともに、親水性を活用して水蒸気と相互作用する複合材料を設計した。この複合材料を基盤として、化学抵抗型の水蒸気センサの実証を行った。導電性材料には還元型酸化グラフェン (rGO) を用い、ジペプチドにはカルボキシ基を有するアスパラギン酸 (D) とフェニル基を有するフェニルアラニン (F) からなるアスパルテムを選択した。さらに、膜形成時の均一性向上を目的として、第3の成分としてスクロースを添加した。アスパルテムとスクロースの比率を変えて混合溶液を作製し、10 mg/ml の rGO-エタノール分散液と 9:1 の比率で混合させ、チャンネル長 0.1 μm , チャンネル幅 0.5 μm の電極上に 1 μL 滴下、乾燥させることで感応膜を作製した。得られたセンサを容積 1.77 cm^3 のチャンバー内に入れ、水蒸気濃度を調整した窒素混合ガスを流しながら電流を測定することで水蒸気への応答を観察した。

アスパルテムとスクロースの混合比率に応じた偏光顕微鏡像を Fig. 1 に示す。アスパルテムの重量比 1:40 以下ではアスパルテムの結晶ができてしまうが、重量比 1:50 以上の試料では結晶が観察されず、均一な薄膜を得ることができた。電極間に低電圧を印可し、複合材料を流れる電流を観察したところ、重量比 1:50 の試料で水蒸気濃度に対して再現良く電流変化が観測された (Fig. 2)。以上の結果より、ジペプチドと還元型酸化グラフェンの複合材料は、水蒸気の検出に有効な化学抵抗型センサ材料として機能することが示され、簡便かつ安価な湿度センシングデバイスの可能性が示唆された。

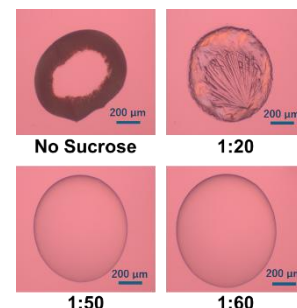


Fig. 1. Polarized light microscopy images of aspartame-sucrose mixtures at different mixing ratios.

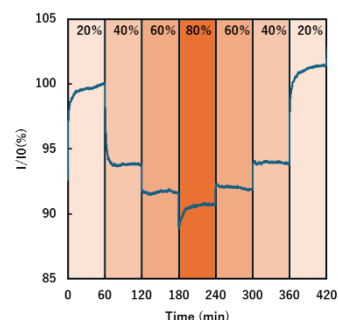


Fig. 2. Time-dependent current change rate of the peptide-rGO composite sensor in response to varying relative humidity levels.

熱延伸プロセスによる高効率「ねじれ型」マイクロミキサーの開発

Development of a High-Efficiency Twisted Microfluidic Mixer

Fabricated via Thermal Drawn Process

(B)加藤駿典¹, Dannesia Zan², To-En Hsu³, Ricardo Arturo Lopez de la Curz⁴,

Amy Q Shen⁴, 郭媛元¹, 東北大学際研¹, Georgia Tech², Chang Gung Univ³, OIST⁴

E-mail: yyuanguo@fris.tohoku.ac.jp

マイクロ流体工学は、マイクロスケールで流体を操作し応用する技術であり、医療診断や化学合成など、多くのアプリケーションで利用されている。マイクロ流体デバイスの性能は、試料の均質かつ効率的な混合に大きく依存する。しかし、マイクロチャネル内の流れは一般に層流であるため、分子拡散による混合プロセスは遅い。そこで、混合を強化するために、カオス移流を促進するような構造が採用される。ソフトリソグラフィーのような微細加工技術によって平面内に螺旋や分離-結合パターンを施したものがよく用いられている。

最近の動向として、より効率的な混合を達成するために 3D（非平面）のマイクロミキサーが注目されている。3D のマイクロミキサーが抱える課題として、製造プロセスの複雑さや既存システムとの統合が困難であることが挙げられる。そこで我々は熱延伸プロセスを活用することで、低コストで製造可能であり、かつ既存システムとの統合を容易にするようなコンパクト性と柔軟性を有する「ねじれ型」のマイクロミキサーの開発に取り組んだ。

熱延伸プロセスでは断面形状を維持したまま、サイズを任意の比で縮小することができる。さらに、延伸中に水平面内に回転を与えることでファイバーをねじりながら延伸することができる (Fig.1(a))[1]。このような手法で製造された「ねじれ型」のマイクロチャネル内 (Fig.1(c-d)) には、試薬の混合に適した旋回流が生成されることが数値流体解析により確認されている (Fig.1(e))。

混合効率を評価するために、2 本の中空針をファイバーに対して T 字に接続し、両側から異なる色の着色液を注入した。2 液が注入直後は層流を形成し、分離していることを確認するために、「ねじれ」領域の前に直線の領域を用意した (Fig.1(b))。簡易的な実験の結果、注入口付近での 2 液の層流による分離 (Fig.1 (f)) と、出口付近での十分な混合 (Fig1. (g)) を確認することができた。

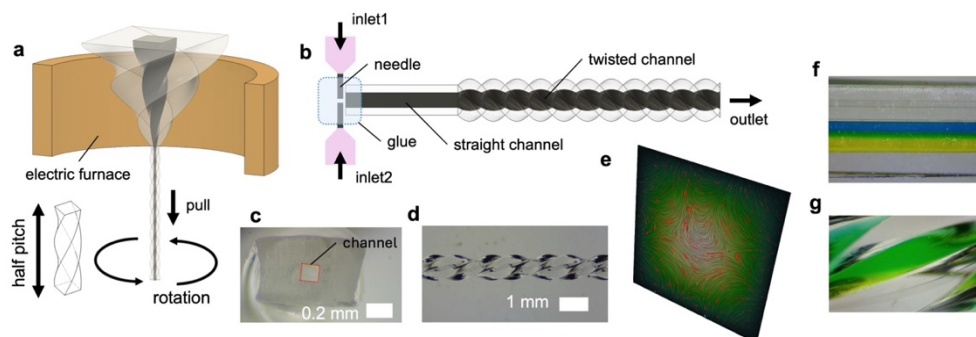


Fig.1 Schematics of the fabrication process and characterization of the fiber micromixer

本研究は JST-FOREST(JPMJFR205D)の支援を受けて実施された。

[1] Kato, Shunsuke, et al. *Microsystems & Nanoengineering* 10.1 (2024): 14.

窒化チタン電極を形成した CMOS アレイセンサの イオン応答特性とバイオセンシングへの応用

Ion response characteristics of a CMOS array sensor with TiN electrodes and biosensing applications

豊橋技術科学大学 Chew Zhi Shun, °土井 英生, 堀尾 智子, 崔 容俊, 高橋 一浩, 野田 俊彦, 澤田 和明

Toyohashi University of Technology

Z.-S. Chew, °H. Doi, T. Horio, Y.-J. Choi, K. Takahashi, T. Noda, K. Sawada

E-mail: doi.hideo.hj@tut.jp

脳細胞外における神経伝達物質とイオンの高分解能イメージングに向け、本研究グループでは導電性の窒化チタン (TiN) が堆積された CMOS アレイセンサ (Fig. 1) の応用を検討してきた⁽¹⁾. TiN はコンタクトにおけるバリアメタルとして広く用いられており, CMOS プロセスとの相性がよい. また, TiN 電極が pH 感応膜として機能する研究報告例⁽²⁾はあるが, バイオセンシングへの応用可能性については詳細に検討されていない. 本研究では, TiN 電極を形成した電位検出型 CMOS アレイセンサ (画素ピッチ: $4.19\ \mu\text{m}$) のイオン計測特性を検討した.

TiN 電極表面には, 窒化ケイ素膜や五酸化タンタル膜と同様に水酸基が形成されていると考えられ, 水素イオン (H^+) が吸着または脱離することで液中の pH 変化を表面電位の変化として計測できる. まず, pH 標準液 (pH4.01, 6.86, 9.18) を用いて出力電位を測定した結果, ネルンスト応答に近い $55 \pm 2\ \text{mV/pH}$ の特性を示した (Fig. 2(a)). H^+ 濃度を減少させた際にも同等の感度特性が得られ, 計測応答の可逆性を確認した. 続いて, イメージングデバイスとしての機能を検証するため, pH 応答の可視化実験を実施した. センサ上を pH9.18 溶液で満たし, 酸性の結晶を投入すると H^+ 濃度上昇に起因するアレイセンサの出力応答が観察され, pH 分布の 2 次元リアルタイムイメージングに成功した (Fig. 2(b)). 生物学的実験環境への応用に向け, 脳内環境を模倣した緩衝液を調製し, TiN 膜の共存イオン (カリウムイオン: K^+ , カルシウムイオン: Ca^{2+} , ナトリウムイオン: Na^+) に対する電位応答を計測した. Fig. 3 に示すように, K^+ , Ca^{2+} および Na^+ 濃度変化にはほぼ応答せず, 高い選択性を確認した. 続いて, これら生理的陽イオンに対応するイオノフォアを用いた PVC 感応膜をセンサ上に形成すると各種イオン濃度に応じた電位応答を示し (K^+ ; $56.6\ \text{mV/dec}$, Ca^{2+} ; $15.2\ \text{mV/dec}$, Na^+ ; $43.5\ \text{mV/dec}$), 電解質陽イオン群を計測可能なセンサとして機能することを確認した. これらの実験結果から, TiN 電極を堆積した CMOS アレイセンサがバイオイメーキングに有用である可能性を示した. 謝辞: 本研究は, MEXT X-NICS JPJ011438, JSPS 科研費 JP23H00182, JP24K17322 の支援を受けたものである.

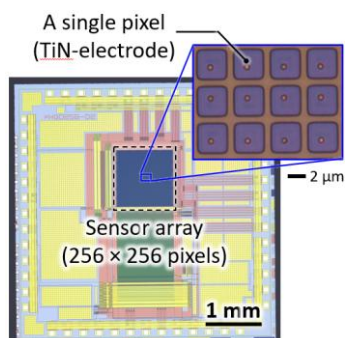


Fig.1 Optical microscopic image of a TiN-deposited CMOS sensor array.

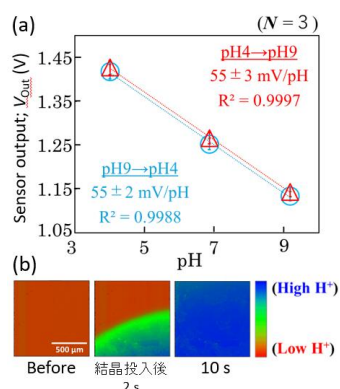


Fig.2 (a) Sensor output plotted against pH and (b) Two dimensional H^+ imaging.

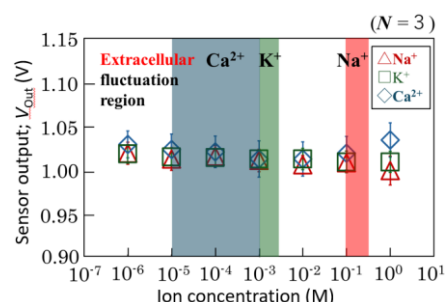


Fig.3 Relationship between the sensor output and interfering ion concentrations.

[1] H. Doi *et al.*, *JJAP*, 64(1), 01SP12, 2025.

[2] S. Shinha *et al.*, *Materials Letters*, 304, 130556, 2021.