

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 【一般公開】先端半導体が切り拓く未来社会 ～応用物理への期待～

[16p-A24-1~8] 【一般公開】先端半導体が切り拓く未来社会 ～応用物理への期待～

[16p-A24-1]

シンポジウムの趣旨説明

○染谷 隆夫¹ (1.東京大学大学院工学研究科)

[16p-A24-2]

半導体産業の持続的成長に向けて

-今、何故「最先端半導体」を選択したか？-

○東 哲郎^{1,2} (1.Rapidus株式会社、2.LSTC)

[16p-A24-3]

次世代サイバーインフラの研究開発

○中尾 彰宏¹ (1.東大工学系研究科)

[16p-A24-4]

積層型CMOSイメージセンサの開発

○梅林 拓¹ (1.SSS)

[16p-A24-5]

半導体量子情報デバイスの開発

○樽茶 清悟¹ (1.理研)

[16p-A24-6]

Challenges in Advanced Semiconductor Industry: Technology, Design, and Talents

○Meng-Fan Chang¹ (1.TSMC)

[16p-A24-7]

先端半導体分野で輝く研究開発人財

○戸津 健太郎¹ (1.東北大学マイクロシステム融合研究開発センター)

[16p-A24-8]

パネルディスカッション

○染谷 隆夫¹、東 哲郎^{2,3}、中尾 彰宏⁴、梅林 拓⁵、樽茶 清悟⁶、Chang Meng-Fan⁷、戸津 健太郎⁸ (1. 東京大学大学院工学研究科、2.Rapidus株式会社、3.LSTC、4.東京大学工学系研究科、5.ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社、6.理化学研究所、7.TSMC、8.東北大学)

半導体産業の持続的成長に向けて
—今、何故「最先端半導体」を選択したか?—

Rapidus 株式会社 取締役会長、LSTC 理事長
東哲郎

Towards Sustainable Growth of Leading-edge Semiconductor Industry
—Why Now I choose the Leading-edge Semiconductor Technology—

Rapidus Corporation, LSTC Chairman
Terry Higashi



1. 半導体産業の変遷
2. AIがもたらすもの
3. なぜ今なのか
4. Rapidusの戦略
5. Rapidusが描く北海道の未来

次世代サイバーインフラの研究開発 R&D of Next Generation Cyber Infrastructure

東京大学¹ °中尾彰宏¹

The University of Tokyo¹, °Akihiro Nakao

E-mail: nakao@nakao-lab.org

我々の社会経済活動の全ては人命の維持さえもサイバーインフラ（サイバー世界を支える情報通信技術のインフラ）に依存している。コロナ禍等のパンデミックや、頻発化・激甚化する自然災害等の影響を受けず、国民生活を安定的に継続させる「ライフライン」としての役割を期待される次世代サイバーインフラの研究開発が進んでいる。

NTN（非地上系ネットワーク）を活用することで、情報の流通範囲を飛躍的に拡張し、AI と情報通信を組み合わせることで、未然に障害を防ぐなど、情報通信が人間の生命の維持や経済活動の継続などに影響がないことを保証することが期待されている。

また、デジタル技術を駆使したライフラインの上に、人類に幸福をもたらす様々なユースケースが実現可能である。取得した物理世界の情報をサイバー世界にリアルタイムに反映し、データ処理に AI を活用してこれまで困難であった社会事象の予測や人知を超えた判断等が可能となる。

近年、情報通信分野では AI の利活用が急速に進展している。今年バルセロナで開催されたモバイル通信の最先端技術の国際展示会 MWC2024（2700 社の展示、205 カ国から 10 万人以上が参加）では、情報通信と AI の融合が象徴的であった。NVIDIA 主導の「AI RAN Alliance」の設立(日本からは Softbank や東京大学が Founding Member)、など産業界の動向が報告されている。また、O-RANの標準化においても AI の活用を想定する RIC (RAN Intelligent Controller)が提唱されている。

学術界では、RISING（超知性ネットワーキングに係る横断型研究会）が 2019 年に発足、電子情報通信学会の 19 研専を横断的に横串として AI x 情報通信の学理に取り組んでいる。

これらの情報通信業界の AI 利活用の裏には、半導体の進化が欠かせない。特に、情報通信に AI 技術を適用するユースケースは、障害予測・障害検知・自動修復、トラフィック予測・制御、通信需要予測による低消費電力化、無線通信周波数動的割り当て、エッジ AI コンピューティング（モバイル通信機能と AI 推論機能の計算リソースの共用）、無線レイヤー高度信号処理の AI 最適化（チャンネル推定・信号補間など）、セル間調整（Inter-Cell Coordination）、分散 MIMO、AI による変復調方式(AI-Native Air-Interface)、通信とセンシングの融合(JCAS)など枚挙に暇がない。複雑な AI 機能の投入と低消費電力性の両立の実現に専用半導体への期待がある。

また、情報通信と情報科学が融合する学理の推進に加えて人財育成も必須である。将来にわたって情報通信を国の重要インフラとして継続的に構築していくためには、半導体・AI 技術と情報通信技術の研究教育を総合知のアプローチで推進し、新たな情報通信産業に人財育成・人財供給をしていく必要がある。

本講演では、情報通信を巡る最新動向を紹介し先進半導体の研究開発への期待を議論する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】先端半導体が切り拓く未来社会 ～応用物理への期待～

[16p-A24-1~8] 【一般公開】先端半導体が切り拓く未来社会 ～応用物理への期待～

[16p-A24-4] 積層型CMOSイメージセンサの開発

○梅林 拓¹ (1.SSS)

キーワード：イメージセンサ、積層構造、シリコン貫通ビア

カメラの撮像素子、CMOSイメージセンサは、近年「積層型構造」が主流となって、スマートフォンや自動車の撮像・認識機能に大きな変化をもたらしました。積層型を開発するに至った発想とそのメリット・効果について説明します。

半導体量子情報デバイスの開発

Development of Semiconductor Quantum Information Devices

理研創発物性科学研究センター、量子コンピュータ研究センター 樽茶 清悟

RIKEN Center for Emergent Matter Science & Quantum Computing Seigo Tarucha

E-mail: tarucha@riken.jp

近年半導体を用いた量子情報デバイスとして量子コンピュータ、量子センサーなどの研究が急速に進んでいる。中でもコヒーレンスが長い、作製プロセスが CMOS の生産ラインと親和性がある、1 ケルビン以上で動作可能であり、低温の CMOS 電子回路との一体化が見込める、といった特徴に注目してシリコン量子コンピュータの研究が活発化している。最近では Intel や Imec といった世界の主要半導体製造機関も開発に参入している。その結果、先ごろまで半導体の課題とされていた量子操作の高忠実度化の研究を経て、量子誤り訂正、大規模化などに研究の中心が移りつつある。講演では量子コンピュータ研究を中心に半導体量子情報デバイスの開発現状と将来展望について紹介する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】先端半導体が切り拓く未来社会 ～応用物理への期待～

[16p-A24-1~8] 【一般公開】先端半導体が切り拓く未来社会 ～応用物理への期待～

[16p-A24-6] Challenges in Advanced Semiconductor Industry: Technology, Design, and Talents

○Meng-Fan Chang¹ (1.TSMC)

キーワード：半導体

The increasing demand for data-centric products and services necessitates innovation across the entire semiconductor technology stack. This talk will discuss recent breakthroughs in semiconductor, including device, material, 3D-IC, and design-technology co-optimization (DTCO). However, challenges in technology, design, testing for advanced semiconductor continuous raise. Moreover, to further propel technological advancement, it is imperative to address the global talent shortage in the semiconductor industry through collaboration between industry and academia to incubate new talent.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】先端半導体が切り拓く未来社会 ～応用物理への期待～

[16p-A24-1~8] 【一般公開】先端半導体が切り拓く未来社会 ～応用物理への期待～

[16p-A24-7] 先端半導体分野で輝く研究開発人財

○戸津 健太郎¹ (1.東北大学マイクロシステム融合研究開発センター)

キーワード：半導体人財、人財育成

高性能で高効率な先端半導体がIT機器、クルマ、ロボットなどあらゆる製品の性能を決定していく。先端半導体の社会への影響力が増す中で、応用物理に関係する設計、材料、デバイス、プロセス、評価などの半導体各分野の研究開発成果が与えるインパクトも大きくなってきている。そのため、研究開発者の活躍機会が拡大するとともに、社会の期待も高まっている。本講演では、先端半導体分野で活躍が期待される人財とその育成について、LSTCの活動も交えて紹介する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 【一般公開】奮闘する日本の先端パワー半導体

[17a-A41-1~3] 【一般公開】奮闘する日本の先端パワー半導体

[17a-A41-1]

オープニング

○矢野 裕司^{1,2} (1.筑波大学、2.先進パワー半導体分科会 副幹事長)

[17a-A41-2]

会長挨拶

○木本 恒暢^{1,2} (1.京都大学、2.応用物理学会会長)

[17a-A41-3]

化合物半導体を用いたIPMのゲート駆動技術

○吉江 徹¹ (1.サンケン電気)

化合物半導体を用いた IPM のゲート駆動技術

Gate drive technology for wide bandgap semiconductor device IPM

サンケン電気¹, ○吉江 徹¹

Sanken electric¹, ○Toru Yoshie¹

E-mail: yoshie@sanken-ele.co.jp

ワイドバンドギャップ化合物半導体である SiC 及び、GaN は、従来の Si に比べて低損失のパワーデバイスを実現できることで、車載関係を中心に普及が進んでいる。しかし、様々な課題が残されており、Si をそのまま置き換えるに至らない状況である。化合物半導体を用いるメリットは、高速動作と素子サイズ小型化であるが、高速動作ではサージや放射ノイズが問題になり [1]、小型化では異常動作時の短絡耐量等が問題となる [2]。このような課題の解決を狙った研究が進められる一方で、これら材料の弱点を十分理解して使いこなす技術も重要である。本報告では、弊社が SiC や、GaN を製品化する上で重要なゲートドライブに関する技術を紹介する。

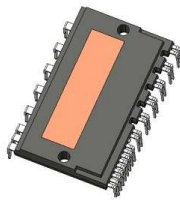


図 1: SiC-IPM

図 1 は、弊社の SiC 製品で、3 相モーター用 IPM である。SiC-MOSFET6 石とゲートドライバーを搭載した 52 × 31 mm のパッケージで、ディスクリットパッケージで構成した場合の 1/3 以下の小型化が実現可能である。更に、Si-IGBT を搭載したものに比べ約 2 倍の電流容量の 50A までの SiC チップを搭載可能であり、同一電流では 1/2 以下の損失を実現している。一方で、ゲート駆動の抵抗値を下げることでスイッチング速度を速め、更なる損失低減化が可能であるが、高速のスイッチング後のサージが問題となる。

図 2 は SiC-IPM のスイッチング波形を示す。500A/ μ sec 程度のスイッチング速度で 600V、50A の ON 及び、OFF の結果である。図中、対策前と示された灰色の波形には ± 10 A で 30MHz 程度のサージがみられるが、対策後と示された赤色の波形にはサージが無く、スムーズなスイッチングが確認できる。本対策とは、モジュール内のインダクタンスを最適にした結果であり、単純に最小にした場合には対策前の様なサージを発生することを示している。

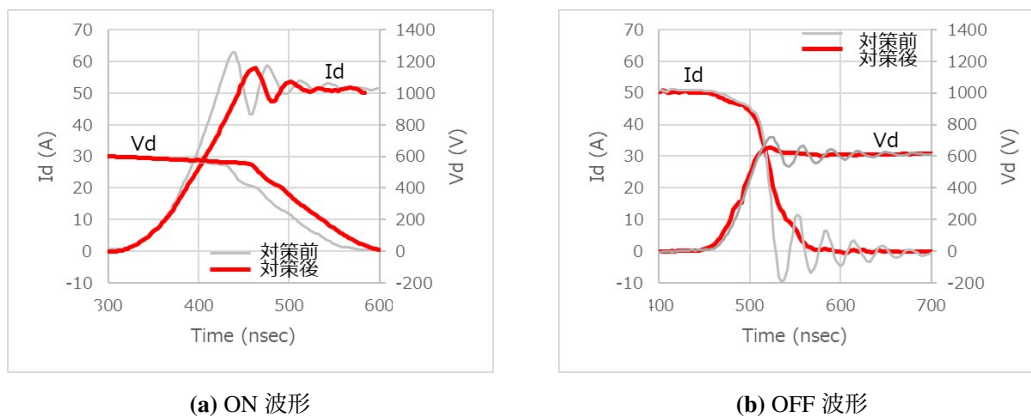


図 2: SiC IPM スwitching 波形

参考文献

- [1] A.Yao, M.Okamoto, et.al., /EICE Electronics Express, advpub. 144, issue 3, pp.18.20210234, 2021.
- [2] K.Yao, N.Iwamuro, /EEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, vol. 144, issue 3, pp. 204-211, 2024.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 【一般公開】奮闘する日本の先端パワー半導体

[17p-A41-1~9] 【一般公開】奮闘する日本の先端パワー半導体

[17p-A41-1]

今後の半導体戦略について

○清水 英路¹ (1.経済産業省 商務情報政策局 情報産業課 デバイス・半導体戦略室)

[17p-A41-2]

ロームが取り組むワイドバンドギャップ半導体

○喜多川 聖也¹ (1.ローム)

[17p-A41-3]

パワーデバイスの進化と応用機器の動向

○西川 和康¹ (1.三菱電機(株))

[17p-A41-4]

電動車用パワー半導体の進化と開発動向

○藤原 広和¹ (1.ミライズテクノロジーズ)

[17p-A41-5]

シリコンパワーデバイスの技術動向

○齋藤 渉¹ (1.九大応力研)

[17p-A41-6]

SiCパワー半導体の現状と今後の展開

○田中 保宣¹ (1.産総研)

[17p-A41-7]

GaNパワーデバイスの現状と今後の展開

○須田 淳^{1,2} (1.名大院工、2.名大未来研)

[17p-A41-8]

WBG半導体によるパワエレ用途拡大と課題

○日下 佳祐¹ (1.長岡技大)

[17p-A41-9]

クロージング

○田中 保宣^{1,2} (1.産業技術総合研究所、2.先進パワー半導体分科会 前幹事長)

ロームが取り組むワイドバンドギャップ半導体

ROHM's activity for wide-bandgap semiconductors

ローム株式会社¹ 〇喜多川聖也¹

ROHM Co., Ltd.¹ 〇Seiya Kitagawa¹

E-mail: seiya.kitagawa@mnf.rohmc.co.jp

近年採用が急速に広がっているワイドバンドギャップ半導体（パワー半導体）だが、車載用インバータや充電器をはじめ、産業施設やインフラ、再生可能エネルギー、家庭用小型 AC アダプターなど、あらゆる分野でも需要が高まっている。

そういった需要の高まりを受け、ロームでは業界トップクラスの SiC（炭化ケイ素）や従来型 Si（シリコン）、注目度の高い GaN（窒化ガリウム）など、幅広い材料を採用し、電力を効率よく取り扱うパワー半導体を提供する。Fig. 1 に示す高い耐電圧、低い損失、高温動作とその耐久性、高速スイッチング動作、高い放熱性などは、電力を効率よく変換するために必ず確認される指標であり、パワー半導体は、従来型 Si に比べ、その指標を引き出す物性において優れた特性を示している。ロームは SiC や GaN の優れた物性に注目し、2000 年より研究を重ね、2010 年に世界で初めて SiC MOSFET（EcoSiC™）の量産化に成功した。その後 SiC モジュールやトレンチ型 SiC MOSFET を世界で初めて量産するなど、パワー半導体業界を常にリードして来た。

一方、GaN デバイスにおいても近年ノート PC 向け AC アダプターでの採用を始め、データセンター用電源での採用検討も進み、確実に拡大する市場の要求に応えるべく、ロームは 2022 年に第一世代 GaN HEMT（EcoGaN™）の量産を開始した。更にドライバ回路を含む GaN モジュールの開発など、お客様の使い勝手を優先した製品作りを精力的に行っている。

今回、ロームが現在取り組んでいる SiC や GaN を使ったパワー半導体について、市場動向を踏まえ、今後の展望について紹介する。

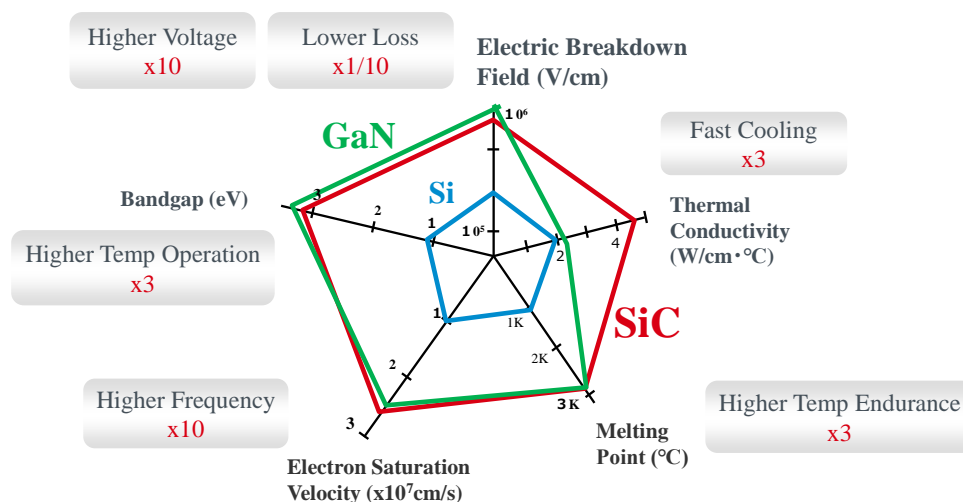


Fig.1 Performance Radar Chart of SiC, GaN and Si semiconductor

パワーデバイスの進化と応用機器の動向

Progress of Power Devices and Development Trends of Their Applications

三菱電機株式会社 西川 和康

Mitsubishi Electric Corporation, Kazuyasu Nishikawa

E-mail: Nishikawa.Kazuyasu@dr.MitsubishiElectric.co.jp

2050年にカーボンニュートラル社会を実現するため、そのキー技術の一つであるパワーデバイスの更なる進化が求められている。本講演では、これまでのパワーデバイスの進化と応用機器の変遷を俯瞰し、SiCパワーデバイスの開発状況と応用機器の動向について述べる。

GTOサイリスタとバイポーラパワートランジスタの実用化により、鉄道・産業・家電分野の機器のインバータ化が推進され、その後、IGBTの実用化・性能進化により、インバータ制御性向上、省エネ、機器の小型・軽量化が加速した。現在、IGBTは応用機器の主力デバイスになっている。

最近、パワーデバイスの適用分野・領域の拡大とともに、応用機器へのSiCデバイスの搭載が始まっている。SiCデバイスとしてSBD、プレーナMOSFET、トレンチMOSFET[1]、MOSFETとSBDを一体化したSBD内蔵MOSFET[2]が実用化されている。SiCモジュールは、家電分野向けの600V SiC DIPIPM™[3]から鉄道分野向けの3.3kVフルSiCおよびSBD内蔵SiC MOSFETモジュール[4]といった幅広い耐圧クラスで製品化されている。

SiCを適用した応用機器として、鉄道車両用システムと、直流配電システム向けDCマルチ電圧システムを紹介する。鉄道車両システム[5]ではSiC適用により主要な電力消費源であるモーター損失と機械式ブレーキ損失を低減し、鉄道システム全体での低消費電力化(約30%減)とインバータの小型・軽量化(約65%減)を実現した。直流配電システムは太陽光発電等の再生可能エネルギーや蓄電池との親和性が高く、既存の交流配電システムと比べ電力変換損失が小さい電力供給システムとして注目されているが、電力変換器の低損失化とシステムの小型化が課題である。中低圧直流配電システム向けにSiCを適用したDCマルチ電圧システム[6]を開発し、従来比*電力損失45%減、体積20%減、重量36%減の実現とともに、交流配電に比べ受配電損失20%減を確認した。

今後も、パワーデバイスおよび応用機器・システムの開発を推進し、カーボンニュートラル実現と豊かな生活の両立に貢献していく。

※当社製の中低圧直流配電システム(D-SMiree®)向け電力変換器との比較

参考文献

- [1] 三菱電機ニュースリリース：独自の電界緩和構造を採用したトレンチ型SiC-MOSFETを開発(2019年9月30日)。
- [2] A. Iijima et. al., “Improved Short Circuit Ruggedness by Optimization of Sidewall P-type Pillar Ratio for Trench SiC-MOSFET Fabricated by Multiple Tilted Ion Implantation into Trench Sidewalls”, Proc. ISPSD2023, pp.238-241 (2023),
K. Kawahara et. al., “Comparison of Surge Current Capability of SBD-Embedded SiC MOSFETs and Conventional SiC MOSFETs”, Proc. ICSCRM2023 (2023).
- [3] 三菱電機ニュースリリース：超小型フルSiC DIPIPM® 発売のお知らせ(2016年8月17日)。
- [4] 三菱電機ニュースリリース：「SBD内蔵SiC MOSFETモジュール」サンプル提供開始(2023年5月8日)。
- [5] 三菱電機ニュースリリース：フルSiCパワーモジュール適用鉄道車両用インバータ装置を製品化(2013年12月25日)。
- [6] 三菱電機ニュースリリース：業界最高クラスの高効率電力変換を実現する「DCマルチ電圧システム」を開発(2022年11月17日)。

電動車用パワー半導体の進化と開発動向

Evolution and Development Trends of Power Semiconductor for Electric Vehicles

(株)ミライズテクノロジーズ °藤原 広和

MIRISE Technologies Corporation, °Hirokazu Fujiwara

E-mail: hirokazu.fujiwara.j3g@mirise-techs.com

近年、トヨタグループではカーボンニュートラルの達成に向けて BEV(Battery Electric Vehicle) や HEV(Hybrid Electric Vehicle)、PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)、FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle)といった電動車の開発が進められている。これら全ての電動車において高電圧下で大電流を高速で通電、遮断するパワー半導体がい用いられており、このパワー半導体の性能が電動車の電費向上やユニットの小型軽量化に大きな影響を与える。本報では電動車用のパワー半導体がこれまでどのように進化し、現在どのような開発が進められているかについて紹介する。

電動車の駆動モータ制御用インバータにおいて、メインバッテリーの 200V~800V 程度の高電圧下で、数十 kW から数百 kW の駆動用モータを制御するため、パワー半導体には数百 A の電流制御が求められる。1997 年の初代プリウスの時代から現在に至るまで、シリコン(Si)パワー半導体の一つである絶縁型ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT、Insulated Gate Bipolar Transistor)が主に用いられている。初代プリウスの Si-IGBT は、プレーナゲート構造であり、かつ素子加熱検知用の温度センサをチップに内蔵し、スイッチング性能の改善のためにヘリウム(He)照射技術を採用するなどの特徴をもつ。このインバータには、IGBT と還流ダイオードがそれぞれ搭載されていた。現在市販されている最新の 5 世代プリウスでは、Si-逆通電型 IGBT(RC-IGBT、Reverse Conducting IGBT)がい用いられている。この RC-IGBT は、トレンチゲート構造によって電流密度を高くしており、IGBT と還流ダイオードの機能を持つため (IGBT とダイオードがワンチップ化されているため)、素子面積が小型化されている。

車載用の次世代パワー半導体として、シリコンカーバイド(SiC)パワー半導体が期待されている。SiC の絶縁破壊電界は Si の 10 倍ほど高いために素子の厚さを薄くでき、Si より抵抗を下げる事が可能となる。また、SiC では、IGBT よりも低いオン電圧を実現できる金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ(MOSFET、Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)が開発されている。そのため、電動車に SiC-MOSFET を用いることで、Si-IGBT より損失の低減および電費の向上を得ることができる。2015 年にカムリ HEV における SiC-MOSFET の NEDO 実証実験を皮切りに、2023 年には新型 BEV Lexus RZ において、リアモータ駆動用インバータに SiC-MOSFET を採用し、高耐圧、高電流でのスイッチングにおいて低オン抵抗と高信頼性を両立している。また、スイッチングを Si 比で約 3 倍に高速化することで電力損失を約 70%低減し、1 チップあたりの出力を 2.8 倍に向上している。今後、車載用 SiC パワー半導体の本格展開に向けて、SiC-MOSFET の性能向上とコスト低減、パッケージでの冷却性能向上や低インダクタンス化など、SiC のポテンシャルを引き出す研究開発は重要である。

シリコンパワーデバイスの技術動向

Technology Trends on Silicon Power Devices

九大応力研 °齋藤 渉

Kyushu Univ., °Wataru Saito

E-mail: wataru3.saito@riam.kyushu-u.ac.jp

カーボンニュートラルに向けて、電力の有効利用は重要項目の一つであり、そこに使用されるパワーデバイスの重要性も高まり続けている。このようなことから、パワーデバイスの市場は堅調に伸びており、今後の継続した成長が予測されている。SiC や GaN などのワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスが実用化され、その市場は急激に成長しつつも、市場を占める割合において、シリコンパワーデバイスから主役を奪う状況には至っておらず、2030 年においても 80% 以上がシリコンパワーデバイスとなることが予測されている。

パワーエレクトロニクスの発展として、システムの高パワー密度化が挙げられる。パワーデバイスの損失低減により、冷却部材が小さくなると共に、パワーデバイス的高速動作により、受動部品が小さくなることで、システム全体が小型化され、パワー密度が増加してきた。つまり、パワーデバイスの継続的な性能向上により、パワーエレクトロニクス応用の発展に貢献してきた。そして、シリコンパワーデバイスの性能向上に大きく貢献してきたのがプロセス技術の発展である。ロジック・メモリデバイスで開発された微細加工技術を転用することで、トレンチゲートやその微細化が進められてきた。加えて、パワーデバイス特有のプロセス技術として、ウェハ薄化や裏面ドーピング、エピタキシャル成長技術なども開発されてきた。

高まり続ける市場要求に対応するために、ウェハ口径を 200mm ϕ から 300mm ϕ へ上げることで、生産能力が増強されている。ロジック・メモリデバイスに比べると、パワーデバイスで要求される加工寸法は大きいため、シリコンパワーデバイスの製造ラインにおいて、ウェハ大口径化による最小加工寸法の更なる微細化は、それほどメリットではない。しかし、300mm ϕ 製造ラインにて培われてきた自動化や高スループット、品質管理は大面積チップであるパワーデバイスの量産において、大きな武器となる。シリコンパワーデバイスの性能は理論限界に近づきつつあるため、飛躍的な性能向上を望むことは難しいが、生産技術の観点から、高品質なチップを低コストで大量に提供できることがワイドバンドギャップ半導体デバイスとの差異化ポイントとなる。

最近の技術動向として、300mm ϕ 製造に向けたパワーデバイス用シリコンウェハが開発されている。加えて、プロセス技術の発展に基づいた微細化による性能向上といった従来の手法に加えて、トレンチゲートのスケーリング設計²⁾やゲート駆動技術との組み合わせ³⁾といった損失低減に有効な新たなデバイス技術の開発も進められている。

1) W. Saito, IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 71, p. 1356-1364 (2024)

2) M. Tanaka, Ichiro Omura, Solid-State Electronics, vol. 80, p. 118-123 (2013)

3) Y. Kobayashi et al., Proc. of ISPSD 2023, p. 207-210 (2023).

SiC パワー半導体の現状と今後の展開

Current state and future developments of SiC power semiconductor devices

産総研 田中 保宣

AIST, Yasunori Tanaka

E-mail: yasunori-tanaka@aist.go.jp

EV の急激な普及拡大に伴い、SiC パワーデバイスの社会実装が着実に進んでいる。世界における SiC パワーデバイスのシェア獲得競争が熾烈さを増す一方で、日本のパワーデバイスメーカーの出遅れ感は否めない。10 年、20 年後を見据えた持続的な産業競争力強化のためには、現在のシェア獲得競争に打ち勝つことに加えて次世代技術の開発の両輪が不可欠であり、産業界・アカデミア間の連携を今以上に強固にすることが重要である。

本講演では、モビリティを中心に普及が進む SiC パワーデバイスの社会実装の現状、更なる普及拡大のために残された課題とともに、主に産総研における次世代パワーエレクトロニクス技術の研究開発状況について紹介する。

GaN パワーデバイスの現状と今後の展開

Current Status and Future Prospects of GaN Power Devices

名大院工¹, 名大未来研² ○須田 淳^{1,2}

Dept. of Electronics, Nagoya Univ.¹, IMASS, Nagoya Univ.², ○Jun Suda^{1,2}

E-mail: suda@nuee.nagoya-u.ac.jp

ワイドバンドギャップ半導体である GaN は 3.4 eV のバンドギャップを持つ直接遷移型半導体である。当初、GaN は可視短波長光デバイス(青色 LED や LD)を目指して研究が進められていたが、低温バッファ層技術により良質な結晶成長が可能になると、次世代電子デバイス材料としての検討も始まった。当初は $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 高電子移動度トランジスタ(HEMT)の高出力化を目指して $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 構造が検討された。その結果、予想を上回る高密度の二次元電子ガス(2DEG)が界面に誘起され、その高い 2DEG 移動度、GaN の大きな絶縁破壊電界強度と相まって高出力のマイクロ波トランジスタ用材料として一躍脚光を集めた。熱伝導性、電気絶縁性に優れた SiC 基板を用いて GaN 系 HEMT の研究が進められ、GaAs 系の 20 倍以上のパワー密度のトランジスタが開発され、現在、レーダーや移動体通信基地局に使われている。後に高密度 2DEG は AlGaN と GaN の分極差により誘起されたことが判明し、分極ドーピングという新しい概念が確立された。

GaN HEMT は低いオン抵抗を有しており、数百 V の耐圧の素子を比較的容易に実現できることから、その低コスト化を進めてパワーデバイスに活用しようという研究が 2001 年頃から活発化した。コスト低減のために安価な Si 基板を使う、いわゆる GaN-on-Si 横型パワーデバイスである。Si パワーデバイスと使い勝手が異なるということからなかなか市場に浸透しなかったが、2021 年頃から USB の高速充電器(65W 以上)への採用が相次ぎ、現在では「GaN 充電器」で検索すると多数の商品がヒットする。普及の理由としては、USB Power Delivery という電源規格の登場、GaN HEMT 駆動回路(Si)をワンチップ化したパワー IC の登場があげられる。

GaN については横型デバイスの開発が先行したが、GaN LD 用に開発された高品質 n 型 GaN 基板が利用可能になったことで、Si や SiC のような縦型パワーデバイスの研究開発もスタートした。特に 2013 年頃から日米で大きなプロジェクトが推進され、この 10 年で大きく進展した。GaN バルク成長では、超臨界アンモニアを溶媒に用いたアモノサーマル法や熔融 Na を使った Na フラックス法などの溶液・融液成長法が利用でき、将来的なウエハの大口径化、低コスト化が多いに期待される。ドリフト層抵抗は GaN と SiC はほぼ同等であるが、GaN MOS チャネル移動度は 200~300 cm^2/Vs のような良好な値が報告されており、また、の AlGaN/GaN 2DEG (1000~1500 cm^2/Vs)をチャネルに使う選択肢もある。トータルのオン抵抗は特に 2000 V 以下のデバイスでは SiC に対して大きく低減できる可能性がある。イオン注入などの技術は開発途上であるが、いくつかの機関からトレンチ MOSFET や DMOSFET などの報告もなされている。

本講演では、GaN パワーデバイスの歴史、GaN 横型パワーデバイスおよび縦型パワーデバイスの研究開発動向や今後の課題を中心に紹介する。

WBG 半導体によるパワエレ用途拡大と課題

Challenges on Power Electronics with Wide Bandgap Semiconductor

長岡技術科学大学¹

Keisuke Kusaka.¹,

E-mail: kusaka@vos.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

パワーエレクトロニクス（以下、「パワエレ」）回路の効率向上や小型化に向けて WBG 半導体に大きな期待が寄せられている。しかし、その実装の観点からは、その高速スイッチングはノイズやゲートの電位変動といった種々の課題を引き起こす。

2. WBG 半導体の適用にあたっての課題

図 1 に WBG スwitchング時のデバイス端子間電圧を示す。WBG デバイスは、高耐圧デバイスにおいても高速なスイッチングを可能とする。しかしながら、これによりデバイス端子間電圧にはこれまでよりも高い高調波成分が含有される⁽¹⁾。

図 2 にパワエレ回路の実装回路例と一般化されたノイズ等価回路⁽²⁾を示す。パワエレ回路では、急峻なスイッチングにより生じた電位変動を電圧源として、回路中の寄生容量を介して伝導ノイズ（差動・同相）が流出する。そのため、これらのパワエレ回路においては LC フィルタ回路の設計が重要となるが、高周波域ではフィルタ回路のインダクタが有する巻線間浮遊容量や、キャパシタが有する等価直列インダクタンスにより高周波帯域における遮断特性が悪化し、十分にノイズを抑制できない問題がある。

3. 長岡パワーエレクトロニクス研究会

最後に、長岡技大が中心となり設立した「長岡パワーエレクトロニクス研究会」の取り組みを紹介する。新潟県長岡市は、パワエレ関連研

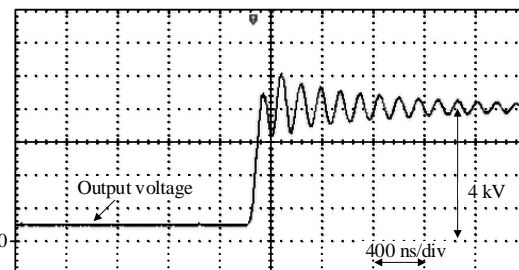


図 1 WBG デバイスによるスイッチングの高速化

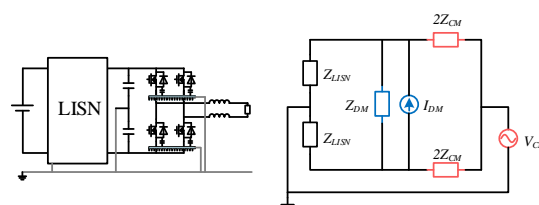


図 2 パワエレ回路におけるノイズの発生

究室を 6 研究室保有する長岡技大に加え、パワエレ関連の大手企業が 2 社、大学発のパワエレ系ベンチャーが 2 社所在するなど、パワエレに関する研究開発が盛んな土地である。このような背景から長岡市内におけるパワエレ産業の振興と、パワエレに関する技術と人材の集約による地域社会の発展を狙い、2022 年に長岡市と長岡技大が中心となり「長岡パワーエレクトロニクス研究会」を設立した。詳細は講演で述べる。

参考文献

- (1) S. Takahashi, et.al., “Review of Modeling and Suppression Techniques for Electromagnetic Interference in Power Conversion Systems,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 11, No. 1, pp. 7-19 (2021)
- (2) M. Amara, C. Voltaire, M. Ali, F. Costa, “Black box EMC modeling of a three phase inverter,” Proc. of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018), pp. 642-647 (2018)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】就活生必見！未来をあなた自身の手で！～半導体が生み出す新しい世界

【19a-A22-1~12】【一般公開】就活生必見！未来をあなた自身の手で！～半導体が生み出す新しい世界

[19a-A22-1]

はじめに

○木下 啓藏^{1,2} (1.応物、2.アイオーコア)

[19a-A22-2]

エンタテインメントコンピューティング

○久寿良木 健¹ (1.アセントロボティクス株式会社)

[19a-A22-3]

大判イメージセンサの生み出す世界と半導体デバイス開発の魅力

○秋山 健太郎¹ (1.ソニーセミコンダクタソリューションズ)

[19a-A22-4]

半導体露光装置が照らす輝く未来

○今井 烈士¹ (1.キャノン株式会社)

[19a-A22-5]

未来をデザインするー半導体実装技術とその可能性ー

○武久 翔多¹ (1.東レエンジニアリング株式会社)

[19a-A22-6]

原子レベルの加工への挑戦 ～米国大学での海外業務研修を通じて～

○中谷 侑亮¹ (1.日立ハイテク)

[19a-A22-7]

資源は有限、技術は無限

～その装置作り続けられますか？～

○藤川 雄兵¹ (1.SCREENセミコンダクターソリューションズ)

[19a-A22-8]

異分野からの半導体業界の発展を支える計測技術への挑戦

○三上 康太¹ (1.株式会社堀場製作所 半導体ソリューション部)

[19a-A22-9]

半導体製造装置メーカーにおけるプロセス×検査のコラボレーション

○澤里 旭¹ (1.77°ライト° マテリアルズ°)

[19a-A22-10]

露光装置の進化を支えるサブナノ計測技術の最前線

○津久井 宏祐¹ (1.(株)ニコン)

[19a-A22-11]

半導体の企業における研究者の働き方 - 基礎研究から事業応用まで～ときどき失敗、紆余曲折も

○中田 憲吾¹ (1.キオクシア株式会社)

[19a-A22-12]

閉会挨拶

○渡部 潔¹ (1.SEAJ)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】Z世代に繋ぎたい未来ビジョン～創造を生むネットワーキングを応物から

[20p-A24-1~11] 【一般公開】Z世代に繋ぎたい未来ビジョン～創造を生むネットワーキングを応物から

[20p-A24-1]

オープニング（開催趣旨、プログラム説明）

○吉水 康人¹ (1.キアクシア(株))

[20p-A24-2]

地域主導の未来社会創造

○東 博暢¹ (1.株式会社日本総合研究所)

[20p-A24-3]

AI時代の衝撃

○坂本 佳史¹ (1.IBMリサーチ)

[20p-A24-4]

生態系並びに共生の概念から見た人-地球のインタラクションに対する考察と活動

○塚田 周平¹ (1.株式会社リバネス)

[20p-A24-5]

AIの社会実装で課題解決を

○土田 安紘¹ (1.AWL)

[20p-A24-6]

次世代データ活用、集合知で未来を創る

○今林 広樹¹ (1.EAGLYS株式会社)

[20p-A24-7]

低空経済で世界一を目指す

○塩澤 駿一¹ (1.Terra Drone株式会社)

[20p-A24-8]

異分野交流パネルディスカッション～テーマ1～わたしたちはどんな日本の未来社会を創り、Z世代に残していくのか？応用物理の役割

○吉水 康人¹、東 博暢²、坂本 佳史³、塚田 周平⁴、土田 安紘⁵、今林 広樹⁶、塩澤 駿一⁷ (1.キアクシア(株)、2.(株)日本総合研究所、3.IBMリサーチ、4.(株)リバネス、5.AWL(株)、6.EAGLYS(株)、7.Terra Drone(株))

名刺&意見交換会

[20p-A24-9]

異分野交流パネルディスカッション～テーマ2～未来のための国際共創、その中で目指したい日本の役割、ポジションは？

○吉水 康人¹、東 博暢²、坂本 佳史³、塚田 周平⁴、土田 安紘⁵、今林 広樹⁶、塩澤 駿一⁷ (1.キアクシア(株)、2.(株)日本総合研究所、3.IBMリサーチ、4.(株)リバネス、5.AWL(株)、6.EAGLYS(株)、7.Terra Drone(株))

[20p-A24-10]

クロージングディスカッション ～未来に向けて～ Z世代に繋ぎたい未来ビジョン

○吉水 康人¹、東 博暢²、坂本 佳史³、塚田 周平⁴、土田 安紘⁵、今林 広樹⁶、塩澤 駿一⁷ (1.キアクシア(株)、2.(株)日本総合研究所、3.IBMリサーチ、4.(株)リバネス、5.AWL(株)、6.EAGLYSL(株)、7.Terra Drone(株))

[20p-A24-11]

閉会の挨拶

○為近 恵美¹ (1.横国大)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 科学教育の人材育成および教育の取り組みとその活性化ー北陸・信越地区ー

[19p-A36-1~7] 科学教育の人材育成および教育の取り組みとその活性化ー北陸・信越地区ー

[19p-A36-1]

新潟大学工学部におけるグローバル理工系人材育成の取り組み

○馬場 暁¹、上孝 和孝¹、中野 祥子¹ (1.新潟大工)

[19p-A36-2]

金沢大学STELLAプログラム

ー 未来の科学技術イノベーターを指向した小中高生の育成 ー

○本田 光典¹、森本 章治¹、山本 茂¹、松原 道男¹、酒寄 淳史¹、本所 恵¹、中村 聡¹、窪田 陽子¹ (1.金沢大)

[19p-A36-3]

ファーマ・メディカルエンジニア養成プログラム～理工系学生の学際的産業分野への誘い

○田端 俊英¹ (1.富山大工)

[19p-A36-4]

長岡高専での実践的技術者教育の試み ～AI/IoTリテラシー教育およびエンジニアリングデザイン教育～

○酒井 一樹¹ (1.長岡高専)

[19p-A36-5]

エネルギー環境教育体験館「きいぱす」での実践紹介

○小鍛治 優¹、橋場 隆¹ (1.美浜町きいぱす)

[19p-A36-6]

備長炭を用いた空気電池製作とそれを利用した理科教育の事例紹介

○小川 賢¹ (1.公立諏訪東理大)

[19p-A36-7]

内核の逆立ちコマ現象による地磁気逆転のメカニズム解明

○石井 義哲¹、廣田 恵¹ (1.艦磁研)

新潟大学工学部におけるグローバル理工系人材育成の取り組み

Development of Global Science and Engineering Human Resources

at Faculty of Engineering, Niigata University

新潟大工 ○馬場 暁, 上田 和孝, 中野 祥子

Niigata Univ.¹ ○Akira Baba, Yasutaka Ueda, Sachiko Nakano

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

新潟大学工学部では、将来ビジョン 2030 において「グローバル理工系人材の育成」と「海外交流協定大学との教育研究交流促進」を大きな目標として様々な取り組みを精力的に実施している。これら取り組みのひとつとして、グローバル人材育成と大学教育のグローバル展開力強化等を目指した「地域協働によるグローバル・ドミトリー (G-DORM) プログラム」を推進している。この G-DORM プログラムでは、本学とメコン諸国 4 大学 (王立プノンペン大 (カンボジア)、ラオス国立大 (ラオス)、チュラロンコン大学 (タイ)、ハノイ工科大学 (ベトナム)) の理工系学生が、学年縦断・分野横断・多国籍学生チームを結成し、主に新潟とメコン諸国において、新潟地域関連企業等における課題解決型の国際グループワーク・インターンシップに取り組んでいる (図 1) [1],[2]。本 G-DORM プログラムは文部科学省「大学の世界展開力強化事業」の採択 (H28) を契機に実施してきており、非常に多くの学生および企業の参加・協力を得て、成長を遂げてきた。また、コロナ禍でしばらくは海外渡航が制限された中でも、新たに国際オンライン協働学習 (COIL: Collaborative Online International Learning) の手法を用いたプログラムも展開してきている。本講演では、この G-DORM プログラムを中心に、新潟大学工学部におけるグローバル理工系人材育成の取り組みについて紹介する。



図 1. G-DORM でのハイブリッド最終発表会 (左), メコンでのインターンシップ (右)

参考文献

- [1] Y. Ueda, A. Baba, S. Nakano, E. Wakabayashi, Proc. 2022 JSEE Annual Conf., W-05, pp.18-21, 2022
- [2] 上田, 馬場, 中野, 若林, 第 71 回年次大会 工学教育研究講演会講演論文集, pp.26-27, 2023

金沢大学 STELLA プログラム — 未来の科学技術イノベーターを指向した小中高生の育成 —

Kanazawa University STELLA Program:

Development of Students Under 18 Toward Future Science and Technology Innovators

金沢大 °本田 光典, 森本 章治, 山本 茂, 松原 道男,
酒寄 淳史, 本所 恵, 中村 聡, 窪田 陽子

Kanazawa Univ., °Mitsunori Honda, Akiharu Morimoto, Shigeru Yamamoto, Michio Matsubara,
Atsushi Sakayori, Megumi Honjo, Satoshi Nakamura, Yoko Kubota

E-mail: kustella@adm.kanazawa-u.ac.jp

自然災害や急激な社会変革に伴う様々な課題を的確に把握し対峙するためには、細分化された自然科学の一学問領域を修得するだけでは不十分である。また、得られた知見を社会へ実装するためには、人文・社会科学の素養も必要となる。このように現代社会においては、目の前の課題に対して柔軟かつ巧みに対応する広い視野を持ち、解決に向けたイノベーションを起こせる人材が求められている。この要請に応えるために本学では、従来実施してきたジュニアドクター育成塾とグローバルサイエンスキャンパスを統合・改新し、将来的に大学院での研究も見据えた理工・医薬系若手人材を育成する「金沢大学次世代科学技術チャレンジプログラム（通称、金沢大学 STELLA プログラム）」を構築した。ここでは、科学技術を含む様々な分野の発展や人類が直面する世界的課題の解決に貢献し、自身が追及するフィールドで将来イノベーターとなる傑出した人材の輩出を目的とした育成に取り組んでいる。

小・中学生を対象としたジュニアコースでは、広範な科学知識と技術を修得しながら主体性と探究力をもった未来の科学者を育成することを目的とし、体験活動やグループ交流を重視しつつ個人研究の推進を行っている。第一段階（A ステージ）では科学講座とグループ活動で、科学者としての態度を学ぶとともに個人の研究を推進した（図1）。第二段階（B ステージ）では、選抜された受講生が大学院生のアドバイスの下に研究を進め、優れた研究については大学教員の指導を受けられることとした。一方、高校生等を対象としたシニアコースは、大学で学びを実践できるユニークかつ未来志向型の活動としている。第一段階（C ステージ）で現代の学術研究に求められる素養を修得後、第二段階（D ステージ）では、本学を含む大学等の研究室で最大2年間の課題研究を行った。選抜された受講生は、国内外の学会やシンポジウムでの発表に挑戦し、世界レベルの研究活動を体感した。これら2つのコースをシームレスに繋ぐことにより、特定の分野に飛び抜けた興味や共感を持つ小中高生を早期に見出し、継続的な育みを可能としている。また、C ステージ修了者に、本学が実施する KUGS 特別入試の出願資格を与え、大学生・大学院生として尖った人材への育成へと繋ぐことを見据えている。



図1. A ステージ科学講座において講師の話に聞き入る受講者

ファーマ・メディカルエンジニア養成プログラム～理工系学生の学際的産業分野への誘い

富山大学学術研究部工学系 田端 俊英

我が国の産業界では製造拠点のオフショアリングが進み、産業の焦点が製造から新しい製品・事業を創造する研究開発に移りつつある。創造的な活動には学際的な知識・技術が不可欠である。富山大学の地元でも、主力産業である製薬と医療機器の部品を含む精密機械の業界で学際的な知識・技術が必要となっている。例えば、医薬品の主役は低分子薬から高分子医薬に交代しつつある。新たに高分子医薬に取り組むためには創薬技術だけでなく、バイオリクターなど製造プラントの開発・維持に関する技術が必要であり、それを担うことができるのは機械・電子・情報・化学・生物などに加えて薬学の基礎知識を身に付けた理工学人材である。また、ハイテク化しつつある医療機器の開発を担うことができるのは機械・電子・情報・化学・生物などに加えて医学の基礎知識を身に付けた理工学人材である。我が国の製薬・医療機器関連分野は兆円単位の輸入超過となっており（したがって、それだけ国内の関連産業に伸び代があるとも言える）、こうした学際的人材を輩出して当該産業を発展させることは、経済上も重要な課題となっている。しかしながら、従来の縦割り教育部局体制ではこのような人材を育成することは困難である。そこで、富山大学では大学院理工学教育部修士課程（現・理工学研究科博士前期課程）にファーマ・メディカルエンジニア養成（PME）プログラムを開講した（平成26年度文科省概算要求特別経費プロジェクト）。PMEプログラムの履修は任意であったが、理工学教育部修士課程全体の1/5～1/4もの学生が履修した。PMEプログラム履修生は、大学院医薬学教育部修士課程・理工学教育部修士課程・理学部・工学部からセレクトされた医療・製薬に関連する講義、理・工学部の有志教員が分担指導する医薬品製造機器や診断・治療機器を用いたPME実習、地元・全国の関連産業企業の開発者を講師とするオムニバス形式の事業紹介講義（PME概論）、地元関連産業企業の見学会、さらに当該産業への就活トレーニングを自由に受講することができた。また、上記の授業科目で一定以上の単位を獲得すると、自専攻の修了認定に加えて、学長名義でPMEプログラム修了認定を受けることができるようになっていた。このような教育活動の結果、例えば、機械工学専攻の学生がコンタクトレンズのメーカーで開発者となったり、情報工学専攻学生が医薬品製造機器の開発者となったりした。それら修了生の職業に対する満足度も高い。学生アンケートによると、なかでも学生の視野を広げるのに役立ったのはPME概論であった。富山大学はPMEプログラムの経験を踏まえ、令和4年度に医・薬・理・工学部が連携して学際的教育を行う新しい大学院部局である医薬理工学環を開設したが、PMEプログラムはファーマ・メディカル・キャリアデザイン支援プロジェクトと改称し、医薬理工学環メディカルデザインプログラムと理工学研究科へ授業を提供する組織として引き継がれている。メディカルデザインプログラムの令和4・5年度の入学者数は定員の2倍に達しており、令和6年度に定員を倍増した。メディカルデザインプログラムの人気の高さは、PMEプログラムによって推進した学際的教育が理工系学生にとって極めて魅力的な内容であることを示している。我が国では今後あらゆる産業・学術分野で研究開発を担うことができる学際的人材に対するニーズが高まると考えられる。本公演ではPMEプログラムの具体的な授業内容を紹介し、理工系学生に対する学際的教育方法のヒントを供したい。

長岡高専での実践的技術者教育の試み
～AI/IoT リテラシー教育およびエンジニアリングデザイン教育～
Trial of practical engineer education at Nagaoka KOSEN
- AI/IoT literacy education and engineering design education -

長岡高専¹, °酒井 一樹

Nagaoka KOSEN¹, °Kazuki Sakai¹

E-mail: k-sakai@nagaoka-ct.ac.jp

1. はじめに

長岡工業高等専門学校（以下、長岡高専）は全国に 51 校ある国立高専の一つで、1962 年に第一期校の一つとして設立された。機械工学科、電気電子システム工学科、電子制御工学科、物質工学科、環境都市工学科の 5 つの学科から成り立ち、「人類の未来をきりひらく、感性ゆたかで実践力のある創造的技術者の育成」を教育理念として、各分野の工学教育を基礎から実践まで提供している。

本講演では、長岡高専での先駆的な技術者教育の中から、報告者が担当している AI/IoT リテラシー教育およびエンジニアリングデザイン教育の概要と成果を報告する。

2. AI/IoT リテラシー教育

長岡高専では、AI, IoT, Robot の 3 つを、これからの時代のエンジニアにとって分野を問わず空気のように不可欠な技術と位置づけ、頭文字を取って「AIR Tech」と名付け、全学科を対象とした AIR Tech エンジニア育成プログラムを運用している。その中核を成すのが、全学科の 1,2 年生を対象とした AI および IoT のリテラシー授業である。

AI リテラシー授業では、長岡高専で独自に開発した、初学者でも簡単な操作で AI の学習・推論が実行できる Python のプログラムを

用いて、クラスメイトの顔認識などの課題に取り組み、AI のプロジェクトの流れを学ぶ。IoT リテラシー授業では、無線 LAN 対応のマイコンを用いた照度を測定するシステムの構築、Web ブラウザ上でのグラフの確認などを通して、IoT システムの全体像を学ぶ。

3. エンジニアリングデザイン教育

全専攻の専攻科 1 年生を対象としたエンジニアリングデザイン演習という実験を平成 25 年に開始した。地域の自治体や企業などが抱える課題をテーマに、学生がグループで解決策を企画・立案し、プロトタイプを作成・評価するというものである。

授業の最初の 3 回でファシリテーションスキル（発想法や合意形成法など）の研修を行い、残りの 12 回はグループごとの課題解決活動を行う。この際、異なる出身学科の学生が混ざるようにすることで、必然的に分野横断型の思考が展開されるように仕掛けている。仮定の課題ではなく実際に困っている対象のいる課題を扱うことで、クライアントの要望に応える意識が高く涵養される授業となっている。

4. おわりに

長岡高専は、これらの教育実践を発展させ、さらなる教育改革を目指している。他機関に少しでも参考になることがあれば幸いである。

エネルギー環境教育体験館「きいぱす」での実践紹介

Introduction of practices at the EEE Experience Center "Kiipass"

美浜町環境教育体験館「きいぱす」, °小鍛治 優, 橋場 隆

Mihama Town EEE Center "Kiipass", °Masaru Kokaji, Takashi Hashiba

E-mail: kiipasu-m@town.fukui-mihama.lg.jp ※EEE (Energy Envirmental Education)

1. はじめに

美浜町エネルギー環境教育体験館「きいぱす」(図1)は、次代を担う子どもたちが、あらゆるエネルギーや環境に関する正しい知識を学び、これからのエネルギーや地球の将来について自ら考え判断する力を養うことを目的として運営されている、全国で唯一の施設である。その役割として、①美浜町内の学校



<図1「きいぱす」全景>

にここでしかできない体験プログラムを提供して学校のエネルギー環境教育の推進を支援、②①をベースとしたプログラムを町外の学校へも提供して普及、③展示施設や体験プログラムを通して来館者へエネルギー環境教育に関わる学習機会を提供、などがある。

2. 体験できる内容

一例として、美浜町教育委員会カリキュラムに基づく中学生対象の体験プログラム一覧を下に紹介する(図2)。小学校で学んできたエネルギーの基礎知識をもとに、それを活かしてエネルギーの理解を深め、最終的に、カーボンニュートラルについて考えたり、課題研究で自分なりに問題を見出し、解決への方法を考えたりするなどの取り組みを行う。

中学1年生	エネルギーの形態(90分) エネルギーは様々な形態で私たちの身の回りに存在していることを知る。それぞれのエネルギーを定量的に比較して、仕事量の違いを実感する。エネルギーの形態によっては小さな単位で大きな仕事をするものや、強力と思っていたものが意外と少ないエネルギーしか使っていないこと等を実感する。	日本のエネルギー・バランスと消費(90分) 身の回りの製品や食品がエネルギーと密に関わっていることを理解する。一次エネルギーのほとんどを海外に依存していること、二次エネルギーへの変換加工、消費の過程で多くの損失が生じていることを知り、効率的な利用の重要性に対する認識を深める。	エネルギーを賢く使う 電力や電力量等エネルギーの単位の意味を理解する。エネルギーを賢く利用することに対する興味関心を高める。
	電気を届ける仕組み(90分) コンセントの電気は多数の電力をミックスして、発電と消費のバランスを維持しながら届けられていることを知る。交流は簡単に電圧を上下できること、高圧化することによって遠くの発電所からでも小さな送電損失で電力を送られることを確認する。電気エネルギーの利用に対する興味関心を高める。	美浜発電所見学(90分) 美浜発電所を訪問し、原子力発電所の原理と仕組みや長所・短所、美浜発電所が建設された経緯などを学ぶ。また近隣の発電所の状況を知り、美浜町及び福井県にとつての、またわが国のエネルギー政策に対しての美浜発電所の意義について考える。	地球温暖化の学習 地球温暖化や海面上昇のメカニズムの体験を通して、地球環境の危機を実感する。
中学3年生	課題の発見 課題の発表などを通して、自主的に調べ力、分かりやすく伝える力の向上を図る。エネルギー環境問題に関わっていることへの興味を育む。	課題のまとめと発表(90分) 課題の探求、発表を通して、課題を自主的に調べ力、調査結果や自分自身の考えを分かりやすく伝える力の向上を図る。また、自分自身が興味をもった課題について理解を深めることにより、エネルギー環境問題を自分だけの問題として、引き続きかかわっていくことへの意欲を育む。	

<図2 体験プログラムメニュー(中学校)>

体験プログラム以外でも、エネルギー環境に関する展示解説ツアー、電気で動く乗り物体験、VRを使った発電所などの体験、動くブロックを使った制御体験、また、イベントとして工作教室や実験教室、長期休業中の自由研究や特別展示、教員対象のエネルギー環境教育研修など幅広く行っている。これらについても紹介したい。

備長炭を用いた空気電池製作とそれを利用した理科教育の事例紹介

A Case Study of Making Air Battery Using Binchotan Charcoal and Its Application to Science Education

公立諏訪東京理科大学 ○小川 賢

Suwa University of Science, °Satoshi Ogawa

E-mail: ogawa_satoshi@rs.sus.ac.jp

世界中の様々な問題を議論する上でエネルギーについて学ぶことは非常に重要である。しかしながら、一言で「エネルギー」と言っても目に見えるものではないばかりか、運動・熱・光・電気と様々な形態へ変化するため、初等教育においてこの概念を教育するのは難しい課題と言える。

ここでは、このエネルギー教育に対し、空気電池を利用した例を紹介したい。空気電池は、正極側で大気中の酸素を反応源とし、負極側では金属を用いる。電池における負極側の反応は酸化反応であるため、見た目では電池の反応と共に金属が酸化して朽ちていく様子を見ることができる。また、日常生活の中で入手しやすい備長炭を正極に用いることができ、負極においてもマグネシウムや亜鉛、アルミなど正極同様に入手しやすい金属が利用可能である。

Fig. 1 には負極にマグネシウム板を用いたマグネシウム空気電池で電動式の玩具を駆動している様子を示している。電解液に食塩水(10wt%)を用いるが、教育対象が小学生の場合は寒天等を用いて食塩水をゲル化すると失敗が少ない。空気電池から電力を取り出すと負極に使っているマグネシウムが酸化し色の変化として目視できるため、金属が酸化することとエネルギーが取り出されることを関連づけて解説することができる。また、金属を交換すれば再度エネルギーが取り出せるようになるため、燃料電池の原理へ議論を発展することもできる。

講演では、これら空気電池を利用した教育事例の他に、環境意識醸成活動として用いているオフグリッドシステム(Fig. 2)も紹介したい。



Fig. 1 Electric train powered by Binchotan coal



Fig. 2 Off-grid system with log covered batteries

内核の逆立ちゴマ現象による地磁気逆転メカニズムの解明

The elucidating the mechanism of the geomagnetic reversal by the Tippe Top Phenomenon of the inner core

艦磁研, ○石井 義哲, 廣田 恵 Naval Ship M&UEP R.C., Yoshiaki ISHII, Megumi HIROTA

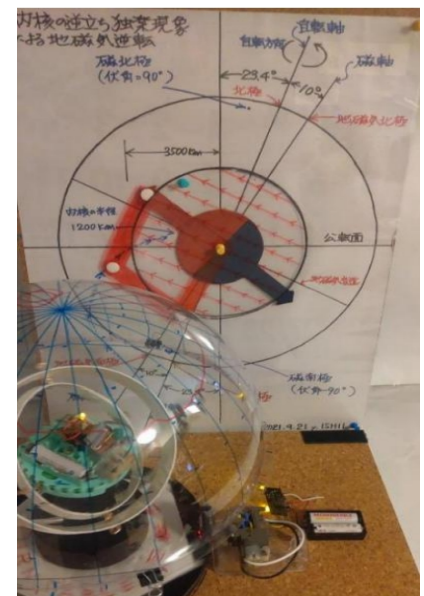
E-mail: ishii@nmurc.com

【背景】チバニ안의地層研究により79万年前から77万年前までの2万年間は無地磁気状態であったことが判明している。この間は地磁気圏が消滅するために太陽風がもたらすプラズマ荷電粒子が容易に地上に到達して送配電システム、無線通信システム、コンピューターネットワークシステムに重大な支障を及ぼすことが懸念されている。その予防と対策には次の無地磁気状態発生時期の予測が必要となる。地磁気逆転については地球発電機説を中心に様々な研究が為せれ、最近では内核の環境を再現する実験も行われているが、現在までのところ、地磁気生成の全容を含め解明されていない。この現象に多くの人に興味を持たせ、科学教育の資となるよう地球内核を固体永久磁石とする展示実験を進めている。

【目的】国際標準地球磁場(IGRF-13)によれば地磁気北極は1900年(78.6N68.8W)から2020年(80.7N72.7W)まで緯度がほぼ直線的に2度移動し、地磁気の大極子モーメントが8.32から7.71($\times 10^{23}$ 乗アンペア平方メートル)まで減少している。この観測結果に着目して、外核の液体金属回転流体による電磁気と永久磁石化した内核の固体金属回転球体の磁気の合成ベクトルが地磁気の正体であるというモデルを立て、次の無地磁気状態発生時期について考える。

【思考実験】内核の磁気の強さを1、外核の磁気の強さを1として2つの磁気の合成ベクトルを作図した。合成ベクトルの方向が地磁気極として観測される方向を示し、スカラー成分が地磁気の強さを示す。内核の回転軸を傾斜させることにより、その傾斜角度の2分の1だけ、地磁気極の方向が傾斜する。地磁気極の傾斜角度を θ とすると、地磁気の強さは $2\cos\theta$ となり、内核が完全に逆立ちした時に0となるとともに地磁気赤道上に消失する。地磁気北極が1900年から現在までの120年間に2度移動が観測されていることから、内核は4度傾斜していることになり、これを外挿すると西暦7300年($(180/4) \times 120 = 5400$ 年)には完全な無地磁気状態に入ることが予測される。

【展示実験の取り組み】この展示実験は第82回秋から継続してポスター講演し、5回目からは逆立ちゴマが机上から受ける抗力に代わるものとして内核のジャイロ効果に注目している。内核に相当する電動ジャイロはモーターと電池が備え付けてある面が重く通常は下方にあるが、外核に相当する回転台の回転方向が電動モーターの回転方向とが反対になる時には、電動モーターの回転軸が上下逆転する現象が見られる。その7では磁軸に相当する電動モーターの回転軸の軌跡を写し取り、世界地図上に展開することを試みている。その軌跡が古地磁気学、地球物理学の研究成果との間に相関を示せば「地磁気は内核による磁気と外核による磁気との合成ベクトルであり、内核の逆立ちコマ現象により地磁気が逆転する」というモデルが地磁気逆転のメカニズム解明と次の地磁気逆転時期の理解に役立つと考える。



思考実験図版及び展示実験装置

謝辞 この研究に変わらない励ましを戴いた艦磁研に感謝します。

- 参考文献等
- 1) 石井、廣田、第69回応用物理学会春季学術講演会26a-P02-6
 - 2) 石井、廣田、第70回応用物理学会春季学術講演会17p-PA01-10
 - 3) 石井、廣田、第71回応用物理学会春季学術講演会23p-P05-21

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：地球の限界？プラネタリバウンダリにおけるプラズマとエネルギーシステムによる危機回避

[19p-A22-1~8] 地球の限界？プラネタリバウンダリにおけるプラズマとエネルギーシステムによる危機回避

[19p-A22-1]

空気プラズマを用いたCO₂直接排出のない窒素肥料生成

○田中 学¹、渡邊 隆行¹、奥村 賢直²、Attri Pankaj²、古閑 一憲²、白谷 正治²、竹内 希³、高橋 克幸⁴
(1.九大院工、2.九大院シス情、3.東工大工、4.岩手大理工)

[19p-A22-2]

大気圧パルス放電の発生と農業への応用

○高橋 克幸¹、高木 浩一¹ (1.岩手大学)

[19p-A22-3]

海産性光合成生物を利用した新しいアクアポニクスと物質循環

○河野 智謙¹ (1.北九州市大)

[19p-A22-4]

食資源循環による「美ら島」実現プロジェクト

○平良 東紀¹ (1.琉球大農)

[19p-A22-5]

プラズマによる新しい炭素循環・エネルギー利用システム

○野崎 智洋¹ (1.東工大工)

[19p-A22-6]

地下圏微生物を活用したエネルギー生産

○柳川 勝紀¹ (1.北九州市立大)

[19p-A22-7]

資源循環型共生社会実現に向けた農水一体型サステナブル陸上養殖のグローバル拠点

○羽賀 史浩¹ (1.琉球大共創)

[19p-A22-8]

食の窒素フットプリントを活用したフードシステムからの窒素負荷の算定および改善策の提案
—石垣島を例にして

○濱田 耕佑¹、江口 定夫²、平野 七恵²、朝田 景²、岡 直子¹ (1.国際農研、2.農研機構)

空気プラズマを用いた CO₂ 直接排出のない窒素肥料生成

Nitrogen Fertilizer Production by Air Plasma without Direct CO₂ Emission

九大院工¹, 九大院シス情², 東工大³, 岩手大⁴ ○田中 学¹, 渡辺 隆行¹, 奥村 賢直²,
Pankaj Attri², 古閑 一憲², 白谷 正治², 竹内 希³, 高橋 克幸⁴

Kyushu Univ.¹, Kyushu Univ. ISEE.², Tokyo Tech³, Iwate Univ.⁴ ○Manabu Tanaka¹, Takayuki
Watanabe¹, Takamasa Okumura², Pankaj Attri², Kazunori Koga², Masaharu Shiratani²,
Nozomi Takeuchi³, Katsuyuki Takahashi⁴
E-mail: mtanaka@chem-eng.kyushu-u.ac.jp

プラズマを利用した窒素固定による肥料生産は、化石燃料を利用した工業プロセスに代わる魅力的な方法の一つである。

地球上の窒素の 99%以上は大気中の N₂ の形で存在しているが、反応性の形態（アンモニアや硝酸塩など）に変換する必要がある。このプロセスが窒素固定プロセスであり、窒素の強力な三重結合を切断し、窒素原子を酸素、水素、炭素などの他の元素と結合させる。このプロセスによって、地球の窒素サイクルが完成する。

世界の推定窒素固定量は、約 413 Tg/年と報告されている[1]。生物学的窒素固定が主要な供給源であるが、時間がかかるため、増加する世界人口を支えるために必要な肥料をまかなうのは現実的でない。最も広く利用されている工業的窒素固定プロセスはハーバー・ボッシュ（HB）で、不均一系触媒を用いた高温高压条件下での化学反応（水素と窒素）によってアンモニアを合成する。2010 年まで、このプロセスによって年間 120 トン以上の窒素が固定され[2]、そのうちの約 80%はその後肥料として使用され、残りの 20%は他の窒素含有化学物質の合成原料として使用されている[3]。工業的窒素固定化の発展により、世界の食糧生産は指数関数的に増加し、急増する人口の需要を満たすことができるようになった。世界人口のさらなる増加が見込まれる中で、HB プロセスは工業的窒素固定において極めて主要な役割を担っている。しかしながら、HB プロセスは非常にエネルギー集約的であり、環境への懸念がある。実際、全世界の総エネルギーの約 1~2%、総天然ガスの 2%がこのプロセスで消費され、その結果、3 億トンの CO₂ 排出の原因となっている。人口の急増と天然資源の枯渇を考慮すると、窒素固定のエネルギー効率を改善できれば、経済的にも環境的にも非常に有益である。そのため、HB プロセス用触媒の改良、プラズマを用いた窒素固定プロセスの開発、生物学的窒素固定など、持続可能な窒素固定法に関する継続的な開発が進められている。

本研究では、一般的な窒素固定にとどまるのではなく、プラズマまたはプラズマ下流ガスを直接腐葉土等の固体試料に照射することで、一段のプロセスで肥料製造するプロセスを検討し、多角的な視点からその評価を行う。

- [1] F. David, et al., The global nitrogen cycle in the twenty-first century, *Phil. Trans. R. Soc. B*, 2013, 368.
- [2] J.W. Erisman, et al., How A Century of Ammonia Synthesis Changed the World. *Nat. Geosci.* 2008, 1, 636–639.
- [3] J.N. Galloway, et al, Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 2008, 320, 889–892.

大気圧パルス放電の発生と農業への応用

Generation of Atmospheric Pressure Pulsed Discharges and Their Agricultural Applications

岩手大¹, 岩手大次世代アグリ² °高橋 克幸¹, 高木 浩一^{1,2}

Iwate Univ.¹, Agri-Innovation Center, Iwate Univ.², °Katsuyuki Takahashi¹, Koichi Takaki^{1,2}

E-mail: ktaka@iwate-u.ac.jp

高電圧パルスパワーを用いて発生する大気圧パルス放電は、電気エネルギーのみでその場で容易にプラズマを形成することができる。プラズマ中では、原子状酸素やヒドロキシラジカルなどといった、酸化力が高い活性酸素種や活性窒素種が生成される。これを利用することにより、薬品などを用いずとも、環境中の難分解性化合物の酸化分解、菌やウィルスの不活化、窒素化合物の生成などが可能となることから、環境浄化や農林水産・畜産業などにおける応用が期待されている。農林水産・畜産業においては、プレハーベストにおける応用として、水耕栽培液や土壌中に含まれる有機化合物の分解や、病原菌の不活化による成長阻害や病害の抑制、窒素固定による養分の生成などがある(Figure 1)。また、畜舎における悪臭物質の除去や粉塵除去による、畜産動物の生育環境改善や、電気刺激によるキノコの増産など、生産性の向上が期待できる。ポストハーベストにおける応用としては、エチレン分解による青果物の鮮度保持や、残渣物からの有用成分抽出、乾燥速度の向上など、鮮度保持による商品価値や新しいチェーンサプライの構築に寄与できる。本発表においては、小型高電圧パルスパワー電源を用いた大気圧パルス放電の発生技術とともに、農林水産・畜産業への応用の取り組みについて紹介する。

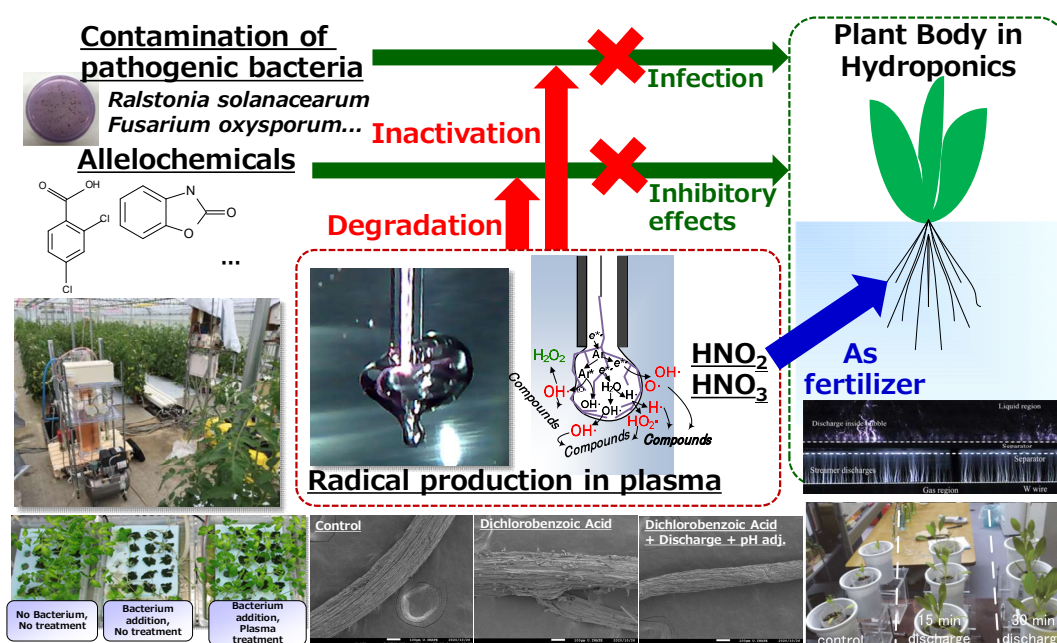


Figure 1 Treatment of nutrient solution of hydroponics
by pulsed discharges generated over liquid surface

海産性光合成生物を利用した新しいアクアポニクスと物質循環

Marine aquaponics with photosynthetic organisms for sustainable C and N cycles

北九州市大¹ ○河野 智謙¹

Univ. Kitakyushu¹, °Tomonori Kawano¹

E-mail: kawanotom@kitakyu-u.ac.jp

現在、地球規模での人口増加に起因する食料問題や環境問題は、それぞれが複合的に関連しており、農作物の生産性向上のための化学肥料の使用や水産資源枯渇を回避するための水産養殖が土壌や海洋の汚染につながるなど、特定の課題を解決するための施策が、別の問題を引き起こす事例が多くある。Paul Crutzen ら(2000)は、人類が地球環境に与える影響が増大した現代を、過去の地質学的時代と区別して「人新世」と呼ぶことを提唱したが、人新世を特徴づける 24 の指標の内、8 項目が、化学肥料（窒素）の使用を起点とした地球規模の環境問題である。

アクアポニクスは、農業と漁業における物質循環を接続させ、効率的な食料生産の実現と環境負荷の低減を企図する技術であるが、その原型は、古代の東アジアでの稲作と淡水魚の飼育の併用や中米におけるチナンパ（湖水に浮かぶ浮島）での耕作に見出すことができるとされる。一方、本格的に窒素循環の効率化を企図して急速に開発が進んだのは 20 世紀後半以降のことであり、現在までに淡水環境での魚類飼育と連結した多様な農作物の栽培がプロトコル化されている。アクアポニクスでは、生産者が魚介類養殖と農業生産の両方から収入を得ることができるため、魚介類養殖に伴う水質汚染を解決する方法としては、コストの面で非常に優れたアプローチである。

年間 96 万トンの魚介類を養殖する日本国内においても（2021 年時点）、環境への負荷を低減する持続可能なアプローチとして、農業と漁業での窒素利用を効率的に接続するアクアポニクス技術が大きな注目を集めている。しかし、日本の水産養殖の約 97%が海面を利用した養殖であるため、淡水魚を想定して開発されたアクアポニクス技術を利用することができない。近年の Satreps プログラムでの国際協力を通じた改良型アクアポニクスの実証試験では、乾燥地特有の塩濃度が高い水環境での魚類養殖と農業に特化した技術導入が試みられているが、海産性の魚類を対象としたアクアポニクス技術は開発されていない。

一方、海洋には、サンゴのように光合成により炭素を固定することで生育する生物が分布しており、この中には、水産資源として高い価値を持つ生物も含まれる。サンゴ礁生態系を代表する動物であるサンゴやシャコガイの仲間は、体内に褐虫藻を共生させ光合成で生育する。北九州市立大学では、宮古島市の海業センターと共同で、地域の高級食材として知られるヒメシャコガイの人工飼育研究に取り組んできたが、近年、ヒメシャコガイが、旧来のアクアポニクスにおける農作物のように魚類由来の窒素成分を効率的に吸収し、自らの生育に利用することを明らかにしている。本講演では、サンゴ礁の生態系を再現した光合成生物と熱帯魚をモデルとした海水対応型アクアポニクスの事例を中心に、生物地球化学的循環から見た持続的な水産養殖や農業の在り方について議論する。

食資源循環による「美ら島」実現プロジェクト

Eco-island project with circular food economy

琉球大農 平良東紀

University of the Ryukyus, Toki Taira,

E-mail: tokey@agr.u-ryukyu.ac.jp

琉球大学では、研究推進機構 共創拠点運営部門内に「地域共創プロジェクトチーム」を設置し、「食資源循環による美ら島実現事業（通称:FoodX プロジェクト）」を推進している。本プロジェクトは地域課題の解決に向けた取組であると同時に、島嶼空間における窒素循環と自然環境との関係を考えるプロジェクトでもある。背景とビジョンを以下に示す。

沖縄は、美しいサンゴ礁の海に象徴される豊かな自然と琉球王朝時代から続く独自の文化を有する「美ら島」として、観光業を中心とした産業で発展してきた。しかし、いま、農業・生活・観光による環境への負荷が美ら島の持続性を脅かしている。畜産農家による家畜糞尿の堆肥化技術が不十分あることに加え、多くの耕種農家が化学肥料に頼っているため、やせた土壌から肥料成分が地下水を通じて海に流出し、サンゴ礁にダメージを与えている。また、沖縄の食文化の象徴である養豚は、ほぼ外国産に依存している飼料の暴騰や散発する感染症により衰退の一途を辿っている。このままでは観光資源である美しい海と食文化は島民の誇りとともに失われてしまう。

フード・トランスフォーメーション（FoodX）がこの状況を転換する。我々は美しいサンゴ礁に囲まれた島嶼空間において、食品残渣を最大限回収・飼料化・エネルギー化するシステムおよび家畜糞尿の効率的堆肥化とその流通・耕畜連携システムを構築する。安価で環境負荷の少ない食品残渣飼料は畜産農家の経営安定化につながり、食品残渣のエネルギー化は多量の食品残渣を出す観光業や食品産業の持続可能性を高める。家畜糞尿堆肥の流通システムの確立は畜産農家の経営安定化と持続可能性を高め、耕種農家の化学肥料から有機肥料（堆肥）への転換による土壌改良と環境負荷低減を実現する。加えて環境モニタリングにより農畜産のサンゴ礁への影響を数値化するとともに閾値を決定し、島民の生活を守りながら環境を守るシステムを構築する。これらにより、「島嶼型食資源循環モデル」を確立する。食品残渣を排出し、有機肥料で作られた農産物を使用・消費する企業・住民・観光客は、このモデルを確立するための重要なステークホルダーである。島嶼における食資源循環の課題を共に考えるプログラムを開発し、地域の小中高生および修学旅行生に向けて実施する。また、観光を学ぶ大学生に食・農・環境についての課題探索型授業を開講しこれらを理解した観光人材の育成を行う。同時に、琉球大学内に実証農場「琉大つながるファーム琉大つながるファーム」を設置し、循環型農業の実践と普及の場、農家同士および農家と地域住民・生徒・学生が交流する場を県・自治体・大学で連携して提供する。

これらを通じて美ら島の再生に向けた農業・生活・観光をつなぐコミュニティが形成される。自らが係わって再生した美しい海と誇れる文化によって醸成されたシビックプライドが、世界で最も持続可能な食資源循環の島「美ら島」を共創する。

プラズマによる新しい炭素循環・エネルギー利用システム

Emerging carbon recycling and energy systems using plasma

東工大工学院 °野崎 智洋

Tokyo Tech, °Tomohiro Nozaki

E-mail: nozaki.t.ab@m.titech.ac.jp

化学反応プロセスの大部分が熱エネルギーの大量消費のうえに成り立っている。熱エネルギーのカスケード利用など省エネ技術はほぼ成熟しており、化石燃料の燃焼熱を利用するかぎり CO₂ 排出量削減に対する根本的な解決は困難を極めている。低温熱エネルギーを利用する場合でも、温度差が小さくなるほど熱流束が小さくなり、生産性の低下や反応器の大型化に伴うコスト増加によって技術の実装が制限を受ける。水蒸気発生のような単純プロセスでも(大気圧なら 100℃)、装置の小型化や迅速な起動停止が要求されるため、1000℃を超える燃焼熱が利用される。一方、物質変換に伴う物理・化学操作の実行にはエネルギーの投入が不可欠であり、低炭素なエネルギー供給源として再生可能エネルギーの利用が求められる。わが国では、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」に基づき、様々な産業分野で既存熱プロセスの電化が推進されており、電気化学、光化学、生化学に加え、電場、マイクロ波、電気加熱などを利用した物質変換技術が検討されている¹⁾。触媒や分子ふるい機能を集積したデバイスの開発や、新しい概念に基づいた分子転換に関する研究も活性化しているが、エネルギー効率や生産性など課題が多く、水の電気分解や CO₂ 共電解など一部を除き基礎研究にとどまっているのが現状である。

近年、非平衡性が高い反応場を大容量でつくるプラズマと、触媒科学を融合したプラズマ触媒に関する研究が既存の熱触媒技術の課題を解決しうる新しい低炭素技術として注目を集めている^{2,3)}。電気エネルギーを用いて分子を活性化するため、熱依存型の従来システムから脱却した新たな低温化学反応システムの創出が期待できる。プラズマの形成には電力を必要とするため、再生可能エネルギーの利用推進と相まって、プラズマ触媒に関連する技術は、電気化学、光化学に次ぐ新しいプロセス電化技術として基礎・応用研究が加速している。本発表では、プラズマ触媒による CO₂ 転換について、最も機構解明が進んでいる逆水性シフト反応 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$: 吸熱反応) とともに、発熱反応である CO₂ メタネーション反応 ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$: 発熱反応) を比較してプラズマ触媒技術の特徴を紹介する。これらの反応は再生可能エネルギーから生成されるグリーン水素を必要とするため、特にコストの点で実装が制限されやすい。そこで、グリーン水素を利用しない炭素循環技術として CO 二量化反応 ($2\text{CO} = \text{C} + \text{CO}_2$) によるカーボンブラック合成についてプラズマ触媒技術の展望を述べる。

謝辞：本研究は JST CREST(JPMJCR19R3)の支援を得て行われた。

- 1) A.I. Stankiewicz and H. Nigar, *React. Chem. Eng.* **5**, 1005 (2020).
- 2) T. Nozaki, X. Chen, D.-Y. Kim, C. Zhan: *Plasma Chem. Plasma Process.* **43**(6), 1385 (2023).
- 3) T. Nozaki, D.-Y. Kim, X. Chen: *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 030101 (2024).

地下圏微生物を活用したエネルギー生産 Energy Production Using Subsurface Microbial Communities

北九州市立大¹, °柳川 勝紀¹

Univ. Kitakyushu¹, °Katsunori Yanagawa¹

E-mail: kyanagawa@kitakyu-u.ac.jp

2050年までに実現を目指すカーボンニュートラルは、温室効果ガスの排出を全体として無くすことを想定しており、化石燃料に依存したエネルギーの需給体制を見直しや温室効果ガスの排出削減が喫緊の課題となっている。さらに、日本の長期的なエネルギー計画を考慮すると、新たな科学的知見と技術開発によるイノベーション創出が不可欠である。特に、国土に豊富に存在するエクセルギーの低い天然資源を有効利用するための研究が、資源の乏しい我が国にとって極めて有益である。

温泉などの地熱水は地下深部で様々な化学反応を経験した溶液である。結果的に多量の還元物質を含んだ熱水が、地表の酸化的な環境で噴出する際に熱力学的に非平衡状態が生まれる。熱水中に生息する微生物は、その際に利用可能な種々の酸化還元反応を触媒することで自由エネルギーを獲得し、自らの非平衡状態を維持している。さらに、多くの熱水環境ではその温度条件で至適増殖が可能な微生物が選択されており、極めて高い代謝活動と自己増殖能を有することも少なくない。これらの物理・化学的特徴に起因する理由で、熱水中の機能性未知微生物は魅力的な生物工学的ポテンシャルを秘めているが、我々はそれらを十分に有効活用できているとは言い難い状況である。

近年、我々の研究グループは大分県杵築市に位置する山香温泉が特徴的な微生物生態系が発達することを見出した。泉温は33-38度、pH 6.6付近で、酸化還元電位は低く、溶存無機炭素濃度が高い物理・化学的環境であった。また、大きな特徴として、塩化物イオンに富み、リチウムやヨウ素も検出され、溶存有機物濃度も高い。微生物群集としてはメタン生成アーキアが優占する。この微生物を含む複合微生物によるプロセスが働き、有機物を分解しメタンを作り出すポテンシャル高く、エネルギーハーベスト手法や分散型エネルギーシステムの構築に繋がる可能性がある。本講演では、それら温泉中微生物の着目し、その代謝活動を刺激することで、様々な未利用もしくは廃棄物バイオマスからメタンの産生を促すバイオメタネーションの取り組みについて紹介する。

資源循環型共生社会実現に向けた農水一体型サステナブル陸上養殖のグローバル拠点

Center of Excellence of the Sustainable Integration of Land-based Aquaculture with Agriculture to build the Resource Circular Symbiotic Society

琉球大共創 羽賀 史浩

Univ. of the Ryukyus, Fumihiko Haga

E-mail: f-haga@cs.u-ryukyu.ac.jp

1. 拠点ビジョン

本プロジェクトでは、一次産業から見える将来課題（人口増に伴う食糧不足、エネルギー供給の持続可能性、食品ロスや食品廃棄の弊害、担い手不足による一次産業の経営困難）を「食」、「エネルギー」、「人材」の好循環を生む仕組みを構築することから解決を目指す。本プロジェクトの未来のありたい社会像は「世代を超えてすべての人が、環境負荷ゼロで食資源の確保と経済的な自立が出来る社会」、20年後の未来には水産業や農業の垣根がなくなり、一次産業が融合した新しい産業が創出され、そこで若者たちが活躍している姿が我々の拠点ビジョンである。

2. 研究開発と社会実装

拠点ビジョンを実現するためには、若者が自信と希望をもって就労できる農水一体型の資源循環型産業の構築が第一歩となる。そのために、本プロジェクトでは6つの研究開発課題に取り組んでいる。研究開発課題1は「無駄を省いた海洋生物の生産技術の開発」で、生物学的アプローチとして養殖対象生物を早く大きく育てる技術開発とともに魚粉代替飼料の開発を行うことで生産コストの削減を目指す。研究開発課題2は「物質循環型農水一体養殖技術の開発」で、海水魚の養殖から排出される水溶性物質および固形物を、それぞれ環境負荷の少ないアクアポニックス技術によって付加価値の高い農産物へ変換する。これにより環境的、経済的に持続可能な物質循環型農水一体型養殖技術の開発を行う。研究開発課題3は「再生可能エネルギー100%による電源供給」で、環境が異なる様々な地域で閉鎖循環式養殖が導入できるための研究開発を行う。モデル予測制御を適用すると共に養殖施設のポンプ等負荷のデマンドレスポンス能力を活用する。研究開発課題4は「ICTを活用したスマート陸上養殖技術の開発」で、閉鎖循環式陸上養殖の技術基盤の構築を目指し、スマート水産業の取り組みで行われているICT活用の効果を検証し、最先端の技術の活用を実施する。研究開発課題5は「沖縄モデルを実現するシステム技術開発」で、4つの研究開発課題を融合し全体最適化を図ることで、部分最適化に陥らずに拠点ビジョンに合致したシステム開発を行う。研究開発課題6は「社会実装のためのビジネスモデル開発」で、水産業や農業でICTを活用して経験や勘に頼らない客観性、情報に基づくオペレーションやビジネスモデル開発をし、若者にとって魅力があり参入しやすい産業を構築する。我々の拠点では、上流の研究開発から下流の流通・販売までサプライチェーン全体を一気通貫した産学官連携グローバル共創プロジェクト拠点を目指している。

食の窒素フットプリントを活用したフードシステムからの窒素負荷の算定および改善策の提案-石垣島を例にして

Evaluation of nitrogen load to the environment from food system and mitigation measures using food nitrogen footprint—a case study in Ishigaki Island

国際農研¹, 農研機構² ◯濱田 耕佑¹, 江口 定夫², 平野 七恵², 朝田 景², 岡 直子¹

JIRCAS¹, NARO² ◯Kosuke Hamada¹, Sadao Eguchi², Nanae Hirano², Kei Asada², Naoko Oka¹

E-mail: hamadak302@affrc.go.jp

世界における窒素に起因する環境問題は逼迫した状況にあり、窒素循環の適正化が強く求められている。そのため、農業生産においては堆肥のようにその地域にすでに存在する有機資源を活用し、化学肥料の使用量を削減することが必要であり、消費においては窒素負荷の少ない食生活へのシフト（食べ過ぎや食品ロスを減らすなど）が必要である。食の窒素フットプリントは、食料の生産、加工、流通、消費、ヒトの排泄の全過程から、どれくらいの反応性窒素（Nr； N_2 を除く全ての窒素）が環境中に排出されるかを表す簡易な科学的指標である。本研究では、食の窒素フットプリントの考え方を活用し、石垣島のフードシステムにおける窒素フローと窒素負荷の現状を物流データ等の統計資料に基づき評価すると共に、その改善策を提案することを目的とした。改善シナリオとして、①牛糞堆肥の利用率向上を通じた化学肥料使用量の低減による窒素負荷削減量と②消費者の食べ過ぎや食品ロスを軽減した場合の窒素負荷削減量を検討した。窒素負荷削減は地球規模で考える必要があるため、島内だけでなく、輸入食飼料を生産する島外の窒素フロー・窒素負荷量も考慮した。

分析の結果、石垣島の主要な食料生産にかかる全 Nr 排出量の 28%が島内消費者向け、72%が島外輸出向けの食料生産に起因することが明らかになった。石垣島の食料生産量は、牛肉を除くと消費者の需要を満たすには十分ではなく、輸入粗食料（非可食部も含む食料）Nr は、島内で生産された粗食料 Nr の 5.1 倍と推定された。これらの結果から、(i) 石垣島の食生活に由来する Nr 排出の一部が、輸入農産物の生産を通じて島外で発生していること、(ii) 島外の食生活のための Nr 排出が、輸出用農産物の生産を通じて石垣島内で発生していることが明らかになった。

堆肥利用率の向上により化学肥料 Nr の 30%を代替するには、島内で産出される堆肥 Nr の約 70%を農地に施用する必要があることが示された。このシナリオでは、島内での Nr 排出は、現状から 17%削減される。一方、消費者の食べ過ぎを現在の半分にするシナリオでは、島内での Nr 排出削減率は 3%程度だが、輸入食飼料を生産する島外での Nr 排出を 10%削減できることが明らかになった。また、食品ロスの飼料利用（エコフィード）や、食品ロス分だけ輸入食料を削減するシナリオでは、前者より後者の方が、島内・島外における Nr 排出削減効果が高いことが示された。

本シナリオ分析より、堆肥利用率の向上は主に島内での Nr 排出削減に寄与すること、食品ロスの削減など消費者の食生活の改善は島内・島外両方の Nr 排出削減に効果があることが示された。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 半導体放射線検出器の最新動向

[17p-A35-1~6] 半導体放射線検出器の最新動向

[17p-A35-1]

4H-SiC epitaxial radiation detectors for harsh environments

○Krishna C. Mandal¹ (1. University of South Carolina)

[17p-A35-2]

ペロブスカイト半導体を用いた放射線検出器開発の動向

○山中 隆志¹ (1.九大基)

[17p-A35-3]

ハライドペロブスカイト半導体による放射線検出器の開発

○佐藤 敏幸¹ (1.元 京都医療科学大)

[17p-A35-4]

TlBr半導体検出器の結晶性及びキャリア輸送特性評価

○渡辺 賢一¹、長谷川 創大¹、須貝 優介¹、田中 清志朗¹、野上 光博²、人見 啓太郎² (1.九大工、2.東北大)

[17p-A35-5]

Advancements in High-Resolution Detector Development for High Energy Instrumentation for Space Telescopes

○Irfan Kuvvetli^{1,2,3}, Selina Howalt Owe^{1,2,3}, Carl Budtz-Joergensen^{1,2,3} (1.DTU Space, Technical Univ. of Denmark, 2.Department of Space Research and Technology, 3.Astrophysics and Atmospheric Physics)

[17p-A35-6]

大面積CdTeフォトンカウンティングX線イメージャーの開発

○青木 徹^{1,2}、西澤 潤一¹、加瀬 裕貴¹、都木 克之^{1,2} (1.静岡大電子研、2.ANSeeN)

4H-SiC epitaxial radiation detectors for harsh environments

University of South Carolina, Columbia, SC USA, Krishna C. Mandal

E-mail: mandalk@cec.sc.edu

The 4H Silicon Carbide polytype has emerged as an outstanding material for semiconductor radiation detectors, particularly in harsh environments, due to its wide bandgap (3.27 eV at 300K), high thermal conductivity, mechanical robustness, and radiation hardness. Schottky barrier detectors (SBDs) fabricated on 4H-SiC epitaxial layers are recognized for their excellent performance in charged particle detection, rivaling silicon detectors. Figure 1(a) shows the pulse height spectrum (PHS) obtained using our Ni/4H-SiC (20 μm thick epilayer) SBD exposed to a ^{241}Am test source, demonstrating excellent energy resolution for 5486 keV alpha particles. However, their application in detecting ionizing radiation such as gamma (γ) photons and fast neutrons has been limited by the thinness and low active volumes of available 4H-SiC epitaxial layers. For effective detection of X-/ γ -photons and fast neutrons, a larger active volume is essential.

Advancements in growth technologies have enabled the fabrication of radiation detectors on epitaxial 4H-SiC layers up to 250 μm thick, enhancing their applicability for penetrating radiation. Figure 1(b) shows a PHS obtained using a 250 μm thick epitaxial Ni/4H-SiC SBD. Nevertheless, utilizing the full thickness requires high biases, increasing bulk and surface leakage currents, which adversely affect detector resolution.

Chemical passivation of the semiconductor surface has proven effective in reducing leakage current and

preventing breakdowns under high bias conditions.

Surface passivation in 4H-SiC is typically achieved through nitrogen or hydrogen passivation. Alternatively, passivation with a thin high- κ dielectric material enhances minority carrier diffusion length, indicating reduced interfacial or surface recombination of holes.

Recently, thin oxide-layer incorporated metal-oxide-semiconductor (MOS) detectors have been extensively studied. Figures 1(c) and 1(d) show the MOS detector geometry and the self-biased radiation response of a Ni/Y₂O₃/4H-SiC MOS detector. This paper reviews these findings, comparing the radiation response of vertical MOS

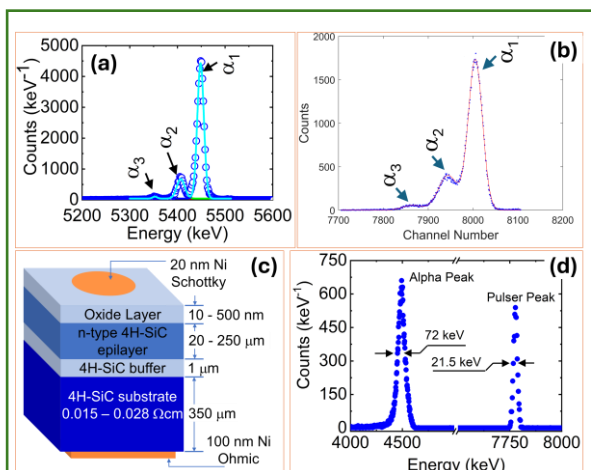


Fig. 1 PHS obtained using a 20 μm (a) and 250 μm (b) thick Ni/4H-SiC SBDs exposed to a ^{241}Am alpha source. (c) The schematic of a MOS detector. (d) PHS obtained using a self-biased Ni/Y₂O₃/4H-SiC MOS.

devices with various high- κ interfacial oxides and SiO₂ layers. We discuss their potential as high-resolution and high-efficiency semiconductor radiation detectors for ionizing radiation applications, offering promising advancements in radiation detection technology.

ペロブスカイト半導体を用いた放射線検出器開発の動向

Development trends of radiation detectors using perovskite semiconductors

九大基¹ ◯山中 隆志¹

Kyushu Univ. Artsci.¹, ◯Takashi Yamanaka¹

E-mail: yamanaka@artsci.kyushu-u.ac.jp

ペロブスカイト化合物、中でもハロゲン化金属化合物は半導体としての性能が発見されて以降、太陽電池材料としての研究が進み、現在ではシリコン系半導体に迫る光電変換効率が得られている。その他にも発光ダイオードや半導体レーザーなど、光の吸収性能だけでなく発光性能にも着目した研究が行われている。また、他の半導体材料と同様に放射線がペロブスカイト材料中で生成する電子、ホールを収集することにより、放射線検出器としても利用が可能である。特に放射線検出器として注目されている特性の一つが鉛などの重元素を構成要素に持つことによる光子に対する高い反応断面積であり、これにより X 線やガンマ線に対して高い阻止能を持つ。もう一つの重要な特性がその作りやすさである。結晶や薄膜を溶液から比較的低温でも生成可能なことから実験室環境下でも容易に生成が可能であり、量産に向けても低コスト化が期待されている。薄膜でも十分な阻止能が得られる X 線検出においては特にこの特性を活かした大面積の検出器が研究され ([1] など)、より感度の高い材料および生成手法が研究されるとともに、実装に向けて読み出し回路も含めた開発も進んでいる。ガンマ線検出の場合はペロブスカイト半導体においても十分な阻止能を得るためには数 mm 以上の厚みが必要となることから 3 次元結晶を用いた検出器の開発が進められており ([2] など)、半導体特有の低い電子・ホール対生成エネルギーを活かした高分解能のガンマ線エネルギースペクトルの測定を可能にしている。

一方で、現在生成されているペロブスカイト半導体ではシリコンやゲルマニウムなどの半導体と比べて暗電流の大きさや電子・ホールの移動度の点では大きく劣り、放射線への感度や時間分解能の低さにより用途に制限がある。これらの改善には不純物や欠陥の生成メカニズムの解明が必要とされる。本講演ではこれらペロブスカイト半導体の放射線検出器としての特性を概観するとともに、その開発の動向を述べる。

[1] Y. Kim et al., Nature 550, 87–91 (2017).

[2] Yihui He, et al., ACS Photonics 2018 5 (10), 4132-4138

ハライドペロブスカイト半導体による放射線検出器の開発

Development of a radiation detector based on the halide perovskite semiconductor

元 京都医療科学大学 ○佐藤 敏幸

Formerly of Kyoto College of Medical Science, °Toshiyuki Sato

E-mail: tsato7242@gmail.com

軽元素材料の界面構造観察、樹脂中のボイドなどの微細構造観察、炭素系複合材料(CFRP)の配向性評価など新規素材の解析要求が高まり、マイクロフォーカス X 線を使った CT や X 線位相イメージングなど新たな手法・装置が開発されている。これらの装置の性能向上のためには、高空間分解能と高感度を兼ね備えた X 線の検出器の開発が重要である。我々は太陽電池材料として開発が大きく進んでいるハライドペロブスカイト材料に着目し CdTe 放射線検出器の感度と CCD の空間分解を持つ X 線検出器の開発を目指した。

X 線光電変換膜を電荷読み出し基板上に形成するためには、基板へのダメージが少なく、大面積化が可能かつ膜品質の均一化が求められる。我々は MAPbI_3 微結晶が分散した溶液を基板上へ滴下し、加熱することで均一な多結晶厚膜を作製し、その X 線検出特性を評価した。講演では検出器を実現するための以下の要素技術開発⁽¹⁻³⁾について報告する。

- (1) MAPbI_3 微結晶分散溶液を用いて晶析により厚さ 1mm の多結晶膜を成膜する手法
- (2) 膜の構造と X 線検出特性の評価。
- (3) 基板からの電荷注入抑制と、空間分解能を確保するために隣接電極間のリーク電流の低減を図るための電荷注入阻止層の検討。
- (4) 添加剤導入による膜質改善の検討。

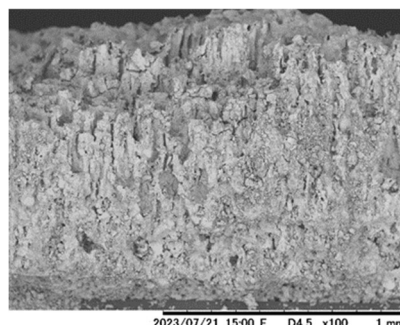


図1 ペロブスカイト膜の断面 SEM 像

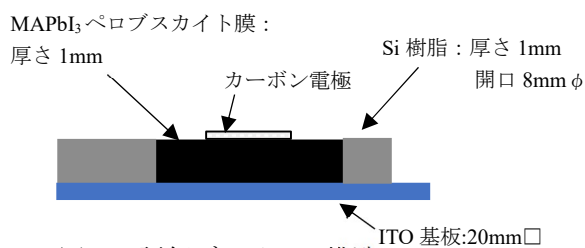


図2 評価デバイスの構造

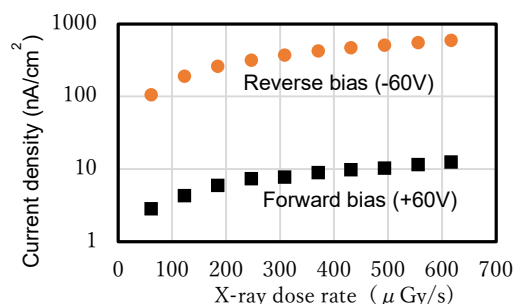


図3 図2の評価デバイスによる管電圧 70kV 時の正負バイアスの X 線検出特性の比較

【文献】

- [1] 佐藤, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 21p-P14-7, (2022)
- [2] 佐藤 他, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-P01-2, (2023)
- [3] 佐藤, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23p-P01-4, (2024)

【謝辞】本研究を共に推進した京都医療科学大学の歴代ゼミ生に感謝します。
本研究はJSPS科研費(21K12525)の助成を受けたものである。また、本研究の一部は文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業(京都大学微細加工プラットフォーム)の支援を受けて実施された。

TlBr 半導体検出器の結晶性及びキャリア輸送特性評価

Evaluation of crystal quality and carrier transport properties of TlBr semiconductor detectors

九大工¹, 東北大² °渡辺 賢一¹, 長谷川 創大¹, 須貝 優介¹, 田中 清志朗¹, 野上 光博², 人見 啓太郎²

Kyushu Univ.¹, Tohoku Univ.², °Kenichi Watanabe¹, Sota Hasegawa¹, Yusuke Sugai¹, Seishiro

Tanaka¹, Mitsuhiro Nogami², Keitaro Hitomi²

E-mail: k-watanabe@nucl.kyushu-u.ac.jp

1. 緒言

TlBr は高い原子番号・密度、ワイドバンドギャップを有する化合物半導体で、室温動作可能、高いエネルギー分解能および高い検出効率を示すガンマ線検出器材料として期待され、開発が進められている。現在乗り越えるべき課題は、デバイス作製における歩留まりの向上であり、安定的に高品質なデバイスを製作可能なプロセスの確立が求められている。検出器製作プロセスの最適化を進める上で、その結晶性の評価手法を確立することは重要である。我々の研究グループでは、これまでに、バルク結晶内部の結晶学的情報を取得可能な中性子ブラッグディップイメージング、および試料表面の情報を詳細に取得可能な電子線後方散乱回折 (EBSD) を用いて、TlBr 結晶の結晶方位分布の観察を進めてきた。同時に、パルスレーザー誘起キャリアの輸送特性評価システムの開発を進めてきた。本講演では、両者の結果を示しつつ、その関連性についても報告する。

2. 結晶性評価

中性子ブラッグディップイメージングは、高強度パルス中性子イメージング施設である J-PARC の BL-22 で行った。時間分解型二次元中性子検出器で取得した中性子透過スペクトル中に存在する回折ディップパターンを解析することで TlBr の結晶方位を推定することが可能である。また、同一のサンプルを九州大学 超顕微解析研究センターに設置された走査型電子顕微鏡を用いて EBSD 測定を実施し、両者の関連性を調べた。

3. キャリア輸送特性評価

Fig. 1 に示すパルスレーザー誘起キャリアの輸送特性評価システムを用いて、TlBr 結晶内の電子移動度の二次元分布を計測した。得られた移動度の二次元分布と上述の結晶方位の関連性を調べ、結晶性とキャリア輸送特性の関連性について検討を進めている。

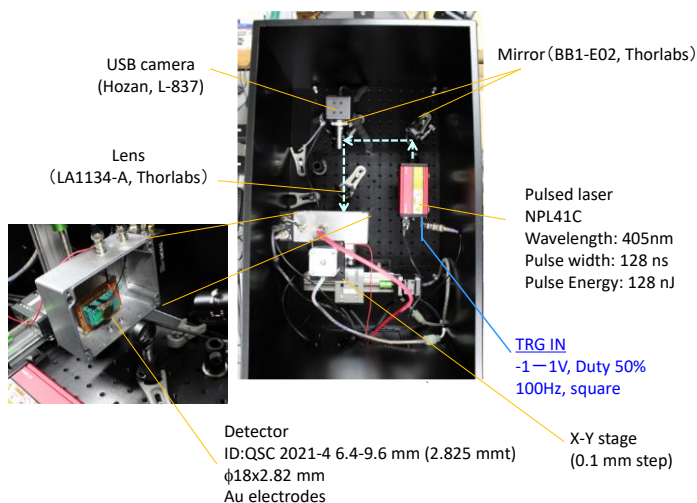


Fig. 1 Experimental setup of the carrier transport property measurement using a pulsed laser.

Advancements in High-Resolution Detector Development for High Energy Instrumentation for Space Telescopes

I. Kuvvetli, S. R. H. Owe, and C. Budtz-Jørgensen

At DTU Space the 3D CdZnTe (CZT) drift strip detector technology [1 to 5] has been developed together with the associated Drift Strip Method (DSM) for pulse shape analysis. The detector technology displays excellent position resolution ($<0.5\text{mm}$), and energy resolution ($<1\%$ at its best) at 661.6 keV achieved through pulse shape signal processing with the Drift Strip Method. The signal formation on each electrode readout employs bi-polar Charge Sensitive Pre-amplifiers. The output is sampled using high-speed digitizers, providing the full pulse shapes generated by each interaction in the detector.

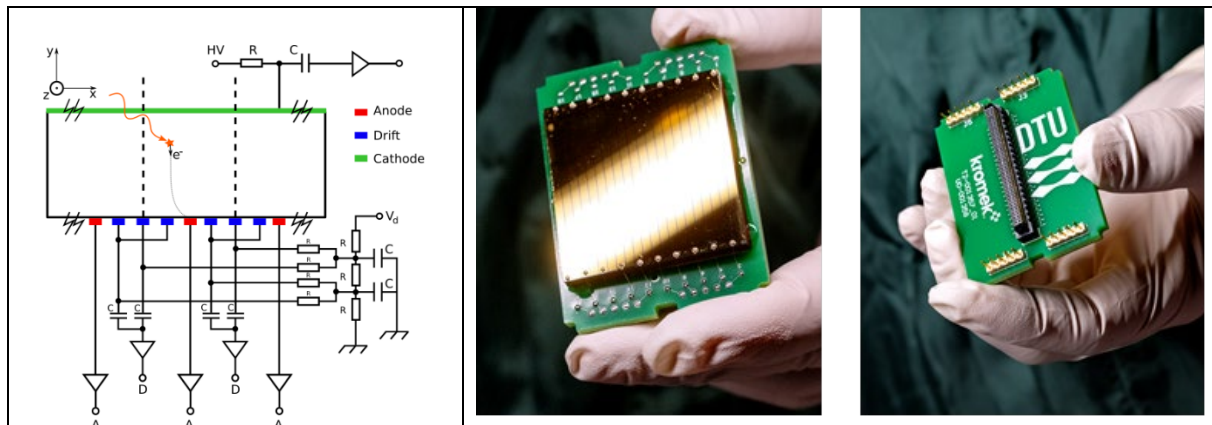


Figure 1: (Left) Principle of Drift Strip Method. (Right) The large area 3D CZT drift strip detector (40mm x 40mm x 5m) attached on a PCB.

Supported by ESA, EU, and national funding, DTU Space has developed novel detector technologies and algorithms [6] that enhance high-resolution spectral-imaging semiconductor detectors. These include AI-powered readout systems and signal processing using artificial neural networks for near-real-time output, applicable in both high-energy astronomy and fields like medical imaging and security.

The 3D CZT drift strip detector technology effectively addresses the challenges of observing MeV (X- and gamma-ray) radiation in telescopes [7 and 8]. This detector offers excellent spectral resolution and spatial resolution, efficiently handling multiple interactions, making it ideal for MeV astronomy and emerging Low-Dose Molecular Breast Imaging (LD-MBI) systems.

This talk will provide a concise overview of these cutting-edge radiation detection technologies, highlighting their significant advancements and applications.

References

- [1] Pamelen, M. A. J. V., & Budtz-Jørgensen, C. (1998). CdZnTe drift detector with correction for hole trapping. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 411(1), 197–200.
- [2] Kuvvetli, I., & Budtz-Jørgensen, C. (2005). Pixelated CdZnTe drift detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 52(5), 1975–1981.
- [3] Kuvvetli, I., & Budtz-Jørgensen, C. (2015). X-ray and gamma-ray radiation detector. Also registered as: WO2014EP75643, EP20130194445; WO2015078902; G01T1/24.
- [4] Kuvvetli, I., & Budtz-Jørgensen, C. (2018). Semiconductor detector with segmented cathode. WO2018065024; G01T 1/24 A I.
- [5] Kuvvetli, I., Budtz-Jørgensen, C., Zappettini, A., Zambelli, N., Benassi, G., Kalemci, E., Caroli, E., Stephen, J. B., & Auricchio, N. (2014). A 3D CZT high resolution detector for X- and gamma-ray astronomy. In *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VI* (Vol. 9154, p. 91540X). International Society for Optics and Photonics.
- [6] Budtz-Jørgensen, C., & Kuvvetli, I. (2017). New position algorithms for the 3-D CZT drift detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 64(6), 1611–1618.
- [7] Owe, S. H., Kuvvetli, I., & Budtz-Jørgensen, C. (2019). Evaluation of a Compton camera concept using the 3D CdZnTe drift strip detectors. *Journal of Instrumentation*, 14(1), C01020.
- [8] Owe, S. H., Kuvvetli, I., & Budtz-Jørgensen, C. (2021). Carrier lifetime and mobility characterization using the 3D CZT drift strip detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*.

大面積 CdTe フォトンカウンティング X 線イメージャーの開発

Development of Large-Area CdTe Photon-Counting X-ray Imager

静岡大電子研¹, ANSeeN² ○青木 徹^{1,2}, 西澤 潤一¹, 加瀬 裕貴¹, 都木 克之^{1,2}

Shizuoka Univ.¹, ANSeeN², Toru Aoki^{1,2}, Junichi Nishizawa¹, Hiroki Kase¹, Katsuyuki Takagi^{1,2}

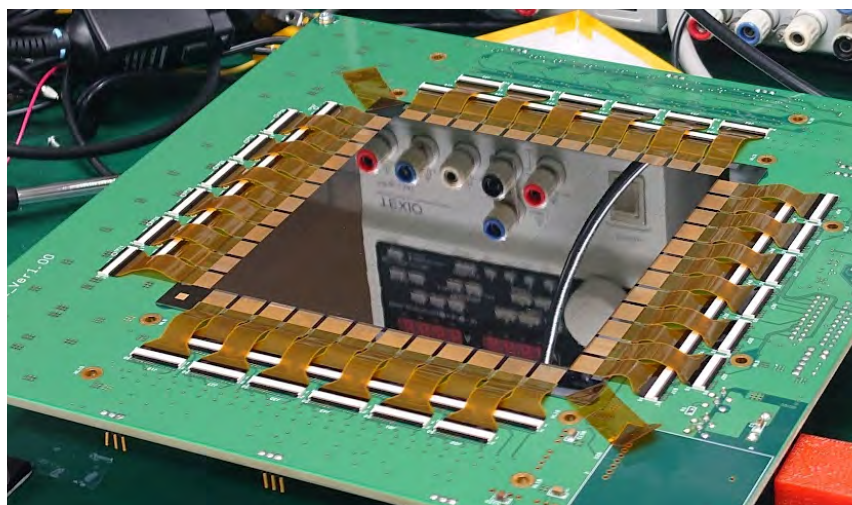
E-mail: aoki.toru@shizuoka.ac.jp

我々は、テルル化カドミウム (CdTe) を用いた画素ピッチ 100 μ m の大面積フォトンカウンティング X 線フラットパネル検出器 (FPD) を開発した。この検出器は、厚さ 0.75 mm のダイオード型 CdTe を採用しファンイン構造で、1 ピクセル 80 μ m 角の超低消費電力フォトン・電荷計数読み出し回路 (独自開発 ASIC) に接続した。各モジュールは 96 \times 96 画素で構成され、これらのモジュールを 12 \times 12 配列することで、約 4.5 インチの大面積イメージャーを実現している。

大面積の開発プロセスでは、超高精度 3 次元集積回路 (3D-IC) 積層技術を活用し、読み出し LSI を薄型化するとともに、信号入出力用の貫通ビア (TSV) を形成した。TSV の反対側には、銀系バンプ材料を用いて 100 μ m ピッチの接続パッド上に金属バンプ接続した。この方法で、CdTe とのフリップチップボンディングを行い 9.6mm 角のモジュールが形成された。これらのモジュールは、極めて平坦な平面性を持つベース基板上にタイリングされ、タイリング・ギャップの幅は 1 ピクセルとし、隣接する CdTe 層間の物理的距離は 40 μ m である。

信号線と電源線は 90° の角度で交差するように構成され、信号出力は FPGA と DPS 技術を利用したコントローラーを介して信号出力する。この大面積 CdTe フォトンカウンティング X 線イメージャーの、検出量子効率 (DQE) や変調伝達関数 (MTF) などを議論する。

今回、3D-IC スタッキング技術の開発と導入により、CdTe というポストプロセスが大変難しい材料系に対しても大型イメージャーを実現することができた。



写真：試作した大面積 CdTe イメージングデバイスのセンサー部分。ASIC と接続した 9.6mm の CdTe/ASIC モジュールが 12 \times 12 でタイリングされている。反射した像が 1 枚の鏡のようであり極めて平坦にタイリングされていることが分かる。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：フォトニックコンピューティングとAIのクロスオーバー ～新潮流から
応用まで～

[18a-C302-1~4] フォトニックコンピューティングとAIのクロスオーバー ～新潮流から応用まで～

[18a-C302-1]

はじめに

○片山 郁文¹ (1.横浜国大工)

[18a-C302-2]

光量子コンピュータで何ができるか

○高瀬 寛^{1,2} (1.東大工、2.理研RQC)

[18a-C302-3]

ナノファイバー共振器QEDによる光・原子ハイブリッド量子コンピュータの開発

○青木 隆朗¹ (1.早大理工)

[18a-C302-4]

コヒーレントイジングマシンの最近の進展

○武居 弘樹¹、稲垣 卓弘¹、稲葉 謙介¹、生田 拓也¹、山田 康博¹、米津 佑哉¹、本庄 利守¹ (1.NTT物性研)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：フォトニックコンピューティングとAIのクロスオーバー ～新潮流から
応用まで～

[18a-C302-1~4] フォトニックコンピューティングとAIのクロスオーバー ～新潮流から応用まで～

[18a-C302-1] はじめに

○片山 郁文¹ (1.横浜国大工)

キーワード：フォトンクス

はじめに

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：フォトニックコンピューティングとAIのクロスオーバー ～新潮流から
応用まで～

[18a-C302-1~4] フォトニックコンピューティングとAIのクロスオーバー ～新潮流から応用まで～

[18a-C302-2] 光量子コンピュータで何ができるか

○高瀬 寛^{1,2} (1.東大工、2.理研RQC)

キーワード：光量子コンピュータ

量子テレポーテーションを利用した光量子コンピュータは室温常圧で動作するほか、ハードウェアのスケラビリティ、クロック周波数の高さなど多くのメリットを持つ。基礎研究の進展により光量子コンピュータの実機作製が可能な段階に入っており、その応用先に関心が高まっている。本講演ではニューラルネットワークや量子一括測定などの、誤り耐性化以前の応用の可能性について最新の動向をお伝えする。

ナノファイバー共振器 QED による 光・原子ハイブリッド量子コンピュータの開発

Development of light-atom hybrid quantum computers based on nanofiber cavity QED

早稲田大 青木 隆朗

Waseda Univ. Takao Aoki

E-mail: takao@waseda.jp

共振器量子電気力学（共振器 QED）系は、共振器に閉じ込められた光と原子が量子力学的に相互作用する系であり、理想的な光・原子ハイブリッド系である。共振器 QED に基づく量子コンピュータは、原子量子ビットと光子量子ビットの利点を両方活用できる。特に、光子を用いて複数の共振器 QED 系を接続しネットワーク化することで、高効率な分散型量子計算が可能になることが期待される。

我々は、独自に開発した低損失ナノファイバー共振器[1-3]に基づくナノファイバー共振器 QED 系[4-6]（Fig. 1）によって、大規模な分散型量子コンピュータの実現を目指している[7]。本講演では、これまでに開発した技術の詳細と今後の展望について述べる。

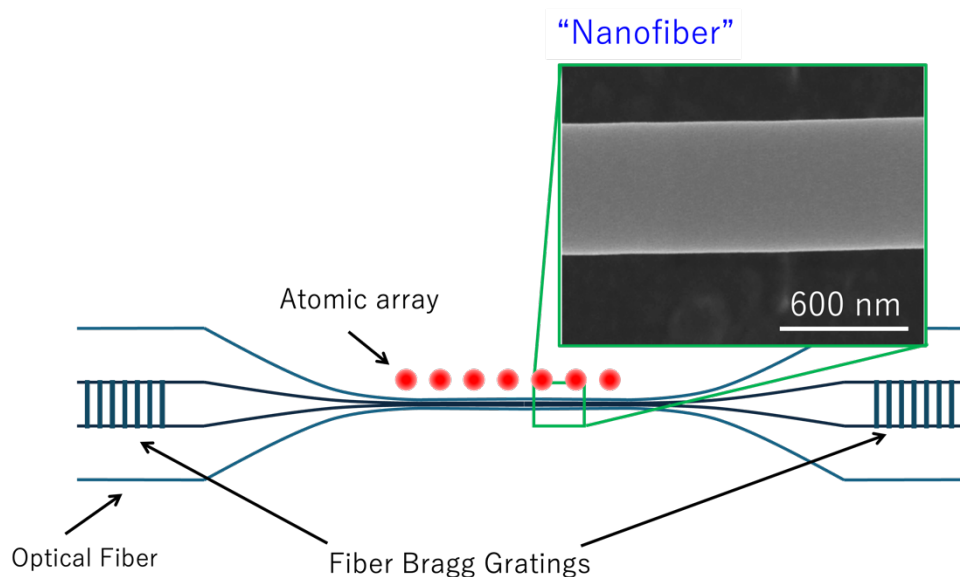


Fig.1: Schematic of a nanofiber cavity QED system.

参考文献

- [1] R. Nagai and T. Aoki, Opt. Express **23**, 28427-28436 (2014).
- [2] S. K. Ruddell *et al.*, Opt. Lett. **45**, 4875 (2020).
- [3] S. Kato and T. Aoki, Opt. Express **30**, 6798 (2022).
- [4] S. Kato and T. Aoki, Phys. Rev. Lett. **115**, 093603 (2015).
- [5] S. Kato *et al.*, Nature Commun. **10**, 1160 (2019).
- [6] D. White *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 253603 (2019).
- [7] 青木隆朗, 日本物理学会誌 **76**, 339 (2021).

コヒーレントイジングマシンの最近の進展

Recent progress of coherent Ising machines

○ 武居弘樹 稲垣卓弘 稲葉謙介 生田拓也 山田康博 米津佑哉 本庄利守

NTT 物性科学基礎研究所

○ H. Takesue, T. Inagaki, K. Inaba, T. Ikuta, Y. Yamada, Y. Yonezu, T. Honjo

E-mail: hiroki.takesue@ntt.com

ムーアの法則の飽和が明らかになりつつある現在、物理システムを用いてより効率のよい計算を実現する試みが活発化している。コヒーレントイジングマシン (coherent Ising machine: CIM) はそのような計算機の一つであり、光パラメトリック発振器 (OPO) をスピンとして見立て、OPO 間の光学的結合によりスピン間相互作用を模擬することで、イジングモデルの低エネルギー状態を探索する物理システムである [1, 2, 3]。本発表では、CIM の原理について述べたあと、大規模化への取り組み [4]、Potts モデルへの拡張 [5]、2 次元イジングモデルの相転移の模擬 [6]、組合せ最適化への応用 [7] など CIM 研究の最近の進展について報告する。

参考文献

- [1] Y. Yamamoto et al., npj Quant. Info. **3**, 49 (2017).
- [2] T. Inagaki et al., Science **354**, 603 (2016).
- [3] P. L. McMahon et al., Science **354**, 614 (2016).
- [4] T. Honjo et al., Sci. Adv. **7**, eabh0952 (2021).
- [5] K. Inaba et al., Commun. Phys. **5**, 137 (2022).
- [6] H. Takesue et al., Phys. Rev. Appl. **19**, L031001 (2023).
- [7] M. Hasegawa et al., IEICE Trans. Commun. **E104-B**, 210 (2021).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): フォトニックコンピューティングとAIのクロスオーバー ~新潮流から
応用まで~

[18p-C302-1~9] フォトニックコンピューティングとAIのクロスオーバー ~新潮流から応用まで~

[18p-C302-1]

光多重化を用いた空間フォトニックイジングマシンの機能拡張

○下村 優¹ (1.阪大情報)

[18p-C302-2]

空間光変調に基づく深層ニューラルネットワークハードウェアの実装方法と応用

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

[18p-C302-3]

磁気光学回折型ニューラルネットワークデバイスの開発

○石橋 隆幸¹、坂口 穂貴¹、本間 拓真¹、赤川 怜央¹、池田 朱莉¹、張 健¹、Zahra Chafi Fatima¹、鷺見 聡²、粟野 博之²、野中 尋史³ (1.長岡技科大、2.豊田工大、3.愛知工大)

[18p-C302-4]

マイクロコムを使った光アクセラレーター

○久世 直也¹ (1.徳大ポストLED)

[18p-C302-5]

集積光技術を活用した光情報信号処理デバイス

○瀧口 浩一¹ (1.立命館大理工)

[18p-C302-6]

異種材料集積を用いたAI用光回路

○竹中 充¹、唐 睿¹、宮武 悠人¹、柴 成立¹、赤澤 智熙¹、作本 宙彌¹、脇田 耀介¹、バルダワジ ダルワイシャン¹、按田 智大¹、高城 和馬¹、関根 尚希¹、渡辺 耕坪¹、大野 修平¹、谷澤 健²、牧野 孝太郎³、富永 淳二³、宮田 典幸³、池田 和浩³、岡野 誠³、モンフレ ステファン⁴、ブフ フレデリック⁴、トープ ラサート ポン カシディット¹、高木 信一¹ (1.東大院工、2.玉川大、3.産総研、4.STマイクロエレクトロニクス)

[18p-C302-7]

写像式フォトニクスニューラルネットワークの最新展開

○コングアンウェイ¹、山本 宗継¹、高 磊¹、前神 有里子¹、並木 周¹、山田 浩治¹ (1.産総研)

[18p-C302-8]

高速アナログ電子回路の光コンピューティングへの適用

○笠松 章史¹、原 紳介¹、田野井 聡¹、和田 和千²、関根 かをり² (1.情報通信研究機構、2.明治大)

[18p-C302-9]

クロージング

○内田 淳史¹ (1.埼玉大)

光多重化を用いた空間フォトニックイジングマシンの機能拡張

Function enhancement of spatial photonic Ising machine by using optical multiplexing

阪大院情報, °下村 優,

Osaka Univ.

E-mail: s-shimomura@ist.osaka-u.ac.jp

多数の選択肢の中から最も良い解を見つけ出す組合せ最適化問題において、効率的な解探索システムの実現は、交通をはじめとした幅広い分野に寄与する。イジングマシンは組合せ最適化問題に特化した計算システムであり、問題の選択肢と制約をスピン変数と相互作用に符号化し、組合せの評価値を示すイジングハミルトニアンを最小化することで最適解を探索する。空間フォトニックイジングマシン (Spatial Photonic Ising Machine, SPIM) は、スピン変数を位相分布に符号化することで、10,000 個以上の選択肢を持つ組合せ最適化問題の解探索を可能とする[1]。しかし、相互作用の表現自由度はスピン数と同等であり、解探索できる組合せ最適化問題の種類は限定されていた。本研究では、光多重化技術を用いた SPIM の機能拡張により、様々な種類の組合せ最適化問題を取り扱う SPIM の開発をめざしている。本手法では時間・空間分割多重化により相互作用の自由度を拡張し、従来の SPIM では解けない組合せ最適化問題における解探索を行なった。

イジングハミルトニアン H はスピン変数 σ と相互作用 J を用いて $H = -\sum_{j,k} J_{j,k} \sigma_j \sigma_k$ と表しており、SPIM では振幅分布 ξ を用いて相互作用を表現する。本手法では複数の光パターンを用いて相互作用の自由度を拡張する[2]。Figure 1 に空間分割多重化を用いた SPIM の概略図を示す。振幅分布 ξ をもつ光の位相は空間光変調器 (SLM) を用いて変調される。各ピクセルの位相変調量 ϕ_j は 2 値であり、スピン変数 $\sigma_j = \exp\{i\pi\phi_j\} \in \{-1, 1\}$ を表現する。変調された光はレンズを用いて集光され、イメージセンサで取得される。集光の中心強度値 $I^{(total)}$ は SPIM のイジングハミルトニアン $H = \sum_{j,k} \xi_j \xi_k \sigma_j \sigma_k$ に対応しており、相互作用は $J = \xi \xi^T$ で表現される。本手法では空間多重化のため振幅分布 $\lambda_k \xi^{(k)}$ をもつ複数の光パターンを SLM に一括入力する。各振幅分布 $\lambda_m \xi^{(m)}$ と位相分布 ϕ と演算により、取得されるイジングハミルトニアンは $H = \sum_k \lambda_k \sum_{i,j} \xi_i^{(k)} \xi_j^{(k)} \sigma_i \sigma_j$ となり、相互作用は $J = \sum_k \lambda_k \xi^{(k)} \xi^{(k)T}$ で表される。その結果、多重化によってとなり相互作用の自由度が増え、処理可能な組合せ最適化問題を拡張できる[3]。

実証実験では、多重化数が 2 つ必要なナップザック問題における最適解探索能力を検証した。スピン数が 17 個必要な問題において、最適化されたスピン変数から組合せ解を求めたところ、最適解が得られることを確認した本結果より、光多重化により SPIM が処理する組合せ最適化問題の種類を拡張できることを実証した。

本研究は JSPS 科研費 23H04805, JST ALCA-Next JPMJAN23F2 の助成を受けたものである。

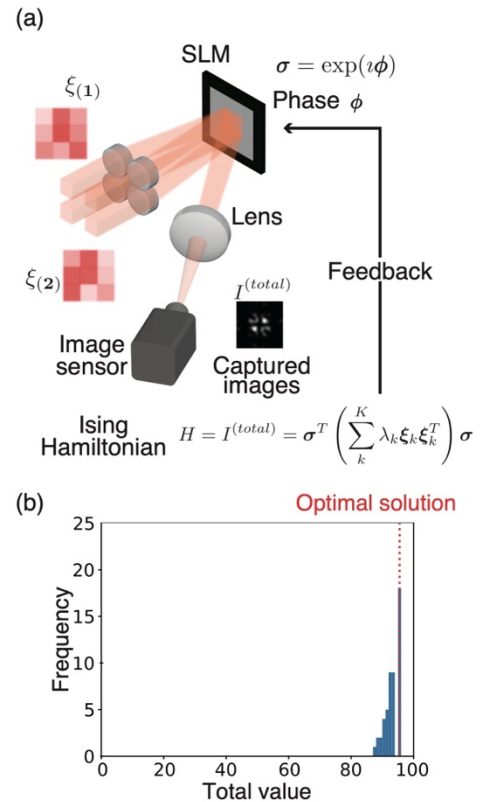


Fig. 1 (a) Schematic of SPIM using space-division multiplexing. (b) Histogram of solution in the knapsack problem.

- [1] D. Pierangeli, G. Marcucci, and C. Conti, “Large-scale photonic Ising machine by spatial light modulation,” *Physical Review Letters*, **122**, 213902 (2019).
- [2] H. Yamashita, K. Okubo, S. Shimomura, Y. Ogura, J. Tanida, and H. Suzuki, “Low-rank combinatorial optimization and statistical learning by spatial photonic Ising machine,” *Physical Review Letters*, **131**, 063801 (2023).
- [3] T. Sakabe, S. Shimomura, Y. Ogura, K. Okubo, H. Yamashita, H. Suzuki, and J. Tanida, “Spatial-photonic Ising machine by space-division multiplexing with physically tunable coefficients of a multi-component model,” *Optics Express*, **31**(26), 44127-44138 (2023).

空間光変調に基づく深層ニューラルネットワーク ハードウェアの実装方法と応用

Implementation and application of deep neural network hardware based on spatial light modulation

九工大情報工¹, 九工大 Neumorph センター² ○ 高林 正典^{1,2}

Kyushu Inst. of Tech. (Kyutech)¹, Neumorph Center, Kyutech², ○Masanori Takabayashi^{1,2}

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

AI (Artificial intelligence) によって解決可能な課題の多様化・複雑化に伴う実装コストの増大が懸念されており, AI の実装に適したハードウェアが期待されている. AI ハードウェアを実現するアプローチの中でも光を利用したものは情報多重性能に優れ, 高い並列性が求められる AI ハードウェアに好適であるとされる. その中でも情報の空間多重を利用した空間光変調型 AI ハードウェアは古くから研究されてきたものであるが, 光の空間的な変調技術や検出技術, 学習理論の発展などもあり, 近年再び注目を集めている [1]. また, 光が不得意とする一部の演算を電子計算機が担う光電融合技術も注目されている.

空間光変調器 (SLM: Spatial light modulator), 線形光学演算部 (自由空間, 散乱媒質, 回折素子等), イメージセンサからなる光学演算層と, イメージセンサと SLM に介在する電子演算層からなる光電融合型深層ニューラルネットワーク (OE-DNN: Optoelectronic deep neural network) を考える. 入力パターンと学習パターンを SLM を用いて光波に変調し, 線形光学演算部を通過することで変化した光の空間分布をイメージセンサで検出する. イメージセンサで取得したパターンに電子演算層で非線形演算等を施したものを次層の入力パターンとし, 学習分布とともに光波に変調する. これらの一連の動作を必要な層数分だけ繰り返し, 最終層の出力パターンを1層目の入力パターンに対する理想的な出力パターンと比較し, その違いが最小となるように各層の学習分布を学習する. このとき, 線形光学演算部を透過行列 (TM: Transmission matrix) [2] を用いて定式化することで, 誤差逆伝搬法などの高速な学習アルゴリズムを用いた学習が実現できる. 特に, TM は SLM 面とイメージセンサ面の複素振幅分布を関係付ける複素行列なので, 複素振幅変調技術や検出技術と組み合わせれば対象とする DNN モデルを複素 DNN に拡張することもできる. 本講演の前半では, TM を用いた複素 OE-DNN の実装方法について紹介する.

また, OE-DNN の線形光学演算部を TM を用いてモデル化できるということは, 任意の光学線形媒質を OE-DNN の線形光学演算部に利用できるということを示唆している. 例えば, 光に変調した情報を記録するホログラフィックメモリ (HDS: Holographic data storage) において, 記録媒質に記録されているホログラムを OE-DNN の線形光学演算部に活用することで, 特別な光学素子や高性能な計算機を追加することなく極めて単純な電子処理だけで深層学習機能を内在させられる可能性がある [3,4]. 本講演の後半では, OE-DNN の応用として, 深層学習機能を内在するホログラフィックメモリによる読み出しデータページのデノイズ処理を紹介する.

謝辞 本研究は科研費 23H04808 の助成を受けたものです. また, 本講演で紹介する研究成果に多大な貢献をいただいた九州工業大学の富岡莉生氏, 高津太一氏, 江藤優太氏, 透過行列に関して有益なご議論をいただいた北海道大学の渋川敦史准教授に感謝申し上げます.

参考文献 [1] J. Hu, et al., Nat. Commun. 15, 1525 (2024). / [2] S. Popoff, et al., Phys. Rev. Lett. 104, 100601 (2010). / [3] M. Takabayashi and A. Okamoto, Opt. Express 21, 3669 (2013). / [4] R. Tomioka and M. Takabayashi, Opt. Rev. 30, 387 (2023).

磁気光学回折型ニューラルネットワークデバイスの開発

Development of magneto-optical deep neural network device

長岡技科大¹, 豊田工大², 愛知工大³ ○石橋 隆幸¹, 坂口 穂貴¹, 本間 拓真¹, 赤川 怜央¹,

池田 朱莉¹, 張 健¹, Zahra Chafi Fatima¹, 鷲見 聡², 栗野 博之², 野中 尋史³

Nagaoka Univ. Tech.¹, Toyota Tech. Inst.², Aichi Inst. Tech.³, ○T. Ishibashi¹, H. Sakaguchi¹,

T. Honma¹, R. Akagawa¹, J. Ikeda¹, J. Zhang¹, F. Zahra Chafi¹, S. Sumi², H. Awano², H. Nonaka³

E-mail: t_bashi@mst.nagaokaut.ac.jp

近年、急速に発展してきたディープニューラルネットワークは、その大きな消費電力が問題となっている。そのため、低消費電力で計算を実行できる物理デバイスの実現が切望されている。我々は、階層型ディープニューラルネットワークを物理的に実装した磁気光学回折型ディープニューラルネットワーク (Magneto-optical Diffractive Deep Neural Network : MO-D²NN) を提案し、研究開発を行っている^{1,2)}。

Fig.1 に、初歩的な計算である手書き数字の分類計算の模式図を示す。MO-D²NN は、隠れ層に用いた磁気光学材料の磁区で生じるファラデー効果を利用した光の位相変調と回折による重ね合わせにより計算が行われる。このデバイスは、2次元の光信号を処理できるため、高速性および並列性を有し、光伝播による電力消費を伴わないことから、省電力性を兼ね備えた物理デバイスとして期待できる。さらに、ニューロンとして機能する磁区は、書き換えが可能のため、再学習や計算タスクの変更も可能である。

Fig.2 は、磁気光学材料としてビスマス置換磁性ガーネット膜³⁾を用いた MO-D²NN の実験装置の模式図である。波長 405 nm のレーザーとガルバノミラーを組み合わせた光磁気書込技術を組み合わせることにより、磁区の書き換えが可能である。

当日は、シミュレーションの結果および実験の進捗状況について報告する予定である。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP23H04803 の助成を受けたものである。

【文献】 1) T. Fujita *et al.* Opt. Exp., 30, 36889 (2022).

2) H. Sakaguchi *et al.*, IEEE Trans. Mag., 59, 1 (2023).

3) T. Ishibashi, J. Magn. Soc. Jpn., 44, 108 (2020).

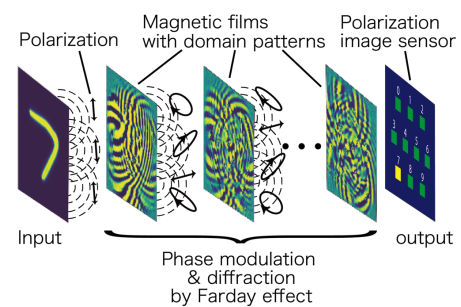


Fig.1 A schematic image of MO-D²NN.

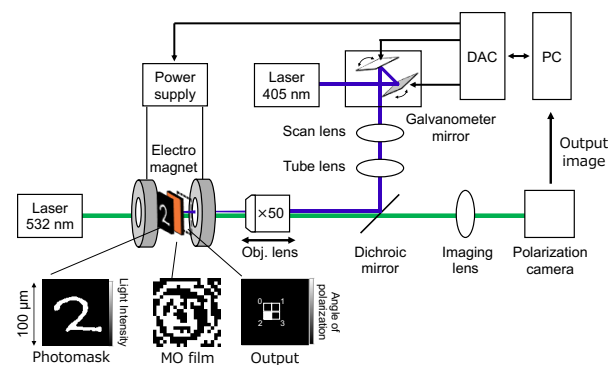


Fig.2 An experimental setup for MO-D²NN.

マイクロコムを使った光アクセラレーター Optical accelerator with microresonator frequency combs

徳島大ポスト LED フォトニクス研究所¹

○久世 直也¹,

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

, ○Naoya Kuse¹

e-mail address: kuse.naoya@tokushima-u.ac.jp

マイクロコムは単一周波数発振 CW レーザーを低損失な微小共振器に結合し、微小共振器内の非線形光学効果によって発生する (図 1(a))。CW レーザー、微小共振器共に半導体製造装置で作製可能なため小型で量産可能な光周波数コムとして注目されている。これまでマイクロコムは光・THz 通信、LiDAR、チップスケール光原子時計などの応用研究がなされている。最近、マイクロコムの波長多重性を光アクセラレーターに使った研究が報告された。そこでは畳み込みニューラルネットワーク中の行列演算がマイクロコムを使って実装された[1,2,3]。本講演では別種の光アクセラレーターとして、研究室で進めている光リザバーコンピューティングや強化学習の問題の 1 つである多腕バンディット問題にマイクロコムを使う研究[4]について紹介する。

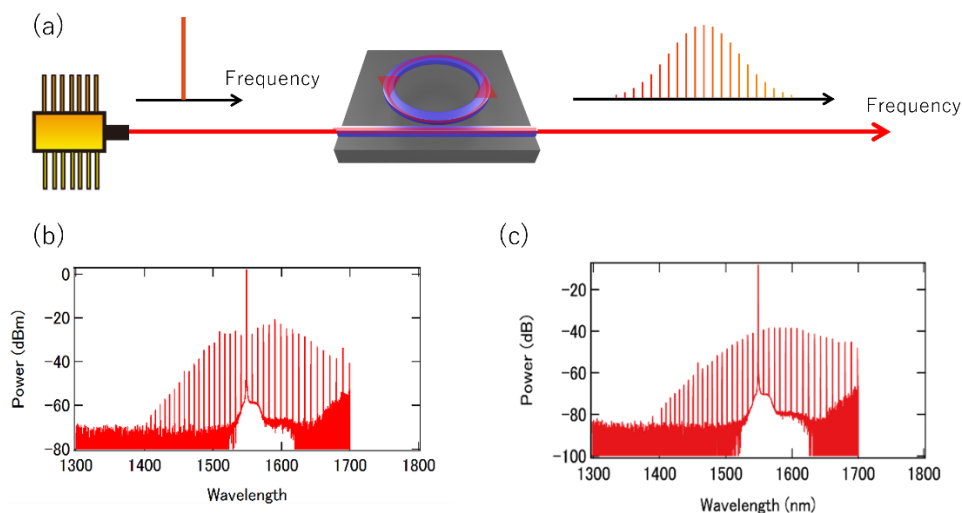


Fig. 1 (a) Conceptual schematic to generate microresonator frequency comb. (b) Optical spectrum of a chaotic comb, which is not in a mode-locked state. The chaotic comb is used for solving multi-armed bandit problems. (c) Optical spectrum of a soliton comb, which is in a mode-locked state. The microcomb is used for optical reservoir computing.

- 1) X. Xu et al. Nature, 589, 44 (2021).
- 2) J. Feldmann et al. Nature, 589, 52 (2021).
- 3) B. Bai et al., Nat. Commun. 14:66 (2023).
- 4) J. Cuevas et al. APL Photonics, 9, 036112 (2024).

集積光技術を活用した光情報信号処理デバイス

Optical Information Signal Processing Device Utilizing Integrated-optic Technology

立命館大理工 瀧口 浩一

Ritsumeikan Univ., Koichi Takiguchi

E-mail: k-taki@fc.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

ビッグデータの活用、AI の進展に伴い、情報通信・コンピュータシステムの処理速度・機能に対する要求が高まっている。従来のシリコン集積回路を基盤とした処理を補完する光アクセラレータを実現するために、光の優れた特性(干渉性、広帯域性、多重性など)を活用した光コンピューティングの研究開発が再興し、集積光技術を用いたニューラルネットワーク回路、論理回路などの成果も報告されている[1]。

多ビットデジタル光信号を一括処理可能な、スラブ導波路型光離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform: DFT) 回路を主構成要素とする、光電融合型の論理回路、演算回路の検討を進めている[2], [3]。その一例として、信号の暗号／復号化、誤り検出に適用可能な光排他的論理和 (Exclusive OR: XOR) 回路について説明する。

2. 多ビットデジタル光信号処理デバイス

図 1 に、多ビットデジタル光信号用 XOR 回路の集積光回路部の概略構成を示す[(a)入力並列ビット数 $N=4$ 、(b) $N \geq 8$ の場合][3]。入力ビットの位相は保持され、各入力部とスラブスターカプラの入力部間との長さは等しいとする。その場合、位相シフタ(シフト値:0 あるいは π)と、光 DFT 回路として動作するスラブスターカプラ[4]での付与位相によって、入力ビット 1 の数が偶数の場合、少なくとも 1 つの出力が 0、入力ビット 1 の数が奇数の場合、全ての出力が 1 となる。従って、光電変換後の出力に AND 電子回路を接続すれば、入力ビットの XOR 演算が得られる。図 1(a)の場合、カプラへの 1 奇数・1 偶数入力部の位相シフトを π にする。また図 1(b)の場合、2 個のカプラの入力部それぞれに関して、奇数・偶数部 $N/4$ 個ずつに π の位相シフトを与え、そのうちの半分ずつの位置のみが一致している必要がある。なお図 1(b)の出力数は N の値によらず 4 であり、入力ビット数は後段の構成に影響を及ぼさない。144 x 144 のスターカプラも実現されており[5]、100 以上の入力ビットを処理可能な光 XOR 回路の実現可能性もある。

並列 4 ビット、各ビット 40 Gbit/s の光信号を用いて図 1(a)の回路の動作検証を行い、平均出力消光比は 5.9 dB であった[3]。

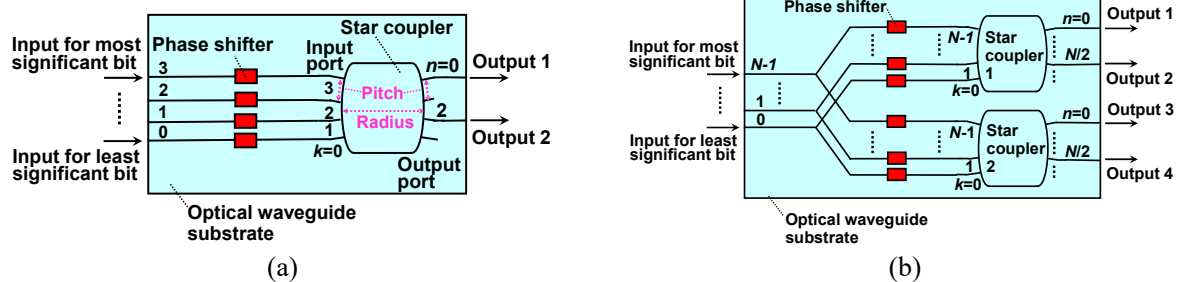


図 1 Optical XOR gates when the number of input bits N is (a) four and (b) more than or equal to eight.

3. まとめ

多ビットデジタル光信号を一括処理可能な、スラブ導波路型光フーリエ変換回路を活用した光電融合型の光 XOR 回路の動作原理、および現状で得られている特性について説明した。

本研究は、科研費 23H04811 の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] K.-I. Kitayama et al., *APL Photonics*, **4**, 090901, 2019.
- [2] K. Takiguchi et al., *Optica Advanced Photonics Congress, ITu2B.3*, Quebec City, Canada, July 2024.
- [3] K. Takiguchi et al., *under submission*.
- [4] K. Takiguchi et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **31**, 1327, 2019.
- [5] K. Okamoto et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4**, 1032, 1992.

異種材料集積を用いた AI 用光回路

AI-oriented Photonic Circuits based on Heterogeneous Material Integration

東大院工¹, 玉川大², 産総研³, ST マイクロエレクトロニクス⁴ [○]竹中充¹, 唐睿¹, 宮武悠人¹, 柴成立¹, 赤澤智熙¹, 作本宙彌¹, 脇田耀介¹, バルダワジ ダルワ イシャン¹, 按田智大¹, 高城和馬¹, 関根尚希¹, 渡辺耕坪¹, 大野修平¹, 谷澤健², 牧野孝太郎³, 富永淳二³, 宮田典幸³, 池田和浩³, 岡野誠³, モンフレ ステファン⁴, ブフ フレデリック⁴, トーブラサートポン カシディット¹, 高木信一¹

The Univ. of Tokyo¹, Tamagawa Univ.², AIST³, STMicroelectronics⁴, [○]Mitsuru Takenaka¹, Rui Tang¹, Yuto Miyatake¹, Chengli Chai¹, Tomohiro Akazawa¹, Hiroya Sakumoto¹, Yosuke Wakita¹, Dhruv Ishan Bhardwaj¹, Tomohiro Anda¹, Kazuma Taki¹, Naoki Sekine¹, Kohei Watanabe¹, Shuhei Ohno¹, Ken Tanizawa², Kotaro Makino³, Junji Tominaga³, Noriyuki Miyata³, Kazunori Ikeda³, Makoto Okano³, Stéphane Monfray⁴, Frédéric Boeuf⁴, Kasidit Toprasertpong¹, Shinichi Takagi¹

E-mail: takenaka@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

近年、光演算用光回路が注目を集めている。光回路上に光位相シフタや光強度変調器を多数集積することで積和演算などが可能になることから、生成 AI などへの応用が期待されている。本講演では、AI 向け光回路に関する研究について紹介する。特に光演算においては位相や強度を変調する光素子が重要となる。MOS キャパシタ[1]や強誘電体[2]、相変化材料[3]を用いた光変調素子 (Fig. 1) についての最近の成果を議論する。

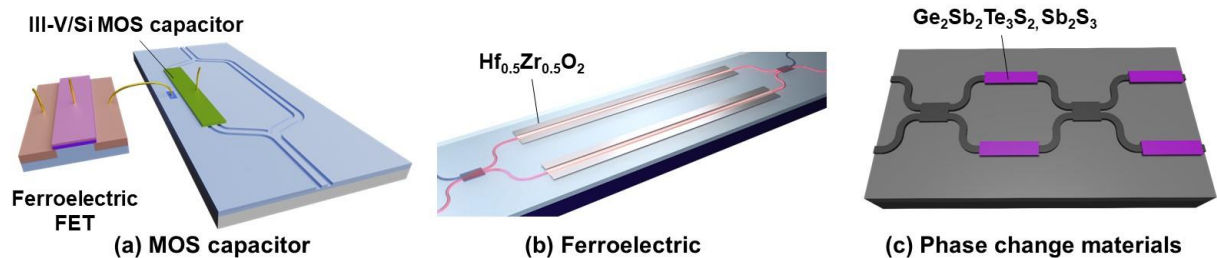


Fig. 1 Optical phase shifters for AI-oriented photonic circuits: (a) III-V/Si hybrid MOS phase shifter, (b) ferroelectric HfZrO₂, and (c) phase change materials: Ge₂Sb₂Te₃S₂ and Sb₂S₃.

謝辞：本研究の一部は JST CREST (JPMJCR2004)、JST 未来社会創造事業 (JPMJMI20A1)、JSPS 科研費 (JP21J20272、JP22K14298、JP23H00172) および文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業 (JPMXP1222UT1028) の助成を受けて実施した。また、NEDO 委託事業 (JPNP16007) の成果を含む。

参考文献：

- [1] R. Tang et al., Laser Photon. Rev., vol. 17, no. 11, Nov. 2023.
- [2] K. Taki et al., Nat. Commun., vol. 15, no. 1, p. 3549, May 2024.
- [3] Y. Miyatake et al., IEEE Trans. Electron Devices, vol. 70, no. 4, pp. 2106–2112, Apr. 2023.

写像式フォトニクスニューラルネットワークの最新展開

Recent Developments of Nonlinear-Projection Based Photonic Neural Networks

産総研 ○叢 光偉, 山本 宗継, 高 磊, 前神 有里子, 並木 周, 山田 浩治

AIST, °Guangwei Cong, Noritsugu Yamamoto, Rai Kou, Yuriko Maegami, Shu Namiki, Koji Yamada

E-mail: gw-cong@aist.go.jp

人工知能 (AI) システムの大規模化に伴い、消費電力の急増が問題になっている。大規模化する AI システムの低電力化に向けて、人工ニューラルネットワーク (ANN) やリザーバーコンピューティングなどの機械学習のアルゴリズムを光集積回路へ実装する光コンピューティング技術が注目されている [1, 2]。このような技術では、光伝搬で機械学習のアルゴリズムを実行するため、低消費電力を実現できる。さらに、これらの光システムは高速性と低遅延性を兼ね備え、アクセラレータとして期待されている。かつてブームとなった光コンピューティングとは異なり、近年の研究では光回路技術 [3]、光電融合技術 [4]、光通信技術 [5] を活用することが特徴である。近年の光集積回路を用いたニューラルネットワークの研究は急速に進展しているが、規模の制限、光学活性化関数の不在、高効率なアナログシステムの学習手法、アルゴリズムの互換性などの課題は解決されていない。光集積回路で従来計算機による深層 ANN モデル (CNN 等) と同等規模に実現するのは困難である。我々は、従来のモデルを単に光で再現するのではなく、特定のタスクに対して光デバイスをどのように利用すると、小規模な機械学習のフォトニクスモデルでも従来技術以上の性能が得られるかに着目した。そのために、光集積回路に適用する新たな機械学習のモデルを探索し、サポーターベクターマシンに着想を得た非線形写像式フォトニクスニューラルネットワーク (PNN) を提案した。従来の ANN とは異なり、写像式 PNN は従来の活性化関数を使わず、入力データに対する非線形変換を行い、その後に線形分離を算出することを求める [6]。こうして我々はシリコン光集積回路上に非線形写像機能を構成し、世界で初めて光伝搬のみで動作する写像式 PNN 演算を行い、高い正解率、電子回路の千分の 1 以下の遅延、かつ数十分の 1 の消費電力の実証に成功した。最近のさらなる展開として、光電融合による光電再帰型ネットワーク [7] やチップレットによる多層化 [8] を検討した。本講演では、これらの技術に関する原理、オンチップ学習手法、実験実証及び今後の展開を紹介する。

本研究は、JST CREST (JPMJCR15N4, JPMJCR21C3)、科研費 (JP23H01885) の助成を受けて遂行された。

[1] K. Kitayama, et al., APL Photonics **4**, 090901 (2019)

[2] Y. Shen, et al., Nature Photonics **11**, 441 (2017)

[3] K. Ikeda, et al., ECOC2023,
DOI: 10.1049/icp.2023.1856.

[4] Y. Chen, et al., Nature **623**, 48 (2023).

[5] X. Y. Xu, et al., Nature **589**, 44 (2021).

[6] G. Cong, et al., Nature Communications **13**,
3261 (2022).

[7] G. Cong, et al., OFC2023, W3G.2.

[8] G. Cong, et al., APL Photonics **9**, 056110
(2024).

高速アナログ電子回路の光コンピューティングへの適用

Application of High-Performance Analog Electronic Circuits to Photonic Computing

情報通信研究機構¹ ○笠松 章史¹, 原 紳介¹, 田野井 聡¹

明治大² 和田 和千², 関根 かをり²

NICT¹, °Akifumi Kasamatsu¹, Shinsuke Hara¹, Satoru Tanoi¹

Meiji Univ.², Kazuyuki Wada², Kawori Sekine²

E-mail: kasa@nict.go.jp

現在の情報処理の多くを担っているマイクロプロセッサ等は集積電子デバイス技術を中心としたエレクトロニクスを基礎としている。フォトリックコンピューティングにおいても、全ての処理を光化することは困難であり、制御回路や後処理回路はエレクトロニクスに依存している。光と電気の融合は最重要課題の一つと言える。

フォトリックとエレクトロニクスのインターフェースや連携については十分に研究開発が進んでいるとはいえず、現状では、例えば、高速オシロスコープを用いて光信号を一旦記録し、別途、通常の計算機上でデータ処理を行うなどしている。このオフライン処理をオンライン化・リアルタイム化することは極めて重要だが、通常のデジタル回路での処理は高速光信号を複数の低速回路に変換するための DEMUX 回路と専用 LSI や再構成可能な LSI (FPGA) の組み合わせとなり極めて高いコストが必要であるだけでなく、スケーラビリティを初めとしたシステムとしての重要な性質が低速なエレクトロニクスによって支配され、光の物理的なメリットを無にしかねない。

また、極限性能を目指したフォトリックコンピューティングの一翼を担うエレクトロニクスによる信号処理技術や電子回路として、従来のデジタル回路やマイクロプロセッサのみをベースとした技術では、非常に規模が大きくなり、消費電力増大や処理速度・効率の問題が顕在化してくると予想される。これは、基本的に情報を2値的に決定論的に処理していることに起因し、従来のデジタル技術とは異なるアナログアーキテクチャで解決する必要がある。

光電融合におけるこのような課題を解決するための研究開発の方向性として、高速アナログ信号処理および超高周波通信のために開発してきた技術を応用展開することが有効である。集積回路に用いられるトランジスタ等の素子のアナログ特性を有効に活用し、少ない素子数で有効に機能を実現することで、現実的な回路規模や消費電力で高機能と高速性の実現を目指すことができる。この際、アナログ信号の活用から生じる不確定性（雑音、ばらつき）や非線形性を許容し、むしろ積極的に活用することが望まれる。これによって、決定論的なデジタル処理では得られない多様な処理と高速性を実現していくことが重要である。

このような研究開発の例として、本発表ではレーザーから生成されるカオス時系列を用いたバンディット問題ソルバシステムにおけるシリコンアナログ集積回路活用例などを示す。

謝辞 本発表の内容の一部は、科学技術振興機構 CREST (JPMJCR17N2)および日本学術振興会科研費(22H05197)の助成による。2023年に急逝された東京大学・成瀬誠教授のご指導に感謝します。

クロージング：フォトリックコンピューティングと AI のクロスオーバー ～新潮流から応用まで～

Closing: Crossover between photonic computing and AI

From new trends to applications

埼玉大 内田 淳史

Saitama Univ., Atsushi Uchida

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

人工知能の急速な進展に伴い、機械学習における計算コストや消費電力が年々増加している。特に、深層学習の重みを最適化するための学習の計算コストや消費電力の低減は、重要な課題である。また、半導体の集積化技術の限界が指摘されており（ムーアの法則の終焉）、シリコン半導体に代わる新たな機械学習用ハードウェアが強く求められている[1]。

そこで近年、光を用いたコンピューティング技術の研究が近年盛んに行われており、光深層学習やコヒーレントイジングマシン、光リザーバーコンピューティング、光強化学習と意思決定など、光を用いた様々な手法が提案されている[1,2]。特に、欧米におけるベンチャー企業の進展や、国際学会・国内学会でのシンポジウム開催が盛んである。また、欧米では光コンピューティングに関する大型プロジェクトも開始されており、国内でも科学研究費 学術変革領域研究(A)が 2022 年から開始している[3]。このように、光コンピューティングに関する社会的要請が急速に高まっている。

深層学習を目的とした光コンピューティングでは、深層学習の行列・ベクトル積和演算を光で行う手法である[4]。また、光リザーバーコンピューティングに代表される新たな機械学習フレームワークが誕生し、多くの研究成果が報告されている[2]。光リザーバーコンピューティングは学習が容易であるという利点があり、計算コストや消費エネルギーの限定されたエッジコンピューティングへの応用が期待されている。

本シンポジウムでは、新たな光コンピューティングの新潮流や、応用へ向けた研究課題などを議論し、今後の光コンピューティングのさらなる発展を目指す。

参考文献

- [1] K. Kitayama, et al., APL Photonics **4**, 090901 (2019).
- [2] 菅野円隆, 内田淳史, “光リザーバーコンピューティング –原理と実装–,” 共立出版 (2024).
- [3] 光の極限性能を生かすフォトリックコンピューティング, 科学研究費, 学術変革領域研究(A)
URL: <https://www.photoniccomputing.jp/>
- [4] Y. Shen, et al., Nature Photonics **11**, 441 (2017).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：新宇宙時代に求められるスペースフォトニクス

[20a-C42-1~9] 新宇宙時代に求められるスペースフォトニクス

シンポジウムスポンサー



OPTOQUEST



[20a-C42-1]

オープニング

○高橋 和¹ (1.大阪公大)

[20a-C42-2]

レーザーを利用した宇宙事業ーレーザーアブレーションによるスペースデブリ除去と衛星高度計ライダーによる地球観測

○丸山 真幸¹、福島 忠徳¹ (1.Orbital Lasers)

[20a-C42-3]

超短パルス宇宙用レーザーをもちいた宇宙デブリの除去

○和田 智之¹、小川 貴代¹、斎藤 徳人¹ (1.理化学研究所)

[20a-C42-4]

光通信等の衛星コンステレーション基盤技術のご紹介

○門脇 亮太¹ (1.アクセルスペース)

[20a-C42-5]

フォトニック帯電センサを用いた宇宙機の電位測定のプロ案

○(M2)大塚 亘晟¹、高濱 渉¹、北城 陸人²、菊永 和也³、豊田 和弘²、高橋 和¹ (1.大阪公大院工、2.九工大院工、3.産総研)

[20a-C42-6]

衛星間光通信の最新動向とフォトニクス技術

○原口 英介¹、尾野 仁深¹ (1.三菱電機(株))

[20a-C42-7]

衛星地上間光通信の最新動向と光照射の安定化技術

○高山 佳久¹ (1.東海大情通)

[20a-C42-8]

光デバイスの迅速な宇宙実証を行うCubeSatの技術

○青柳 賢英¹ (1.福井大)

[20a-C42-9]

中性子線照射が高Q値シリコンナノ共振器に与える吸収損失の評価

○石原 歩¹、奥野 泰希²、高濱 渉¹、大塚 亘晟¹、高橋 和¹ (1.大阪公立大学、2.理化学研究所)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：新宇宙時代に求められるスペースフォトンクス

[20a-C42-1~9] 新宇宙時代に求められるスペースフォトンクス

[20a-C42-1] オープニング

○高橋 和¹ (1.大阪公大)

キーワード：宇宙光通信、デブリ除去、レーザアブレーション

宇宙開発は国家プロジェクトにより進展してきましたが、最近では民間企業が技術開発の中心となりつつあります。新しい宇宙時代に期待される戦略の一つに、これまで利用されてこなかったフォトンクス技術の宇宙利用があります。フォトンクス研究者の皆様には、このシンポジウムに参加していただき、地上産業向けに遂行してきた素晴らしい研究成果を、新しい宇宙時代の形成に役立てる機会として活用していただきたいと思います。

レーザーを利用した宇宙事業 ーレーザーアブレーションによるスペースデブリ除去と 衛星高度計ライダーによる地球観測

Laser-based space business - space debris removal by laser ablation and earth
observation by satellite-borne laser altimeter

株式会社 Orbital Lasers °丸山 真幸、福島 忠徳

Orbital Lasers Co., Ltd. °Masayuki Maruyama, Tadanori Fukushima

E-mail: masayuki.maruyama@orbital-lasers.com

株式会社 Orbital Lasers は、理化学研究所とスカパーJSAT 株式会社による共同研究成果の社会実装を目的とし、2024 年 1 月に設立されたスタートアップである。宇宙ビジネスにおけるレーザー応用に関する研究開発を実施し、主にレーザーによるスペースデブリ除去[1,2]及び衛星ライダーによる地球観測の実用化・商用化を目指している。

スペースデブリとは、地球の衛星軌道上を高速で周回している不要な人工物体（運用を終えた人工衛星や故障した人工衛星、打ち上げロケット上段など）であり、これまで年々増加の一途をたどっている(図 1)。今後の打ち上げにおいて新たなデブリ発生を極力抑制するとしても、持続可能な宇宙開発のためには軌道上にあるスペースデブリを今後 200 年にわたって毎年 5 個以上除去しなければならないことが NASA によって推定されている[3]。

本講演では人工衛星に搭載されたレーザーによるスペースデブリ除去技術の他に、人工衛星に搭載されたレーザーを用いて地表面を計測する高度計ライダー技術(図 2)に関しても紹介する。

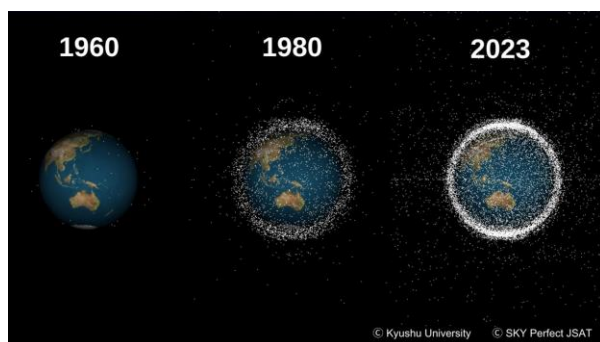


Fig 1. Image of increasing space debris in orbit.

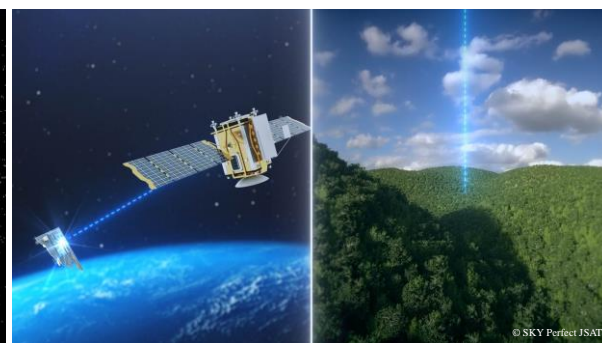


Fig 2. Illustrations of (a) space debris removal by laser ablation and (b) earth observation by satellite-borne laser altimeter.

[謝辞] 本稿の成果はスカパーJSAT 株式会社デブリ除去プロジェクト、理化学研究所衛星姿勢軌道制御用レーザー開発研究チーム、光量子制御技術開発チーム、先端光学素子開発チーム、JAXA J-SPARC、名古屋大学 衝撃波・宇宙推進研究グループ、九州大学 花田研究室のメンバーの協力により行われました。ここに深く御礼申し上げます。

[1] K. Tsuno, et al., Opt. express, **28**(18), 25723 (2020). [2] K. Tsuno, et al., Appl. Phys. A **128**, 932 (2022).

[3] J.-C. Liou, Progress in Propulsion Physics **4**, 735 (2013).

超短パルスレーザーを利用した宇宙デブリの除去

Space debris removal with ultrashort pulse lasers

理化学研究所 RAP 光量子制御技術開発チーム, [○]和田智之, 小川貴代, 斎藤徳人²

RIKEN, RAP, Photonics control technology team

E-mail:swada@riken.jp

近年、通信における5G、6G化、GPS、地球観測衛星など宇宙空間の高度な利用が進む中で、必要とされる衛星の数は増え続けている。例えば、通信では、経度において2度刻みで衛星の配置が必要になり、その数は、数万にもなろうとしている。この状況下で、軌道のコントロールができなくなった衛星や、故障した衛星などデブリと呼ばれる宇宙ゴミの存在は、大きな社会課題となっている。

現在、種々のデブリ衛星除去技術の開発が進められている。ほとんどの提案では、機能停止の衛星（デブリ衛星）をターゲットとして、デブリ除去のために運用される衛星（チェイサー）が物理的に一体化し、デブリ衛星とともに高度を下げるというものである。こうした手法に対して、我々は遠隔な手法としてレーザーアブレーションにより発生する推力を利用したデブリ衛星の除去や精密位置制御の研究を進めている。

レーザーアブレーションによる推力発生に関する研究は、1970年代からはじまっているものの、宇宙用レーザーの実用化が遅れていることが、研究推進上の大きな障害となっていた。しかしながら、LD励起の固体レーザー等レーザー技術の進展や、ソーラーパネルによる電力供給システムの発展、宇宙空間における冷却技術の進展により、達成可能な推力でも十分に利用できるミッションが見出され、その実現が望まれている。具体的には、われわれは、パルスエネルギーが1Jの固体レーザーによって20 μ Js/Jの力積発生の結合定数が得られることを実験的に示した[1]、それによって、衛星の位置制御や回転を止めることが原理的にできることを示した[2]。

レーザーアブレーションによるデブリ衛星の除去や、位置の精密制御を実現するためには、より高性能な宇宙用のレーザー開発が必要不可欠である。また、現在から将来に向けてその利用可能範囲と課題を見極めることが、今後、レーザーアブレーションによる推進の利用範囲を広げるために非常に重要である。これまで、宇宙用で実現されているレーザーは、パルスレーザーでは100mJクラスのnsパルスQスイッチレーザーがすべてであった。これに対して、本研究では、パルスエネルギー、パルス幅、繰り返し、波長のバリエーションの拡張等、宇宙用レーザーの稼働範囲を広げるための基礎研究を進める。レーザー開発では、宇宙用超短パルスレーザーの実現を目指し、半導体レーザー駆動の短パルス発振器と再生増幅器の開発により、パルスエネルギーが100mJクラスのレーザーに対して実用パルス幅領域をこれまで実現されていないピコ秒領域に拡大する。

本研究では、デブリ衛星や衛星の精密位置制御を目的として、基礎となるレーザーアブレーションによる推力に関して、理化学研究所の持つレーザー技術を駆使して、市販のレーザーでは決してできない、波長領域、出力領域、パルス幅、ターゲットの材料をパラメーターとした網羅的な実験的な研究を行う。一方、C. Phippsらが進めていた物理学的モデルを短パルス、高ピーク出力領域へ拡張したモデルの構築を行う。さらに、重要なキー技術である、宇宙用レーザー、照射システムの基盤技術を開発する。

参照論文

1. K. Tsuno et al.: Optics express Vol. 28 (2020) 25723
2. T. Fukushima et al.: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc8/paper/124>
3. C. Phipps et al.: J. of Propulsion and Power Vol. 26 (2010) 609
4. C. Phipps et al.: J of Applied Physics, 0021-8979 (2017) 122

謝辞：本研究は防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

光通信等の衛星コンステレーション基盤技術のご紹介

Introduction of the fundamental technology of optical communications used in satellite constellations.

アクセルスペース¹ 門脇 亮太¹

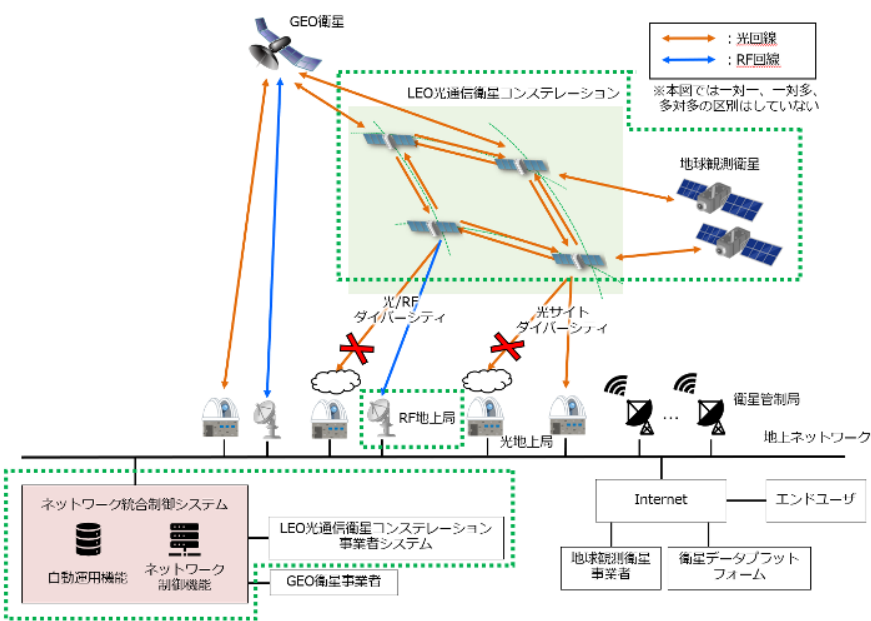
Axelspace.¹, Ryota Kadowaki¹

E-mail: kadowaki@axelspace.com

宇宙における自由空間光通信（Free-space optical communication, FSOC）は、その高速伝送能力とセキュリティの高さから、次世代の宇宙通信技術として注目されています。FSOC 技術は、地上と人工衛星、または人工衛星同士を高速で結ぶために利用され、電波を用いた通信に対する伝送能力等のメリットもありますが、一方でメリットでもある指向性の高さや空間での減衰に起因する課題を解決する必要があります。

近年、地球との距離が近い LEO（Low Earth Orbit）軌道の人工衛星の需要が増加しています。LEO 軌道の衛星は、地球から比較的近い距離に位置するため、遅延が少なく、高速でのデータ転送が可能です。一方で、LEO 衛星（低軌道衛星）は地球に近い軌道を周回しているため、1 つの衛星が特定の地域をカバーできる時間が限られています。そのため、複数の衛星をコンステレーションとして配置することでこれを解消する試みがなされています。構成する複数の衛星の製造と打ち上げコストを大幅に削減するために、小型衛星の活用が進んでいます。ただし、衛星の小型化に伴い、搭載される機器のサイズや重さに対する要求が厳しくなっています。当社では、NEDO のプロジェクトにおいて、小型衛星への自由空間光通信端末の搭載およびその実証を計画しています。

小型衛星に搭載するという観点では、光通信端末の大きさと重量、電力効率が重要な課題となっています。また、人工衛星間や地上との通信のいずれにおいても長距離の伝送となるため、送信光や受信光双方とも増幅するデバイスが信号損失を補う重要な役割となります。フォトリソ技術を活用することで、小型で効率的な光デバイスおよび光増幅器の開発が出来れば多数の小型衛星に搭載することが可能になります。参加者の皆様の技術を活用した新たな光通信端末の実現を期待し、我々の想定する光通信端末への要求性能と現状、プロジェクトにおける光通信端末の使い方などをご紹介します。



フォトニック帯電センサを用いた宇宙機の電位測定 の提案

Proposal for Measuring Spacecraft Potential Using a Photonic Charge Detection Sensor

大阪公大院工¹, 九工大院工², 産総研³ ○大塚 亘晟¹, 高濱 渉¹, 北城 陸人², 菊永 和也³,
豊田 和弘², 高橋 和¹

Osaka Met. Univ.¹, Kyushu Institute of Technology.², AIST.³, ○K. Otsuka¹, T. Higashiguchi¹,
R. Hojo², K. Kikunaga³, K. Toyoda² and Y. Takahashi¹

E-mail: si23040s@st.omu.ac.jp

序論 我々は、シリコンフォトニック結晶を用いた空間電荷検知技術を研究してきた[1-3]。この技術の最初の適用例として、宇宙機の静電気問題に焦点を当てている。地球近傍の宇宙空間には電子と陽イオンが存在し、人工衛星などの宇宙機表面を帯電させる。この帯電により、宇宙機表面と宇宙空間との間に電位差が生じることがESD（静電気放電）の原因となる[4]。この電位差を計測することが、宇宙機のESD事故を減らすために重要であるが、宇宙機の電位を計測することは難しく、限られた計測データしか存在しない。

前回、我々は真空中におけるフォトニック結晶導波路による電子線検知を報告した[5]。フォトニック結晶に侵入した電子が、自由キャリア吸収によって光を吸収する現象を利用している。真空中での実験結果は大気中よりもSN比が高いことが確認され、計測原理から放射線やESDに強いいため、宇宙空間での利用に有望である。今回、このフォトニック帯電センサを利用して、宇宙機の電位を計測できる可能性を見出したので報告する。

実験方法・結果 図1(a)に実験系を示す。真空チャンバー内に設置されたキューブサット模型の側面にセンサモジュールを取り付けた。励起光（スーパーluminescentダイオード：SLD）の入射と透過光の取り出しはファイバファイバードスルーを用いて行い、ロックインアンプで透過光強度を計測した。実験は室温、真空度 7×10^{-4} Pa（非プラズマ発生時）で行った。宇宙空間で宇宙機が帯電した状況は、真空チャンバー内にXeプラズマを発生させた状態で、モジュール筐体の電位を変化させることで再現した。図1(b)は、筐体の電位を0V~-250V（右軸）の範囲で変化させた際の透過光強度の時間変化を示している。透過光強度は、モジュールが負に帯電するほど減衰し、0Vに戻るにつれて回復した。この結果は、フォトニック帯電センサが宇宙機の電位を計測できることを示唆している。透過光が減少するメカニズムなど、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。
【参考文献】 [1] S. Yasuda, *et al.*, Opt. Express **29**, 16228 (2021). [2] Y. Takahashi, *et al.*, Opt. Express **30**, 10694 (2022). [3] M. Fujimoto, *et al.*, Opt. Continuum **2**, 349 (2023). [4] K. Toyoda, *et al.*, IEEE T. Plasma Sci. **36**, 2413 (2008). [5] 大塚亘晟, 他, 2024 年春季応物講演会, **24p-11E-6**.

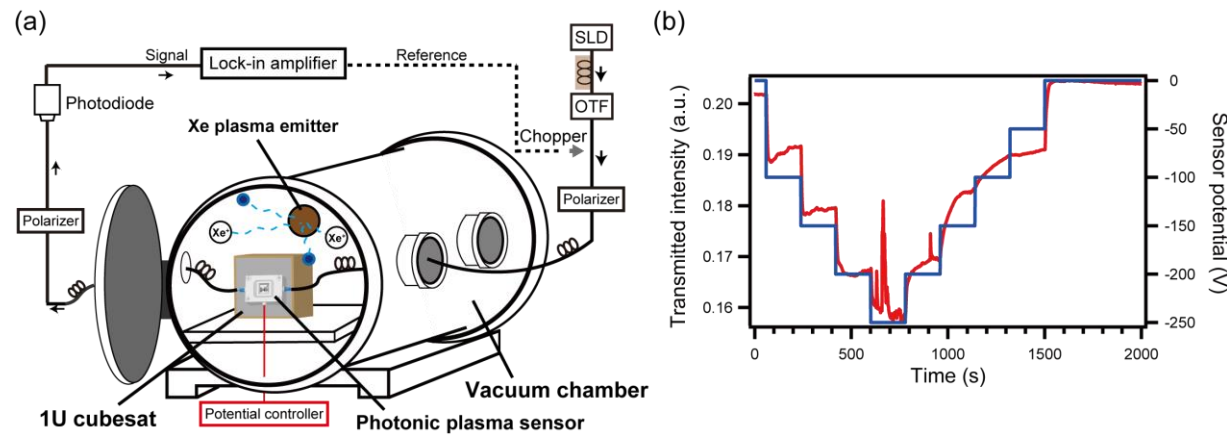


Fig. 1. (a) Experimental system for charged particles in the vacuum. (b) Temporal change in intensity of light transmitted through the module when the potential of the module is varied with Xe plasma being generated.

衛星間光通信の最新動向とフォトニクス技術

Latest trends in inter-satellite optical communication and photonics technology

三菱電機(株) ◯原口 英介, 尾野 仁深

MitsubishiElectric Corp., °Eisuke Haraguchi, Hitomi Ono

E-mail: Haraguchi.Eisuke@cw.Mitsubishielectric.co.jp

近年、観測衛星の大容量データ伝送の要求から、小型・低消費電力で高速伝送が可能な衛星間光通信を用いたデータ中継衛星システムの整備が欧州、米国、日本各国で進められている。衛星間光通信システムは従来の電波による通信と比べ広帯域、小型軽量、周波数免許が不要といった利点を有する。今後、衛星間光通信の適用領域は広がり、LEO(Low Earth Orbit)-GEO(Geostationary Earth Orbit)間のデータ中継だけでなく、月圏と地球圏、LEO コンステレーションの持続的な伝送、衛星-地上間での大容量伝送といったことが考えられる。我が国における宇宙空間での光通信は光通信基礎実験装置が搭載された技術実証衛星 ETS-VI(Engineering Test Satellite - VI)にて 1994 年に世界で初めて衛星-地上間 1 Mbps の伝送速度で実証され[1]、2006 年には光衛星間通信実験衛星“きらり”が欧州宇宙機関(ESA)の実証衛星 “ARTEMIS” との間で世界初の双方向衛星間光通信に成功している[2]。近年では、通信レート 2.5 Gbps の性能を有する光衛星間通信システム(LUCAS)が 2020 年に打ち上げられている。世界的には LEO コンステレーションを推進する starlink において 200 Gbps の LEO-LEO 衛星間光通信を目指すなど、地上光通信の技術活用や通信速度高速化の検討が進められている[3]。

衛星間光通信を実現する光ターミナルの構成概要図を図 1 に示す。光ターミナルは、宇宙空間に対して光の送受信を行い光の捕捉追尾を行う光アンテナ、送信光の増幅を行う光アンプ、送信光の変調や受信光からの復調を行う光モデム、ターミナル全体を制御するターミナル制御ユニットから構成される。宇宙空間における光通信と地上での光ファイバ通信の最も大きく異なる点は通信相手が光ファイバで接続されていない点にある。そのため、衛星間光通信の実現に向けた主要課題は①：通信衛星間の捕捉追尾技術(光アンテナ、ターミナル制御ユニット)、②高感度な光送受信技術(光モデム)、③衛星軌道条件(耐放射線など)で安定動作する光増幅技術(光アンプ)である。発表では、衛星間光通信の最新動向や衛星間光通信に適用可能なフォトニクス技術について述べる。

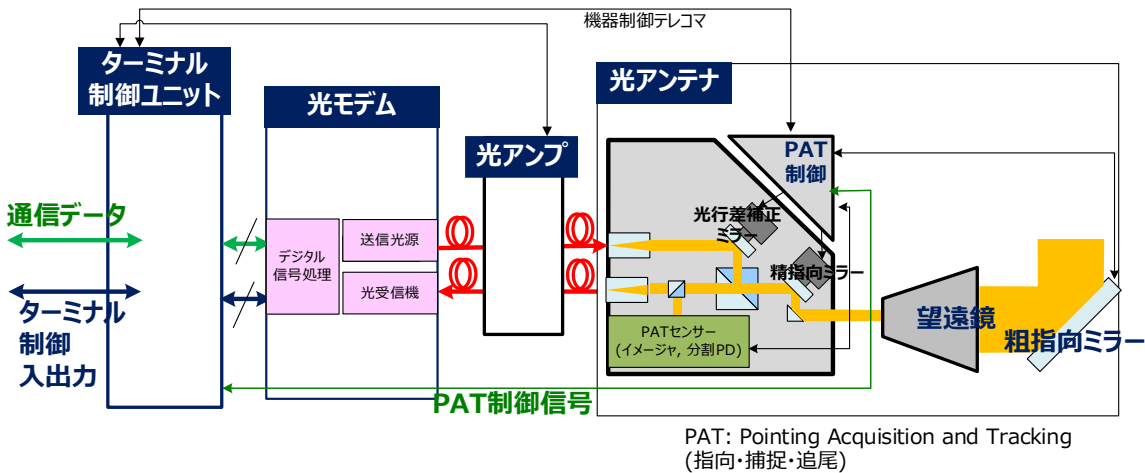


図 1 衛星光通信ターミナルの構成概略図

【参考文献】

[1] 荒木 賢一 他, 通信総合研究所季報, vol.43 No3, pp.493-520, 1997 年 9 月
[2] 城野 隆 他, 日本航空宇宙学会誌, 2007, 55 巻, 637 号, p. 37-42
[3] Travis R. Brashears, Proc. SPIE 12877, Free-Space Laser Communications XXXVI, 1287702, 2024

衛星地上間光通信の最新動向と光照射の安定化技術

Satellite-Ground Optical Communications and Stabilization of Laser Irradiation

東海大情通 高山佳久

Tokai Univ., School of Information and Telecommunication Engineering, Yoshihisa Takayama

E-mail: yoshihisa.takayama@tokai.ac.jp

1. はじめに

1990 年代から現在までに幾つもの衛星間および衛星－地上局間の光通信が実施され、近年は 100Gbps を超える高速通信や 2 億 2600 万 km を超える長距離通信に成功している¹⁻³⁾。本報告では衛星地上間の光通信に着目した研究開発動向と大気揺らぎへの対策について述べる。

2. 最近の実験と大気揺らぎへの対策

衛星－地上局間の光通信では、大気揺らぎが弊害となる。安定した受信のための対策を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a)は補償光学による波面補正である。これまでもその効果は示されているが、最近の成果としては 2022 年、NASA の TeraByte Infrared Delivery (TBIRD) program において地上局に設置され、低軌道衛星からの 200Gbps 信号をシングルモードファイバへ導入した²⁾。また Fig.1(b)は受光波面を複数の空間モードに分解する方法であり、各モードに対応するシングルモードファイバへ導入した光を再結合する⁴⁾。一方、送信側へ適用し通信相手を安定して照射する方法を Fig.2

に示す。Fig. 2(a)は到来光とは逆方向の伝搬によって大気揺らぎによる波面歪を相殺する位相共役な光を伝送する方法、Fig.2 (b)は高い空間周波数を含む光を伝送する方法である。また Fig. 2 (c)は、これまでの衛星と光通信を行う地上局に適用

された方法で、互いに干渉しない複数の光を同時に伝送する。最近の成果としては、NASA JPL の光地上局に採用され、衛星 Psyche に 10 本のレーザ伝送を行うことによる通信実験に成功している³⁾。

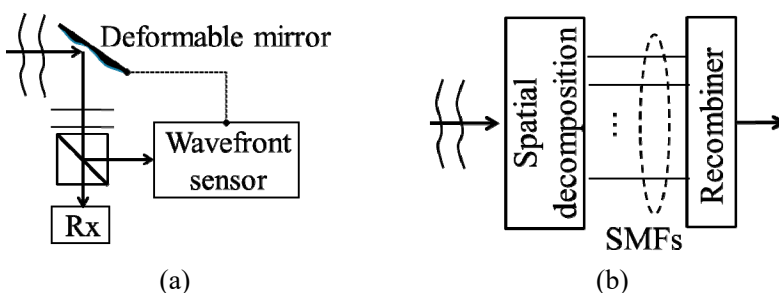


Fig. 1 For reception, (a) wavefront compensation and (b) modal decomposition.

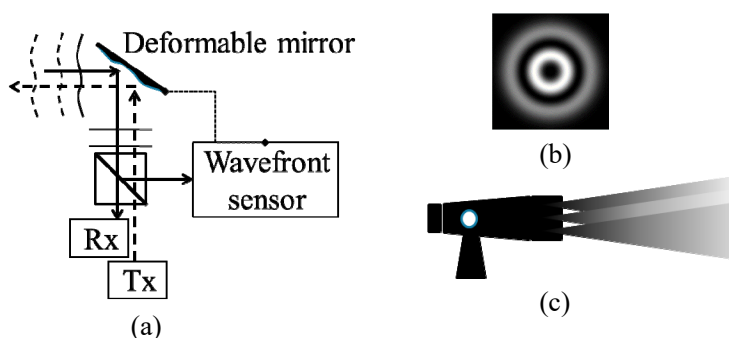


Fig. 2 For transmission, (a) wavefront manipulation, (b) higher modes, and (c) multiple beams

- 1) H. Kaushal, et al., IEEE Commun. Surv. Tutor., 19, 57-96, 2017.
- 2) C. M. Schieler, et al., Proc. SPIE 12413, 1241302, 2023.
- 3) <https://www.nasa.gov/missions/psyche-mission/nasas-optical-comms-demo-transmits-data-over-140-million-miles/>
- 4) A. Billaud, et al., Proc. IEEE ICSOS, 85-92, 2022.

光デバイスの迅速な宇宙実証を行う CubeSat の技術

Technology of CubeSat for rapid demonstration of Optical device

福井大学 青柳賢英

University of Fukui, Yoshihide Aoyanagi

E-mail: aoyanagi@u-fukui.ac.jp

宇宙開発・利用分野において、「超小型衛星」、特に 10cm 立方を 1 単位 (1U、約 1kg) とする CubeSat(キューブサット)に注目が集まっている。従来の大型・中型衛星は、数トン～数百 kg の衛星であり、そのほとんどが国主導の衛星であった。また、数少ない人工衛星製造メーカーが開発し、限られた人々が利用していた。この状況を一変させたのが、重量数十 kg 以下の超小型衛星の登場である。超小型衛星・CubeSat の利点は、低コスト・短期開発・最先端の民生技術を取り込みやすい点等があげられ、これにより、宇宙産業への新規参入の敷居を下げたと言える。従来の人工衛星は、一品ものであり、開発には数年間を要するものがほとんどであった。それに対して、CubeSat は、同型機を複数製造する機会もあり、また開発は数か月～2 年程度で可能である。また搭載部品等は規格化されているものが多いため、様々なメーカーが CubeSat 部品の市場に参入し始めている。このような背景のもと、近年はスタートアップ企業の参入が目覚ましく、CubeSat の量産製造、数百機以上の衛星群を用いたサービスを展開する企業が登場してきている。

宇宙空間における光デバイスの活用は、地球観測などの光センシング技術や地上衛星間・衛星間における光通信技術などがあげられる。これら光デバイスの技術向上は目覚ましいものがあり、地上で実証・利用された技術を、そのまま宇宙空間で利用することができれば、人工衛星の技術革新につながることを期待される。しかしながら、このような新規デバイスを、人工衛星に搭載するためには、熱・真空環境下、放射線環境下などの過酷な宇宙環境に耐える設計である必要があり、更に宇宙で実利用するためには宇宙での動作実績が重要となる。従来の開発実証プロセスでは、数年～十数年の期間が必要となり、最先端の光デバイスの宇宙実証が難しかった。それに対して、CubeSat の製造は数か月～2 年程度で可能なため、早いサイクルでの宇宙実証が可能である。また、複数の実験機器・ユーザーが相乗りするマルチミッション型の CubeSat は複数のユーザ(機関)による共用が可能であり、一機関あたりの開発コスト等が低減され、打ち上げ頻度の増大や量産化が進むことが期待される。このような CubeSat の仕組みを利用することにより、迅速に最先端の光デバイスの宇宙実証を行うことができる。福井大学らを含むチームでは、3U-CubeSat の標準システムとして「TRICOM-2 衛星バス」を開発しており、これを用いることにより様々な先端デバイスの宇宙実証を行ってきた。更には、1U-CubeSat 向けの標準システムの開発も行い、今後宇宙での実証を計画している。本講演では、このような CubeSat の仕組みを紹介するとともに、実例として幾つかの衛星の技術紹介を行う。

中性子線照射が高 Q 値シリコンナノ共振器に与える吸収損失の評価

Evaluation of absorption loss in high- Q Si nanocavities induced by neutron irradiation

大阪公大院工¹, 理化学研究所² ○石原 歩¹, 奥野 泰希², 高濱 渉¹, 大塚 亘晟¹, 高橋 和¹

Osaka Met. Univ.¹, Institute of Physical and Chemical Research.² ○ A. Ishihara¹, Y. Okuno², W.

Takahama¹, K. Otsuka¹, and Y. Takahashi¹

E-mail: sj24832s@st.omu.ac.jp

序論 現在, 人工衛星が取り扱うデータ量は急激に増加しており, 今後は衛星機内で行う情報処理を, 省エネルギーで高速化していくことが重要となる. このため, 地上産業で利用されているシリコントランシーバ技術を, 人工衛星に応用することが検討されている[1]. 宇宙空間には高エネルギーの放射線が存在しており, 人工衛星に搭載された半導体デバイスに悪影響を及ぼすことが知られている[2]. シリコンフォトニクス素子を宇宙空間で利用するためには, その放射線耐性を明らかにすることが必要となる.

我々は, CMOS 互換プロセスで大量作製されたシリコンナノ共振器において, 平均 Q 値 300 万以上を達成している[3]. このような高い Q 値を有するシリコン共振器に放射線を照射すると, 欠陥形成による小さな光吸収の増加を定量的に見積もることができる. これまでに初期評価としてガンマ線照射の影響を報告した[4]. 今回, 中性子線照射が高 Q 値ナノ共振器に与える吸収損失の増大を評価したので報告する.

実験方法・結果 図 1 に実験に用いたマルチヘテロ構造ナノ共振器を示す. 実験には 2 つのチップ A, B を用意して, 以下の 3 つの手順で進めた. ①チップ A, B それぞれについて 11 個のシリコンナノ共振器の Q 値を測定. ②チップ A にのみ中性子線照射 (4.28×10^{10} particle/cm²: 理研 RANS-II を使用[5]). ③再度, チップ A, B の Q 値を測定. チップ B は比較のため, 中性子を未照射とした. 図 2 は, チップ A の Q 値の測定結果である. 中性子線の照射後には Q 値が下がる傾向が確認された. チップ A, B の Q 値を表 1 にまとめた. Q_{ave} は 11 個の共振器の平均値を表す. 中性子線を照射していないチップ B も Q_{ave} が下がっているのは, 時間経過に伴う表面酸化が原因である. 2 つのチップに対して $1/Q_{\text{loss}} = 1/Q_{\text{ave_after}} - 1/Q_{\text{ave_before}}$ の関係式を用いて Q_{loss} を計算した. 2 つのチップ間の $1/Q_{\text{loss}}$ の差は, 7.05×10^{-8} ($Q_{\text{loss}} = 1.41 \times 10^7$) である. これが中性子線照射によって生じた吸収損失と考えられる. 吸収係数に換算すると約 1.42×10^{-2} cm⁻¹ である. ドーピング濃度が極めて低い高 Q 値ナノ共振器を用いた本測定結果は, 今後の宇宙用シリコンフォトニクス素子開発に基礎的情報を与えると期待される.

謝辞 本研究は科研費 (21H01373) 及び JST-START の支援を受けた.

参考文献 [1] M. Dun, *et al.*, Sci. Adv. **10**, eadi9171 (2024). [2] K. Toyoda, *et al.*, IEEE T. Plasma Sci. **36**, 2413 (2008). [3] M. Katsura, *et al.*, Opt. Express **31**, 37993 (2023). [4] 太田雄士, 他, レーザー学会 2023, F01-19a-XII-03. [5] T. Kobayashi, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A, **994**, 165091 (2021).

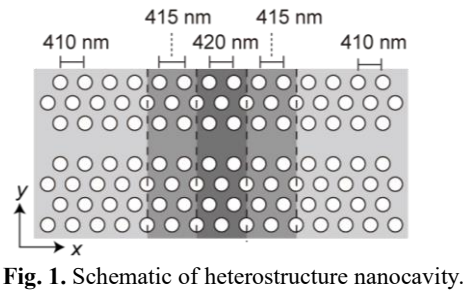


Fig. 1. Schematic of heterostructure nanocavity.

Table 1. Summary of experimental results.

	$Q_{\text{ave_before}}$ [million]	$Q_{\text{ave_after}}$ [million]	Q_{loss} [million]
Chip A w/ neutron irradiation	3.08	2.31	9.31
Chip B w/o neutron irradiation	3.23	2.89	27.1

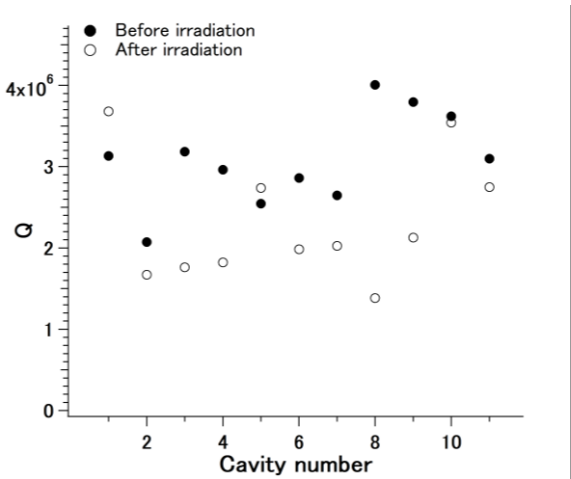


Fig. 2. Q values of chip A for before and after irradiation.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): Si基板へのエピタキシャル成長単結晶薄膜とデバイス応用

[16p-A23-1~6] Si基板へのエピタキシャル成長単結晶薄膜とデバイス応用

[16p-A23-1]

マルテンサイト・エピタキシー

○木島 健^{1,2}、關 雅志¹、木村 勲¹、田畑 仁²、中尾 健人¹ (1.(株)Gaianax、2.東大工)

[16p-A23-2]

スパッタリング単独プロセスによるSi上強誘電体エピタキシャルキャパシタの形成

○吉村 武¹ (1.大阪公立大院工)

[16p-A23-3]

スパッタ法によるSi基板上エピタキシャルPZT圧電薄膜の作製

○神野 伊策¹、グォン サンヒョ¹、譚 ゴオン² (1.神戸大工、2.大阪公立大)

[16p-A23-4]

ゾルゲル法によるSi基板上のエピタキシャルPb(Zr,Ti)O₃薄膜の作製と評価

○譚 賡¹、權 相曉²、神野 伊策² (1.大阪公立大、2.神戸大学)

[16p-A23-5]

巨大圧電性を有するPMN-PT系単結晶薄膜のSi基板上へのエピタキシャル成長

○吉田 慎哉¹ (1.芝浦工大工)

[16p-A23-6]

ScAlNおよびLiNbO₃エピタキシャル圧電薄膜のBAWフィルタ応用の現状

○柳谷 隆彦^{1,2,3,4} (1.早稲田大学、2.材料技術研究所、3.JST-CREST、4.JST-FOREST)

マルテンサイト・エピタキシー
Martensite Epitaxy

(株)Gaianixx¹, 東大工² ○木島 健^{1,2}, 関 雅志¹, 木村 勲¹, 田畑 仁², 中尾 健人¹
Gaianixx Inc¹, Univ. of Tokyo², °Takeshi Kijima^{1,2}, Masashi Seki¹, Isao Kimura¹, Hitoshi Tabata²
and Kento Nakao¹
E-mail: kijima@gaianixx.com

我々は、コアテクノロジーである「マルテンサイト・エピタキシー (ME)」を用いて、従来は困難とされてきた多層構造での高品質単結晶化を「多能性®中間膜 HfZrO₂ (HZO)」による「動的格子マッチング」で可能とした。これまでに多能性®中間膜を用いた ME によって、各種機能膜（圧電材料、金属材料、化合物半導体材料等）を 8 インチ Si (100) 基板上に於いて、それぞれ単結晶薄膜化を実現した (Table1)。

Table1 の結果は、各種機能膜を単結晶 Si 基板上にヘテロエピタキシャル成長させる際に、両者の間に HZO 多能性®中間膜をバッファ層として挟み込むだけで達成した。そのメカニズムは、シリコン基板と機能膜との間に存在する格子ミスマッチによりウェハ接触面内で生じた剪断応力がマルテンサイト (MS) 変態の為の主動力源となり、その剪断応力を打ち消す方向に Figure1 のように多能性中間膜が滑り双晶型 MS 転位することで、シリコン基板の良好な単結晶性が、そのまま機能膜に転写され、良好な単結晶薄膜としてエピタキシャル成長することが確認出来た。この多能性中間膜を用いた独自のエピタキシャル成長メカニズムを我々は、マルテンサイトエピタキシーと呼んでいる。この結果得られた単結晶機能膜は、従来とは一線を画す膜物性を示した。例えば、これまでに得られた 100nm-PZT 薄膜の場合は、とても大きな残留分極値 P_r=100 μC/cm²を示すと同時に超低リーク電流密度 10⁻¹² A/cm²を有していた。

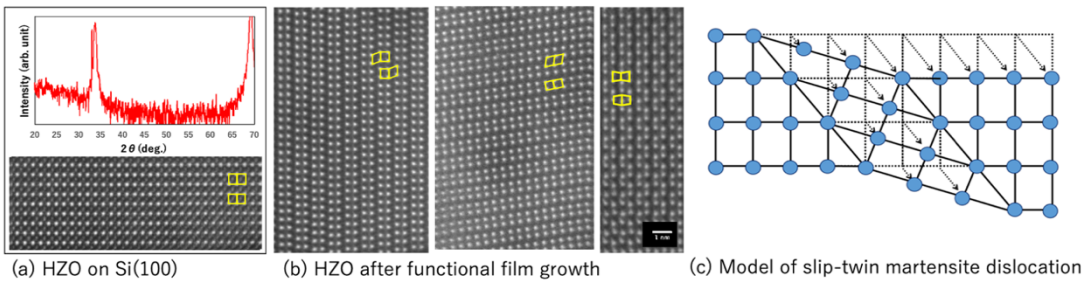


Figure1 STEM images and slip twin model diagram of HZO before and after martensitic epitaxy

Table1 Single-Crystal Overview

圧電体薄膜, Piezoelectric Thin Film							
材料, material	Pb(Zr,Ti)O ₃	BaTiO ₃	BiFeO ₃	(K,Na)NbO ₃	LiNbO ₃	LiTaO ₃	傾斜AlN
単結晶性, single crystalline	○	○	○	○	○	○	○
パワー半導体, Power Semiconductor		酸化物半導体, Oxidized Semiconductor		単結晶基板材料, Single-Crystal Substrate			
材料, material	GaN	4H-SiC	IGZO	InO ₂	Sapphire	Quartz	MgO
単結晶性, single crystalline	○	poly	ongoing	○	ongoing	ongoing	○
金属, Metal							
材料, material	Pt	SUS	Ag	Cu	Al	Mo&W110	FeNi
単結晶性, single crystalline	○	○	○	○	○	○	○

スパッタリング単独プロセスによる Si 上強誘電体エピタキシャルキャパシタの形成

Formation of Ferroelectric Epitaxial Capacitors on Si by Sputtering Process

阪公大工, 吉村 武

Osaka Metro. Univ., T. Yoshimura

E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

ペロブスカイト系強誘電体の圧電特性は、強い結晶方位依存性を持つことが知られている。分極の回転が生じるように電界を印加することで大きな圧電応答を誘起することができ、この手法はドメインエンジニアリング等と呼ばれる[1]。高い圧電特性を持つ単結晶や配向セラミックスを開発するための基本指針であり、現在の多くの圧電 MEMS デバイスでも、シード層などを利用して(100)配向成長させた PZT 薄膜が利用されている[2]。さらなる圧電特性の向上を期待して、Si 上でも強誘電体薄膜をエピタキシャル成長させる試みが続けられてきた。2011 年に報告された(100)PMN-PT 薄膜[3]などが代表例であるが、これまでの報告のほとんどで Si 基板上のエピタキシャルバッファ層には SrTiO₃ や YSZ などの酸化物が用いられている[4]。Si 表面の酸化を防ぎつつ、酸化物薄膜をエピタキシャル成長させるためには MBE や真空蒸着等の超高真空製膜が必要となる。MEMS 用の強誘電体薄膜は主にゾルゲル法もしくはスパッタ法で作製されるため、量産においてはスループットを制約する可能性がある。そこで本研究では、バッファ層から強誘電体薄膜まですべて同一のスパッタ装置内で製膜し、エピタキシャル成長させることに取り組んだ。

スパッタ法で Si 基板上にエピタキシャル成長させることができる物質として、非酸化物であり格子整合性もある TiN に着目した[5]。製膜開始前の基板加熱や RF 出力のプロセスを最適化することで、超高真空装置を用いなくて(100)Si 基板上に(100)TiN をエピタキシャル成長できるようになった。TiN は導電物質であるが、その上に直接酸化物強誘電体を製膜すると TiN が酸化するため、バリア層と下部電極を兼ねて(100)Pt を製膜した後、非鉛強誘電体である BiFeO₃ を成長させた。この時点でスパッタ法のみを用いて Si 基板上に(100)BiFeO₃ をエピタキシャル成長させることには成功したが、膜の剥離という問題も生じた。先行研究[5]では Pt 電極を 500nm に増加させることで剥離を防いでいたが、本研究では密着層の導入により 100nm の Pt 電極でも剥離の問題を解消することができた。図 1 に得られた(100)BiFeO₃/(100)Pt/(100)TiN/(100)Si 構造の試料の X 線φスキャン図形を示す。(100)Si に対して Cube-on-Cube の関係で(100)BiFeO₃ がエピタキシャル成長していることがわかる。また Pt 電極上に LaNiO₃ 等のシード層を形成することで、異配向粒等の成長も抑制することができた。講演では、密着層の詳細、基板温度や組成を試料面内で傾斜させたコンビナトリアル製膜、および得られた試料の結晶構造、強誘電特性、圧電特性を包括的に示し、エピタキシャル成長の効果について議論する。

【謝辞】本研究は JST CREST(JPMJCR20Q2)の支援を受けて行われた。

【参考文献】

- [1] S. E. Park *et al.*, J. Appl. Phys., 82, 1804 (1997).
- [2] I. Kanno, Jpn. J. Appl. Phys., 57, 040101 (2018).
- [3] S.H. Baek, *et al.*, Science, 334, 958 (2011).
- [4] Z. Zhou, *et al.*, Sens. Actuators A, 266, 352 (2017).
- [5] A. Sakurai, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 39, 5441 (2000).

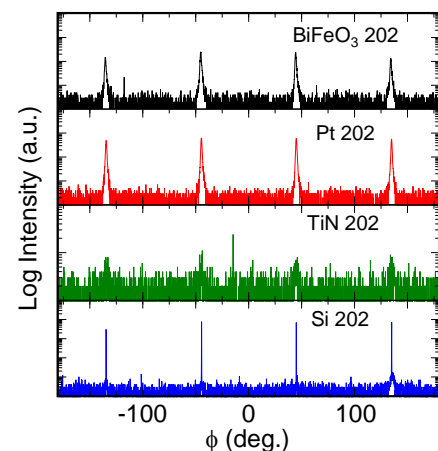


Fig. 1. XRD ϕ scan profiles of (100)BiFeO₃/(100)Pt/(100)TiN on (100)Si grown by all-sputtering process.

スパッタ法による Si 基板上エピタキシャル PZT 圧電薄膜の作製

Sputtering deposition of epitaxial PZT thin films on Si substrates

神戸大工¹, 大阪公立大² °神野伊策¹, グォン サンヒョ¹, 譚ゴオン²

Kobe Univ.¹, Osaka Metro Univ.², °Isaku Kanno¹, SangHyo Kweon¹, Goon Tan²

E-mail: kanno@mech.kobe-u.ac.jp

圧電薄膜を用いた MEMS デバイス応用に関する研究開発が活発化しており、高い圧電定数を有する薄膜の実現が強く求められている。センサやアクチュエータ応用を想定した場合、現在多結晶 PZT 薄膜が主に用いられており、これまで PZT 薄膜の組成や配向を最適化させることで圧電性の向上および安定化が図られてきた。一方、エピタキシャル薄膜は面外以外に面内方向の結晶軸も揃うため、多結晶薄膜と比較して分極方向や面内応力の最適化が容易となり各種特性の向上および制御するための有力な手段となる。これまでエピタキシャル PZT 薄膜は SrTiO₃ や MgO に代表されるエピタキシャル基板上が主に用いられてきたが、近年 Si 基板上にエピタキシャル Pt 電極を成膜する技術が量産化されており、特に圧電 MEMS 分野におけるエピタキシャル圧電薄膜の研究開発が注目されている。

我々は、これまでスパッタ法でエピタキシャル PZT 薄膜を作製し、その圧電性の特徴を報告してきた。特に、その特徴的な結晶構造はバルク PZT や多結晶 PZT 薄膜と大きく異なっており、誘電特性、強誘電特性および圧電特性を利用した新しい応用への展開が期待されている[1,2]。この他、均質組成薄膜以外に膜厚方向に周期的に組成変調した超格子薄膜を Si 基板上に作製し、その結晶構造および圧電性について評価を行った[3,4]。PZT 超格子薄膜は、XRD および TEM による分析により、強い面内層間応力のためバルク材料と大きく異なる結晶構造を有していることが明らかとなった。超格子薄膜特有の結晶構造はバルク材料と異なる新しい機能性発現が期待でき、今後組成構造の最適化および結晶構造と圧電性の関係を明らかにすることで、新しい圧電薄膜デバイスの創出につながると期待される。

参考文献

- [1] E.-J. Kim, et al., Appl. Phys. Lett. 121 (2022)161901.
- [2] S.-H. Kweon, et al., Adv. Mater. Interfaces 2023, 2300634.
- [3] G. Kimura, et al., Appl. Phys. Lett. 122 (2023) 122902
- [4] Y. Sato, et al., J. Mat. Sci., 59 (2024) 8134

ゾルゲル法による Si 基板上のエピタキシャル Pb(Zr,Ti)O₃ 薄膜の作製と評価Fabrication and characterization of epitaxial PZT thin films on Si substrates
by sol-gel method大阪公立大¹, 神戸大工² ○譚 (タン) 廣 (ゴオン)¹, 權 相曉², 神野 伊策²Osaka Metro. Univ.¹, Kobe Univ.², °G. Tan¹, S. H. Kweon², I. Kanno²

E-mail: tan@omu.ac.jp

PZT (チタン酸ジルコン酸鉛) に代表される圧電材料は周波数フィルター、圧力センサーやインクジェットヘッドなどの圧電デバイスとして様々な産業のセグメントで応用されている。汎用性、コスト、微細加工および圧電性能の両方を考慮すると Si 基板上で分極軸方向に配向した薄膜を成長させることが理想である。本発表では、簡易な成膜装置に加えて大気圧下で成膜が可能なゾルゲル法を用いて、Si 基板上への PZT 圧電薄膜のエピタキシャル成長、およびその結晶構造、圧電特性の評価について報告する。バッファ層付き Si 基板(I-PEX Piezo Solutions(株))上に、スピncerコーターで PZT ゾルゲル原料液(三菱マテリアル(株))を塗布した。その後、300°Cで煅焼、600°Cでアニールを行った。この工程を 10 回繰り返すことで、膜厚が約 1 μm の PZT(52/48)圧電薄膜を作製した。図 1 に PZT 薄膜の面外方向の XRD パターンおよび PZT 204 付近の逆格子マップ(RSM)を示す。これら結果により、c 軸方向に配向したエピタキシャル PZT 薄膜が得られてることが確認できた[1, 2]。

次に、カンチレバー法により逆圧電測定を行なった結果を図 2 に示す。交流電圧を 1 から 3 の順番で変化させて圧電定数を測定した。多少の電圧依存性は見られたものの、得られた圧電定数 $|e_{31,f}|$ は 8.9~11.6 C/m² で、スパッタリング法で作製したエピタキシャル PZT 薄膜に匹敵する大きな圧電定数を示した。

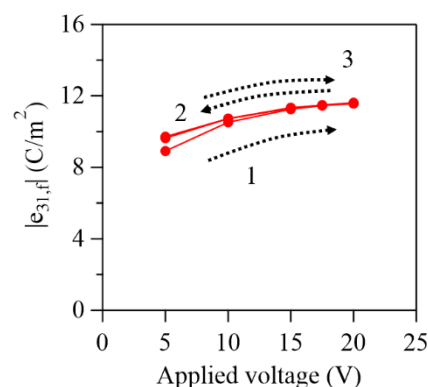
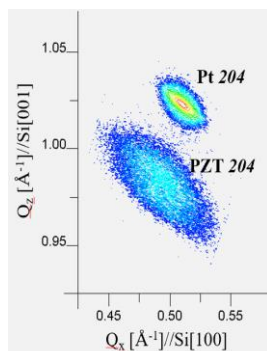
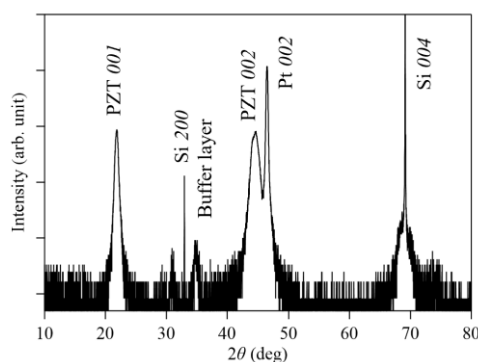


図 1 ゾルゲル法で作製した Si 基板上の PZT 薄膜の XRD 面外測定の結果、および PZT 204 付近の逆格子マップ(RSM).

図 2 ゾルゲル PZT 薄膜の逆圧電測定の結果.

[参考文献]

- [1] 金山裕一他, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 25p-E305-15.
[2] G. Tan, S. H. Kweon and I. Kanno, *Thin Solid Films* **764**, 139612 (2023).

巨大圧電性を有する PMN-PT 系単結晶薄膜の Si 基板上へのエピタキシャル成長

Epitaxial growth of PMN-PT-based single-crystal thin film with giant piezoelectricity on Si substrate

芝浦工業大工 ○吉田 慎哉

Shibaura Institute of Technology, Shinya Yoshida

E-mail: syoshida@shibaura-it.ac.jp

圧電 MEMS アクチュエータの性能限界を打破するために、チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) を超える巨大な圧電性 (電場誘起歪) を有する薄膜が望まれている。Baek らは、 27 C/m^2 という大きな $|e_{31f}|$ 値を示すマグネシウムニオブ酸・チタン酸鉛 (PMN-PT) 単結晶薄膜を報告した^[1]。しかし、Si 基板上への SrTiO_3 バッファ層の成膜には、分子線エピタキシが用いられており、量産に適しているとは言い難い。

そこで我々は、より量産性に優れたバッファ層上に成膜可能な、巨大圧電性材料の探索を行っている^[2]。その候補の一つは、バルク単結晶において巨大圧電性を示した Sm-PMN-PT (PMN-PT に Sm を添加したもの) である^[3]。今回、この薄膜を、市販のバッファ層成膜済み Si 基板上にスパッタ堆積させ、その圧電性能を評価した。

成膜用基板には KRYSTAL® Wafer (SRO/Pt/ZrO_2 on Si) を用いた。スパッタ堆積には粉末ターゲットを用いた。Sm の比率を全体の 2.5mol% に固定し、PMN と PT の最適な組成比を探索した。ここでは、組成比を PMN:PT = 50:50 としたとき “Sm-PMN-50PT” と表記する。スパッタ条件を最適化することで、図 1 や図 2 に示すように、(100)/(001) に優先配向し、かつ純粋なペロブスカイト相からなる Sm-PMN-PT 薄膜を得られた。また、PMN:PT 組成比を変化させたときの、X 線回折パターンの (100)/(001) のピーク位置について調査した。その結果、PT の割合が大きいつまきは、それらのピーク位置が明確に分かれた。

(図 3)。そして、PT の割合が 50% 以下になると不明瞭となった。ゆえに、PMN:PT=50:50 付近に、モルフトロピック相境界がある可能性が示された。最後に、カンチレバー法を用いて、逆圧電効果から $|e_{31f}|$ を測定した。その結果、Sm-PMN-50PT の組成の薄膜において、 $|e_{31f}| = 25 \text{ C/m}^2$ という比較的大きな圧電定数を得られた。Sm の比率も最適化することで、さらに大きな圧電性を有する薄膜を得られる可能性がある。この膜は、頭打ちとなっている圧電 MEMS アクチュエータの性能をさらに向上させられる可能性を秘めている。

[1] S. H. Baek et al., Science, vol. 334, no. 6058, pp. 958–961, Nov. 2011.

[2] X. Qi, S. Yoshida, and S. Tanaka, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol. 69, no. 5, pp. 1821–1828, 2022.

[3] F. Li et al., Science, vol. 364, no. 6437, pp. 264–268, Apr. 2019.

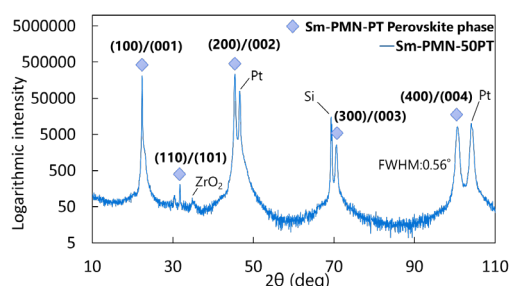


Figure 1. Typical XRD pattern of the Sm-PMN-PT thin film. This composition ratio is Sm-PMN-50PT.

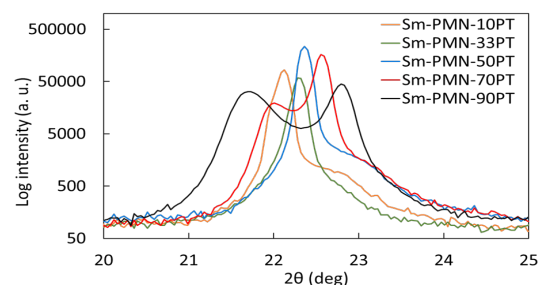


Figure 3. Dependency of the XRD patterns around the (100)/(001) peaks on the PMN:PT composition ratio.

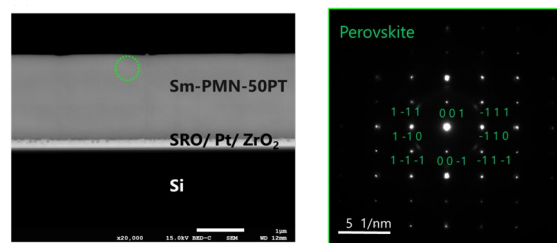


Figure 2. (Left) TEM image of the Sm-PMN-50PT epitaxial thin film. (Right) Electron diffraction pattern around the green circle in the right-side image.

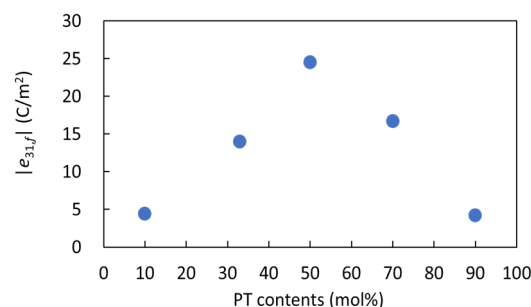


Figure 4. Dependency of the piezoelectric constant $|e_{31f}|$ on the PMN:PT composition ratio.

ScAlN および LiNbO₃ エピタキシャル圧電薄膜の BAW フィルタ応用の現状

Piezoelectric epitaxial thin films for BAW filter applications

早大先進理工¹, 材料技術研究所², JST-CREST³ °JST-FOREST⁴

○柳谷隆彦^{1,2,3,4}

Waseda Univ.¹, ZAIKEN², JST-CREST³, JST-FOREST⁴, °Takahiko Yanagitani^{1,2,3,4}

E-mail: yanagitani@waseda.jp

エピタキシャル圧電薄膜は、スマートフォン向けの BAW フィルタ分野において、注目を集めている。現状の市場の主な BAW フィルタは、非常に高配向の多結晶 AlN 薄膜(もしくは ScAlN 薄膜)により構成されているが、エピタキシャル成長により更なる高性能化が期待される。具体的には、音響損失および誘電損失の軽減によりフィルタの急峻性および耐電力性が向上する可能性がある。今後、フィルタの市場は 5 GHz 以上の高周波域へと伸びていくことが予想されており、エピタキシャル薄膜はますます多結晶薄膜に対して優位になっていくと思われる。すでに研究開発レベルでは、より高い Q 値と電気機械結合係数 k^2 値を両立させるために、LiNbO₃ 単結晶薄片を転写した BAW 共振子の報告が増加しており、単結晶化への潮流は衰える気配がない¹⁻³。エピタキシャル成長を使ったものでは、c 軸配向の LiNbO₃ 薄膜は比較的作りやすいが、電気機械結合係数が小さく、BAW フィルタ応用には向かない。バルク単結晶からイオンスライシングや機械研磨により切り出した単結晶薄片は結晶方位を選べる点で有利である。例えば、LiNbO₃ とよく似た音響関連物理定数を持つ ScAlN 薄膜では Sc40% ドープの電気機械結合係数が最も大きなものでも、 $k^2=25\%$ 程度⁴であるのに対して、X-cut の LiNbO₃ BAW 薄膜共振子では 40% 近い k^2 が報告されている¹。また ScAlN 薄膜は相境界の Sc40% 付近において、Sc 濃度による音速と k^2 値の変動が大きい欠点もある⁵。LiNbO₃ は SAW フィルタにおいてこれまで大きな成功を収めており、BAW フィルタへの応用は自然な流れである。欠点は、現状バルク単結晶のサイズが 6 インチに留まっているところである。対してスパッタ成膜を使う ScAlN 薄膜は 8 インチで量産が流れており、今後のサイズ拡大もスパッタ成膜の方が早く進展すると予想される。

そこで本研究では、双方の長所と短所を補うこと考え、スパッタ法を用いたオフ角基板上への c 軸傾斜 LiNbO₃、PbTiO₃、MgZnO のエピタキシャル成長とその音響共振子応用について紹介する。結晶方位も制御しつつ大面積成膜を狙った研究である。また昨年には米国で分極反転層 (Periodically polarization inverted piezoelectric films:P3F)を用いた 10 GHz 帯 BAW フィルタ開発の国プロジェクト(20 億円)が立ち上がっており、多くの研究グループが参入してきている⁶⁻⁸。LiNbO₃、PbTiO₃、MgZnO 薄膜の分極反転特性、BAW 特性についても報告する。

参考文献

1. M. Gorisse et al., Proc. IFCS/EFTF 8856017 (2019)
2. M. Kadota and S. Tanaka, Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 1-10 (2023).
3. M. Bousquet, et al., Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 1-9 (2023).
4. Y. Shimizu and T. Yanagitani, Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 1-4 (2023).
5. T. Yanagitani and M. Suzuki, Appl. Phys. Lett. 105, 122907 (2014).
6. Izhar et al., IEEE Electron. Device Lett. 44, 1196 (2023).
7. J. Kramer, et al., Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 1-4 (2023).
8. A. Kochhar, et al., Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 1-4 (2023).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：Society 5.0を支えるサイバーフィジカルシステムの先端技術 - フィジカル空間を繋ぐ材料・デバイス・プロセス・回路・アプリケーション技術 -

[16a-A36-1~5] Society 5.0を支えるサイバーフィジカルシステムの先端技術 - フィジカル空間を繋ぐ材料・デバイス・プロセス・回路・アプリケーション技術 -

[16a-A36-1]

酸化物ナノ構造とグラフェンを利用した半導体式ハイブリットガスセンサの可能性

○菅原 徹^{1,2}、小野 堯生²、植村 隆文²、廣瀬 由紀子¹、岡西 音哉¹ (1.京都工芸繊維大学、2.大阪大学)

[16a-A36-2]

パーシステントホモロジーを応用した機械学習ポテンシャルの開発

○南谷 英美¹ (1.阪大産研)

[16a-A36-3]

CO₂電解による高選択エチレン生成へ向けた反応場設計

○田巻 孝敬¹ (1.鹿児島大院理工)

[16a-A36-4]

準安定物質を創出するための反応場開拓

○藤岡 正弥¹ (1.産総研)

[16a-A36-5]

広域多次元多角的顕微分光解析によるナノ材料デバイスの電子状態解析

○永村 直佳^{1,2}、後藤 陸^{1,2}、大石 健太^{1,2} (1.物材機構、2.東京理科大)

酸化物ナノ構造とグラフェンを利用した 半導体式ハイブリットガスセンサの可能性

Potential Application of Semiconductors Hybrid Gas Sensor using Oxide

Nano-structures and Graphene

京工繊大¹, 阪大産研², 阪大基礎工³ ○菅原 徹^{1,2}, 廣瀬 由紀子¹, 植村 隆文², 小野 堯生³

Kyoto Inst. Tech.¹, Osaka Univ.², °Tohru Sugahara^{1,2}, Yukiko Hirose¹, Takafumi Uemura², Takao Ono²

E-mail: sugaharathr@kit.ac.jp

講演概要

Society 5.0 を支えるサイバー・フィジカル・システム(CPS)の基軸となるガスセンサデバイスは、人間の呼気に含まれる微量な濃度の化合物を検出/検査することで、重大疾患の早期発見、早期治療に繋げる重要な研究開発となっている。このような背景の下、低濃度かつ混合ガスでも確実に分類検出可能なガスセンサの開発が求められている。

我々の研究グループは、源材料の省資源化などの観点から、印刷技術を駆使して、電子デバイスを製造する技術に着目し、プロセスの簡略化、インク材料や印刷・焼結技術を研究してきた。特に、有機金属分解(MOD)法に着目し、前駆体溶液を基板に塗布・焼結するだけで、 MoO_x ナノ構造アレイを作製することができる^{1,2}。また、前駆体溶液に含まれる添加剤(クエン酸やアミン量)を調整することで、ナノロッドアレイの粒径や粒形、長さ、またシード層の膜厚を自在に制御することが可能である³⁻⁷。また、この酸化物ナノ構造薄膜(ナノロッドアレイ)を活用し、ガスセンサデバイスを作製し、呼気に含まれる希薄な揮発性有機化合物(VOC: Volatile Organic Compounds)ガスを検出ところ、ナノ構造薄膜の非常に大きな比表面積と高い結晶性に起因して、高感度かつ高いセンサ応答性の半導体式ガスセンサが開発できた³。一方で、半導体式ガスセンサは、反応ガスを一種類に絞った(ガス選択性のある)半導体材料でガスを検出する。そのため、「におい・かおり」など、多くのガスが混合したガスの同時検出が非常に困難であった。

我々の研究グループは、酸化モリブデン(MoO_x)が結晶構造と酸化数によりフェルミ準位が大きく変動しp型とn型伝導を両立する数少ない材料系で、これまで半導体式センサ材料として誰も注目しなかった酸化性/還元性ガス分子の両極反応に着目し、多様なガス種が検出できることを証明した。加えて、酸化モリブデンと同様な両極反応の特性を持つ2D材料のグラフェンとハイブリットすることで、エタノール(EtOH)ガスのセンシング特性が、単純な酸化モリブデンナノロッドガスセンサのn型伝導⁹からp型伝導へシフトすることを見出した(図1)⁹。

本講演では、酸化物ナノ構造とグラフェンをハイブリットした半導体式センサデバイスによる混合ガスセンサ開発へ取り組みについて紹介する。

[参考文献]

- 1) T. Sugahara, *et al.*, J. Am. Ceram. Soc. **97**, 10, 3238(2014). ;2) S. Cong, T. Sugahara, *et al.*, Cryst. Grow. and Des., **15**, 9, 4536 (2015).;
- 3) S. Cong, T. Sugahara, *et al.*, Adv. Mater. Inter., **3**, 1600252 (2016).;4) S. Cong, A. Hadipour, T. Sugahara, *et al.*, J. Mater. Chem. C, **5**, 889 (2017).; 5) M. Karakawa, T. Sugahara, *et al.* Sci. Rep., 2018, **8**, 10839 (2018).; 6) T. Sugahara, *et al.*, ACS Appl. Electron. Mater. **2020**, **2**, 6, 1670, (2020).;7) Y. Hirose, T. Sugahara, *et al.*, Mater. Chem. Frontiers, 2021, **5**, 386 (2021).8).T. Nakajima, T. Sugahara, *et al.*, Sensors **2022**, **22**(5), 1996 (2022). 9)T. Sugahara, *et al.*, ACS Appl. Eng. Mater. **2023**, **1**, 4, 1086–1092 (2023).

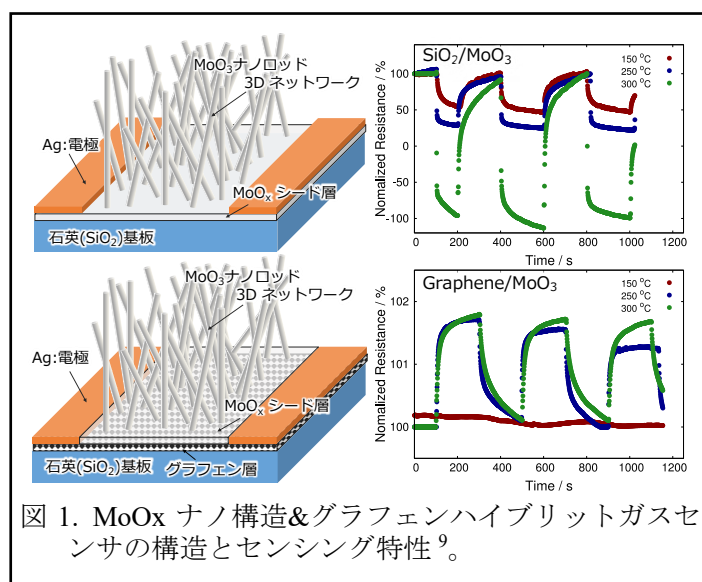


図 1. MoO_x ナノ構造&グラフェンハイブリットガスセンサの構造とセンシング特性⁹。

パーシステントホモロジーを応用した機械学習ポテンシャルの開発

Development of Machine Learning Potentials Using Persistent Homology

阪大産研 南谷英美

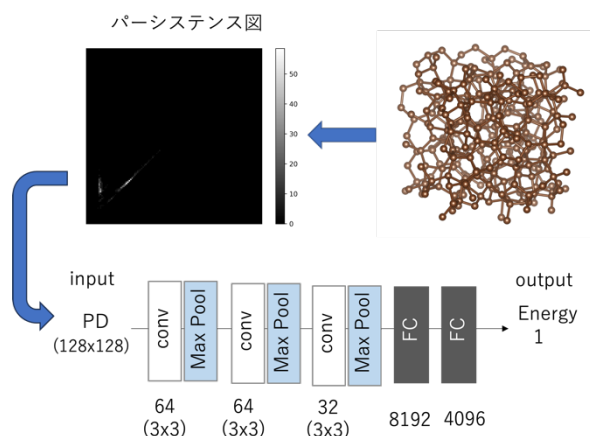
SANKEN, Osaka Univ. Emi Minamitani

E-mail: eminamitani@sanken.osaka-u.ac.jp

構造と物性の相関を明らかにすることは、固体物理における本質的な課題の一つである。しかし、アモルファスやガラスのような周期性がなく乱れた構造を持つ物質については、中距離秩序などの従来方法では捉えがたい構造特徴を、そもそもどのようにして抽出するかが問題であった。近年、トポロジカルデータ解析がこの問題の解決方法として注目されている。

トポロジカルデータ解析は、データの中に潜む「穴」のような特徴を、数学におけるトポロジーの概念を応用して見出すテクニックである。その代表的な技術がパーシステントホモロジーである[1]。パーシステントホモロジーを原子構造に対して応用した場合には、例えば、原子の成す環の構造や空隙の特徴を定量化することができる。環や空隙の構造に注目した解析方法としては、リング統計やボロノイ体積も挙げられるが、パーシステントホモロジーは、様々なスケールでの環や空隙の情報を一度に取り扱うことができるという利点がある。

このように、マルチスケールなトポロジー特徴を定量化できる点を応用し、パーシステントホモロジーから得られた情報を機械学習モデルの入力とすることで、物性予測に結びつける試みが進められている[2-4]。本講演ではとくに、物質のポテンシャルエネルギーを機械学習モデルで予測する、機械学習ポテンシャルへのパーシステントホモロジーの応用と、そのアモルファス物質での具体例を紹介する[5]。



参考文献

- [1] H. Edelsbrunner, J. Harer, *Computational Topology: An Introduction* (AMS, 2010).
- [2] S. Kunii et al., *Sci. Rep.* **12**, 19892 (2022).
- [3] S. M. Moosavi et al., *Chem. Sci.* **11**, 5423–5433 (2020).
- [4] E. Minamitani et al., *J. Chem. Phys.* **156**, 244502 (2022).
- [5] E. Minamitani et al., *J. Chem. Phys.* **159** (2023)

CO₂ 電解による高選択エチレン生成へ向けた反応場設計

Design of Reaction Environment for Selective Ethylene Production by Electrochemical CO₂ Reduction

鹿児島大院理工¹ ○田巻 孝敬¹

Kagoshima Univ.¹ ○Takanori Tamaki¹

E-mail: tamaki@cen.kagoshima-u.ac.jp

持続可能な社会を構築するためには、化石資源へ依存した社会から脱却する必要がある。現在、化石資源からはエネルギー・燃料に加えて化学製品も製造されていることから、将来的には非化石資源からの化学製品製造が求められる。近年の海外における再生可能エネルギー由来の電力価格の急激な低下を受け、電気エネルギーを利用してCO₂を直接化学製品の原料へ変換するCO₂の電気化学還元(CO₂電解)に着目する。CO₂電解では触媒に銅を用いると2電子を超える還元が起こり、化学製品の重要な原料であるエチレンも生成する(Y. Hori et al., *Chem. Lett.*, 15, 897 (1986))ことから、銅のナノ構造制御に関して多数の報告がなされてきたが、選択性の低さが課題であった。高エチレン選択性を実現するためには触媒近傍の反応場制御と触媒のナノ構造制御を融合した反応場設計が重要である。

本研究では、CO₂電解による高選択エチレン生成へ向けて、電極反応場設計として図1に示すように 1) アニオン伝導性ポリマーによる銅電極の被覆、および 2) 銅電析三次元電極の構造制御を行い、3) 銅のナノ構造制御との融合による高選択エチレン生成を図る。

1) アニオン伝導性ポリマーによる銅平板電極の被覆では、ポリマー未被覆の電極と比較して、エチレン生成割合が増加した。また、ポリマーの官能基量やポリマー層厚みが生成物割合へ影響することも示された。2) 銅電析三次元電極の構造制御では、カーボン三次元電極(カーボンペーパー: CP)へ電析により生成する銅電極の電極厚さ方向の厚みを制御し、CP表面のみに銅を電析した電極ではエチレンが生成したのに対し、CP深さ方向全体に渡り銅を電析した電極では水素生成が大半となった。1)、2)ともに電極における反応・拡散過程を考慮した

数値モデルによる解析を行い、電極反応場がエチレン生成に影響することを明らかにしている。また、3) 銅のナノ構造制御では、銅電析CPへの電位掃引によりエチレン生成に有利な(100)面を露出した立方体状の銅ナノ粒子が生成し、電位掃引条件により銅ナノ粒子のサイズが制御されること、およびサイズが大きいほど高エチレン選択性が得られることを示している。

謝辞: 本研究の一部は、JST 創発的研究支援事業、JPMJFR2278の支援を受けたものである。

関係各位に感謝申し上げます。

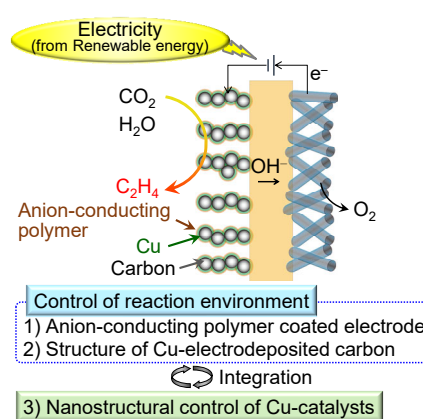


Fig. 1. Schematic illustration of the design of the reaction environment in this study

準安定状態を創出するための反応場開拓

Development of reaction field to create metastable states

産総研, [○]藤岡 正弥

AIST, [○]Masaya Fujioka

E-mail: m.fujioka@aist.go.jp

世界中で展開されている Materials Informatics (MI) により、無機合成研究者が新規材料を探索するための膨大な情報にアクセスできる環境が整備された。これらのヒントに基づいた考察や新たな設計指針が、近年の探索的研究の道標となっており、この 10 年における MI の発展は、材料科学分野の変革点であったと言える。しかし、計算的には実現可能と判断される化合物が、実際には合成できないケースは極めて多い。一方で、先人達が積み上げてきた探索活動により、単純に混ぜて焼くことで実現するような安定相は軒並み調べられている。このような背景の中で、計算の予測精度を上げるだけでなく、より汎用的に準安定状態を実現する実験側の技術革新が必要である。ダイヤモンドに代表される準安定物質は、対象とする環境下で最も安定な状態ではないが、何らかのエネルギー励起がない限り、安定に存在できる状態にある。このような準安定状態には広大な未踏領域が存在し、これらの物質を有効に取り出すことができれば、今後さらに実験と計算のギャップを埋めることができると期待される。

準安定物質を合成するための技術は多岐にわたるが、本講演では特に、化合物内で特定の元素のみが拡散する非平衡な環境を利用した物質創製について紹介する。化合物はその構成元素に応じて、様々な結合状態をとるが、ある温度で構造の骨格を保持する元素と、サイト間を拡散する特定の弱結合元素が共存するような場合、この弱結合元素の拡散を異方的に促すことで、効率的な化学組成変調が可能になる。また、化学組成の変化は物質の電子状態を変え、機能創出へと繋がる。図 1 は我々が開発した種々の合成手法により、イオンの除去・導入・交換により得られた準安定物質の一部である。講演ではこれらの手法と物質について具体的な内容を紹介する。

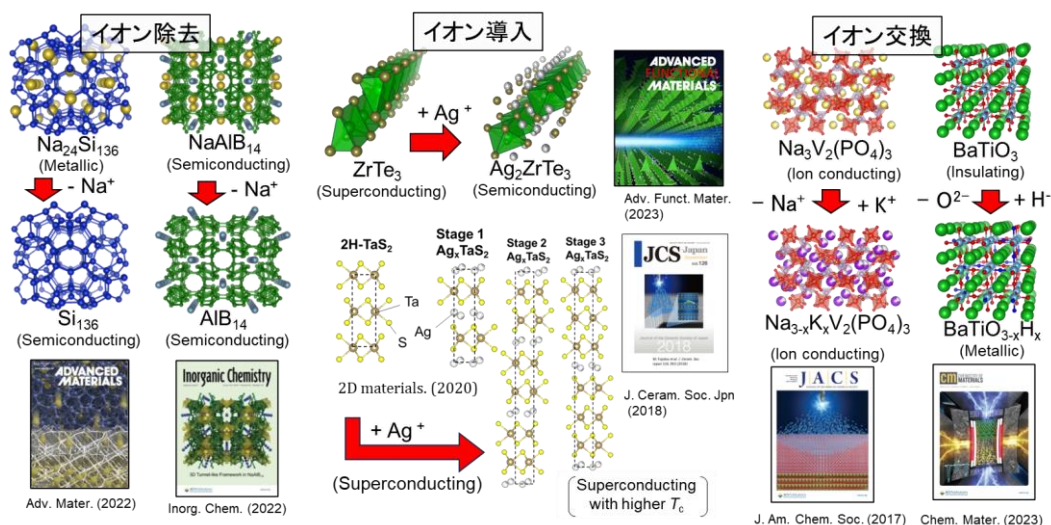


図 1. 拡散制御により得られた準安定物質

広域多次元多角的顕微分光解析によるナノ材料デバイスの電子状態解析

Electronic state analysis of nanomaterial devices

using multi-scale, multi-dimensional, and multi-modal spectromicroscopy

物材機構¹, 東京理科大² ○永村 直佳^{1,2}, 後藤 陸^{1,2}, 大石 健太^{1,2}

NIMS¹, Tokyo Univ. of Sci.², °Naoka Nagamura^{1,2}, Riku Gotoh^{1,2}, Kenta Oishi^{1,2}

E-mail: NAGAMURA.Naoka@nims.go.jp

グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドといった層状化合物やナノワイヤー、ナノドットといった低次元ナノ材料を半導体デバイスに応用するにあたり、デバイス特性を大きく左右する表面の化学状態や電子状態を評価するには、高空間分解能の顕微分光が有用である。我々は放射光オペランド顕微X線光電子分光(XPS)を活用して、原子層トランジスタ構造における、原子層チャンネルと金属電極およびゲート絶縁膜界面の界面相互作用や、原子層ナノシートの層間・層内キャリア移動を可視化してきた^[1,2,3]。高空間分解能かつ大面積のマルチスケール分析や、時空間分割で外場を掃引するオペランド計測での多パラメータ(多次元)分析では、さらに膨大なスペクトルマッピングデータを扱う必要がある。

そこで本研究では、スペクトルビッグデータからの物性情報抽出を目的として、機械学習を活用して高速自動ピークフィッティング解析するパッケージ EMPeaks の開発を進めている^[4,5]。さらに、顕微 XPS との多角的な物性評価を実現するために、新たに多探針オペランド顕微ラマン分光システム(MORINGA)を開発し、ナノ材料デバイス構造の構造や局所電荷移動の評価を実施している^[6]。

講演では、オペランド顕微 XPS・ラマンの先端計測システム詳細と、グラフェン電界効果ト

ランジスタ(G-FET)や遷移金属ダイカルコゲナイドトンネル FET など層状化合物デバイスの機械学習を活用した電子状態空間分布解析結果、将来展望について報告する。

【参考文献】

- [1] N. Nagamura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **102**, 241604 (2013)., Carbon **152**, 680 (2019). [2] M. Okada *et al.* APL Materials **9**, 121115(1-10) (2021). [3] K. Nakamura *et al.* ACS Appl. Mat. Int. **12**, 51598 (2020). [4] T. Matsumura, *et al.*, Sci. Tech. Adv. Mat., **20**, 733 (2019). [5] EMPeaks (PyPI) : <https://pypi.org/project/EMPeaks/> [6] 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 [21a-P04-11]

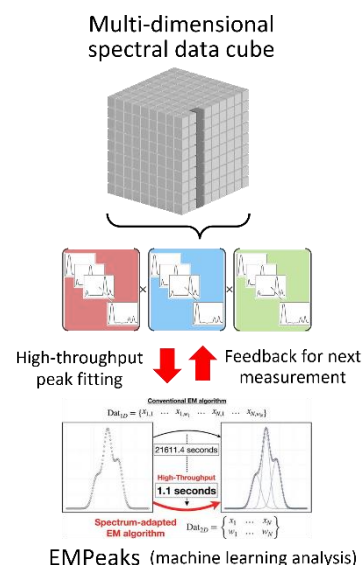


Fig. 1 Schematic image of multi-dimensional spectral analysis supported by informatics.

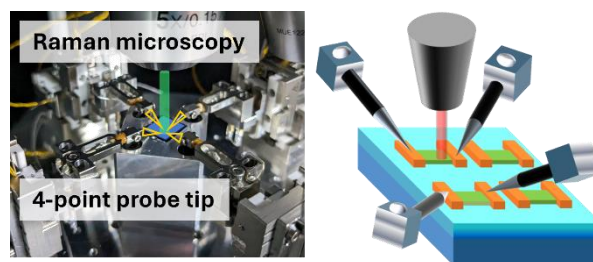


Fig. 2 Multi-probe *operando* raman imaging for nano-scale gated analysis, "MORINGA".

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): Society 5.0を支えるサイバーフィジカルシステムの先端技術 - フィジカル空間を繋ぐ材料・デバイス・プロセス・回路・アプリケーション技術 -

[16p-A36-1~8] Society 5.0を支えるサイバーフィジカルシステムの先端技術 - フィジカル空間を繋ぐ材料・デバイス・プロセス・回路・アプリケーション技術 -

[16p-A36-1]

革新的熱制御技術に向けた熱電永久磁石の開発

○安藤 冬希¹、内田 健一^{1,2} (1.NIMS、2.東大新領域)

[16p-A36-2]

折り紙構造や切り紙構造を用いた熱電発電デバイス

○寺嶋 真伍¹、岩瀬 英治¹ (1.早大理工)

[16p-A36-3]

拡張伝送線モデル(TLM)法を用いた熱電半導体/金属界面の固有接触抵抗率の精密測定と界面の信頼性評価

○(M1)桂 章皓¹、鶴元 真妃¹、廣瀬 由紀子¹、Micucci Daniele²、佐藤 峻^{3,4}、岩瀬 英治⁴、菅原 徹^{1,4} (1.京工繊大工、2.トリノ工科大、3.産総研、4.早稲田大)

[16p-A36-4]

液体金属を用いた電子素子実装が電子デバイスの伸縮耐性へ及ぼす影響の評価

○佐藤 峻¹、岩瀬 英治² (1.産総研SSRC、2.早大理工)

[16p-A36-5]

フレキシブルエレクトロニクスを活用したウェアラブル生体計測システムの開発

○植村 隆文^{1,2} (1.阪大産研、2.産総研先端フォトバイオ)

[16p-A36-6]

仮想匂い地図を介した匂いのデジタル化と価値創造

○長島 一樹¹ (1.北大電子研)

[16p-A36-7]

グラフェンバイオセンサーによる超高感度計測 —酵素反応計測から病原体検出・創薬を目指した応用まで—

○小野 堯生¹ (1.阪大基礎工)

[16p-A36-8]

日常生活下での生体計測に向けた非接触計測技術

○和泉 慎太郎¹ (1.神戸大)

革新的熱制御技術に向けた熱電永久磁石の開発

Creation of thermoelectric permanent magnets toward innovative thermal management technologies

NIMS¹, 東大新領域² °安藤 冬希¹, 内田 健一^{1,2}

NIMS¹, Univ. of Tokyo², °Fuyuki Ando¹, Ken-ichi Uchida^{1,2}

E-mail: ANDO.Fuyuki@nims.go.jp

固体中で電流と熱流が相互に変換される熱電変換現象は、可動部を有することなくスケラブルに精密冷却・環境発電できる技術として注目を集めている。電流と熱流がそれぞれ平行な方向に変換される一般的な縦型熱電効果（ゼーベック/ペルチェ効果）に対し、それぞれ垂直な方向に変換される横型熱電効果は、複雑なデバイス構造を不要とし材料そのものがシンプルで汎用性の高い熱電冷却・発電デバイスとして機能するため、多様な用途に応用できると期待されている[1]。しかし、横型熱電効果による熱電性能は従来のゼーベック/ペルチェ効果に比べて数桁低いことから、これまで横型熱電変換の研究は基礎段階に留まってきた。

本講演では、異なる横型熱電変換原理や材料を複合化することによって、無磁場下で巨大な横型熱電変換を実現する熱電永久磁石の開発成果を紹介する。横型熱電変換は大きく分類して6種類の原理で駆動されることが知られるが、これらは歴史的に独立に研究されてきた。そこで我々は、2種類の物質を交互にかつ傾斜させて積層した多層複合材料において発現する非対角ペルチェ効果に対して、外部磁場によって駆動される磁気ペルチェ効果と正常エッチングスハウゼン効果が重畳した、ハイブリッド横型熱電冷却を実証した[2]。一般に、外部磁場や磁化に依存した磁気熱電効果は小さいが、これらを非対角ペルチェ効果に重畳させることで大きく性能向上させることができた。また、構成材料として永久磁石を組み込むことで、無磁場下でもハイブリッド横型熱電変換を実現できることを示した。さらに、永久磁石と熱電材料からなる傾斜積層体において、非対角ゼーベック効果による巨大熱電発電を実証した[3]。適切な材料設計によって非対角ゼーベック効果を最適化することで、サーモパイル型熱電モジュールにおいて温度差 152 K で 200 mW を超える横型熱電発電を観測した。このモジュールは永久磁石としても機能するため、磁気吸着可能なあらゆる熱源に簡便に設置することができ、これまでにない熱回収あるいは熱制御の機会をもたらす得る。

謝辞：本研究は JST ERATO (JPMJER2201) の支援により遂行された。

[1] K. Uchida and J. P. Heremans, *Joule* **6**, 2240-2245 (2022).

[2] K. Uchida, T. Hirai, F. Ando, and H. Sepehri-Amin, *Adv. Energy Mater.* **14**, 2302375 (2023)..

[3] F. Ando *et al.*, arXiv:2402.18019.

折り紙構造や切り紙構造を用いた熱電発電デバイス

Thermoelectric generator using origami/kirigami structures

早大理工 [○]寺嶋真伍, 岩瀬英治 ²

Waseda Univ., [○]Shingo Terashima, Eiji Iwase

E-mail: terashima@iwaselab.amech.waseda.ac.jp, iwase@waseda.jp

Society5.0 を支える IoT センサネットワークを駆動する自立電源として、熱源があればどこでも発電可能な熱電発電デバイスが注目されている。一方で身近に存在する熱源は熱配管やヒトや生物の皮膚など曲面を有する熱源も多く、熱電発電デバイスには屈曲性や延伸性が求められる。

そこで、基板に折り紙構造や切り紙構造を利用することにより、Fig. 1 に示すように硬く熱電発電特性の良い熱電発電材料を用いながらも、曲面熱源に貼付可能な延伸性を有する熱電発電デバイスを実現した^{[1]-[5]}。本技術は、高い交換コストの一次電池に代わる小型で交換・メンテナンスフリーの自立電源としての利用が考えられる他、環境発電市場の多くの割合を占める廃熱利用において場所や条件を選ばず設置が可能であり、適用範囲は広い。

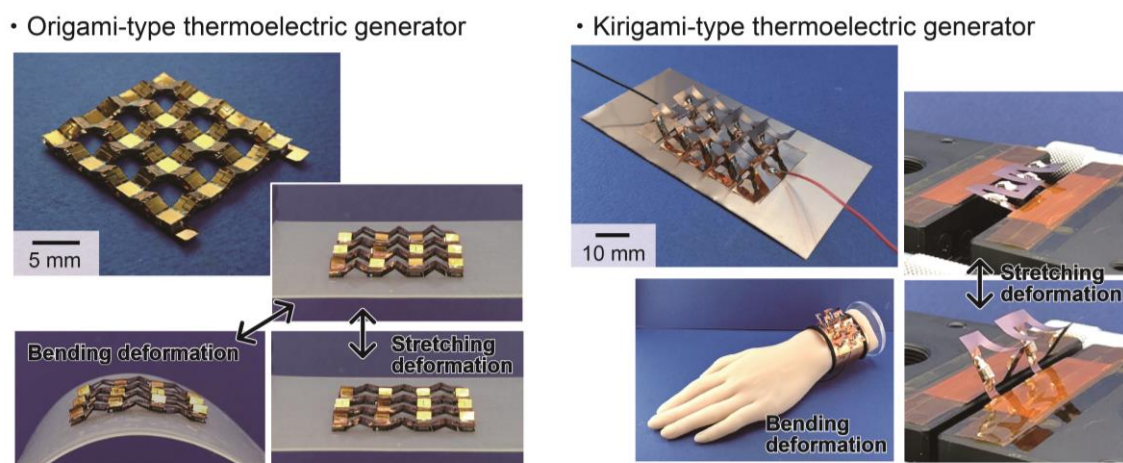


Fig. 1 Thermoelectric generator using origami structures (left) and using kirigami structures (right)

- [1] Kana Fukuie, Yoshitaka Iwata, Eiji Iwase, “Design of Substrate Stretchability using Origami-Like Folding Deformation for Flexible Thermoelectric Generator,” *Micromachines*, vol. 9, issue 7, 315, 2018.
- [2] 寺嶋真伍, 岩瀬英治, “折り紙構造をもつフレキシブル熱電発電デバイス” in 鈴木雄二 監修 “環境発電ハンドブック 第2版 ～機能性材料・デバイス・標準化：IoT時代で加速する社会実装～,” pp. 141-150 (第4編 第2章 2), エヌ・ティー・エス, 2021.
- [3] Shingo Terashima, Eiji Iwase, “Kirigami Thermoelectric Generator with High Flexibility and High Performance,” *Proceedings of the 35th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2022)*, pp. 612-615, 2022.
- [4] Yusuke Sato, Shingo Terashima, Eiji Iwase, “Origami-type Flexible Thermoelectric Generator Fabricated by Self-Folding,” *Micromachines*, vol. 14, no. 1, 218, 2023.
- [5] Yusuke Sato, Eiji Iwase, “Self-Folding Method using a Linkage Mechanism for Origami Structures,” *Advanced Intelligent Systems*, vol. 5, issue 6, 2200445, 2023.

拡張伝送線モデル(TLM)法を用いた熱電半導体/金属界面の 固有接触抵抗率の精密測定と界面の信頼性評価

Refined Measurement of the Specific Contact Resistivity of Interface between Thermoelectric Semiconductors and Metal with Advanced Transfer Length Method

京工繊大¹, トリノ工科大², 産総研³, 早稲田大⁴ (M1) 桂 章皓¹, 鶴元 真妃¹, 廣瀬 由紀子¹,

Daniele Micucci², 佐藤 峻^{3,4}, 岩瀬 英治⁴, 菅原 徹^{1,4}

Kyoto Institute Univ.¹, PoliTo², AIST³, Waseda Univ.⁴, Akihiro Katsura¹, Maki Tsurumoto¹,

Yukiko Hirose¹, Daniele Micucci², Takashi Sato^{3,4}, Eiji Iwase⁴, Tohru Sugahara^{1,4}

E-mail: katsura.akihiro.1025@gmail.com

【緒言】

半導体デバイスにおける電氣的損失を低減し、性能及び信頼性を向上させるためには、半導体/金属界面の接触抵抗を精密に計測する必要がある。従来、接触抵抗の測定には、伝送線モデル(TLM)法が用いられてきた。しかしながら、既存の TLM 法は、半導体の厚みやデバイスのサイズ設計条件に依存するため、異なる材料間で界面物性の材料特性を精密に抽出し、評価できない。加えて、同一の界面材料においても、マルチスケールに渡って、半導体/金属界面の電氣的物性を評価できないという問題がある。そこで、我々は、従来の TLM 法を改良し、固有接触抵抗率(ρ_c)を算出することで、デバイスのサイズ設計条件に依存することなく、半導体/金属界面の電氣的物性を精密に評価する拡張 TLM 法を提案している。

本研究では、200~450K の温度領域での応用が期待される熱電半導体((BiSb)₂Te₃)と既存の半導体デバイスに利用される代表的な拡散バリア金属(Ti, Cr, Ni)を対象に、デバイス動作条件下で半導体/金属界面の固有接触抵抗率を精密に計測し、接合界面における信頼性を評価した。

【実験方法】

スパッタ法を用いて、石英ガラス(SiO₂)基板上に密着層(Ti = 0.1 μ m)と熱電半導体((BiSb)₂Te₃ = 0.1, 0.3, 0.5 μ m)を成膜し、拡散バリア金属(Ti, Cr, Ni = 0.2 μ m)と電極(Ag = 1 μ m)を積層成膜し、9種類のデバイスを作製した。デバイスの形状は、電極数 15 本、電極幅 150 μ m、電極間距離 1850 μ m で、レーザー加工によりデバイス内に5種類の幅 W(1000~6000 μ m)のサンプル領域を設計した。

以下の2つのデバイス動作条件下で、4端子法を用いて、各電極間距離に対する線形的な電流-電圧(IV)特性を計測した。

- I. 界面物性の温度依存性を観察するため、測定ステージ温度を常温(25°C)から高温(105°C)まで 10°C 刻みに調節し、4端子法で、各電極間距離に対する IV 特性を計測した。
- II. 過酷環境下でデバイスを長期間実用した際の界面物性の経時変化を観察するため、環境試験(熱衝撃試験)を低温(-40°C)から高温(125°C)の温度条件で 100, 200, 500 サイクル実施し、その前後で IV 特性を計測し、初期条件と比較することで、半導体/金属界面の信頼性を評価した。

デバイスを光学顕微鏡により分割撮影し、統合し得られた像から画像解析によりデバイス形状情報(デバイス幅 W、電極間距離 L、電極幅 d)を精密に取得した。加えて、熱電半導体((BiSb)₂Te₃)の厚み t は、段差膜厚計を用いて計測した。

【結果と考察】

Fig.1 は、拡張 TLM 法($RWt = \rho L + \rho_c$)に基づき、電極間距離に対して、各抵抗値 R とデバイス幅 W、(BiSb)₂Te₃ の厚み t の積(RWt)を、信頼区間 95% の最小二乗近似としてプロットしたものである。このプロットにおける傾きは、半導体層の抵抗率を意味しており、拡散バリア金属によって、熱電半導体/金属界面の材料特性が顕著に現れた。また、半導体層の抵抗率は、Ti, Ni, Cr の順に増大することが明らかになった。一方で、拡散バリア金属に関わらず、傾きにより大きく 2 つの群($t = 0.147 \mu\text{m} / t = 0.313, 0.466 \mu\text{m}$)に分類できた。有限要素法による解析から、半導体層が薄膜化するに伴い、半導体層直下の密着層 Ti が電流経路として優位になっている可能性が示唆された。

また、固有接触抵抗率(ρ_c)は、熱電半導体((BiSb)₂Te₃)に対して、Ti を有する接合界面が最も小さい値で、Cr が最も大きな値を示した。加えて、半導体層の抵抗率及び固有接触抵抗率は、温度上昇に伴い、増加する傾向が観察された。

講演当日は、高温環境下及び環境試験前後での固有接触抵抗率の精密計測による、界面物性の材料特性や温度依存性、界面の信頼性について評価し発表する。

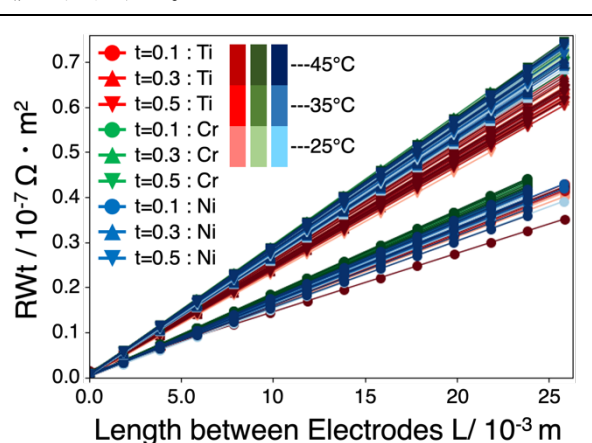


Fig.1 The RWt value of the devices depending on L values of each barrier metals and (BiSb)₂Te₃ semiconductor thicknesses at each temperatures.

液体金属を用いた電子素子実装が電子デバイスの伸縮耐性へ及ぼす影響の評価

Effects of Electronic Component Mounting Using Liquid Metal on Stretch Tolerance of Electronic Device

産総研 SSRC¹, 早大理工² ○佐藤 峻¹, 岩瀬 英治²

SSRC AIST¹, Fac. Sci. and Eng. Waseda Univ.², ○Takashi Sato¹, Eiji Iwase²

E-mail: machotakashi-satou@aist.go.jp

1. 序論

近年、曲げ・伸縮変形可能な電子デバイスの研究が盛んに行われている。伸縮基板上の金属配線に硬い表面実装素子を組み込んだデバイスを伸縮させると、素子周辺が剛性差によって破断するため、電気的接続材の伸縮耐性が重要となる。従来の主な電気的接続材であるハンダや導電性接着剤は硬いため、伸縮電子デバイスに用いると伸縮耐性が得られない。そこで本研究では、液体金属を電気的接続材に用いることで、高伸縮耐性を得ることを考えた^{[1][2]}。ガリウム系液体金属は常温で液体のため高伸縮性 (>400%) を有するが^[1]、液体金属実装がデバイス全体の伸縮性へ及ぼす影響は明らかでない。

2. 実験方法

Fig. 1 に液体金属を用いた電子素子実装の概念図を示す。Fig. 2 に引張試験用サンプルの概念図を示す。切り紙構造を有する伸縮銅配線 (Toray) にガリノスタン (Changsha Rich Nonferrous Metals) およびペーストハンダ (SMXH05, Sanhayato) を用いてチップ抵抗 (MCR10EZPJ000, ROHM) を実装し、シリコーンゴム (Ecoflex03-00, Smooth-On) で封止したサンプルを作製し、引張試験を行った。実装部周辺の剛性分布が配線の伸縮耐性へ及ぼす影響を評価するため、接続材および配線パッド部の切り紙構造の有無に対する配線の破断ひずみを比較した。

3. 結果・考察

比較用に求めた配線単体の最大破断ひずみは 397% であった。これに対し、ハンダ実装では配線単体の 0.1 倍のひずみ (53%) で破断した (Fig. 3(a),(b))。一方、液体金属実装しつつ配線パッド部まで切り紙構造を設けると、配線単体の 0.8 倍のひずみ (304%) で破断した。このことから、液体金属は自身が伸縮するだけでなく、配線の伸縮耐性を引き出せることが明らかとなった。また、304%伸縮時の抵抗変化は 1.2 倍以下であり、切り紙構造の特徴である低抵抗変化が得られた (Fig. 3(a))。さらに 100%ひずみで繰り返し伸縮させても 463 回目まで電気的接続を維持した (Fig. 3(c))。最後に液体金属実装によるチップ LED アレイを作製し、高伸縮性 (>150%) を実証した (Fig. 4)。

4. 結論

本研究では、液体金属を用いた電子素子実装を提案し、単に液体金属が伸びるだけでなく、液体金属実装によってデバイス全体の伸縮耐性を引き出せることを明らかにした。

謝辞

本研究は JST ACT-X (JPMJAX21K6) の支援を受けている。

文献

- [1] T. Sato *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, no. 15, pp. 18247-18254, 2021.
- [2] T. Sato *et al.*, *Proc. of IEEE MEMS 2024*, pp. 356-359, 2024.

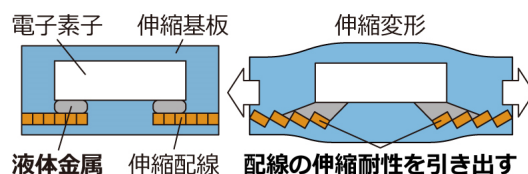


Fig. 1 Schematics of electronic component mounting method using liquid metal.

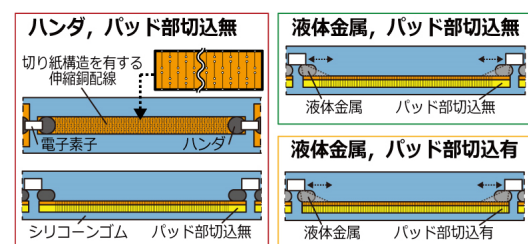


Fig. 2 Schematics of tensile test samples.

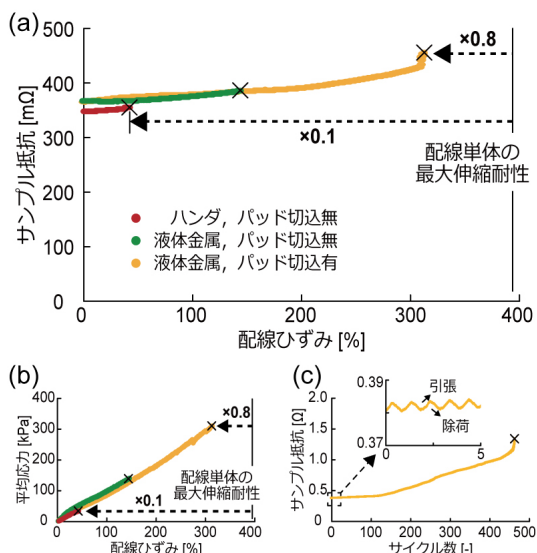


Fig. 3 Tensile test results. (b) Relationship between strain and resistance ($N=3$). (c) Relationship between strain and stress ($N=3$). (d) Cyclic tensile test result ($N=2$).

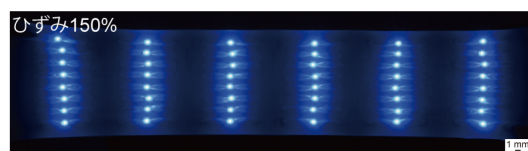


Fig. 4 Demonstration of stretchable LED array.

フレキシブルエレクトロニクスを活用した ウェアラブル生体計測システムの開発

Development of Wearable Biosensing System Using Flexible Electronics

阪大産研¹, 産総研先端フォトバイオ² °植村 隆文^{1,2}

SANKEN, Osaka Univ.¹, PhotoBIO-OIL, AIST.², °Takafumi Uemura^{1,2}

E-mail: uemura-t@sanken.osaka-u.ac.jp

現在、実空間の物や人、様々な対象物の情報・状態を的確に計測し、取得した情報を情報空間に転送した上で解析を行い、その結果を再度実空間にフィードバックする Cyber Physical Systems (CPS) があらゆる社会システムに実装されるようになってきている。その結果、ヘルスケア・インフラ・物流管理、スマートハウス・シティの実現を目的として、実空間の管理対象物には無数のセンサデバイスが実装されることとなった。このように、CPS 技術は現在の社会基盤を支える重要技術として位置付けられており、更なる CPS 技術の高度化のためには、高度情報処理技術の進展と共に、様々な対象物の計測に適したセンサデバイス開発が求められている。中でも、生体皮膚の柔らかさに近い素材をエレクトロニクス基材として用いるフレキシブルエレクトロニクスは、リアルタイムの健康モニタリングを可能にする技術として期待され、大きな関心を集めている。

このような背景から、生体皮膚に装着しても違和感を生じない、柔軟・軽量の有機信号処理回路を搭載した貼付式のシート型ワイヤレス生体信号モニタリングシステムを開発してきた。開発した有機回路は、有機トランジスタ、薄膜抵抗、キャパシタ等の柔軟電子回路を厚さ 1 μ m のポリマーフィルム上に統合して作製されている。そのため、信号処理回路は人間の柔らかい皮膚に直接貼付けることが可能である。本講演では、開発したノイズ低減回路とその心電計測への応用 (Fig.1(a))¹⁾、加えて、低ノイズ有機トランジスタの活用による μ V レベルの微小生体電位を検出可能な電圧増幅回路による脳波計測²⁾、さらに、汗のリアルタイム分析を可能にするウェアラブル化学センサと、そのノイズ低減を実現する有機信号処理回路への応用 (Fig.1(b))¹⁾ について紹介する。いずれの技術も、体動ノイズやハムノイズなどが課題となるウェアラブルセンサによる高精度計測において、計測対象の近傍で信号品質 (S/N) を向上するための技術である。

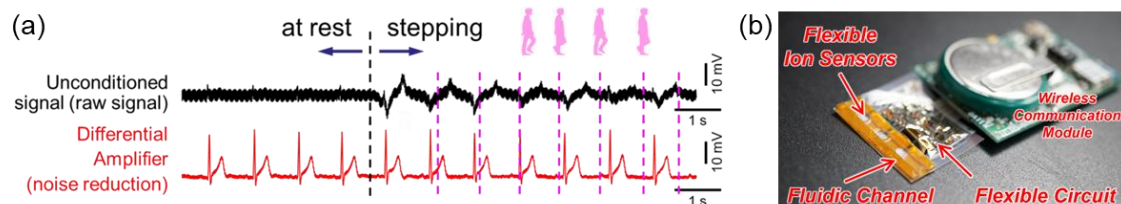


Fig. 1. (a) Improvement of S/N ratio of electrocardiographic measurement with a flexible noise reduction circuit. (b) Image of an integrated wearable sweat sensor with flexible signal processing circuits.

- 参考文献： 1) M. Sugiyama *et al.*, *Nat. Electron.*, 2, 351-360 (2019).
2) T. Kimura *et al.*, *Adv. Electron. Mater.*, 2201279, 1-8 (2023)

仮想匂い地図を介した匂いのデジタル化と価値創造

Odor Digitization and Value Creation Through Virtual Odor Maps

北大電子研 長島 一樹

RIES Hokkaido Univ. Kazuki Nagashima

E-mail: nagashima@es.hokudai.ac.jp

フィジカル空間とサイバー空間が高度に融合した情報社会基盤(サイバーフィジカルシステム)の実現・利活用へ向けて、IoT 関連技術や人工知能の更なる技術発展に加え、様々なデータを収集するセンサ技術の革新が希求されている。自然界に存在する数十万種類の揮発性分子(=匂い分子)を情報源とする人工嗅覚センサは、従来物理情報を遥かに凌駕する情報量を備えた‘化学情報’の収集を目指すものであり、得られる膨大で多角的な化学情報は生体活動や環境-人インタラクションの様に多数の因子が相関し合う複雑な現象を本質的に理解するための新たなアプローチを与えるのみならず、生体ガスによる健康診断や毒物・環境負荷物質の時空間解析など全く新たな付加価値を創造可能なことから近年世界的に注目を集めている。一般に、多成分の分子群から構成される匂いの概要を捉えるためには、構成分子群を網羅的に検出し、的確に特徴量抽出を行う情報処理技術が不可欠となる。生体の嗅覚システムに目を向ければ、嗅覚受容体で認識された匂い分子群が嗅細胞内で電気信号へ変換され、神経伝達を介して脳の嗅球表面で匂い地図を形成し、情報処理を円滑にするといった優れた機構が存在する。本研究では、生体の嗅覚システムに倣った人工嗅覚センサを概説すると共に、仮想匂い地図を用いたデータ解析技術とその有用性、生体ガスを利用した化学情報の収集と価値創造に関する研究を紹介する。加えて、人工嗅覚センサによる匂いセンシング・匂い識別を加速する材料・デバイス技術開発に関する我々の取り組みも併せて紹介する。

References:

- C. Jirayupat, K. Nagashima *et al.* *Chem. Commun.* 58, 6377 (2022)
- W. Li, K. Nagashima *et al.* *ACS Sens.* 7, 151 (2022)
- J. Liu, K. Nagashima *et al.* *ACS Sens.* 7, 534 (2022)
- C. Jirayupat, K. Nagashima *et al.* *Anal. Chem.* 93, 14708 (2021)
- Y. Kazama, K. Nagashima *et al.* in preparation

グラフェンバイオセンサーによる超高感度計測 —酵素反応計測から病原体検出・創薬を目指した応用まで—

High-sensitive measurement using graphene biosensors:

from enzyme assay to pathogen detection and application toward drug discovery

阪大基礎工 ○小野 亮生 / Osaka Univ., ○Takao Ono

ono.takao.es@osaka-u.ac.jp

炭素の単原子層薄膜であるグラフェンは、全構成原子が表面に露出した高い比表面積や、極めて高いキャリア移動度といった特異な物性を持ち、エレクトロニクスをはじめ多分野への応用が期待されている。我々は、グラフェンのセンサーマテリアルとしての優位性、特に、界面近傍での微小な生化学反応を高感度にセンシングする基盤としてのポテンシャルに着目して、グラフェンバイオセンサーの研究を進めている。本講演では、近年の我々のいくつかの結果を紹介する。

マイクロウェル内でのアンモニア発生反応をグラフェンで計測することで、*Helicobacter pylori* を1菌体以下(菌体断片)レベルで検出できる(Fig. 1(a)) [1,2]。ここで利用したアンモニア計測の夾雑物への耐性を、S/N比にして3桁向上させた新たなデバイス構造も提案している(Fig. 1(b)) [3,4]。一方、インフルエンザウイルスのレセプター糖鎖をグラフェンバイオセンサー上に修飾することで、当該ウイルスを高感度に検出できるが、細胞上界面での感染反応を模倣したこのバイオセンサーは、界面で作用する抗ウイルス薬の薬効評価にも適用できる。これらの結果を紹介しながら、このユニークなバイオセンサーマテリアルの社会実装についても議論する。

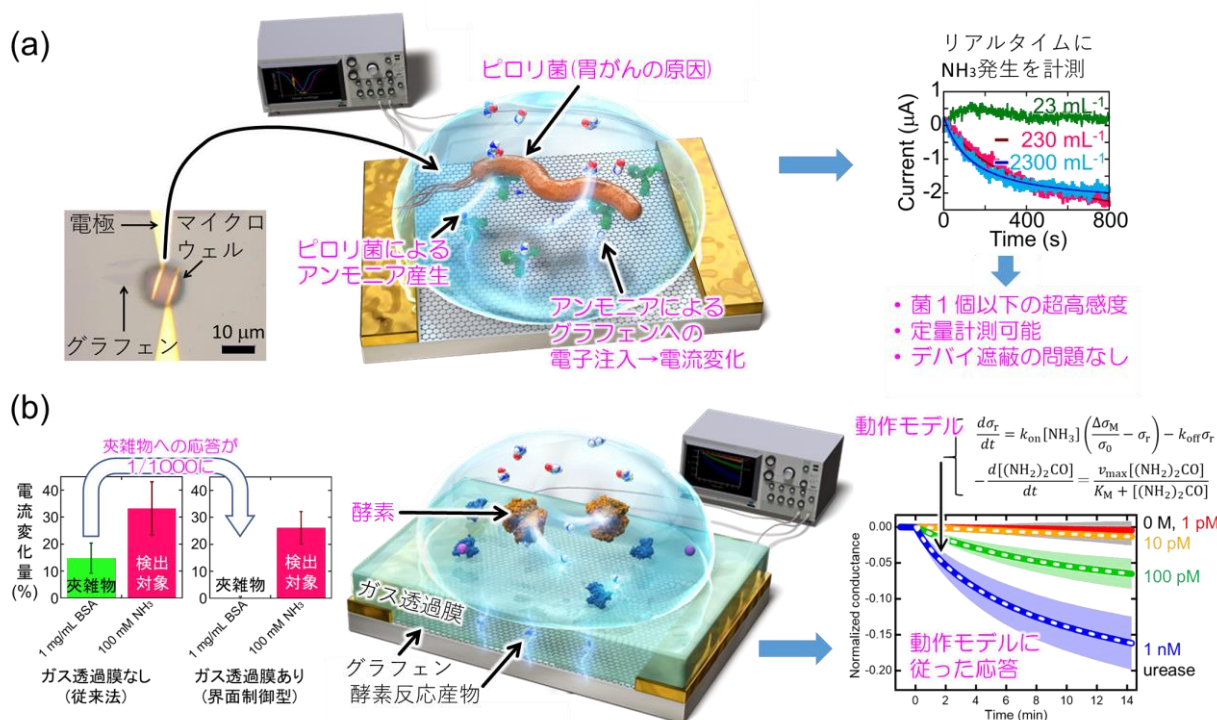


Fig. 1: A couple of examples of our graphene biosensors.

【謝辞】本研究は JST さきがけ(JPMJPR19G3)、NEDO 若サボ(JPNP20004)の支援を受けた。

[1] T. Ono *et al.*, *Nano Lett.* **19**, 4004-4009 (2019). [2] 特許第 6949397 号.

[3] T. Ono *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, 067002 (2023). [4] PCT/JP2024/019161.

日常生活下での生体計測に向けた非接触計測技術

Non-contact measurement for biological measurements in daily life

神戸大¹ ○和泉 慎太郎¹

Kobe Univ.¹, °Shintaro Izumi¹

E-mail: shin@cs28.cs.kobe-u.ac.jp

近年、腕時計型のウェアラブルデバイスのように手軽に生体情報を計測できるデバイスが注目されている。日常生活下において常時生体信号を計測することができれば、疾患の早期発見や生活習慣の改善など多くのメリットがある。しかし、実際にはセンサ装着や充電の煩わしさ、皮膚へのダメージなどのデメリットがあり、広く一般に受け入れられているとは言い難い。そこで、より気軽に生体情報の計測ができる技術が求められている。

本講演では非接触、低侵襲生体計測技術を中心に、そのニーズと課題、信号処理と機械学習まで含めた研究内容を紹介する。特に体表面から計測できる情報に着目する(図1)。例えば図2はマイクロ波ドップラーセンサを用いて非接触で心拍を計測の様子を示している。また、医療ヘルスケア分野における最新の応用研究についても紹介する。

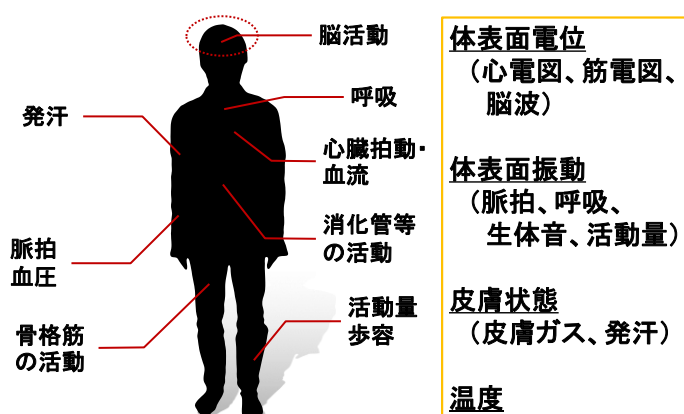


図1 体表面における生体情報



図2 マイクロ波ドップラーセンサを用いた心拍計測の一例

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 2次元材料とその集積回路・電子デバイス応用

[18p-C42-1~7] 2次元材料とその集積回路・電子デバイス応用

シンポジウムスポンサー



[18p-C42-1]

3D-Stacked FET 向け 2D 材料・デバイス技術

○若林 整¹ (1.東工大研究院)

[18p-C42-2]

2次元材料のウエハスケール集積回路技術の基盤構築に向けて

○長汐 晃輔¹ (1.東京大学)

[18p-C42-3]

Possible applications of 2D material devices and related integration challenges

○Tom Schram¹ (1.imec)

[18p-C42-4]

新規MO原料を用いたTMD 成膜

○小椋 厚志^{1,2}、町田 英明³ (1.明治大 理工、2.明治大 MREL、3.気相成長 (株))

[18p-C42-5]

二次元ヘテロ構造を舞台とした量子マテリアル・機能創出

○北浦 良¹ (1.物材機構)

[18p-C42-6]

ファンデルワールス複合原子層の自在配列と素子応用に向けて

○町田 友樹¹ (1.東大生研)

[18p-C42-7]

オプティカルデバイスに向けた光応答分子・溶液と2D物質との複合材料

○Komeda Tadahiro¹、高岡 毅¹ (1.東北大多元研)

3D-Stacked FET 向け 2D 材料・デバイス技術

2D Material and Device Technologies for 3D-Stacked FET

東京工業大学 ○ 若林 整 ; ○ Hitoshi Wakabayashi, Tokyo Institute of Technology

E-mail: wakabayashi.h.ab[at]m.titech.ac.jp

半導体集積回路産業は、Moore's law [1] を目標とした Scaling concept [2] に従った微細化により [3]、高速化や低消費電力化、低コスト化、高集積化を実現している。特に近年では、Fin-FET 技術による特性ばらつき抑制により、低消費電力化や低コスト化、高集積化が進んでいる [4]。さらに一部で Gate-All-Around Nano-Sheet FET (GAA-NS-FET) により、ノンドープチャネル膜厚のばらつきを低減することで低消費電力化や低コスト化、高集積化が進んでいる [5, 6]。次に、さらなる低消費電力化や低コスト化、高集積化に向けて、Complementary FET (CFET) 或いは 3D-Stacked FET (3DSFET) が開発されている [7-10]。しかし、CFET や 3DSFET では膜厚ばらつきを低減できないため、原子層状半導体膜、例えば遷移金属ダイカルコゲナイド (Transition-metal di-chalcogenide: TMDC) 膜 [11] を用いた 2D 薄膜半導体を用いた 3DSFET が研究され、さらに移動度向上によるエネルギー遅延積低減 [12] も研究されている。

そこで本稿では材料・デバイス技術として、まず TMDC 膜について、移動度向上のためにチャネル濃度を低減する必要があり、スパッタ膜により 10^{-14} cm^{-3} 程度まで低減できている [13-21]。またスパッタ TMDC 膜の膜厚ばらつき抑制は比較的小さく、 ZrS_2 膜等は移動度も高い [22-24]。次に、3DSFET の特有のプロセスとして、Sacrificial layer あるいは Supporting layer 上への TMDC 成膜がある [25]。そこで MoS_2 膜について、例えば、plasma SiO_2 膜上 PVD- MoS_2 膜の膜質が良好であることを確認した [26]。さらに、ハロゲンのドーピングやカルコゲナイドの欠損などにより低抵抗化することや [27-29]、nFET には仕事関数が小さいコンタクト材料 [30, 31]、pFET には仕事関数が大きいコンタクト材料 [32] により高性能化できることが分かっている。以上の通り、2D 材料・デバイス技

術の研究開発が進められているが、Integration の観点では研究課題が山積みである。

謝辞：本研究の一部は文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 (JPS011438) 及び JSPS 科研費 (20H05880) の助成を受けた。

参考文献

- [1] Gordon E. Moore, *Electronics*, **38**, No. 8, p. 114, 1965.
- [2] Robert H. Dennard, *et al.*, *IEEE J. Solid-State Circuits*, **SC-9**, p. 256, 1974.
- [3] Hitoshi Wakabayashi, *et al.*, *IEEE T-ED*, v53, i9, p. 1961, 2006.
- [4] Shien-Yang Wu, *et al.*, *IEEE/IEDM*, 27.5, 2022.
- [5] E.-J. Yoon, *et al.*, *IEDM*, 27.1, 2004.
- [6] Jaehun Jeong, *et al.*, *Symp. on VLSI Tech. and Circuits*, T1-2, 2023.
- [7] Eisuke Anju, *et al.*, *IEEE/J-EDS*, p. 1239, **6**, 2018.
- [8] Marko Radosavljević, *et al.*, *IEDM*, 29-2, 2023.
- [9] Jaehyun Park, *et al.*, *IEDM*, 29-4, 2023.
- [10] S. Liao, *et al.*, in *IEEE/IEDM*, 29-6, 2023.
- [11] B. Radisavljevic, *et al.*, *Nature Nanotech*, **6**, pp. 147-150, 2011.
- [12] H. Wakabayashi, *et al.*, *EDTM*, 4D-1, 2024.
- [13] Takumi Ohashi, *et al.*, *JJAP*, **54**, 04DN08, 2015.
- [14] Shinya Imai, *et al.*, *JJAP*, **60**, SBBH10, 2021.
- [15] Ryo Ono, *et al.*, *JJAP*, **61**, SC1023, 2022.
- [16] Jun'ichi Shimizu, *et al.*, *JJAP*, **56**, 04CP06, 2017.
- [17] Kentaro Matsuura, *et al.*, *J.*, *Electrical Materials*, Vol. 47, No. 7, p. 3497, (2018).
- [18] Takuya Hamada, *et al.*, *J-EDS*, v9, p. 1117, 2021.
- [19] Haruki Tanigawa, *et al.*, *JJAP*, **59**, SMMC01, 2020.
- [20] Kentaro Matsuura, *et al.*, *JJAP*, **59**, 080906, 2020.
- [21] Shinya Imai, *et al.*, in *44th International Symposium on Dry Process (DPS2023)*, D-4, 2023.
- [22] M. Hamada, *et al.*, *IEEE/J-EDS*, **7**, 1258, 2019.
- [23] Masaya Hamada, *et al.*, *JJAP*, **60**, SBBH05, 2021.
- [24] Masaki Otomo, *et al.*, *JJAP*, **62**, SC1015, 2023.
- [25] Yun-Yan Chung, *et al.*, *IEEE/IEDM*, 2-1, 2023.
- [26] N. Matsunaga, *et al.*, *IEEE/EDTM*, 2J-4, 2024.
- [27] Takuya Hamada, *et al.*, *IEEE/J-EDS*, 2021.
- [28] Taiga Horiguchi, *et al.*, *JJAP*, **61**, 075506, 2022.
- [29] Keita Kurohara, *et al.*, *J-EDS*, p. 390, **12**, 2024.
- [30] Satoshi Igarashi, *et al.*, *JJAP*, **60**, SBBH04, 2021.
- [31] Shinya Imai, *et al.*, *IEEE/EDTM*, 4D-4, 2024.
- [32] Ryosuke Kajikawa, *et al.*, *SSDM*, A-2-03, 2023.

2次元材料のウエハスケール集積回路技術の基盤構築に向けて

Toward wafer-scale integrated circuit technology using two-dimensional materials

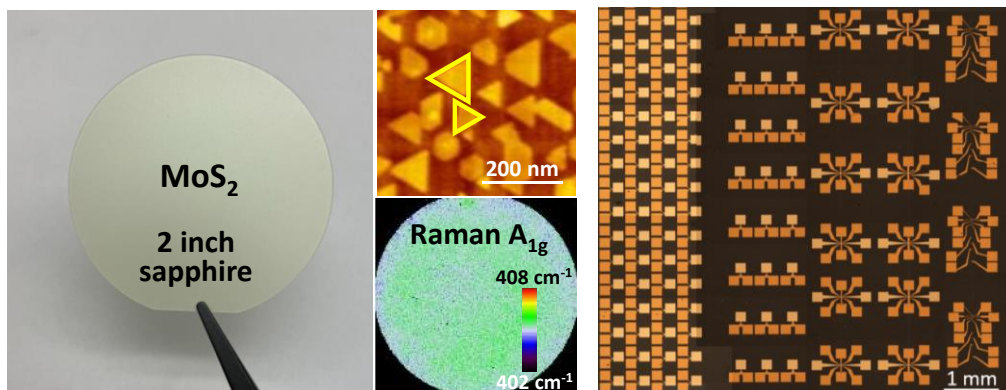
東大マテリアル 長汐晃輔

Univ. of Tokyo, K. Nagashio

E-mail: nagashio@material.t.u-tokyo.ac.jp

2次元材料は、(i)ダングリングボンドの無い表面構造のため単層厚さで Si よりも高い移動度を維持できること、(ii)原子層厚さのため短チャネル耐性に強いこと、(iii)厚さに起因したチャネル容量を無視できることによるオン電流向上等の実証により Si-MOSFET に対する優位性は既に広く理解されている。しかしながら、自身を含めこれらの研究報告は、全て単一デバイスにおいてなされたものであり、2次元材料の本格的な集積化につながる基礎的な研究開発は限定的である。これは、最先端ロジックにおける最終到達のデバイス構造は PMOS ナノシート上に NMOS ナノシートを3次元配置する「CFET」であるが、チャネルの物理長が 10 nm 以下での3次元微細加工技術を駆使した研究は残念ながらアカデミアでは困難であることにも起因している。そこで、「2次元集積回路基盤技術として将来的に価値あるアカデミアで可能な基礎研究は何か」ということを様々な角度から検討してきた結果、サファイア基板上にヘテロエピ成長させた2次元材料の CMOS 集積化への基盤技術の構築という結論に至った。これは、面内配向を制御できず多結晶となるアモルファス SiO_2/Si 基板と異なり、3回対称の c 面サファイア表面構造を利用することで理論上ヘテロエピによる全面単結晶化が可能なこと、産業利用できる 300 mm サイズのウエハが入手可能なことを特徴としており、最先端ロジックにおける集積回路基盤技術の蓄積に貢献するだけでなく、ウエハスケールでの将来的な電子デバイス展開も期待できることが強みである。このような大面積成長には、簡便さから殆どの大学で利用されている粉末ソース CVD は厳密な蒸気圧制御が困難なため不適であり、MOCVD のようなガスソースが必須となる。

本講演では、NIMS の佐久間らが MOCVD により2インチサファイア基板上に 180°ドメインのみを持つ単層 MoS_2 を用いて、直接トップゲート FET を形成しデバイス特性を評価した結果を紹介する。サファイア基板上の FET 特性の現状・課題を明確にすることで、将来展望を議論したい。



Possible applications of 2D material devices and related integration challenges

imec, Tom Schram

E-mail: tom.schram@imec.be

The introduction of 2D materials allows a range of applications and prospects for future devices. Graphene based devices enable sensing and optical applications ranging from light sensing to optical waveguides. Due to their specific properties, metal dichalcogenides (MX_2) like MoS_2 , WS_2 and WSe_2 are major candidates for replacement of Si for future scaled devices, including future CFET devices.

Some of these properties impose specific restrictions on the device architecture and the used integration methods, such that the typical integration used for Si based devices can no longer be used. These challenges will be discussed with the accompanying solutions.

In the first part of the presentation, the integration of a single sheet MX_2 based device will be discussed, restricting the options to future proof 300 mm Si fab compatible processes compatible with scaled devices. They can be summarised as: absence of a reliable junction doping method, the need for a dedicated contact technology, limited adhesion due to the Van der Waals nature, increased sensitivity for wet delamination, oxidation and surface sensitivity of the single or few monolayer thick MX_2 .

In the 2nd part of the presentation, an extrapolation will be made towards the extra challenges and process needs for the more complex case of a stacked nanosheet as illustrated below.

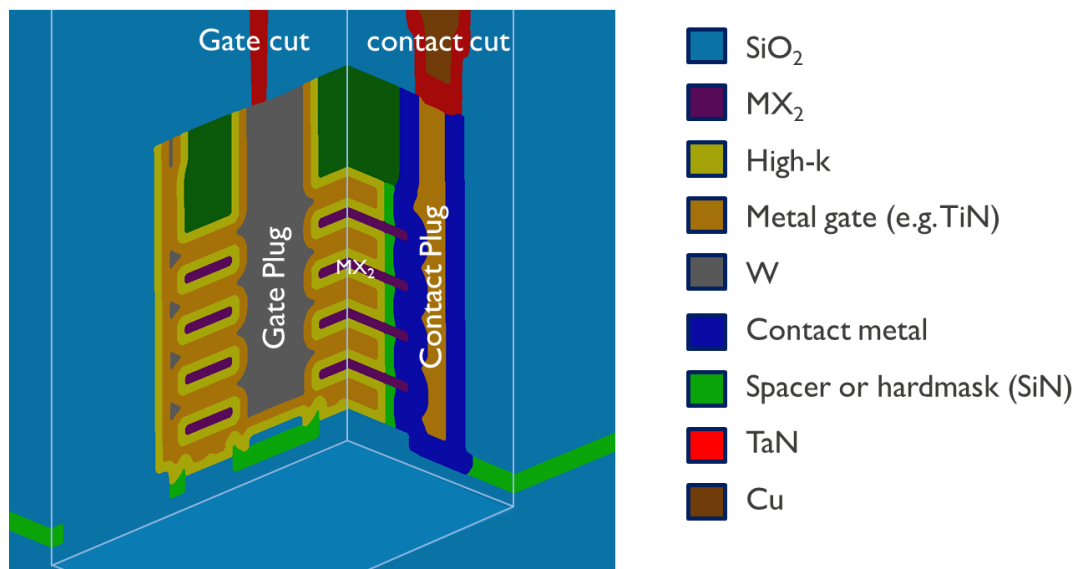


Fig: Final cross section through the gate and contact plane of a probable implementation of a 4-sheet replacement gate MX_2 based device. (SEMulator3D, <https://www.lamresearch.com/products/semulator3d/>)

Some process steps might be shared with Si technology but many of them will require adaptation to the 2D nature of the channel materials. These include: the initial stacking of the individual 2D sheets, different contact technology, mechanical integrity during the replacement gate and contact process.

新規 MO 原料を用いた TMD 成膜 TMD Film Deposition using Novel Metal-organic Precursors

小椋厚志^{1,2}、町田英明³

(1.明治大 理工、2 明治大 再生可能エネルギー研究インスティテュート、3 気相成長 (株))

A. Ogura^{1,2}, H. Machida³

(1. Meiji Univ., 2. Meiji Renewable Energy Laboratory, 3. Gas-phase Growth Ltd.)

E-mail: a_ogura@meiji.ac.jp

背景:本シンポジウムの主題である 2 次元層状材料を代表する遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD: Transition Metal Di-Chalcogenide)は、極微細ゲートによる制御が可能な超薄膜でも高いキャリア移動度を有する性質から、次世代 LSI デバイスのチャンネル材料として注目されている。一方、複雑な 3 次元構造を持つ次世代トランジスタのチャンネルに TMD を利用するためには、回り込み特性や被覆性に優れた成膜方法の確立が不可欠である。このような動機に基づき筆者らは低温で化学気相成長 (CVD: Chemical Vapor Deposition) を可能とする遷移金属 (W および Mo) とカルコゲン (S および Te) の新規有機(金属)化合物 (MO 原料)を開発し、MOCVD (Metal-organic CVD) による TMD 成膜の研究開発に取り組んできた。

実験:低温成膜が可能であり大学の実験室でも取り扱いが容易な安全性を持つことを条件に我々が新規に開発した原料は、Fig.1 にそれらの化学構造を示す n-BuNC-W(CO)₅、i-Pr₂DAD-Mo(CO)₃、t-Bu₂S₂、i-Pr₂Te であり、MOCVD では原料はすべてキャリアガスによるバブリング法でベースをターボポンプ排気が高真空中に保った成長室に (一部実験では交互に= ALD: Atomic Vapor Deposition) 供給し、概ね 450℃を

上限とする温度に保った平坦および fin 状に加工した Si(001)基板上に成膜した。得られた TMD 膜は、透過電子顕微鏡(TEM)、ラマン分光法(励起波長:532 nm)、X 線光電子分光法(XPS)等により評価した。

結果:断面 TEM 像で確認した平坦基板上的 TMD 膜は成長当初は表面に平行な層状の構造を持ち、概ね 10 層を超える膜厚から一部縦方向成長が始まった。ラマン分光測定でも層状 TMD に特有なピークが見られ、XPS で確認した組成は概ね化学量論に一致し、かつ 6 か月程度の保管による変化は少なかった。トレンチ基板上的 WS₂ 膜を Fig. 2 に例示したように、回り込み特性は良好で、fin 上部、角部、側壁部にもそれぞれ基板形状に沿った平行な成膜が確認された。

謝辞:本研究の一部は、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点事業 JP011438 の助成を受けたものである。

参考文献:

- [1] M.-Y. Li *et al.*, Proc. IEEE Symp. on VLSI Tech. and Cir., p.290 (2022).
- [2] K. Cho *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SG1048 (2023).

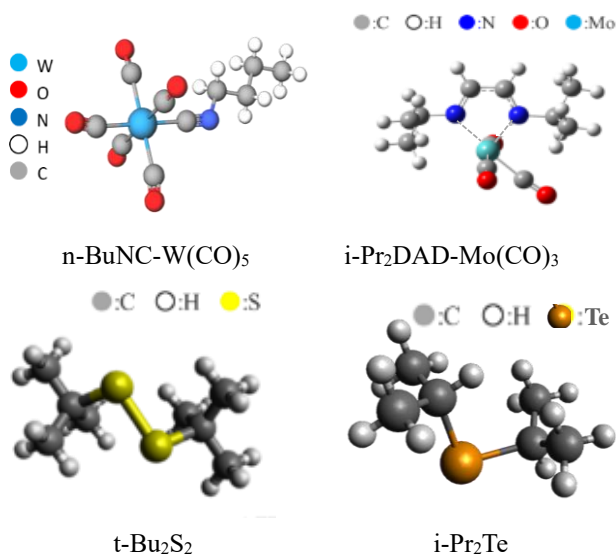


Fig.1 Chemical structure of novel precursors for TMD.

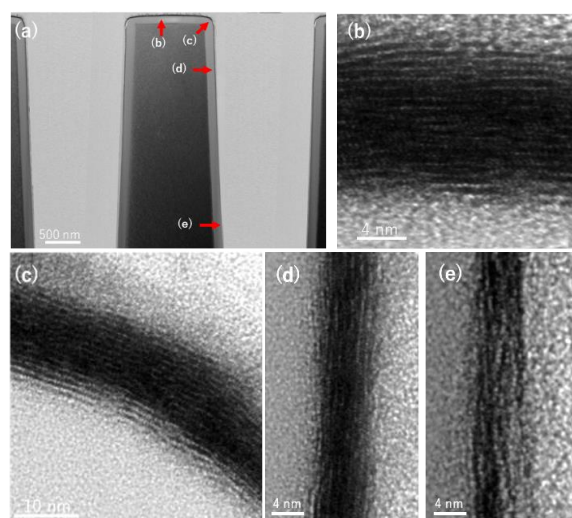


Fig. 2 TEM images of WS₂ film deposited on fin structure.

二次元ヘテロ構造を舞台とした量子マテリアル・機能創出

Two-dimensional-heterostructures for functional quantum materials

物料機構 MANA, 北大総合 北浦 良

National Institute for Materials Science MANA, Hokkaido Univ.

E-mail: KITAURA.Ryo@nims.go.jp

カーボンナノチューブ、グラフェン、窒化ホウ素 (hBN)、遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD、図 1) などの低次元材料は、ナノスケールでの新しい科学を探索するための魅力的なプラットフォームを提供してきた。とくに近年の二次元(2D)系の発展は著しく、物質科学の一大トピックスとして基礎・応用を巻き込んだ展開を見せている。これには、個々の 2D 物質が興味深い物性をもつことに加えて、それらが構成要素となりさまざまなヘテロ接合、ヘテロ積層、超格子などのナノ構造へと展開できるという点が大きな役割を果たしている。そのような背景のもと、我々は薄膜成長技術(有機金属化学気相成長法(MOCVD)や分子線エピタキシー法(MBE))による結晶成長や乾式転写法を用いることでさまざまな低次元超構造、特に2次元半導体ベースのヘテロ構造を作製する研究を行ってきた^{[1]-[6]}。これらヘテロ構造は、さまざまな量子機能を生み出す舞台として優れていることに加えて、本シンポジウムのテーマである電子デバイス応用にもつながりうる。本講演では、我々の二次元ヘテロ構造を舞台とした量子マテリアル・機能創出に関する最近の成果を紹介しつつ、2次元材料の電子デバイスへの展開に関する話題にも少し触れたい。

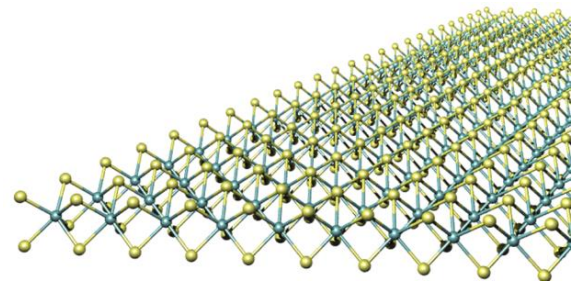


Fig. 1. A ball-and-stick representation of a monolayer transition metal dichalcogenide. Green and yellow balls correspond to transition metal (Mo, W, etc) and chalcogen (S, Se, Te) atoms, respectively.

References:

- [1] M. Xue, et., al., Appl. Phys. Lett. 123 6 (2024)
- [2] Y. Urano, et., al., Appl. Phys. Exp. 16 (6), 065003 (2023)
- [3] S. Zhang, et., al., Nanoscale 15 (12) 4570 (2023)
- [4] T. Hotta, et., al., Appl. Phys. Exp. 16 (1) 015001 (2022)
- [5] Y. Murai, et., al., ACS Nano 15(12) 19225 (2021)
- [6] T. Hotta, et. al., ACS Nano, 15, 1, 1370-1377 (2021)

ファンデルワールス複合原子層の自在配列と素子応用に向けて

Fabrication and applications of van der Waals junctions of 2D materials

東京大学生産技術研究所 町田 友樹

Institute of Industrial Science, University of Tokyo Tomoki Machida

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

The most distinct feature of van der Waals (vdW) junctions of 2D materials is controllability of twist angle between the crystals, which modulates the band structure and material properties. Here, we demonstrate that the spatial inversion symmetry and hence the spin splitting in band structure can be controlled by vdW assembly. Twisted bilayer WTe₂ with twist angle $\theta_{\text{twist}} = 0^\circ$ and 180° are investigated. The intensity of second harmonic generation changes by two orders of magnitude depending on θ_{twist} , indicating that 1L WTe₂ + 1L WTe₂ (0°) possesses the spatial inversion symmetry, whereas 1L WTe₂ + 1L WTe₂ (180°) lacks the inversion symmetry. The electronic structure of the 1L WTe₂ + 1L WTe₂ are significantly modulated by θ_{twist} . The spin splitting emerges when $\theta_{\text{twist}} = 180^\circ$ due to the broken inversion symmetry.

Few-layer transition metal dichalcogenides (TMDs) exhibit subband quantization induced by the out-of-plane quantum confinement of the wavefunctions, i.e., a few-layer TMDs is a naturally-formed quantum well (QW). Using momentum-conserved resonant tunneling, we investigate the QW states in 4L-WSe₂/h-BN/4L-WSe₂ vdW tunnel junctions with tunnel twist angles θ_{tunnel} . Current-voltage characteristics exhibit multiple resonant tunneling peaks whose positions shift as θ_{tunnel} was varied over the $0-60^\circ$ range, which indicated the presence of a spin-polarized subband crossing and a saddle point. Our twist-controlled resonant tunneling approach overcomes the difficulties associated with momentum-resolved electronic structure measurements and reveals the unique vdW-QW states in the conduction band of multi-layer WSe₂.

- [1] Y. Zhang, K. Kamiya, T. Yamamoto, M. Sakano, X. Yang, S. Masubuchi, S. Okazaki, K. Shinokita, T. Chen, K. Aso, Y. Y.-Takamura, Y. Oshima, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, T. Sasagawa, K. Ishizaka, and T. Machida, Nano Lett. **23**, 9280 (2023)
- [2] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, and T. Machida, Nano Lett. **22**, 4640 (2022).
- [3] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, and T. Machida Phys. Rev. Research **5**, 043292 (2023).
- [4] S. Kawasaki, K. Kinoshita, R. Moriya, M. Onodra, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, and T. Machida Phys. Rev. Research (in press).

オプティカルデバイスに向けた光応答分子・溶液と 2D 物質との複合材料 Photochromic Molecule in Solution Combined with 2D Material FET for Optical Device

東北大多元研、米田忠弘 高岡毅

Tohoku Univ., Tadahiro Komeda and Tsuyoshi Takaoka

E-mail: tadahiro.komeda.a1@tohoku.ac.jp

オプティカルデバイスと MOS デバイスの融合はシリコンベースの論理回路の限界を越えていくために必要な技術の一つと考えられる。前者で高い光応答を得るためには現状の微細加工技術とは異なった材料とプロセスが必要となるが、特に光への応答性の高い、光異性化などを伴う分子の光反応、あるいは遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)層状物質を原子層薄膜としたときに得られる直接遷移型の電子励起が可能なバンド構造などを利用することに注目が集まる。本報告ではシリコン技術と融合を目指した、TMD 原子層膜をチャンネルとして用いた電界効果トランジスタと、溶液中の光異性化分子を組み合わせるオプティカルデバイスの動作原理を検証した最近の研究を報告する。

Figure 1 はその概念図であり、TMD 原子層をチャンネルとして用いた FET デバイスに微小溶液分析に用いられるマイクロ流路を組み合わせたデバイスに、光照射をおこなう。光異性化分子を含む溶液を用いることで、特定の波長に反応する化学反応を利用可能であり、このことで複雑な光を利用した論理回路構築が可能である。

吸着分子の化学変化が、FET 特性の変化として検知可能かは興味深い。特に、Figure 2(a)に示すような、フォトクロミック Spiropyrans (SP)分子と Merocyanine (MC)の可逆的変化が電流特性変化として捉えられれば、光を用いた演算にも発展する。SP/MC の可逆的変化は溶液中ではよく調べられている。チャンネル上においても、SP 分子を堆積した後、光照射で MC 分子に変化させ、熱印加によって SP 分子に戻すサイクルが可能である。その変化を FET 特性の変化可能であることが検証されている。Figure 2 (b)に示すのは SP 分子・MC 分子間の可逆的サイクルを FET のドレイン電流変化で検知したものである。よりアクセプター性の強い SP 分子状態の場合、ゲート電圧-ドレイン電流曲線はより右にシフトして観察され、しきい値の変化で表現すると (Figure 2(c)) 2つの分子間のサイクルを忠実に再現していることがわかる。さらに温度変化を測定することで、活性化エネルギーが測定可能であり、それが単層膜と多層膜で異なることが示された。従来この変化を単層以下の薄膜で捉えるには大掛かりな装置たとえばシンクロトロン X 線吸収分光が必要であったが、ミクロン単位のデバイスを用い、かつ電気特性のみで少数分子の化学反応を検知したことが注目される。

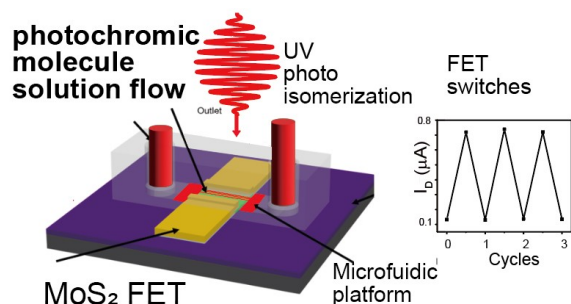


Fig.1. Schematics of TMD-FET combined with microfluid platform. Solution with photochromic molecule is delivered to a target channel.

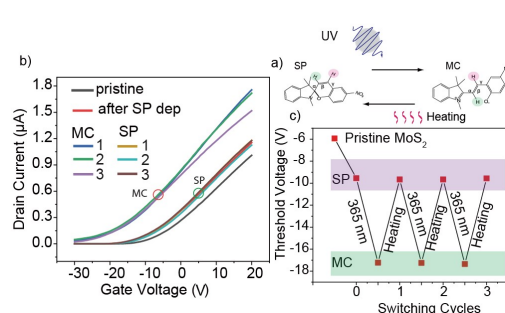


Fig.2. (a)Photochromic reaction. (b)MoS₂ FET property change with molecule adsorption. (c) Cycles of photochromic changes.

【本

研究は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業（課題番号 JPMXP1224NM0062 と JPMXP1224TU0052）の支援を受けています】

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 新材料・新原理を活用した物理リザーバーコンピューティングの社会応用に向けて

[19a-A41-1~4] 新材料・新原理を活用した物理リザーバーコンピューティングの社会応用に向けて

[19a-A41-1]

オープニング ～開催趣旨～

○神吉 輝夫¹ (1.阪大産研)

[19a-A41-2]

物理リザーバー計算能力向上のための有機無機複合材料の材料設計技術

○西田 三博¹、窪田 智之²、中嶋 浩平² (1.(株)ブリヂストン、2.東大情報理工)

[19a-A41-3]

分子ネットワークによるインマテリアルリザーバー演算

○松本 卓也¹ (1.阪大院理)

[19a-A41-4]

イオン・電子・スピンの時空間ダイナミクスを利用する物理リザーバーコンピューティング

○土屋 敬志¹、並木 航¹、西岡 大貴¹、新ヶ谷 義隆¹、寺部 一弥¹ (1.物質・材料研究機構)

物理リザーバー計算能力向上のための有機無機複合材料の材料設計技術

Materials Design Technologies for Organic-Inorganic Composites to Improve the Computational Power of Physical Reservoir Computing

㈱ブリヂストン¹, 東京大学² ○西田三博¹, 窪田智之², 中嶋浩平²

Bridgestone Co.¹, Univ. Tokyo² ○Mitsuhiro Nishida¹, Tomoyuki Kubota², Kohei Nakajima²

E-mail: Mitsuhiro.nishida@bridgestone.com

自動運転社会の到来を見越して、タイヤ自身が路面状況や荷重、及び自らの劣化や故障を教えてくれるスマートタイヤの実現が望まれており、その為にはタイヤ構成部材であるゴム自身の Physical reservoir computing(以下 PRC)としての計算能力を向上させることが必要である。今まで PRC を構成する材料や手法は数多くが提案されている¹⁾。しかし、有機無機複合材料であるゴムの内部組成や、Static/Dynamic 時の内部ダイナミクス変化は極めて複雑なため、PRC として優秀なゴムの材料設計技術については知見が無い。

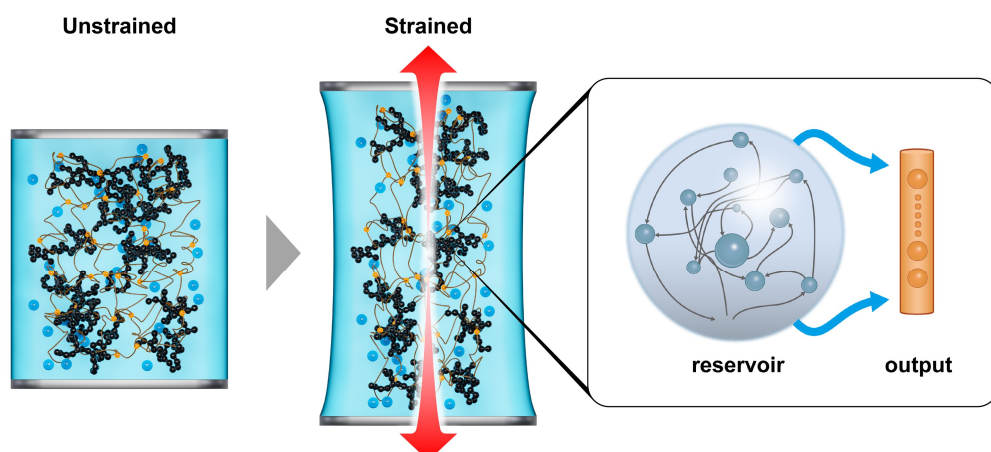


Fig. 1 Schematic diagram of the internal dynamics of rubber under applied strain and its application to physical reservoir computing.

It is thought that the electrical resistance signal from the rubber changes due to changes in the arrangement of the filler and other components when strain is applied.

そこで本講演では、ゴムの内部ダイナミクスを表現している電気抵抗及び応力からゴムの歪みを予測するタスクを作成し(Fig.1)、①窪田らが開発した²⁾ゴムの PRC 能力の内実まで評価出来る”Temporal Information Processing Capacity”手法について簡単に説明し、②この手法を用い、ゴムを構成する材料が PRC の計算能力に及ぼす影響について考察し、PRC として最適な材料の材料設計手法について解説する。

参考文献：

1) Nakajima, K. (2020). Physical reservoir computing—an introductory perspective. Japanese Journal of Applied Physics, 59(6), 060501.

2) Kubota, T., Suzuki, Y., Kobayashi, S., Tran, Q. H., Yamamoto, N., & Nakajima, K. (2023). Temporal information processing induced by quantum noise. Physical Review Research, 5(2), 023057.

分子ネットワークによるインマテリアリザバー演算

In-material reservoir computation using molecular networks

阪大院理, 松本卓也

Osaka Univ., Takuya Matsumoto

E-mail: matsumoto-t@chem.sci.osaka-u.ac.jp

近年、人間の持つ知性、認識などを計算機で実現しようとする人工知能（AI）の利用が急速に進展しているが、膨大なマシンパワーと電力が要求されるようになってきた。そこで、現在のデジタル計算機で行われているフォンノイマン型の情報処理とは異なり、脳に学んだ神経回路型（ニューロモルフィック型）の情報処理の方法が模索されている。

神経回路型情報処理は一大分野として広範な研究が行われているが、注目すべき点のひとつは、設計論的な考え方だけでなく自然計算の要素があることである。たとえば、聴覚は音の信号の波形解析を行うのではなく、蝸牛により物理的にフーリエ変換されて、各周波数の振幅値に変換される。さらに聴覚神経により各周波数の振幅は脳に伝えられるが、このとき、各周波数の信号は並列に、音の高さの順に配列された形で脳に入力される。つまり、脳における音響知覚は、まさに物理計算であるといえ、音の高さと神経ネットワークの位置関係が重要な意味を持つ。

生体や脳で行われている物理計算に学んで、人工的な物質のネットワークが持つ計算能力を開発し、外部環境のセンシングと意味抽出の計算処理を一体化させたエッジコンピューティングを行えば、AIによる計算爆発の回避にも役立つと期待できる。

本発表では分子系を中心に、神経型応答に必要な非線形特性やメモリスト特性を得るための物性論的な方法論を紹介する。さらに、これをノードとみなし、ノード間の接合を実現するためのプロセスについて議論を進める。

実例として電気伝導性有機高分子ネットワークを取り上げ、高分子における電気伝導メカニズムそのもの [1] が、本質的なリザバーを構成できることを波形生成などのベンチマークテストで示す。さらに無機ポリマーであるポリオキソメタレートがメモリスト特性を持つことを示し、実際に手書き文字認識を行う能力があることを示す。いずれの場合も、ノードとしての物性発現単位と電極の相対的な大きさ関係が、神経型物理演算能力を引き出すための鍵となっている。

謝辞

本研究の一部は JSPS-KAKEN 19KK0131 および JST-CREST JPMJCR2185 の助成により行われた。

文献

[1] J. Bao, Y. Otsuka, H. Ohoyama, and T. Matsumoto, shape-dependent conduction regime in self-doped polyaniline, J. Phys. Chem. C, vol.126, pp.8029–8036, 2022. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c10929

イオン・電子・スピンの時空間ダイナミクスを利用する 物理リザーバーコンピューティング

Physical Reservoir Computing Utilizing

Spatio-Temporal Dynamics of Ions, Electrons, and Spins

物質・材料研究機構, °土屋 敬志, 並木 航, 西岡 大貴, 新ヶ谷 義隆, 寺部 一弥

NIMS, °Takashi Tsuchiya, Wataru Namiki, Daiki Nishioka, Yoshitaka Shingaya, and Kazuya Terabe

E-mail: TSUCHIYA.Takashi@nims.go.jp

近年、深層学習に代表される機械学習が大きく発展し、様々な産業で活用される一方、機械学習によって消費される電力やクラウドとの通信量は指数関数的に増加しており、深刻な社会問題となっている。この解決のため、「物理リザーバー」と呼ばれる材料・デバイスが入力に対して示す物理現象（非線形応答）を計算資源に利用する高効率な脳型情報処理、物理リザーバーコンピューティング（PRC）が注目されており、アナログ回路、光学素子、ソフトボディ、有機分子、ナノワイヤネットワークなど多種多様な材料・デバイスの研究開発が進んでいる。我々は、材料・デバイス中のイオンや電子、スピンといった様々な情報担体が表面・界面などの微小領域で示す時空間ダイナミクスを利用した PRC の研究を行っている。例えば、リチウムやプロトンを伝導する固体電解質薄膜と半導体を組み合わせたイオンゲーティングトランジスタでは電気二重層(EDL)効果^[1-4]や酸化還元反応^[5-7]によって多様な出力が得られ、NARMA（非線形自己回帰移動平均）モデルなどの時系列パターン予測で良好な性能が得られた。EDL トランジスタ型 PRC ではリザーバー層の多層化によって一部のシミュレーション型 RC を上回る性能を得ることができた^[4]。また WO_x ナノロッドと銀ナノ粒子の界面近傍の表面増強ラマン散乱効果を用いて検出したごく少数の有機分子の分子振動変化を用いて波形変換や血糖値変化予測を行った^[8]。磁性体内のスピン波の干渉による非線形応答を多端子検出し^[9,10]、さらに光励起^[11]やイオンゲーティング^[12]で高次元化することで NARMA モデルや Mackey-Glass 方程式によるカオス時系列などを高精度に予測することができた。本研究の一部は JST さきがけ(JPMJPR23H4)、防衛装備庁安全保障技術研究推進制度(JPJ004596)の助成を受けて遂行された。

【参考文献】

- [1] D. Nishioka, W. Namiki et al., Sci. Adv. 8, eade1156(2022). [2] M. Takayanagi, D. Nishioka et al., Mater. Today Adv. 18, 100393 (2023). [3] Y. Yamaguchi, D. Nishioka et al., Appl. Phys. Express. 17, 024501(2024). [4] D. Nishioka et al., Commun. Eng. (in press). [5] T. Wada, D. Nishioka et al., Adv. Intell. Syst. 5, 2300123(2023). [6] K. Shibata, D. Nishioka et al., Sci. Rep. 13, 21060(2023). [7] W. Namiki, D. Nishioka et al., Nano Lett. 24, 4383 (2024). [8] D. Nishioka, Y. Shingaya et al., Sci. Adv. 10, eadk6438 (2024). [9] W. Namiki, D. Nishioka et al., Adv. Intell. Syst. 5, 2300228 (2023). [10] W. Namiki et al., Neuromor. Comp. Eng. (in press). [11] W. Namiki, Y. Yamaguchi et al., Mater. Today Phys. 45, 101465(2024). [12] W. Namiki et al., (submitted)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 新材料・新原理を活用した物理リザバーコンピューティングの社会応用に向けて

[19p-A41-1~6] 新材料・新原理を活用した物理リザバーコンピューティングの社会応用に向けて

[19p-A41-1]

絶縁性磁性体膜を連続媒質型リザバーに利用した機械学習コンピューティング

○中根 了昌^{1,2} (1.東大d.lab、2.東大電気系)

[19p-A41-2]

スピン波による物理リザバー計算の理論的解析

○義永 那津人^{1,3,5}、飯浜 賢志²、小池 雄也⁴、水上 成美³ (1.はこだて未来大情報、2.名古屋大工、3.東北大AIMR、4.東北大工、5.産総研MathAM-OIL)

[19p-A41-3]

シリコンCMOS物理リザバーコンピューティング

○浅井 哲也¹ (1.北大情科院)

[19p-A41-4]

リザバーコンピューティングによる複雑時系列パターン認識

○田中 剛平¹ (1.名工大工)

[19p-A41-5]

社会応用が期待されるマテリアルリザバー演算素子

○田中 啓文^{1,2} (1.九工大生命体工、2.九工大Neumorphセンター)

[19p-A41-6]

クロージング

○葛西 誠也¹ (1.北大)

絶縁性磁性体膜を連続媒質型リザーバーに利用した 機械学習コンピューティング Machine-learning computing utilizing an insulating magnetic film as a continuous-media-type reservoir

東大工学系 d.lab¹, 電気系²

中根了昌^{1,2}

¹Systems Design Lab, ²Department of Electrical Engineering and Information Systems,
Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo
Ryosho Nakane^{1,2}

再帰型ニューラルネットワークを用いた機械学習コンピューティングの一つであるリザーバーコンピューティング (RC) は、調整パラメータを持たない「リザーバー」と呼ばれる系列データ入出力変換の溜池を用いる [1, 2]。この特徴によって、リザーバーから出力層に接続された結合重みのみを線形回帰により最適化することで、様々な時系列データの情報処理が可能となる。ここでリザーバーの機能性は、短期的記憶を持ちながら 1 次元系列データを高次元空間に非線形写像することである。物理 RC は、こうしたリザーバーの機能性を自然に潜在する非線形物理ダイナミクスによって置き換えた「物理リザーバー」を実現する試みで、これまで様々な物理系を用いたコンピューティングが原理実証されている [3, 4]。物理リザーバーは、簡便な電子デバイス等でも実現が可能であることから、次世代超低消費電力エレクトロニクスを目指した電子デバイス・回路分野における物理 RC の研究が活性化してきている。

物理 RC システムは利用する物理リザーバーに依存して、ネットワーク型、フィードバック型、ヒステリシス型、連続媒質型、のシステムに分類することができる [5]。ここで連続媒質型とは、物理量が外部刺激によって応答し、しばらくすると元に戻る興奮性媒質を物理リザーバーに利用したシステムを示す。代表例は、物理 RC 黎明期において報告された、文字通りの物理リザーバー「バケツ中の水」を利用したシステムである [6]。内部配線の無い非常に簡便な物理リザーバーであるため拡張性と高性能化のポテンシャルが高いが、自由度が高い反面、システム設計の見通しが立ちづらい困難があり、他の型に比べると報告例は多くない。一方、時系列入力が励起する時空間に分布した非線形ダイナミクスを利用するこの型は、物理 RC の計算原理を具現化しているといえる。このことから、物理 RC 計算原理の深い理解に役立つ「物理ダイナミクスと計算性能の関係解明」や、工学的発展のために必要な「物理 RC システム設計法の確立」につながる知識と技術を集積していくには、優れた系のひとつであると考えている。

これまで、物理シミュレーションをベースとした計算実験によって、局所電子スピンの興奮性媒質となる連続様な絶縁性磁性体膜をリザーバーに用いた 1 入力多出力電子デバイスを提案し、研究を行ってきた [7-9]。利用する物理量は局在電子スピンの 1 方向成分である。デバイス動作原理は、磁性体膜中心に位置する入力電極の局所において励起された運動はスピン波となって連続空間を伝播し、空間に分布した多数の検出器によってスピンの時系列出力信号を得ることである。この単純な系において、短期記憶性、非線形性、高次元性という写像の要求仕様をどのように満たして情報処理タスクの計算性能を高めていくかを探究してきた。短期記憶と非線形現象を同時に満たし短期記憶性と非線形性につなげるには物理系の過渡応答を利用することが有用であることから [5]、スピン歳差運動の緩和時間を見積もり、RC 計算の離散時間ステップとの対応関係を多数試行した。また、1 つの時系列入力から多様な時系列出力信号を得て高次元性につなげるためには、ダイナミクスの空間分布を生み出す仕掛けが必要であり、非線形現象が起こりやすい小さな外部磁場を用いること、スピン波の反射と干渉を多数起こすと同時に非線形現象を導入するためにストライプ磁区を利用すること、外部磁場によりダイナミクスを操作して出力信号を変化させること、などの工夫を駆使した。計算実験の利点を活かし、こうした数々のパラメータ設定に対してタスク計算性能がどのように変化するかに関連性を調べた。これと同時に、物理現象の特徴量抽出に基づく考察を行うことで、どのような非線形物理現象が有用であるかを見出しつつある。

講演ではスピンを用いた物理 RC の結果とともに、それにより見出された物理現象と計算原理との関係の考察、計算性能を高めるヒントとなるシステム設計の技術、などについても紹介をおこなう。

参考文献 [1] H. Jaeger, GMD Technical Report **148**, 13 (2001). [2] W. Maass, T. Natschläger, and H. Markram, Neural Comput. **14**, 2531 (2002). 706 [3] G. Tanaka, et al., Neural Netw. **115**, 100 (2019). [4] K. Nakajima, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 060501 (2020). [5] 田中, 中根, 廣瀬, リザーバーコンピューティング, 森北出版, 2021 年. [6] C. Fernando and S. Sojakka, European Conf. Artificial Life, 588 (2003) [6] R. Nakane, G. Tanaka, and A. Hirose, IEEE ACCESS **6**, 4462 (2018). [7] R. Nakane, A. Hirose, and G. Tanaka, Phys. Rev. Res. **3**, 033243 (2021). [8] R. Nakane, A. Hirose, and G. Tanaka, Phys. Rev. Appl. **19**, 034047 (2023).

スピン波による物理リザーバー計算の理論的解析

Theoretical analysis of physical reservoir computing using spin waves

はこだて未来大情報¹, 名古屋大工², 東北大 AIMR³, 東北大工⁴, 産総研 MathAM-OIL⁵,

○義永 那津人^{1,3,5}, 飯浜 賢志², 小池 雄也⁴, 水上 成美³

Future Univ. Hakodate¹, Nagoya Univ.², Tohoku Univ.³, AIST⁴,

○Natsuhiko Yoshinaga^{1,3,4}, Satoshi Iihama², Yuya Koike³, Shigemi Mizukami³

E-mail: yoshinaga@fun.ac.jp

近年、ナノメートル、ギガヘルツで動作する省電力人工知能の実現に向けてスピントロニクスの技術を用いた脳型計算機の物理実装が注目を集めている。その中で、リザーバー計算はニューラルネットワーク内部の重みを調整せずに学習を行うことができるため、物理実装の有望な手法となっている。これまでにスピントルク発振器やスピン波を内部層として用いた物理リザーバー計算機が実験的に報告されてきたが、短期記憶容量などの学習性能は他の物理系である光リザーバーに比べて劣っているのが現状である。スピントロニクスを使ったりリザーバー計算の高性能化には、スピンダイナミクスがどのように学習性能と結びついているのかを明らかにする必要がある。そこで、本研究では、ナノスケールにおける高性能なスピン波リザーバー計算をマイクロマグネティックシミュレーションによって実証し、理論的な解析を行うことで高い学習性能に必要な条件を明らかにすることを目的とする。

図(c)に本研究で考えるスピン波のシステムを示す。入力と出力を兼ねたノードにおいて、入力となる時系列に比例する強度でスピン注入トルクによりスピンダイナミクスを励起し、発生したスピン波を出力ノードで読み出す。リザーバー計算による時系列データの学習では、入力の時系列から、過去の時刻のデータを読み出したり（記憶）、未来のデータの予測などのタスクを行うことができる（図(a)）。スピン波のダイナミクスを記述する Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式から、入力に対する応答を計算することで、入力した情報が他のノードにどのように伝わるのかを解析した（図(b)）。その結果、ノード間の距離の最大値を特徴的なシステムサイズとした時に、このサイズとスピン波の電波速度との間に比例関係がある時に学習性能が最大になることを見出した。講演では、マイクロマグネティックシミュレーションの結果とともに、スピン波によるリザーバー計算の学習のメカニズムについて議論する。

[Ref.] Satoshi Iihama, Yuya Koike, Shigemi Mizukami, Natsuhiko Yoshinaga, *npj Spintronics*, **2**, 5 (2024).

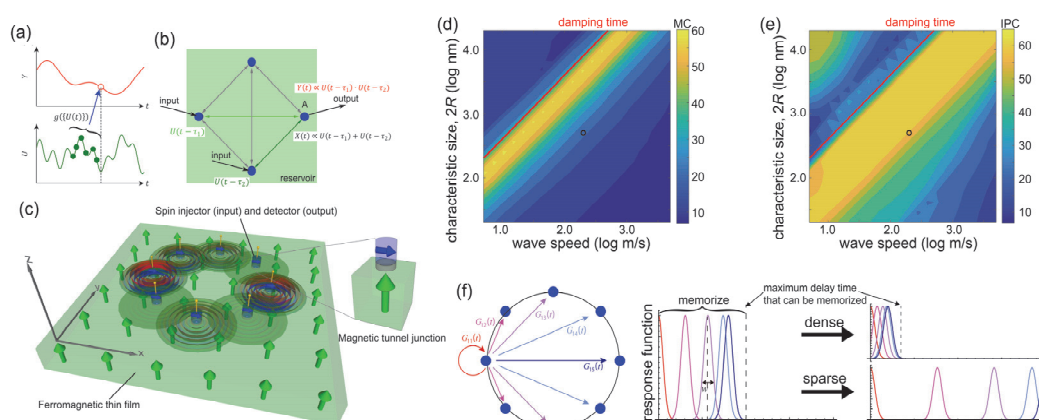


Fig. (a-c) Schematics of our physical reservoir computing system using spin waves. (d,e) The linear (MC, d) and nonlinear (IPC, e) memory capacity obtained from our theoretical analyses of the Landau-Lifshitz-Gilbert equation. (f) Schematics of propagation of information from an input to output nodes with different delay time.

シリコン CMOS 物理リザーバコンピューティング

Silicon CMOS Physical Reservoir Computing

北大情科院 浅井 哲也

Hokkaido Univ., Tetsuya Asai

E-mail: asai@ist.hokudai.ac.jp

シリコン CMOS デバイスで構成されたアナログおよびデジタルリザーバとそのオンライン学習器からなる物理リザーバコンピューティングの概要と応用例を紹介する。CMOS リザーバ・学習器は、性能目標を設定した上で、ボトムアップで回路を構築できる特徴を持っている。限られたハードウェアリソース（CMOS 素子、面積、電力）の範囲内で、リザーバコンピュータとしての性能を最大化するための様々な工夫が込められている。

まず、北大の物理リザーバを紹介する。具体的には、以下の3つのタイプがある：

1. アナログ CMOS リザーバ[1]：省回路面積と低消費電力を重視し、アナログ CMOS デバイスでリザーバを構成
2. 低～中速演算用デジタル CMOS リザーバ[2]：様々なタスクに適応できる非線形性を持ち、内部重みを自動生成するデジタル CMOS リザーバ。重みパラメータを保存するメモリが不要
3. 高速演算用デジタル CMOS リザーバ[3]：高速演算・リアルタイム処理に特化したデジタル CMOS リザーバ

次に、北大のリザーバオンライン学習器を紹介する。以下の2つのタイプがある：

1. フォグ・クラウド向け超高速 FORCE 学習エンジン[4]：シストリックアレイによる高速な学習を実現するが、コストが高く回路面積も大きい。
 2. エッジ向け学習エンジン[5]：アンサンブルカルマンフィルタを用いた省面積・低電力・低コスト（しかし低スループット）の学習エンジンで、エッジデバイス向けに適している
- 最後に、これらの CMOS リザーバの実応用例と今後の展望について述べる。

参考文献

1. Abe Y., et al., *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, 10966 (2024).
2. Abe Y., et al., *Nonlinear Theory and Its Applications*, vol. E15-N, no. 2, pp. 262-272 (2024).
3. Abe Y., et al., *Int. J. Parallel, Emergent and Distributed Syst.*, vol. 39, no. 2, pp. 197-213 (2024).
4. Yoshida K., et al., *Journal of Signal Processing*, vol. 26, no. 4, pp. 103-106 (2022).
5. 玉田 洸太, 阿部 佑紀, 浅井 哲也, "アンサンブルカルマンフィルタのストリーミングハードウェアアーキテクチャ," 電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス研究会 (CCS), 富山県立大学, (富山), 2023 年 11 月 11-12 日.

リザーバーコンピューティングによる複雑時系列パターン認識

Complex time series pattern recognition with reservoir computing

名工大工¹ °田中 剛平¹

Nagoya Institute of Technology¹, °Gouhei Tanaka¹

E-mail: gtanaka@nitech.ac.jp

リザーバーコンピューティングは簡便で高速な機械学習を可能とする枠組みであり、時間方向の依存性をもつ時系列データのパターン認識に適している[1]。リザーバーによる情報変換は、**excitability** をもつさまざまな物理系の過渡応答を利用して実現することができ、各種物理系を基盤とした物理リザーバーコンピューティングの研究が著しく進展してきている[2]。特定の物理リザーバーコンピューティングデバイスの性能向上には、情報符号化・復号手法、信号の前処理・後処理手法、信号検出手法などの実装面での直接的な工夫が鍵となる[3]。

一方で将来の社会応用を念頭におくならば、数理モデル・アルゴリズム研究で見出された知見の導入や対象とする物理系の特性に好適な応用の考案なども必要となるだろう。本講演では、リザーバーコンピューティングの数理的研究における近年の発展を概観しつつ、複雑な時系列データの予測・分類・異常検知等の具体的な応用事例を紹介する[4,5,6]。これらを踏まえて、IoT 社会でのリザーバーコンピューティングの活用方法と課題について議論する。

- [1] 田中 剛平, 中根 了昌, 廣瀬 明, リザーバーコンピューティング: 時系列パターン認識のための高速機械学習の理論とハードウェア, 森北出版 (2021).
- [2] G. Tanaka, T. Yamane, J. B. Heroux, R. Nakane, N. Kanazawa, S. Takeda, H. Numata, D. Nakano, and A. Hirose, Recent Advances in Physical Reservoir Computing: A Review, *Neural Networks*, vol. 115, pp. 100-123 (2019).
- [3] G. Tanaka and R. Nakane, Simulation platform for pattern recognition based on reservoir computing with memristor networks, *Scientific Reports*, vol. 12, 9868 (2022).
- [4] Z. Li, Y. Liu, and G. Tanaka, Multi-Reservoir Echo State Networks with Hodrick-Prescott Filter for Nonlinear Time-Series Prediction, *Applied Soft Computing*, vol. 135, 110021 (2023).
- [5] H. Tamura, K. Fujiwara, K. Aihara, and G. Tanaka, Mahalanobis distance of reservoir states for online time-series anomaly detection, *Authorea Preprints* (2023).
- [6] Z. Li, K. Fujiwara, and G. Tanaka, An Echo State Network-Based Method for Identity Recognition with Continuous Blood Pressure Data, *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN)*, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 14257, pp.13-25 (2023).

謝辞: 本研究の一部は **JSPS 科研費 (23K28154)**, **ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2021)**, **JST-CREST (JPMJCR19K2)**, 東京大学社会連携部門「モビリティ知能社会デザイン」の助成を受けたものである。

社会応用が期待されるマテリアルリザーバー演算素子

Material Reservoir Computing Devices with Promising Social Application

九工大生命体工¹, 九工大 Neumorph センター² ○田中 啓文^{1,2}

Kyushu Institute of Technology¹, Hirofumi Tanaka¹

E-mail: tanaka@brain.kyutech.ac.jp

近年、ソフトウェアを使用した深層学習(DL)の計算能力の向上が目覚ましい。それに伴い、人工知能(AI)の実用化は急速に広がり、社会全体に発展的影響を与えている。しかしながら、電力消費量の大きさも問題になっており、高効率AI演算モデルが必要とされている。その一つとして注目されているリザーバー演算(RC, Fig.1(a))は学習時における人工ニューラルネットワーク中間層各層における重み更新が、リザーバー内では非線形ノードを導入することで固定化され、出力信号の線形和部分でのみ学習するため高効率になる。このリザーバー層が非線形ノードのランダムネットワーク(RNW)であることに注目し、ジャンクション部分が非線形性を示す導電性ナノマテリアルの RNW に置換したものをマテリアルリザーバーと呼ぶ。この場合、情報を電気信号として導入することによりリザーバーはアナログ素子として働き、出力信号が演算済みの状態で得られ、さらなる省エネルギー化が期待される。

我々は RNW 用マテリアルとして、原子スイッチにも使われる Ag_2S のナノワイヤ(NW)ネットワークのほか、 Ag_2Se -NW[1]、 Ag_2S ナノ粒子[2,3]、カーボンナノチューブネットワーク[4]などを用いた。他にもポリマー[5]など有機物やイオン伝導体を用いることもある。消費電力から換算すると 100TOPS/W 程度と考えられ、これは欧州のグループの提案デバイスの試算[6]とほぼ同じ値である。マテリアルリザーバーはノード数を圧倒的に大きく取れ、将来の性能向上により 1 デバイス当たりのノード数 10^8 - 10^9 程度に増加させることができると試算されており、拡張性が高い。当日はデータ拡張[7]、システム拡張[8]、インセンサ演算[9,10]などロボット応用など社会的貢献が期待される応用例も紹介する。

謝辞 本研究に対する JST ALCA-Next、JST CREST、JSPS 科研費などの研究資金援助や、マテリアルリザーバー研究に携わって頂いた全共同研究者、研究室のスタッフ・学生・OB・OG に感謝申しあげる。

参考文献 [1] T. Kotooka, H. Tanaka et al., *Nature Portfolio*, archive (2021). DOI: 10.21203/rs.3.rs-322405/v1. [2] Hadiyawardman, H. Tanaka et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 60, SCCF02 (2021). [3] T. T. Dang, H. Tanaka et al., *Appl. Phys. Lett.* 124, 091903 (2024). [4] D. Banerjee, H. Tanaka et al., *Adv. Intell. Syst.* 4, 2100145 (2022). [5] Y. Usami, H. Tanaka et al., *Adv. Mater.* 33, 2102688 (2021). [6] S. Bose et al., *Nat. Nanotechnol.* 10 1048 (2015). [7] T. Kotooka, H. Tanaka et al., *Appl. Phys. Express*, 16, 014002 (2023). [8] Y. Tanaka, H. Tanaka et al., *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2023)*, 2056, (2023). [9] K. Kimizuka, H. Tanaka et al., *arXiv:2406.03958v1*. [10] 君塚、2024 年 3 月応用物理学会講演奨励賞受賞

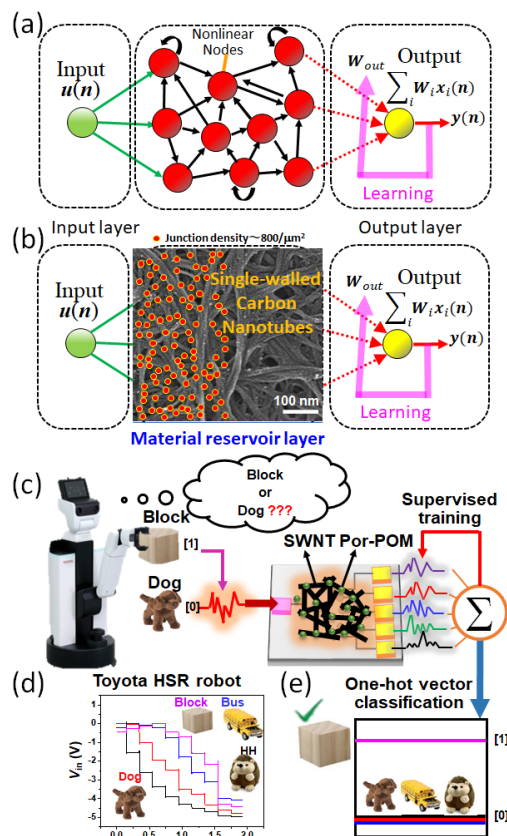


Fig. 1 (a) Reservoir network. All nodes with nonlinearities are connected randomly. The computation of the intermediate layer is treated as a black box, so there is no need for training. Learning is performed only in the output layer. (b) Material reservoir using SWNT. Junction density was about $800/\mu\text{m}^2$. (c) Stepwise object binary classification using a single-walled carbon nanotube (SWNT)/porphyrin (Por-) POM reservoir device. Toyota's human-assist-robot (left) with a schematic of the arm connected to the gripper via force sensors collects tactile data from changes and the grasping force applied to the objects block and dog. Signal obtained by the sensor input to the SWNT (black line)/Por-POM (green circle) reservoir with recurrent connections (red arrow) (upper right) (d) Time-series inputs obtained from different objects (i.e., Hedgehog (HH), dog, bus, block) input separately. (e) One-hot vector coding was used for binary classification. The lines in the graph represent the respective target signals for HH, dog, bus, and block, respectively. Modified from original article [4].

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：原子間力顕微鏡による有機・生体システム計測の技術的進歩と未来展望

[19p-A24-1~6] 原子間力顕微鏡による有機・生体システム計測の技術的進歩と未来展望

[19p-A24-1]

原子間力顕微鏡：有機・バイオ計測の現状と今後の展開

○山田 啓文^{1,2,3} (1.京都技術科学センター、2.龍谷大、3.京都大)

[19p-A24-2]

S P M技術の進歩と有機・バイオ試料観察

○繁野 雅次¹ (1.株式会社日立ハイテク)

[19p-A24-3]

液中FM-AFMによる有機・生体分子の構造・物性・機能計測

○小林 圭¹ (1.京大工)

[19p-A24-4]

有機分子・バイオシステムの液中3次元AFM解析

○福間 剛士¹ (1.金沢大)

[19p-A24-5]

高速原子間力顕微鏡の技術革新と応用展開

○内橋 貴之^{1,2} (1.名大理、2.ExCELLS)

[19p-A24-6]

原子間力顕微鏡を用いた高分子ナノメカニクスの進展

○中嶋 健¹ (1.東工大物質)

原子間力顕微鏡：有機・バイオ計測の現状と今後の展開

Atomic Force Microscopy: Present status and future prospect in organic, bio-material fields

京都技術科学センター¹, 龍谷大², 京都大³, °山田 啓文^{1,2,3}

Kyoto Technosci. Center¹, Ryukoku Univ.², Kyoto Univ.³, °Hirofumi Yamada^{1,2,3}

E-mail: h-yamada@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

「触診」は、医療診断の原点とも言うべきもっとも原初的な探索法であるが、この手法を現代科学技術の粋を集めて顕微法として発展させたものが「原子間力顕微鏡」だと言っても全く過言ではないだろう。触り方も、当初は極めて単純な接触法から、軽く触れる間欠接触（タッピング）法に、さらには、超能力かと思う非接触法までに至ることになり、今や、原子・分子レベルで生体試料を観察しても不思議でなくなったことに返って感慨を覚える。本講演では、有機・生体分子試料の AFM 観察・計測の現状を述べるとともに、その課題と今後の展開について議論したい。

2. AFM イメージング法

AFM では、試料表面の各点 (x, y) で得られた力 (F) 、あるいは設定した力が得られる位置 (z) のマッピング像を取得する計測法である。非破壊での高感度の力検出を可能とするために、単純な接触法は、低雑音・高感度な振幅変調 AFM (AM-AFM) や周波数変調 AFM (FM-AFM) となることが一般的になった。この流れは、通信伝送の分野で（従って計測分野でも）、ベースバンド伝送が、AM、FM 伝送に移行したことに対応しており、雑音解析の点で非常に興味深い。現在の装置の多くは、理論感度である熱雑音レベルに迫る性能を有しており、安定な高分解能イメージングが実現し、イメージング時間の高速化も図られている[1-3]。

3. フォース分光法 (Force Spectroscopy)

イメージングにおいては、特定の z での F が使用されたが、探針-試料間相互作用力には、試料の重要な物性・機能情報が含まれることから、フォースカーブ $F(z)$ の計測がフォース分光法として発展する。特に、生体分子間の特異結合の解析への応用は動的分光法 (DFS) へと展開し、高分解能な空間マッピング法へと発展することになる。また、試料の粘弾性分布の評価法である Force Volume 法も同時期に発展した。現在、フォースマッピング法にはいくつか異なる方法があり、さまざまな応用が進んでいる。講演において詳細を解説したい。

4. おわりに

現在、2 でも触れたように、装置改善が進んだ結果、測定対象・条件によっては、今や必ずしも共振法は必須ではないように思われるが、高感度化のための変調法は依然有効であり、詳細な解析・議論が待たれる。また、今後の課題である、液中サブ分子分解能イメージング、タンパク質ドメイン電荷分布の可視化、NC-AFM における安定な探針などについても新たな展開を期待したい。

Reference

- [1] “Noncontact Atomic Force Microscopy Vol. 3” eds. S. Morita, F. J. Giessibl et al., Springer (2015.6).
- [2] “走査型プローブ顕微鏡入門” 秋永広幸監修, 秦信宏編, オーム社 (2013.8).
- [3] “Applied Scanning Probe Methods VI”, eds. B. Bhushan, S. Kawata, Springer (2016.7).

SPM技術の進歩と有機・バイオ試料観察

Advances in SPM technology and the observation of organic and biological samples

日立ハイテク ○繁野 雅次,

Hitachi High-Tech Corporation, ○Masatsugu Shigeno

E-mail: masatsugu.shigeno.kk@hitachi-hightech.com

<はじめに>

有機・バイオの世界をひも解く時、その第一歩は見ることよりはじまります。機能と形態の間には必然的な関係があり、研究者は見えるもの（見ることができる事象）より考え、観たいもの（観察したいイメージ）を推測し、見ることにより実証します。良く使用されていた光学顕微鏡、電子顕微鏡など種々の観察装置に加え、1980年代に発明されたSPM（走査型プローブ顕微鏡）は、新しい観察・分析方法を提供し、多様な現象を捉えることを可能としてきました。

<有機・バイオ観察でのSPMの特徴>

- ・電子顕微鏡では観察が難しい軽元素を含む有機・バイオ試料の直接観察
- ・溶液中、ガス中などでの、活性な状態でのその場観察
- ・最表面の高分解能形状と物性の同時観察
- ・ナノ領域でのマニピュレーション

など、これまでの顕微鏡にはなかった特徴を持っています。

<有機・バイオ観察での課題>

当初のSPMは、高分解能観察に特化した装置が多く、広範囲を低ダメージかつ高速で観察するのが不得意でした。コンタクトモードのAFMで、ソフトな有機・バイオ試料を観察すると、ダメージの発生や探針への汚れの付着などの課題もありました。レバーを共振状態にして、ノンコンタクトやサイクリックコンタクトによる動作、測定点のみで接近する間欠的な測定手法が開発され、上記課題を乗り越え応用範囲が拡大してきました。試料の原子・分子の種類を検出するために、IRやラマンとの同時測定や、同一箇所の座標情報を共有した分析装置との組み合わせへの応用も進み、新しい世界を見せてくれるように進歩してきました。

<SPMの可能性>

SPMは、微小領域を走査し形状と物性を直接検出するミクロな指を、私たちに提供してくれます。このような指があったらどんな事ができるか、今までに考えも及ばなかった様々な測定を創造する力が、今後のSPMの発展に最も重要だと思っています。今までSPM測定に関係なかった分野であっても、ナノテクノロジー技術の発展によりその恩恵を受ける日がやってくるでしょう。原子・分子スケールでの三次元形態観察に加え、色々な物性を同時に測定する技術の必要性は、ますます高まると信じています。

「見えるにあらず、観たい思い、視るを成し遂げる」観察したい熱い思いを胸に・・・

液中 FM-AFM による有機・生体分子の構造・物性・機能計測

Surface structures, properties, and functions of organic and biomolecules

investigated by liquid FM-AFM

京大工¹, [○]小林 圭¹

Kyoto Univ.¹, [○]Kei Kobayashi¹

E-mail: keicoba@iic.kyoto-u.ac.jp

周波数変調型原子間力顕微鏡 (Frequency-modulation atomic force microscopy: FM-AFM) は、振幅変調 (Amplitude Modulation: AM) 型のダイナミックモード AFM を真空中で用いる際に、カンチレバーの機械的 Q 値が高くなり測定帯域が大きく制限されてしまう問題を克服するために開発された技術であり、カンチレバーを常に共振周波数で振動させてカンチレバーの共振周波数のシフトから相互作用力を検出する手法である[1]。われわれは、カンチレバーの Q 値が極端に低下する液中であっても FM-AFM 動作させることができることを示し[2]、光てこ変位検出系のノイズ低減等の要素技術開発を行い、原子・分子分解能を達成した[3,4]。

現在、液中 FM-AFM は有機分子や生体分子の高分解能観察[5,6]や生体分子間相互作用計測[7,8]に利用されているほか、観察液中での観察液と試料表面との界面（固液界面）の水和・溶媒和構造計測[9,10]にも応用されている。本講演では、FM-AFM の原理と開発の歴史、DNA・タンパク質・脂質膜等の高分解能観察、水和構造計測、生体電荷分布や弾性率分布などの物性計測の事例を紹介するとともに、今後の展望について述べる。

1. T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne, and D. Rugar, *J. Appl. Phys.* **69**, 668 (1991).
2. K. Kobayashi, H. Yamada, and K. Matsushige, *Appl. Surf. Sci.* **188**, 430 (2002).
3. T. Fukuma, K. Kobayashi, K. Matsushige, and H. Yamada, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 193108 (2005).
4. T. Fukuma, K. Kobayashi, K. Matsushige, and H. Yamada, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 034101 (2005).
5. H. Yamada, K. Kobayashi, T. Fukuma, Y. Hirata, T. Kajita, and K. Matsushige, *Appl. Phys. Express* **2**, 095007 (2009).
6. S. Ido, K. Kimura, N. Oyabu, K. Kobayashi, M. Tsukada, K. Matsushige, and H. Yamada, *ACS Nano* **7**, 1817 (2013).
7. S. Ido, H. Kimiya, K. Kobayashi, H. Kominami, K. Matsushige, and H. Yamada, *Nat. Mater.* **13**, 264 (2014).
8. H. Kominami, Y. Hirata, H. Yamada, and K. Kobayashi, *Nanoscale Adv.* **5**, 3862 (2023).
9. K. Kobayashi, N. Oyabu, K. Kimura, S. Ido, K. Suzuki, T. Imai, K. Tagami, M. Tsukada, and H. Yamada, *J. Chem. Phys.* **138**, 184704 (2013).
10. K. Umeda, L. Zivanovic, K. Kobayashi, J. Ritala, H. Kominami, P. Spijker, A. S. Foster, and H. Yamada, *Nat. Commun.* **8**, 2111 (2017).

有機分子・バイオシステムの液中3次元AFM解析

3D-AFM Analysis of Organic-Molecular or Biological Systems

金沢大学 NanoLSI¹ ○福間 剛士¹

WPI-NanoLSI, Kanazawa Univ.¹

E-mail: fukuma@staff.kanazawa-u.ac.jp

近年、固液界面で探針を3次元的に走査し、その間に探針に印加される力を記録する、3次元AFM (3D-AFM) 技術が開発され、固液界面の水和構造観察などに利用されている¹⁾。この計測では、探針を水和構造内に挿入する際に、その構造を部分的には破壊してしまう。しかし、探針を除去した際に、水分子が自己組織的に元の構造を構築するために、繰り返し探針を挿入・抜去し、本来の水和構造を強く反映した情報が得られる。逆に言えば、自己組織化能力のある3次元構造、すなわち3次元自己組織化構造 (3D-SOS) であれば、その内部を観察できる可能性がある。

我々は、この考えに基づき、近年様々な3D-SOSの観察に取り組んできた。例えば、脂質膜／水界面において熱揺動する脂質頭部の3次元密度分布や²⁾、サファイア表面における界面活性剤の3次元吸着構造³⁾などをサブナノスケールの分解能で可視化した。これらの計測では、計測対象の厚みが2 nm以下であったため、市販のAFM探針の先端に偶発的に存在するナノスケールの突起構造で3次元観察が可能であった。しかし、それ以上の厚みを持つ3D-SOSの観察には、その構造を大きく乱すことなく挿入できる、細長いニードル状の探針が必要である。

この考えに基づいて、我々はナノ内視鏡AFMを開発した。この技術では、あたかも細長い胃カメラを生きた人体に挿入して胃壁を観察するように、細長いニードル状のAFM探針を生きた細胞の内部に挿入し、細胞内のナノ構造・動態・力学物性を計測する。我々はこれまでに、細胞全体や、細胞核、アクチン繊維、細胞の裏打ち構造、接着斑などの3D-AFM観察に成功している。⁴⁾さらに、細胞核や接着斑表面の硬さ分布やその動的な変化も捉えることに成功している。

ナノ内視鏡AFMの開発は、適切なニードル探針さえ作ることができれば、たとえ厚さが数 μm に及ぶ3D-SOSであってもその内部をAFM観察できることを実証した。ただし、数nmの厚みを持つ界面構造と数 μm の厚みを持つ細胞の間には、数多くの3D-SOSが未だ観察できないまま残されている。特に、生命科学分野では、ほとんどの生命システムが生体分子の自己組織化で形成されており、その多くが3D-AFMの観察対象となり得る。我々は、FIB切削探針、電子線堆積探針、カーボンナノチューブ探針など、様々なサイズのニードル探針を作製し、それらの3D-SOSの3次元観察を目指した開発に取り組んでいる。

1) T. Fukuma, Y. Ueda, S. Yoshioka, and H. Asakawa, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 016101 (2010).

2) H. Asakawa, S. Yoshioka, K. Nishimura, and T. Fukuma, *ACS Nano*. **6**, 9013 (2012).

3) T. Ikarashi, K. Nakayama, N. Nakajima, K. Miyata, K. Miyazawa, and T. Fukuma, *ACS Appl Mater Interfaces*. **14**, 44947 (2022).

4) M. Penedo, K. Miyazawa, N. Okano, H. Furusho, T. Ichikawa, S. Alam Mohammad, K. Miyata, C. Nakamura, and T. Fukuma, *Sci. Adv.* **7**, eabj4990 (2021).

高速原子間力顕微鏡の技術革新と応用展開

High-Speed Atomic Force Microscopy: Technological Advancements and Applications

名大理, ExCELLS 内橋 貴之

Nagoya Univ., ExCELLS, Takayuki Uchihashi

E-mail: uchihast@nagoya-u.jp

原子間力顕微鏡(AFM)を用いたダイナミクス観察は、AFM の発明直後の 1986 年から多くの試みが行われてきた。1989 年には、血液凝固因子であるフィブリノーゲンの重合過程が 10 秒の時間分解能で観察された例もある¹⁾。1990 年代にも、10 秒~1 分程度の時間分解能で DNA やタンパク質を観察した報告がいくつかあるが、この時間分解能で追跡できる溶液下のダイナミクス現象が限られていたことと、試料にダメージを与えずに非侵襲的に高速イメージングすることの技術的困難さから、応用分野はかなり限定的であった。

AFM の高速化に向けた要素技術開発は、スキャナーやカンチレバーを中心に世界中のグループで進められてきた。2001 年に金沢大学の安藤教授から報告された高速 AFM は、80 ms/frame という従来の AFM より圧倒的に速い時間分解能でのイメージングを達成し、タンパク質の構造を破壊しない非侵襲性を兼ね備えているという点で画期的であった²⁾。その後も非侵襲観察に向けた様々な技術改良が継続され、2008 年頃に現行性能の高速 AFM がほぼ確立した。以降、15 年近くにわたってタンパク質や核酸などの生体分子を対象としたダイナミクスイメージングに応用され、数々の成果が挙げられてきた^{3,4)}。近年ではユーザーも増加し、関連論文数は増加の一途をたどっている。

最近では、生体分子以外の人工高分子の動態観察にも高速 AFM が適用され始め、高分子分野への応用範囲が拡大している。また、試料の表面構造イメージングにとどまらず、プローブからの外力を利用した構造操作⁵⁾、局所力学特性の定量計測⁶⁾やマッピングも可能になってきている。さらに、高速 AFM の高フレームレート撮像性能を活用することで、局在化 AFM と呼ばれる超高解像イメージング技術への応用が可能となっている⁷⁾。局在化 AFM では、高速 AFM によって得られる大量の画像データを用いることで、単一分子の動態を超高解像度で可視化することができる。この手法は、生体分子の機能メカニズムの解明や、ナノスケールでの材料特性の評価など、幅広い分野での応用が期待されている。

本発表では、高速 AFM の生体分子応用の研究を紹介しつつ技術の進展について概説する。加えて、最近の合成分子のダイナミクス計測や機能拡張に関する開発動向についても述べる。

- 1) B. Drake, H. Hansma, D. Cannell, A. Weisenhorn, S. Gould, C. Quate, P. Hansma, T. Albrecht, and C. Prater, *Science* **243**, 1586 (2006).
- 2) T. Ando, N. Kodera, E. Takai, D. Maruyama, K. Saito, and A. Toda, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **98**, 12468 (2001).
- 3) T. Ando, T. Uchihashi, S. Scheuring, *Chem. Rev.* **114**, 3120 (2014).
- 4) G. R. Heath, S. Scheuring, *Curr. Opin. Struct. Biol.* **57**, 93 (2019).
- 5) T. Fukui, T. Uchihashi, N. Sasaki, H. Watanabe, M. Takeuchi, and K. Sugiyasu, *Angew. Chemie Int. Ed.* **57**, 15465 (2018).
- 6) C. Ganser and T. Uchihashi, *Nanoscale* **11**, 125 (2019).
- 7) G. R. Heath, E. Kots, J. L. Robertson, S. Lansky, G. Khelashvili, H. Weinstein, S. Scheuring, *Nature* **594**, 385 (2021).

原子間力顕微鏡を用いた高分子ナノメカニクスの進展

Advances in polymer nanomechanics using atomic force microscopy

東工大物質¹ ○中嶋 健¹

Tokyo Tech.¹ ○Ken Nakajima¹

E-mail: knakaji@mac.titech.ac.jp

原子間力顕微鏡 (AFM) を用いたナノメカニクス¹ は、ナノスケールの分解能で静的および動的な弾性率や凝着エネルギーなどの像を得ることができ、高分子物理学のさまざまなトピックを調査するための強力なツールとなっている。本発表ではそのいくつかの事例を紹介する。

一つ目の事例として、圧縮ひずみ下にあるカーボンブラック (CB) 充填ゴムのナノ力学的挙動を可視化するために本手法を用いた。その結果、Fig. 1 に示すように、CB を充填したゴムは局所的に不均一な微視的変形を示すことがわかった²。また Fig. 2 の局所応力分布も不均一性を示し、圧縮時の応力は CB 粒子の近傍領域に集中していることがわかった。

二つ目の事例として、シリカナノ粒子を充填したアミン硬化エポキシ樹脂を対象にした研究では³、得られた弾性率と散逸エネルギー像から、厚さ 20 nm の界面エポキシ層の存在が証明され、この層は弾性率の低下と接着応答の弱さを示した。この柔らかい界面層を Halpin-Tsai モデルに組み込むことで、硬化したエポキシナノコンポジットの引張弾性率に及ぼすシリカ分率の影響についてもうまく説明することができる。

当日はその他の事例や、関係する ISO 標準化の最新動向についても紹介を行う予定である。

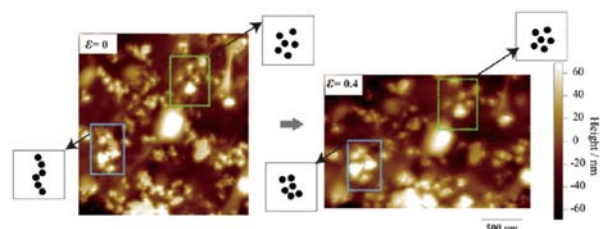


Fig. 1 In situ AFM height images of the same region at macroscopic compressive strains $\varepsilon = 0$ and 0.4.

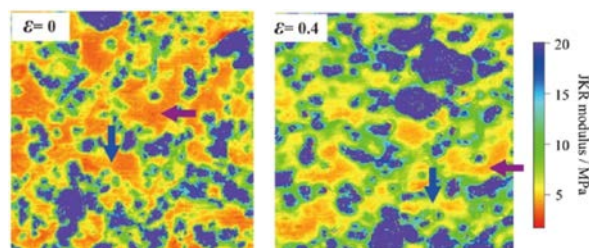


Fig. 2 In situ AFM modulus images of the same region at macroscopic compressive strains $\varepsilon = 0$ and 0.4.

1. Nakajima, K.; Ito, M.; Wang, D.; Liu, H.; Nguyen, H. K.; Liang, X.; Kumagai, A.; Fujinami, S.; *Microscopy* **2014**, 63, 193-207.
2. Liang, X.; Kojima, T.; Ito, M.; Amino, N.; Liu, H.; Koishi, M.; Nakajima, K.; *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15, 12414-12422.
3. Nguyen, H. K.; Shunto, A.; Liang, X.; Yamamoto, S.; Tanaka, K.; Nakajima, K.; *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, 14, 47213-47222.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 先端イオン/電子顕微鏡技術のナノスケール材料・デバイスへの応用展開

[18p-A36-1~11] Application of Advanced Ion/Electron Microscopy for Future Nanoscale Materials and Devices

[18p-A36-1]

Application of Advanced ion / electron microscopy for future nano scale materials and devices -Introduction to the Symposium-

○Shinichi Ogawa¹, Jun Taniguchi² (1.AIST, 2.TUS)

[18p-A36-2]

From Dual Damascene to Semi-Damascene and new materials: opportunities for characterization in interconnects

○Zsolt Tokei¹ (1.IMEC)

[18p-A36-3]

Evaluation of hydrogen-gas-field-ionization ion source and its application

○Shinichi Matsubara¹, Hiroyasu Shichi¹, Tomihiro Hashizume² (1.Hitachi, Ltd. CDS, 2.Hitachi, Ltd. CER)

[18p-A36-4]

Nanoscale High-Transition Temperature Josephson Junctions and SQUIDs

○Shane Cybart¹ (1.UC Riverside)

[18p-A36-5]

Nanosized quantum sensor spots in hexagonal boron nitride created using helium ion microscopy

○Kento Sasaki¹ (1.UTokyo)

[18p-A36-6]

Charge trap memory based on MoS₂ with He⁺-irradiated h-BN as a trapping layer

○Mahito Yamamoto¹, Takuya Iwasaki², Keiji Ueno³, Takashi Taniguchi², Kenji Watanabe², Yukinori Morita⁴, Shinichi Ogawa⁴, Yutaka Wakayama², Shu Nakaharai⁵ (1.Kansai Univ., 2.NIMS, 3.Saitama Univ., 4.AIST, 5.Tokyo Univ. Tech.)

[18p-A36-7]

Graphene phononic devices for thermal rectification with He Ion beam technology

○Fayong Liu¹, Kaidi Sun¹, Qianyu Jia¹, Haiyong Zheng¹, Manoharan Muruganathan², Hiroshi Mizuta² (1.Ocean Univ. of China, 2.JAIST)

[18p-A36-8]

Direct Patterning in Ultrathin Silicon Nanosheets Utilizing Helium Ion Beam Irradiation

○Yukinori Morita¹, Kensuke Inoue², Ryuichi Sugie², Shinichi Ogawa¹ (1.AIST, 2.TRC)

[18p-A36-9]

In-situ and precise atomic-scale transmission electron microscopy for electronic materials

○Yukio Sato¹ (1.Kumamoto Univ.)

[18p-A36-10]

Mapping Dielectric Response of Materials by Time-Resolved Electron Holography

○Yoh Iwasaki¹, Toshiaki Tanigaki², Keiko Shimada¹, Ken Harada¹, Daisuke Shindo¹ (1.RIKEN, 2.Hitachi, Ltd.)

[18p-A36-11]

Characterization of monolayer film with an advanced ULV-SEM

○Takaya Nakamura¹, Masayasu Nagoshi¹, Kaoru Sato¹, Hiroki Ago² (1.JFE Techno-Research Corp., 2.Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University)

先端イオン/電子顕微鏡技術のナノスケール材料・デバイスへの応用展開 -シンポジウム開催にあたり-

Application of Advanced ion / electron microscopy for future nano scale materials and devices

-Introduction to the Symposium-

産総研¹, 東京理科大² °小川 真一¹, 谷口 淳²

AIST¹, TUS.², °Shinichi Ogawa¹, Jun Taniguchi²

E-mail: ogawa.shinichi@aist.go.jp

This symposium aims to broadly discuss research outcomes and technologies related to the control of nanoscale material properties, the creation and evaluation of devices using advanced gas (helium) ion/electron microscopy techniques. The goal is to deepen understanding of these cutting-edge ion/electron microscopy technologies and to promote their further effective utilization in the research and development of materials and devices. In Japan, the research applications of advanced ion microscopy, particularly scanning gas ion microscopy, remain extremely limited. It is essential to discuss and promote the broader adoption of this technology for its significant potential in physics, chemistry, materials science, and device development. This technique can focus the beam to a diameter as small as 0.35 nm, allowing for the precise control and processing of material properties at the nanoscale. It is a critical technology for the fabrication of novel ultra-fine devices and the manipulation of ultra-fine physical phenomena. Beyond its applications in semiconductors, it offers promising possibilities in thin films, surface science, two-dimensional materials, superconductors, phononics, and various other fields. Moreover, atom probe technology is a precursor to the development of gas ion microscope ion sources and has remarkable applications in the atomic-level analysis of impurities in semiconductor microstructures. On the other hand, recent advancements in electron microscopy technology used for evaluating ultra-fine nanostructures have been impressive. This symposium will also discuss atomic-resolution scanning transmission electron microscopy (STEM) and ultra-low acceleration electron microscopy (SEM) technologies.

Related symposia have been continuously held during the Spring and Fall Meetings of 2017, the Fall Meeting of 2018, the Spring Meeting of 2019, and the Spring Meeting of 2020. We aim to foster deep discussions and encourage participation from experts across various fields. We would also like to express our gratitude to the Nano Charged Particle Beam Industry-Academia Collaboration Committee (ナノ荷電粒子ビーム産学連携委員会) of the Japan Society of Applied Physics for their invaluable cooperation in organizing this event.

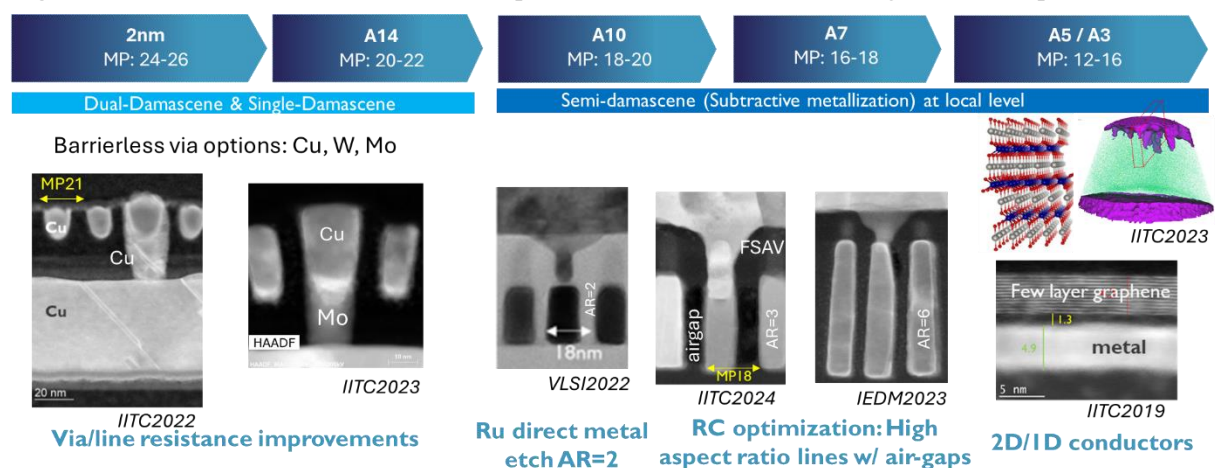
From Dual Damascene to Semi-Damascene and new materials: opportunities for characterization in interconnects

Zsolt Tókei, Imec, Kapeldreef 75 B-3001, Leuven, Belgium

E-mail: zsolt.tokei@imec.be

Going forward Back-End-of-Line innovations will be required at design, module and material level. A research roadmap along with pitch scaling at the local level and potential material changes is shown in Figure 1. These options represent a rich variety of tight pitch metal lines and vias -, starting at about 26nm pitch all the way down to 12nm - combined into a multi-level configuration. Today the state-of-the-art interconnects are based on damascene technology. Copper dual damascene is a well-known cost-effective industry standard. Control of both vertical and horizontal resistances are crucial along with matched capacitance to keep RC-delay under control, while maintaining robust mechanical properties compatible with packaging technology. Furthermore, with the emergence of backside interconnect options there is a growing need of better understanding thermal material properties as well. These are multiple parameters to optimize simultaneously. To overcome the challenges, several options are being investigated such as for example single damascene, direct metal etch and semi-damascene modules. Besides copper, tungsten, molybdenum, ruthenium emerges as potential part of the puzzle. Going forward binary and ternary alloys might be necessary and even 2D/1D conductors are of research interest. From characterization point of view this opens a lot of opportunities: thin lamella preparation, high resolution imaging, revealing local information at interfaces, understanding and characterizing defects and their impact on resistance etc.

Figure 1 Interconnect module and material options to fuel standard cell scaling; MP: metal pitch



References [1] Zs. Tókei et al., IEDM2021, [2] K. Croes et al., IEDM 2020, [3,4] M. Van der Veen et al. IITC 2022, IITC2021, [5] G. Murdoch et al., VLSI 2022, [6] A. Gupta et al. IEDM2023, [7] G. Delie et al. IITC2024, [8] S. Achra et al. IITC2020 [9] C. Adelman et al. IITC 2023, [10] C. Fleischmann et al. IITC2024

水素ガス電界電離イオン源の評価とその応用

Evaluation of hydrogen-gas-field-ionization ion source and its application

松原 信一¹, 志知 広康¹ 橋詰 富博²

Center for Digital Services, Hitachi, Ltd.¹,

Center for Exploratory Research, Hitachi, Ltd.²

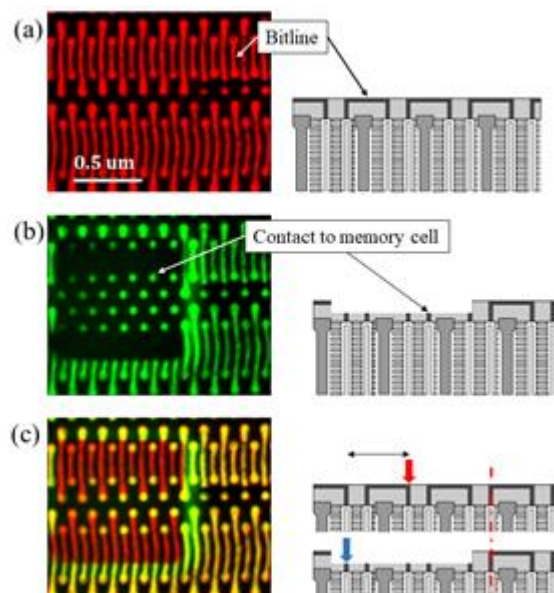
E-mail: shinichi.matsubara.zm@hitachi.com

A gas field ionization source scanning ion microscopy (GFIS-SIM) using light element gases, such as helium or hydrogen, is expected to improve the resolution of sample-surface observation because the diffraction aberration is smaller than that of scanning electron microscopy at the same beam acceleration. GFIS-SIM using heavy element gases, such as neon or argon, is also expected to improve processing accuracy compared with conventional focused ion beam (FIB) systems equipped with liquid-metal-ionization sources or plasma-ionization sources.

We present the results of an energy analysis of hydrogen ions by ion beam retarding with an electrostatic lens. Several hydrogen ion species are generated from the hydrogen-ion GIS, among which H_3^+ was shown to be the most suitable for surface observation through this analysis.

We also propose a method of introducing a mixture of light and heavy element gases into the GFIS to eliminate the gas-venting time and speed up the switching of processing and observation functions by changing ion beams. With this method, the beam can be switched from a hydrogen ion beam to neon beam in 0.7 seconds by switching the voltage to the electrode, such as the extraction voltage.

The feature of this switching function is that the two types of beams are emitted from the same column. It is easy to combine the observation and processing functions under optimal conditions for beam focusing (high-resolution conditions). In a multi-column system, e.g., FIB-SEM system, the distance between the objective lens and sample surface (working distance) on the SEM column side must be larger than the optimum value to switch between processing and observation, which forces observation under unfavorable conditions for high-resolution. Our method uses only one identical column for focusing two ion beams, eliminating the above limitation.



(a) Scanning ion microscope (SIM) image before dig process and schematic cross-sectional view of Semiconductor devices with three-dimensional structures (3D NAND) sample. (b) SIM image after dig process (c) Superimposed images

Nanoscale High-Transition Temperature Josephson Junctions and SQUIDs

S.A. Cybart,

*Department of Electrical and Computer Engineering,
University of California Riverside, Riverside, CA 92521
cybart@ucr.edu*

Focused helium ion beam nanolithography is a promising approach for fabrication of high-transition temperature superconductor circuits. With this method, a 0.5 nm diameter beam of 40-kV helium ions is scanned over the material, which undergoes a metal-to-insulator transition, due to ion beam induced disorder. (Figure 1.) Regions converted to insulators can be as narrow as 2 nm and serve as Josephson junctions [1] and SQUIDs [2]. Our laboratory has investigated the helium ion beam process and report the electronic transport properties of Josephson junctions fabricated from a range of different ion doses. At doses below 200 ions/nm the junctions exhibit superconductor-normal metal-superconductor (SNS) properties. These SNS junctions have higher resistances and less excess current than masked ion beam junctions. For higher ion beam doses greater than 300 ions/nm, we observe Josephson junctions with superconductor-insulator-superconductor (SIS) properties. In these devices the voltage state resistance increases with decreasing temperature which suggests that the intrinsic shunt is behaving as an insulator with hopping conduction. We correlate these transport properties with Monte Carlo ion implantation simulations which estimate the extent and spatial distribution of the ion beam induced disorder.

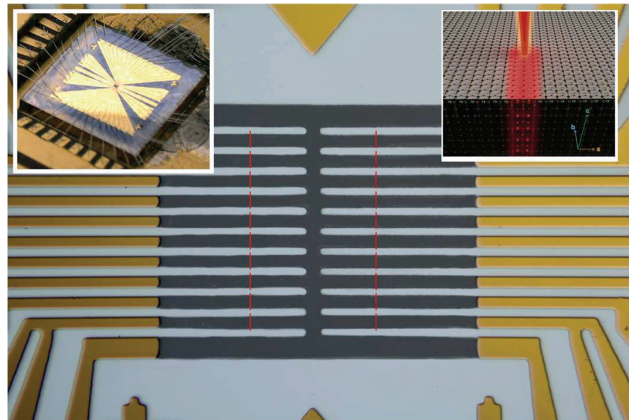


Figure 1. Optical image of a YBCO thin film microbridge chip where the ion beam was scanned across each bridge with different fluence to study how ion dose effects electrical transport. (Left inset) Full view of the bonded 5 mm x 5 mm YBCO on sapphire chip bonded in a chip carrier. (Right Inset) Representation of the helium ion beam interacting with a crystal of YBCO.

- [1] S. Cybart, E.Y. Cho, T. Wong, *et al.* "Nano Josephson superconducting tunnel junctions in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ directly patterned with a focused helium ion beam" *Nature Nanotech* **10**, 598–602 (2015). <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.76>
- [2] H Li, H Cai, E.Y. Cho *et al.* , "High-transition-temperature nanoscale superconducting quantum interference devices directly written with a focused helium ion beam", *Appl. Phys. Lett.* **116**, 070601 (2020). <https://doi.org/10.1063/1.5143026>

Nanosized quantum sensor spots in hexagonal boron nitride created using helium ion microscopy

UTokyo¹, ^oKento Sasaki¹

E-mail: kento.sasaki@phys.s.u-tokyo.ac.jp

In this presentation, we introduce a technique for creating quantum sensors using helium ion microscopy, and our recent results [1,2]. Since 2020, a boron vacancy (V_B) defect in hexagonal boron nitride (hBN), a vacancy at a boron site, has been found to function as quantum sensors even at room temperature. By a mechanism similar to the nitrogen vacancy center in a diamond, a representative quantum sensor, the electron spins of this defect can be optically initialized and read out. It allows optical detection of magnetic resonance (ODMR) of the defect's electron spin. In quantum sensing, the magnetic field strength is determined based on the Zeeman effect from the resonance frequencies obtained by ODMR. This quantum sensor works even when the hBN flakes are less than 100 nm thick. It provides nanometer proximity to measurement targets with the van der Waals forces. This proximity is essential to take advantage of the sub-nanometer size of quantum defect sensors to obtain high sensitivity and spatial resolution.

V_B can be created by irradiating hBN crystals with ions, neutrons, or electron beams. Typically, irradiation is uniform and quantum sensors are produced with uniform areal density throughout the flake. In such case, the spatial resolution of the magnetic field imaging is limited to the optical resolution of ODMR system. It is typically about 1 μm , which is more significant than the hBN flake thickness; even if the sensors adhere to the measurement target, the static stray magnetic field from the target is spatially averaged. Thus, the excellent adhesion property of the hBN quantum sensor cannot be fully utilized.

To mitigate this issue, we arrange nanosized sensor spots using helium ion microscopy (HIM) [1,2]. HIM is a microscope that utilizes focused helium ion beams to enable resolutions of up to sub-nanometers. As a proof-of-principle, we used HIM to irradiate He ions to spot sizes of less than $(100\text{ nm})^2$ to create quantum sensor spots. We demonstrated that magnetic field imaging with higher spatial resolution by arranging sensor spots in an array [1]. We also characterized quantum sensors created with different hBN film thicknesses, substrate surfaces, and ion dosages. The obtained results were discussed to obtain the irradiation conditions that maximize the sensitivity [2]. Our creation technique can be applied to 0-dimensional objects, such as quantum dots, and symmetric or periodic structures, such as magnetic domains and superconducting vortices.

We would like to thank Mr. Tomohiko Iijima, operator, for the use of the helium ion microscope in the Super Clean Room at the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

[1] K. Sasaki, Y. Nakamura, H. Gu, M. Tsukamoto, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Ogawa, Y. Morita, and K. Kobayashi, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 244003 (2023).

[2] H. Gu, M. Tsukamoto, Y. Nakamura, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Ogawa, Y. Morita, K. Sasaki, and K. Kobayashi, *to be submitted*.

Charge trap memory based on MoS₂ with He⁺-irradiated h-BN as a trapping layer

Kansai Univ.¹, NIMS², Saitama Univ.³, AIST⁴, Tokyo Univ. Tech⁵.

°Mahito Yamamoto¹, Takuya Iwasaki², Keiji Ueno³, Takashi Taniguchi², Kenji Watanabe²,

Yukinori Morita⁴, Shinichi Ogawa⁴, Yutaka Wakayama², Shu Nakaharai⁵

E-mail: myama@kansai-u.ac.jp

Charge trap memory has attracted much attention for applications in memory-based computing. Two-dimensional (2D) materials such as graphene and transition metal dichalcogenides have great potential as building blocks of charge trap memory, owing to the absence of surface dangling bonds and the stacking degree of freedom. However, wide range control of trap density is challenging with an intrinsic 2D material, although is crucial for novel analog computing applications. Here, we fabricated MoS₂-based charge trap memory using He⁺-irradiated h-BN as a charge trapping layer, where the trap density can be tuned widely with the He⁺ dose amount. BN flakes were exfoliated from bulk crystals onto Si/SiO₂(285 nm) and irradiated with He⁺ by using a helium ion microscope. After the irradiation, MoS₂ flakes were transferred onto He⁺-irradiated h-BN and Ti/Au electrodes were defined by the electron-beam lithography method (Fig. 1a). The trapping properties of BN-supported MoS₂ were investigated at room temperature in vacuum using the field effect geometry, where Si and SiO₂ serve as a gate and a gate dielectric. Figures 1b-c show transfer characteristics of FETs based on MoS₂ on He⁺-irradiated BN with different dose amounts (D). The FETs show hysteresis in the forward and backward gate sweeps, hence working as charge trap memory. With increasing the dose amount, the hysteresis window monotonically widens, indicating that traps are present at defective sites in h-BN. However, at D ~ 10¹⁶ cm⁻², the off state was suppressed, possibly due to the significant increase in the trap capacitance, which may be unfavorable for applications in charge trap memory. Our results could be a guidance to create a charge trapping layer with the controlled trap density for memory applications. **Acknowledgement:** This work was partly supported by the JST SICORP program (grant No. JPMJKB2103) and ARIM of MEXT (JPMXP1224NM5118). We extend our gratitude to Mr. Tomohiko Iijima (AIST) for operating the AIST SCR HIM during the helium ion irradiation process.

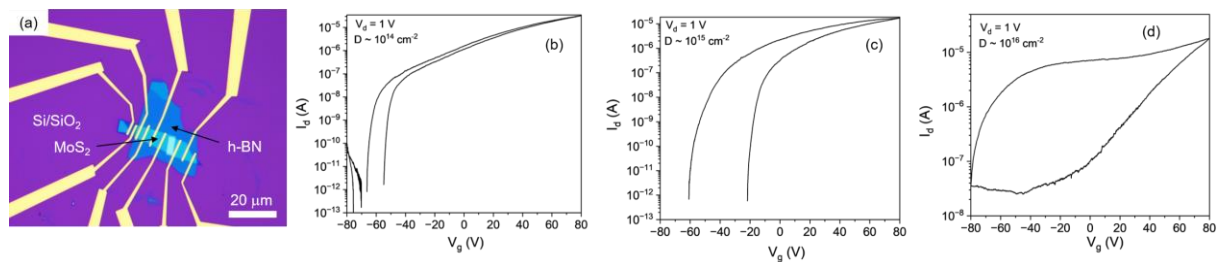


Figure 1. (a) Optical image of MoS₂ on He⁺-irradiated h-BN on a Si/SiO₂ substrate. (b)-(d) Drain-current (I_d)-gate voltage (V_g) characteristics of MoS₂ on He⁺-irradiated h-BN with dose amounts (D) of 10¹⁴, 10¹⁵, and 10¹⁶ cm⁻². The drain voltages (V_d) are 1 V.

Graphene phononic devices for thermal rectification with He Ion beam technology

F. Liu¹, K. Sun¹, Q. Jia¹, H. Zheng¹, M. Muruganathan², H. Mizuta²

Ocean University of China¹, Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST)²

E-mail: lfy@ouc.edu.cn

Graphene is one of the most famous representations of two-dimensional materials with its super physical and chemical properties. With the helium ion beam milling (HIBM) technique, the original graphene structure is artificially modified with a nanometer periodical configuration (Fig.1). It forms a 2D phononic crystal structure for phonon engineering to control the phonon transmission with artificial nanostructures [1]. As the phononic crystals introduce the asymmetry in a suspended graphene ribbon, the thermal rectification phenomenon has been observed and investigated.

In this talk, we will demonstrate the graphene nanostructure fabrication processes with the HIBM technique by coupling it with advanced graphene Nano-Electromechanical System (NEMS) technology. It includes how to reshape the suspended graphene ribbon [2] and pattern periodical nanopores with a 6 nm diameter on a graphene ribbon [3]. With the established experience above, asymmetric graphene phononic crystal structures are introduced on a suspended graphene ribbon. With the help of a differential thermal leakage method, the thermal rectification phenomenon is observed with up to 60% thermal rectification ratio at 150 K [4].

In order to understand the mechanism of thermal rectification on graphene phononic devices, we deeply investigate the phonon transport behavior from each part of the device composition, especially the graphene-gold interface (Fig.2) and asymmetric graphene structures (Fig.3). We use both the molecular dynamics simulation method and the finite element method to investigate the wave properties of the phonon, and found that each part of the device composition gives different weights of the contributions for the thermal rectification phenomenon. This work provides both experimental and theoretical support for further developing graphene-based thermal management devices.

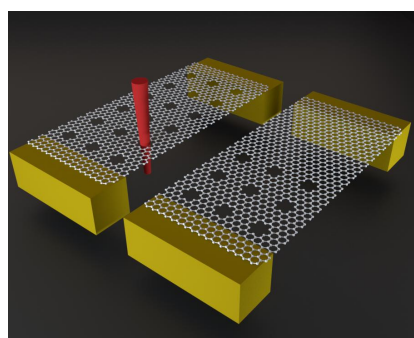


Fig. 1: Schematic illustration of the graphene phononic devices

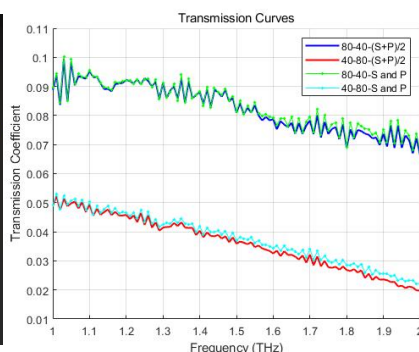


Fig. 3: Wave phonon transmission properties on asymmetric graphene devices

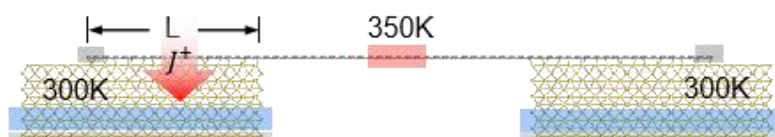


Fig. 2: Molecular dynamics simulation to investigate the interface heat transfer properties.

Acknowledgement:

This work was supported by the Grant-in-Aid for Scientific Research No. 18H03861, 19H05520 from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), the National Natural Science Foundation of China No. 62304212, the Natural Science Foundation of Shandong Province No. ZR2023QF037, and the Qingdao Postdoctoral Program Foundation No. QDBSH20230201010.1

Reference:

1. M. E. Schmidt, H. Mizuta, et al., ACS Applied Materials & Interfaces 10, 10362 (2018).
2. M. E. Schmidt, H. Mizuta, et al., Small 15, 46, 1903025 (2019)
3. F. Liu, H. Mizuta, et al., Micromachines 11(4), 387 (2020)
4. F. Liu, H. Mizuta, et al., Nano Futures 5 045002 (2021)

Direct Patterning in Ultrathin Silicon Nanosheets
Utilizing Helium Ion Beam Irradiation

AIST¹, TRC² ○Yukinori Morita¹, Kensuke Inoue², Ryuichi Sugie², Shinichi Ogawa¹

E-mail: y.morita@aist.go.jp

Helium Ion Microscopy (HIM) has been used as an electron microscopy using secondary electrons generated by focused helium (He) ion beam irradiation onto the sample. Using ion collision phenomena, it is also possible to modify material properties and perform etching processing by tuning the energy and dose of the He⁺ beam. In this work, ultra-thin silicon nanosheets were irradiated with the focused He⁺ beam and aim to perform nanofabrication with nanometer-level position control without using lithography technology. Using an extremely uniformly thinned silicon layer, we verified the possibility of forming nanopore arrays with positional control, like two-dimensional materials [1].

A (100) oriented silicon-on-insulator (SOI) sample was used for the experiment. The SOI was etched with oxygen to a thickness of approximately 1 to 3 nm [2]. The He⁺ beam was focused at approximately 0.35 nm and the acceleration voltage was 30 keV, and changes in processed shape and defect generation by modulating the dose were investigated. Fabricated shapes were evaluated using a secondary electron image of the sample using HIM.

Figure 1 is a typical HIM image of the sample surface irradiated with 7 × 7 of 20 nm rectangular dots at a pitch of 100 nm. A bright spot is observed at the irradiation position, and as the dose increases, the central part of the irradiation area changes into a “concave” shape. Overall, swelling due to blistering [3] caused by helium gas injection is observed, noticeable over 1e19 cm⁻² irradiation. The photoluminescence measurement revealed that before and after nanopore formation no significant increase in defects was observed due to ion irradiation. When the SOI layer is made even thinner, the dose required to create the depressions shown in Fig. 1 decreases, suggesting that He⁺ beam irradiation realizes nanofabrication of the ultrathin Si layer.

This work was partly supported by JSPS KAKENHI, Grant Number 22K18799.

[1] F. Liu et al., Nano Futures 5 (2021) 045002.
[2] Y. Morita et al., IEDM 2015, 390.
[3] V. Veligura et al., Beilstein J. Nanotechnol. 4 (2013) 453.

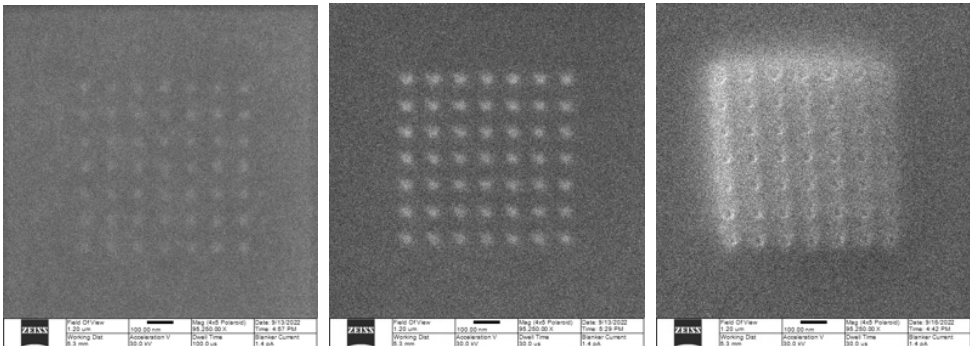


Fig. 1 HIM images after HIM nanolithography on very thin (3.6 nm) SOI. The image area is 1200 × 1200 nm. (a) 1e17, (b) 1e18, (c) 1e19 cm⁻² of He⁺ dose, respectively.

In-situ and precise atomic-scale transmission electron microscopy for electronic materials

Kumamoto Univ.¹, Yukio Sato¹,

E-mail: sato-yukio@kumamoto-u.ac.jp

Intriguing physical properties of materials often originate from their micro and nano-scale structures and their responses to external stimuli. In this context, we explore dielectric materials as a prime example. The emergence of dielectricity, piezoelectricity, and ferroelectricity is closely linked to the intricate details of the crystal unit cell and the structure of domains where the polarization of numerous unit cells is aligned in the same direction. Moreover, the response of these structures to applied external electric fields plays a significant role. (Scanning) Transmission electron microscopy is a powerful method that enables us to elucidate detailed unit-cell and domain structures, along with their responses to an electric field, with high spatial resolution and in real time. In this talk, we will introduce some of our key results.

The atomic arrangement of crystals can be directly observed using atomic-scale STEM (scanning transmission electron microscopy). However, errors in the obtained internal atomic positions within unit cells and lattice parameters are usually not negligible. We have developed a methodology that significantly reduces these errors. Errors in lattice parameters can be reduced from 2–3% to 0.1%, and those in cell angles from approximately 0.6° to around 0.1° [1,2]. This method can be applied to determine or discover new crystal phases in localized regions.

In-situ electrical biasing transmission electron microscopy (TEM) has been utilized to visualize response of ferroelectric domain structure by applying electric fields. For example, it was clarified that lamellar-like nanodomains in a piezoelectric single crystal, PMN-PT ($0.68\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.32\text{PbTiO}_3$) reorients by applying an electric field and revert to an original state when the field is removed. These results can explain a part of piezoelectric coefficient and the low hysteresis in the strain-electric-field loop [3]. Not only direct-current electric field but also alternative-current field can be applied using our system. Furthermore, such in-situ observations can be done at an atomic scale precisely by combining the aforementioned methodology [2,4].

References

- [1] Fujinaka *et al.*, J. Mater. Sci., **55**, 8123 (2020).
- [2] Sato *et al.*, Phys. Status Solidi, RRL, **14**, 1900488 (2020).
- [3] Sato *et al.*, Phys. Rev. Lett., **107**, 187601 (2011).
- [4] Sato *et al.*, Appl. Phys. Lett., **111**, 062904 (2017).

Acknowledgement

A part of this work was supported by JSPS KAKENHI (JP23K26382 and JP23H03804). A part of experiments was conducted at Ultramicroscopy center, Kyushu University and Engineering Research Equipment Center, Kumamoto University.

時間分解電子線ホログラフィーによる 画像化誘電分光法の試み

Mapping Dielectric Response of Materials by Time-Resolved Electron Holography

理研 CEMS¹, 日立製作所² ○岩崎 洋¹, 谷垣 俊明², 鳶田 恵子¹, 原田 研¹, 進藤 大輔¹

RIKEN¹, Hitachi, Ltd.² ○Y. Iwasaki¹, T. Tanigaki², K. Shimada¹, K. Harada¹, D. Shindo¹

E-mail: yoh.iwasaki@riken.jp

電気化学素子の解析に多用される誘電分光 または AC インピーダンス測定は、2 端子間の試料を流れる電流 vs. 電圧の周波数特性を調べる手法である。測定結果を再現する等価回路の考察を経て試料の内部構造への洞察が得られるので、広範な応用がある。いっぽう電子線ホログラフィーは、電子顕微鏡中で試料ならびに周りの空間の電位分布を画像化する手法として知られる。ならば、これを交流電圧下の試料に適用することにより「誘電応答の空間分布をより直接的に観測できないか」と考えた。⁽¹⁾

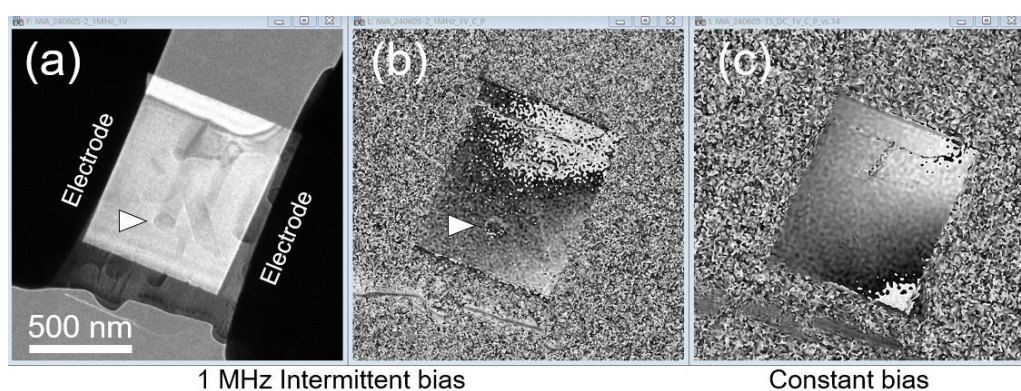


Fig.1 (a) Interference image obtained with accumulated exposures synchronized to the periods with +1V bias voltage on the specimen repeated at 1MHz. (b) Phase image reconstructed from the interference image, (a). (c) Phase image reconstructed from another interference image (not shown) obtained under +1 V constant bias.

Li⁺イオン伝導性のガラスセラミック材料を薄片化し、ふたつの金属電極間に保持して観測対象とした。加速電圧 300kV の透過電子顕微鏡 (HF-3000X, Hitachi, Ltd.) の電子ビームを ON/OFF してストロボスコーピックな露光を行なった。電極間に周波数 1 MHz で $\pm 1V$ の矩形波交番電圧を印加し、+1V が印加される期間に同期した露光を積算して得た干渉像を Fig.1(a)に、これに基づいて再生した位相像を Fig.1(b)に示した。また、DC 1V を印加して連続露光で撮影した干渉像に基づく位相像を Fig.1(c)に示した。DC 印加時(c)の位相分布は平坦であるが、同じ 1V でも間欠印加中に撮影した場合の位相分布(b)には矢印▶の先に輪郭を持つ斑点が認められ、1MHz の間欠電場には追従できていない分極成分があることがわかる。この斑点には対応する試料内部の粒構造が干渉像(a)に認められ、この領域の誘電応答が周囲と異なることが示唆される。

ストロボ露光を利用した電子線ホログラフィーによって、試料内部の誘電応答の不均一を可視化する可能性が示された。観測に利用できる周波数域の広さが重要であるが、先に提案した差動ブランキング (Differential Blanking) 法⁽²⁾ を用いてビームを ON/OFF する間欠露光によれば、時間幅が最短 20 ナノ秒までの露光を積算して干渉像、位相像が得られている。【本研究は科研費の助成(21K04892)を受けて行なわれた。】

(1) Y. Iwasaki, Z. Akase, K. Shimada, K. Harada, and D. Shindo, “Time-Resolved Electron Holography and Its Application to an Ionic Liquid Specimen”, *Microscopy*, **72** (2023) 455-459.

(2) International Patent Application: PCT/JP2022/011544.

Characterization of monolayer film with an advanced ULV-SEM

Nano-scale Characterization Center, JFE Techno-Research Corporation¹, Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University², ^oTakaya Nakamura¹, Masakazu Nagoshi¹, Kaoru Sato¹, Hiroki Ago²

E-mail: t-nakamura@jfe-tec.co.jp

Two-dimensional (2D) materials with atomic-level thicknesses are attracting attention because of their novel electronic, optical, and magnetic properties [1]. It is important to control the number of layers, composition, and structure of these 2D materials, and thus a method to evaluate them quantitatively and easily is required. Although scanning electron microscopy (SEM) is widely used for microscopic evaluation of materials, conventional SEM is not suitable for characterizing 2D materials. In recent years, SEM and related techniques have made remarkable progress. For example, ultra-low accelerating voltage SEM (ULV-SEM) enables surface-sensitive observation. A new windowless energy-dispersive X-ray spectrometer (EDX) allows elemental analysis under the same conditions where surface-sensitive observation is performed [2]. We have been working on the evaluation of various advanced materials by making full use of these techniques [3]. In this study, we characterized 2D materials such as graphene oxide (GO) [4] and molybdenum disulfide (MoS₂) using the latest ULV-SEM equipped with a windowless EDX.

Figure 1 shows backscattered electron (BSE) images and EDX elemental mapping images recorded for a MoS₂ monolayer film with accelerating voltages of 5 kV (a) and 1 kV (b). The monolayer sheet of MoS₂, a kind of transition metal dichalcogenide (TMDC), was deposited on a sapphire substrate using a CVD method and then transferred onto a SiO₂/Si substrate. The MoS₂ film is not visible in the BSE image, and no S or Mo distribution could be found in the EDX mapping with the accelerating voltage of 5 kV. This is because the information depth at 5 kV is much deeper than the thickness of the MoS₂ monolayer film (estimated to be about 0.6 nm). The peak energies of S-K (about 2.31 keV) and Mo-L (about 2.29 keV) are close together, making separation of the peaks difficult with EDX. We think this is also a reason why distribution of S and Mo are difficult to be detected. In the BSE image at 1 kV, MoS₂ films exhibit a brighter contrast on the dark SiO₂/Si substrate. The S-L and Mo-M signals are detected corresponding to the MoS₂ film in the EDX mapping. A decrease of Si signal in the MoS₂ area compared to that in the Si substrate is also observed. The new high-sensitive windowless SDD enables detection of ultrasoft X-rays, such as Si-L (about 0.09 keV), S-L (about 0.15 keV), and Mo-M (about 0.19 keV) lines that cannot be detected with a conventional EDX. The shallow penetration depth of primary electrons and the relatively large energy difference between S-L and Mo-M peaks made it possible to visualize the distribution of S and Mo. This ULV-SEM/windowless EDX will provide characterization of various 2D materials with a high throughput.

References: [1] H. Ago., Oyo Buturi, **90**(2021) 617-622. [2] M. Nagoshi, K. Sato, and T. Aoyama, J. Surf. Anal. **24**(2017) 129-135. [3] T. Nakamura, K. Sato, and M. Nagoshi, J. Surf. Anal. **26**(2019) 206-207. [4] <https://www.oxinst.jp/casestudy/jfe-tec>

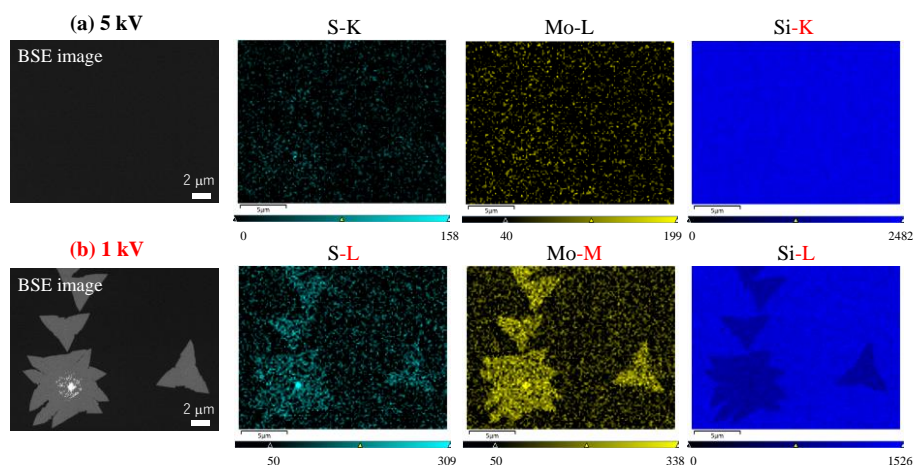


Fig.1 BSE images and EDX mapping results of MoS₂ monolayer at (a) 5 kV and (b) 1 kV, respectively. The analytical areas of (a) and (b) are identical.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：次世代半導体・新デバイス製造に向けたプラズマ直接接合技術

[17p-C41-1~11] 次世代半導体・新デバイス製造に向けたプラズマ直接接合技術

[17p-C41-1]

オープニング

○田中 宏昌¹ (1.名古屋大)

[17p-C41-2]

プラズマ表面活性化による基板接合技術の動向

○高橋 健司¹ (1.産総研)

[17p-C41-3]

表面活性化接合のメカニズム

○須賀 唯知^{1,2} (1.東京大学、2.明星大学)

[17p-C41-4]

3D集積応用へ向けた接合絶縁膜の低温接合メカニズム解析

○北川 颯人¹、佐藤 亮輔¹、井上 史大¹ (1.横浜国大)

[17p-C41-5]

大口径基板接合に向けた高速原子ビーム源

○秦 誠一¹ (1.名大院)

[17p-C41-6]

大気圧プラズマジェットによる異種基板の直接接合

○竹中 弘祐¹、内田 儀一郎²、節原 裕一¹ (1.阪大接合研、2.名城大理工)

[17p-C41-7]

パワーデバイスの接合技術

○梁 剣波¹、大野 裕²、井上 耕治²、永井 康介²、重川 直輝¹ (1.大阪公大院工、2.東北大金研)

[17p-C41-8]

1インチ多結晶ダイヤモンド上 GaN HEMT

○森山 千春¹、川村 啓介²、大内 澄人²、浦谷 泰基²、大野 裕³、井上 耕治³、永井 康介³、重川 直輝¹、梁 剣波¹ (1.大阪公大工、2.エア・ウォーター(株)、3.東北大金研)

[17p-C41-9]

フレキシブルエレクトロニクスのための柔軟実装技術

○高桑 聖仁^{1,2} (1.東大工、2.理研)

[17p-C41-10]

表面活性化接合のフォトニクスデバイスへの展開

○日暮 栄治¹ (1.東北大)

[17p-C41-11]

パネルディスカッション

○谷出 敦^{1,2}、田中 宏昌²、石川 健治²、高橋 健司³、須賀 唯知⁴、高桑 聖仁⁴、秦 誠一⁵、竹中 弘祐⁶、梁 剣波⁷、日暮 栄治⁸ (1.SCREEN HD、2.名大低温プラズマ、3.産総研、4.東大院工、5.名大院工、6.阪

大院工、7.大阪公立大院工、8.東北大院工)

プラズマ表面活性化による基板接合技術の動向

Wafer Bonding Assisted by Plasma Surface Activation and its Application

産総研, 高橋 健司

AIST, Kenji Takahashi

E-mail: kenji.takahashi@aist.go.jp

1986年にSiウェハの貼合わせについての論文をIBM[1]と東芝[2]が発表してから40年近くが過ぎた。これらの論文は用いるウェハが熱酸化膜付きかベアSiかという違いはあったが、接合のメカニズムとしてウェハ表面に存在するSi-OH基がSi-O-Si結合を形成したことを挙げている点では共通している。IBMは酸素雰囲気中での貼合後に片側のSiを数 μm 残してエッチングすることでSOI基板が作製できたとし、一方東芝はp型Siとn型Siの貼合わせによりダイオード特性が得られたとしている。いずれも大変先進的な取組であったことが理解できる。

これらのウェハ貼合では800~1050 $^{\circ}\text{C}$ の加熱を必要としていたが、Takagiら[3]はArビームによる表面活性化と超高真空中での貼合により常温でのウェハ接合が可能であることを示した。その後 N_2 プラズマなどを用いた表面改質技術により大気中での貼合で比較的低温のアニールでも十分な接合が得られるようになり、デバイスウェハの貼合が実用化されるようになった。

先陣を切ったのは2008年のソニーの裏面照射型CMOSイメージセンサであり、同社はその後もCu-Cuハイブリッド接合技術を用いたウェハ積層技術を精力的に開発し、新たなイメージセンサ製品を世に送り出している[4]。

最近ではNANDフラッシュメモリでもウェハ積層が実用化されてきている。これはメモリセルのウェハとロジックICのウェハを別々に作り、ハイブリッド接合技術により一つのウェハにする、というコンセプトである[5]。

さらにここ数年注目を集めてきている裏面電源配線網(Backside Power Delivery Network)でもウェハ積層が一つのキー技術と考えられている[6]。この場合、貼合後のパターン形成のためウェハのひずみへの対策が必要になり、リソグラフィとの連携も求められる[7]。

このように約40年前に始まったウェハの貼合技術はこの10数年で急速に進歩を遂げた。今後はウェハ貼合ではさらに微細化・高精度化が進むことが見込まれる。一方でチップをウェハに直接接合するDie-to-Waferの接合技術についてもHeterogeneous Integrationの切り口で研究開発が進められており、究極のチップレット組み立て技術として注目されている。

文献

- [1] J. B. Lasky, Appl. Phys. Lett., 48(1), 78, 1986.
- [2] M. Shimbo, et al., J. Appl. Phys., 60(8), 2987, 1986.
- [3] H. Takagi, et al., Appl. Phys. Lett., 68(16), 2222, 1996.
- [4] 岩元ら, エレクトロニクス実装学会誌, 27(1), 163, 2024.
- [5] S. Kobayashi, et al., IEDM 2023, 35-2, 2023.
- [6] A. Jourdain, et al., Proc. 72nd ECTC, 1531, 2022.
- [7] H. Mitsuishi, et al., Proc. 73rd ECTC, 1664, 2023.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：次世代半導体・新デバイス製造に向けたプラズマ直接接合技術

[17p-C41-1~11] 次世代半導体・新デバイス製造に向けたプラズマ直接接合技術

[17p-C41-3] 表面活性化接合のメカニズム

○須賀 唯知^{1,2} (1.東京大学、2.明星大学)

キーワード：表面活性化、接合、インターコネクト

本講演では、表面活性化接合の現状と課題について、特に常温接合の観点から、プラズマ活性化接合との関連で考察する。特に、表面活性化の意味、表面活性化のための親水化処理とイオン衝撃の違いについて議論し、金属、半導体、絶縁体材料について現状および将来動向をまとめる。

3D 集積応用へ向けた接合絶縁膜の低温接合メカニズム解析

Interfacial Characterization of Novel Bonding Dielectric Films for 3D Integration

横浜国大¹, ○(M1)北川 颯人¹, (M1)佐藤 亮輔¹, 井上 史大¹

YOKOHAMA National University¹, °Hayato Kitagawa¹, Ryosuke Sato¹, Fumihito Inoue¹

E-mail: inoue-fumihito-ty@ynu.ac.jp

CFET や BSPDN を代表とする「直接接合」を用いた新規 3D ロジックデバイス集積構造の研究開発が活発化している。さらに、チップレット集積やメモリ積層においてもハイブリッド接合を中心として、直接接合技術の応用研究が進んでいる。本研究では、低温域(250℃以下)において高接合強度を有すると知られる C 含有絶縁膜の接合メカニズムについて調査を行った。

300mm(100)Si ウエハ上に PECVD によって絶縁膜-A と絶縁膜-B を堆積した。CMP 後、ウエハ表面に N₂ プラズマを照射し、それぞれのペアウエハ同士を張り合わせた。接合後アニールを行い、界面状態を陽電子消滅法 (PAS) にて解析した。

Fig.1(a)に DCB 法を用いた接合エネルギー測定結果を示す。絶縁膜-B は 250℃以下の低温域において絶縁膜-A よりも高い接合強度を持つことがわかった。Fig. 1(b)に H₂O の TDS 測定結果を示す。350℃付近の H₂O 脱離ピークは両者に確認されたが、低温域でのピークは絶縁膜-B でのみ確認できた。また Fig. 1(c)の分光エリプソメータによる屈折率測定結果より、絶縁膜-B のほうが屈折率が低いことがわかった。これらより、絶縁膜-B 内に水分が多量に含まれることで屈折率が低下しており、アニールによってそれらが脱離したといえる。

その後、絶縁膜-A と絶縁膜-B それぞれでウエハ接合および接合後アニールを行った。Fig. 1(d)は接合ウエハの PAS 測定結果である。アニール温度が高くなるほど界面近傍全体の S 値が大きくなっており、界面近傍水分の脱離が進んでいることが分かった。また、250℃において絶縁膜-A より絶縁膜-B のほうが S 値が小さいのは、絶縁膜-B 内水分が多いためだと考えられる。一方、接合界面では絶縁膜-B のみ局所的な S 値減少がみられ、界面により多くの水分が残留していることを示している。また、この絶縁膜は多量のダングリングボンドを持つことが知られている。すなわち、絶縁膜-B では多量の水分を膜内・界面に持つことにより、ダングリングボンドによる水の消費とともに多くの水素結合・界面共有結合の形成を容易にすることで、低温高強度・ボイドフリーを両立していると考えられる。[Ref] F. Inoue et.al., ECTC 2024, F. Nagano et. al., ECS JSS 11 (6), 063012 (2022)

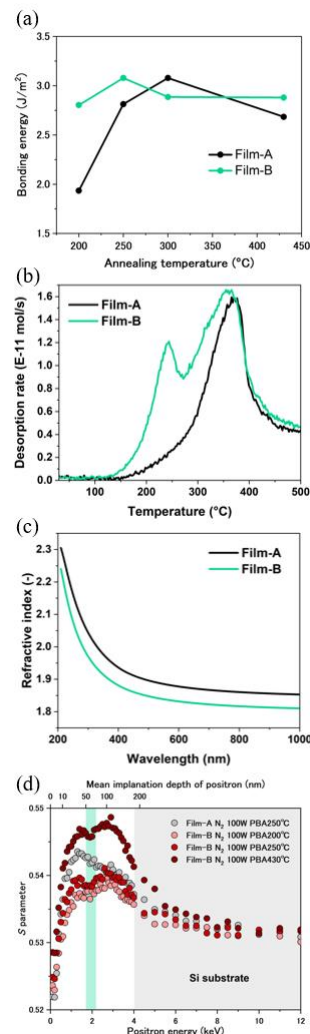


Fig. 1. (a)DCB results of film A and B. (b) TDS results of water outgas, (c) Refractive index of films and interface. (d) PAS results of interface.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：次世代半導体・新デバイス製造に向けたプラズマ直接接合技術

[17p-C41-1~11] 次世代半導体・新デバイス製造に向けたプラズマ直接接合技術

[17p-C41-5] 大口径基板接合に向けた高速原子ビーム源

○秦 誠一¹ (1.名大院)

キーワード：表面活性化接合、高速原子ビーム源、大口径ウエハ

高機能ウエハの接合技術としてFABによる表面活性化接合が使用されている。大面積に対して均一にFABを照射するためには、照射口形状やその分布の変更や、FAB源の複数台の設置およびFABの走査などの工夫がなされている。本講演ではプラズマシミュレーションを利用し設計した新しい形態のFAB源や照射口付近の電極構造変更により、大面積に対して均一なFAB照射を行う試みについて紹介する。

大気圧プラズマジェットによる異種基板の直接接合

Direct bonding of dissimilar materials using atmospheric pressure non-equilibrium plasma jet

阪大接合研¹, 名城大理工²

○竹中 弘祐¹, 内田 儀一郎², 節原 裕一¹

Osaka Univ.¹, Meijo Univ.², °Kosuke Takenaka¹, Giichiro Uchida², Yuichi Setsuhara¹

E-mail: takenaka.kosuke.jwri@osaka-u.ac.jp

近年、金属と有機材料との異種材料の接合が様々な分野で注目されてきている。特に自動車・航空宇宙産業では、それぞれの長所に応じて適材適所に組み合わせ、総合的に優れた製品や部材を創出するマルチマテリアル化が注目されており、車体や機体の軽量化のために有機材料の利用が検討されている。また、エレクトロニクス分野においても、ウェアラブルデバイス作製に向けた有機基材上への配線や、第6世代（6G）に向けた低伝送損失の高周波フレキシブルプリント基板の材料として期待されるフッ素樹脂などの難接着・接合樹脂への配線材料の形成が求められてきている。これらの応用の実現のためには、金属と有機材料など構成物質が全く異なる異種材料を強固に直接接合する技術が求められる。金属と有機材料の接合プロセスの一つとして、金属を接合する有機材料の融点近くまで加熱し、溶かして接合する熱圧着法がある。熱圧着法はリベットや接着剤などの部材を必要としないが、適用範囲が極性官能基を有する熱可塑性樹脂に限定される問題点がある。これらの問題を解決するために、熱源・ラジカル源の両機能を有する高密度大気圧非平衡プラズマジェットを用いた表面処理による極性官能基付与、およびに大気圧非平衡プラズマジェットからの入熱による直接加熱を利用した、金属と有機材料との異種材料直接接合の実現へ向けた研究を行っている。これまでに、化学構造に極性官能基を有しないポリエチレンに対して、プラズマ照射による表面への極性官能基付与を確認するとともに、ポリエチレンとステンレスの熱圧着による直接接合を実現している。また極性官能基を化学構造中に有する有機材料においても、プラズマ処理において接合強度を増加できること確認している。例えば、ステンレスとポリカーボネートの直接接合では両方の材料にプラズマ照射を行うことで、未処理の材料を用いた熱圧着法における直接接合に比べて約 8.2 倍の接合強度が得られている。

本講演では、金属と有機材料の異種材料直接接合における大気圧非平衡プラズマジェットを用いたプラズマ処理による接合強度の向上について、特に自動車・航空宇宙産業で用いられる金属や有機材料について検討した結果について報告する。

謝辞：本研究成果の一部は、JST 研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム ASTEP トライアウト JPMJTM22DF の支援を受けた。

パワーデバイスの接合技術

Power Device Bonding Technology

大阪公大工¹, 東北大金研²

○梁 剣波¹, 大野 裕², 井上 耕治², 永井 康介², 重川 直輝¹

Osaka Metropolitan Univ.¹, IMR Tohoku Univ.²

○Jianbo Liang¹, Yutaka Ohno², Koji Inoue², Yasuyoshi Nagai², Naoteru Shigekawa¹

E-mail: liang@omu.ac.jp

ワイドギャップ半導体である SiC (シリコンカーバイド)、GaN (窒化ガリウム)、Ga₂O₃ (酸化ガリウム) は、優れた物性値を持つため、パワーデバイスへの応用研究が進められている。これらのデバイスは動作中に大量の熱を発生し、デバイスの性能低下や寿命の短縮を招くため、効果的な放熱方法の開発が重要である。発生した熱が下地基板を通じて放熱されるため、基板材料の熱伝導率が放熱性を大きく左右する。ダイヤモンドは材料の中で最も高い熱伝導率を持ち、デバイスの放熱材料として非常に期待されている。しかし、ダイヤモンドは SiC、GaN、Ga₂O₃ と比較して、熱膨張係数と格子定数の差は大きいため、これらの材料をダイヤモンドの上で直接結晶成長させることが困難である。この技術的障壁を克服するため、多くの研究開発が進行中であり、新しい接合技術の開発が特に期待されている。我々の研究チームはこれまでに、常温接合技術を用いて Si を SiC、GaN、Ga₂O₃ と直接接合する技術を開発し、高い熱安定性とデバイスへの応用可能性を実証した [J. Liang et al. Appl. Phys. Lett. 104, 161604 (2014), Y. Zhou et al. Appl. Phys. Lett. 122, 082103 (2023), J. Liang et al. Jpn. J. Appl. Phys. 61, SF1001 (2022)]。また、最近では GaN とダイヤモンドを直接接合する技術を世界で初めて達成し、1000℃の高温にも耐える安定した接合を実現した[J. Liang et al. Adv. Mater. 33, 2104564 (2021)]。さらに、研究チームは Si 上で成長させた AlGaIn/GaN/3C-SiC 層を Si 基板から剥離し、ダイヤモンド基板上に接合することで、約 1 インチの GaN トランジスタを製造した (Fig. 1(a), 1(b))。1100℃の熱処理後も接合界面に膜剥離が起こらず、高品質なヘテロ接合界面を得ることができた (Fig. 1(c))。さらに、他の方法で作製されたダイヤモンド基板上的トランジスタと比較して、高い放熱性を達成し、トランジスタ特性の大幅な改善に成功した (Fig. 1(d))。

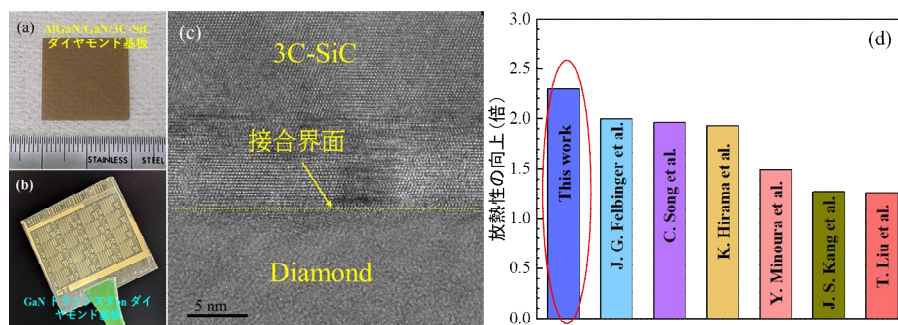


Fig.1. Optical microscopy images of (a) AlGaIn/GaN/3C-SiC thin films bonded to the diamond substrate and (b) the fabricated GaN HEMTs on the diamond, (c) cross-sectional TEM image of the bonding interface after annealing at 1100°C, and (d) Comparison of the heat dissipation improvement ratio between GaN HEMTs on diamond fabricated in this study and GaN HEMTs on diamond fabricated by other methods.

1 インチ多結晶ダイヤモンド上 GaN HEMT

GaN HEMTs on 1-inch polycrystalline diamond wafers

大阪公大工¹, エア・ウォーター (株)², 東北大金研³

○森山 千春¹, 川村 啓介², 大内 澄人², 浦谷 泰基², 大野 裕³, 井上 耕治³, 永井 康介³,
重川 直輝¹, 梁 剣波¹

Osaka Metropolitan Univ.¹, Air Water inc.², IMR Tohoku Univ.³

○Chiharu Moriyama¹, Keisuke Kawamura², Sumito Ouchi², Hiroki Uratani²,
Yutaka Ohno³, Koji Inoue³, Yasuyoshi Nagai³, Naoteru Shigekawa¹, Jianbo Liang¹

E-mail: liang@omu.ac.jp

【はじめに】GaN HEMT はその優れた電子輸送特性と耐電圧特性から、高出力および高周波デバイスへの実用化が進んでいる。しかし、デバイス動作時に生じる過度な発熱は、デバイス性能および素子信頼性の低下を引き起こす。そのため、Si(111)基板上に成長された GaN HEMT 層を、高い熱伝導率を有するダイヤモンド基板に転送することで、GaN on-diamond HEMT 構造を実現する研究が行われている[1]。

我々は、3C-SiC/Si(111)上に結晶成長した GaN HEMT 構造を、単結晶ダイヤモンド(SCD)基板に転写することにより、GaN on SCD HEMT を作製し、優れた放熱特性を実証した[2]。一方で、SCD は高価かつ大面積基板の作製が困難であるため、GaN on SCD HEMT 構造の実用化に関しては未だに課題が残っている。

このような背景から、SCD ではなく、比較的安価で大面積基板の作製が可能な多結晶ダイヤモンド(PCD)を放熱基板として用いることが望ましい。我々はこれまでに 10mm 角 PCD 上の GaN HEMT の作製に成功し、SCD 上の HEMT と同等の放熱特性を報告した[3]。今回は、GaN on PCD HEMT 構造の更なる大面積化を目標とし、1-inch PCD 上の GaN-HEMT を作製した。

【実験方法】 Fig.1 に、1-inch PCD 上 GaN HEMT の作製プロセスを示す。Si(111)上に結晶成長された AlGaIn/GaN/3C-SiC 層を、Si 基板から剥離し、剥離面と 1-inch PCD 基板を表面活性化接合法により接合し、その上に GaN HEMT を作製した。今回用いたプロセスは、デバイス形成前にダイヤモンド基板との接合を行う “bonding-first process” である。

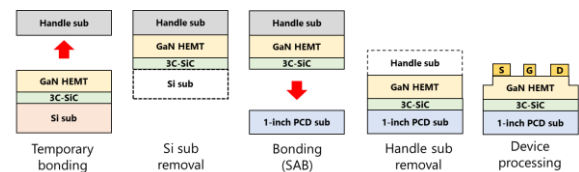


Fig1. Fabrication process of GaN on 1-inch PCD HEMTs

【実験結果】AlGaIn/GaN/3C-SiC 層と 1-inch PCD 基板を接合した試料および作製した GaN HEMT の外観を Fig. 2 (a) (b)に示す。大面積 PCD 基板は一般的に接合が難しいとされているが、接合条件の最適化により、我々は初めて 1-inch PCD 基板への GaN HEMT 層の大面積転写と HEMT の作製に成功した。この結果により、GaN on diamond HEMT 構造の実用化の可能性を示した。

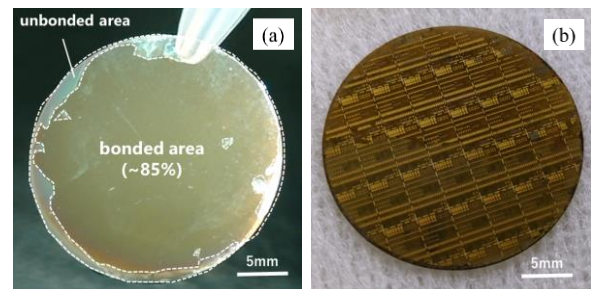


Fig2. (a) A 1-inch AlGaIn/GaN/3C-SiC/PCD wafer and (b) GaN HEMTs on 1-inch PCD wafer.

【謝辞】本研究の実施にあたり、JST 研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 産学共同 JPMJTR222B の支援を受けた。

- [1] S.Hiza et al,応用物理 Vol.90, No.3, pp.167-171 (2021)
- [2] R. Kagawa et al, *Small*, 2305574 (2023)
- [3] C. Moriyama, et al. 第 84 回応用物理学会 秋季学術講演会 23a-B201-9 (2023)

フレキシブルエレクトロニクスのための柔軟実装技術

Flexible direct bonding method for the fabricating flexible electronics system

東大工¹, 理研² °高桑 聖仁^{1,2}

The University of Tokyo¹, RIKEN², °Masahito Takakuwa^{1,2}

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

研究概要

オンスキンデバイスは、低ノイズの生体信号取得や静脈生体認証など次世代アプリケーションとして開発の需要が高まっている。オンスキンデバイスの実用化にはそれを構成するための数ミクロン厚のフレキシブルなセンサーや配線、プロセッサ等の素子開発が必要であると共に、リジッドデバイスの実装と異なり、フレキシブルエレクトロニクスの柔軟性を阻害しない柔軟な実装技術の開発が必須である。現在様々な研究者により有機材料の特性を利用した 5 ミクロン厚未満の超薄型の有機太陽電池や有機光検出器、有機トランジスタ等の柔らかい素子開発が進んでいる。そしてそれらの素子同士を接合し、システム化するための方法として、素子よりも分厚い導電性両面テープや銀ペーストが一般的に使われている。しかしながら追加接着層を設ける従来の実装アプローチは、接合部の曲げ剛性を増加させ、システムとしての柔軟性を著しく低下させる問題があった。したがって、接着剤を必要としない電極同士の直接接手法や接合部の機械的耐久を高めるためにポリマー基板の直接接合を開発する必要がある。本研究では、シリコンウェハ上へのチップ素子の実装のために開発された、プラズマ処理による表面活性化接合 (SAB) 技術を数ミクロン厚のポリマー基板自体やその上の金属電極の直接接合に応用した。ガス種最適化や超薄膜ならではの低い曲げ剛性特性を利用する事で表面粗さが 5 nm 程度の粗い表面でも直接接合に成功したため報告する。

実験方法及び結果

本研究では、接合試験片として超薄型フレキシブルエレクトロニクスで一般的に使用されるパリレン高分子 (2 μm 厚) を超薄型基板として作製した。基板上に電極と密着層として金とクロムをそれぞれ 100 nm と 3.5 nm 蒸着した。その結果、パリレンの表面は 5.1 nm の表面粗さであり、金電極表面は 5.3 nm の表面粗さであった。プラズマ処理には SAMCO 社の Aqua plasma 装置を利用し OH ラジカル過多の状態試験片の表面処理を行った。その後活性化表面同士を大気中で数分以内に接触させ、85°C 程度の加熱を行う事で表面粗さが大きいにもかかわらず界面が消失するほど強固な金電極の SAB を達成した。更に水蒸気プラズマ処理を使用する事で疎水性のパリレン基板も接触角は 79.1° から 1.4° まで低減し、水の導入が容易になることを確認した。そのため、プラズマ処理後に密着させた状態で水をパリレン基板界面に 5 μL 未満の水滴を注入し、85°C 程度の低温加熱を行う事で、水の可塑剤効果を利用したポリマー基板の直接接合を達成した。これらの SAB は同じプラズマ処理、加熱温度で生じるため、一連の接合処理を行う事で同時にポリマー基板領域と金電極領域を直接接合可能であるハイブリッド SAB 技術であり、オンスキンデバイスの柔軟で強固な実装技術として期待される。

表面活性化接合のフォトニクスデバイスへの展開 Application of Surface Activated Bonding to Photonic Devices

東北大 °日暮 栄治

Tohoku Univ., °Eiji Higurashi

E-mail: higurashi@tohoku.ac.jp

異種材料・異種機能を集積するヘテロジニアス集積技術が、将来の継続的な半導体産業成長の鍵として注目を集めている。ヘテロジニアス集積技術を支えるコアテクノロジーの一つが “常温・低温接合技術” である。常温・低温接合技術によりどのような機能や特性が実現できるのか、具体的なデバイスを例に述べる。

- 1) 気密封止：不活性ガスを用いた気密封止に加えて、気体による熱伝導を避ける赤外線センサでは、真空封止が求められる。変位・回転角を測定するマイクロエンコーダや小型原子時計用ガスセルへの適用をめざし、Au 薄膜を用いた封止技術の開発が進められている。平滑な Au 薄膜(RMS 表面粗さ 0.5 nm 以下)を用いて、常温・無加圧での気密・真空封止が可能である。
- 2) 高放熱構造の実現：半導体デバイスの高出力化に伴い、温度上昇による素子性能劣化を抑制するため、高放熱基板と一体化する接合技術が関心を集めている。光半導体と高熱伝導基板が一体となった高放熱構造光デバイスを実現するために、直接遷移型化合物半導体の GaAs と、Cu よりも大きな熱伝導率を有する SiC を表面活性化接合により直接常温で貼り合わせた高放熱構造が提案されている。
- 3) マルチチップ接合：低温かつはんだを用いないダイボンディング手法として、Au 薄膜や Au マイクロバンプを用いた Au-Au 表面活性化接合による大気中、低温接合（常温～150℃）が開発されている。半導体レーザやフォトダイオードなどの複数の光素子を高精度に表面実装した基板をさらに高精度に積層していくことにより作製した 3 次元構造の変位・回転角センサ（光マイクロエンコーダ）が実現されている。光センサの超小型化(2.8 mm×2.8 mm)、薄型化(1.0 mm)が実現されている。一方、このような光素子の Au 電極表面は、必ずしも直接接合に求められる表面粗さ 1 nm 以下でないことも多い。そのため、テンプレートストリッピングに基づく転写プロセスにより後工程で平滑な表面を形成する手法の開発などの試みも進められている。
- 4) ハイブリッド接合による 3D 集積化：半導体の高集積化を進める手法として、3 次元積層技術がある。機能の異なる層を積層することで、微細化を進めずに回路規模を増やすことが可能となる。3 次元積層技術により高性能化・高機能化が進められている分野の一つがイメージセンサである。3 枚の 8 インチウェハに受光部やカウンタ回路を形成し、Si ナノ密着層を用いた常温ハイブリッド接合による 3 層の画素が実現されている。

[1] 日暮栄治, 総論—ヘテロジニアス集積技術と光デバイス応用—, OPTRONICS, vol. 42, no. 503, pp. 102-103 (2023).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 光と磁気、スピントロニクスに関わる最新の研究動向

[17p-A22-1~7] 光と磁気、スピントロニクスに関わる最新の研究動向

[17p-A22-1]

オープニング: 光と磁気、スピントロニクスに関わる最新の研究動向

○清水 大雅¹ (1.東京農工大工)

[17p-A22-2]

光導波路を用いた光磁気記録デバイスとAI応用

○庄司 雄哉¹、高木 岳¹、矢島 駿¹ (1.東工大)

[17p-A22-3]

磁気光学効果のセンサ応用とスピンプラズモニクスへの展開

○山根 治起¹、長谷川 崇²、小林 政信³、安川 雪子³ (1.秋田産技センター、2.秋田大、3.千葉工大)

[17p-A22-4]

熱アシスト磁気記録(HAMR)技術開発と製品化およびその実用化

○横山 智弘¹、岩田 太郎¹ (1.日本シーゲイト (株))

[17p-A22-5]

磁性メタマテリアルを用いた光スピン流制御: メタ光スピントロニクス

○松原 正和^{1,2,3} (1.東北大理、2.東北大CSIS、3.JSTさきがけ)

[17p-A22-6]

光を用いた超高速磁化制御

○塚本 新¹ (1.日大理工)

[17p-A22-7]

反強磁性マグノン伝播の時間分解イメージング

○佐藤 琢哉¹ (1.東工大理)

オープニング：光と磁気、スピントロニクスに関わる最新の研究動向

Opening: Recent trends in research activity related to light, magnetism, and spintronics

東京農工大 清水 大雅

Tokyo Univ. of Agri. & Tech., °Hiromasa Shimizu

E-mail: h-shmz@cc.tuat.ac.jp

光と磁気、スピントロニクスが関係する現象は、通信、センサ、プラズモニクス、メタマテリアル、磁気記録から、演算、AI 応用まで幅広く分野横断的に活発な研究活動が行われ、重要なトピックスです。本シンポジウムでは、光と磁気、スピントロニクスに関わる物理、デバイス応用に関する最先端の研究を行っている大学・研究所の講師の方々や、磁気記録の技術開発と製品化、および、その実用化を行っている企業の技術者の方に講演いただき、最新の動向と今後の展望について議論します。

光導波路を用いた光磁気記録デバイスと AI 応用

Magneto-optical recording device with optical waveguide and AI applications

東工大 °庄司 雄哉, 高木 岳, 矢島 駿

Tokyo Institute of Technology, °Yuya Shoji, Gaku Takagi, Shun Yajima

E-mail: shoji@ee.e.titech.ac.jp

光磁気記録は MO ディスクに代表される光記録メディアとして広く研究開発が行われてきた歴史があるが、近年では HDD の近接場を用いた熱アシスト磁気記録としての利用に限られている。新しい応用開拓に向けて、ディスク機構によらない固体式の構成や光信号の高速処理への適用の観点から、我々は光導波路に着目した光磁気記録デバイスの研究を行っている。

光通信分野では近赤外波長帯で動作する半導体デバイスが主流であり、それらと磁性材料との集積が課題となる。再生層としては YIG など磁気光学結晶が低い光吸収損失で適しており、半導体上での結晶化は容易ではないが、近年いくつかのアプローチで進展が見られる[1,2]。一方、記録層としては磁化のスイッチングがしやすく残留磁化の大きな軟磁性体 CoFeB が適している。電流で CoFeB の磁化を書き換えた光スイッチにおいて 20 dB 以上の高い消光比動作に成功している[3]。光書き込みについては、Fig.1 に示すように Si 導波路上に形成した $20\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ サイズの CoFeB に対して、光入力をトリガーとした熱アシスト磁化反転の観測に成功している[4]。外部磁場を掃引した測定では光入力の有無で保磁力が低下することも確認している。

しかし、光回路および記録層のサイズとして情報記録デバイスとしての応用は難しい。そこで、新しい応用分野として光吸収による熱アシスト磁化反転の過渡応答をニューロンにおける漏れ積分発火モデルに見立てた光スパイキングニューロン素子を提案している[4]。さらには、磁気不揮発性を活かして、回路内部でパラメータを逐次更新していくような教師なし学習型の光演算回路の実現を目指し研究を進めている。

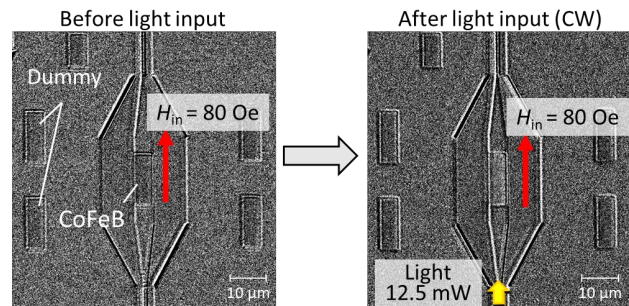


Fig. 1. Magneto-optical recording of CoFeB formed on Si waveguide [4].

謝辞：本成果の一部は NEDO (JPNP16007)、JSPS 科研費(23H04802)の支援によるものであり、実験プロセスの一部は文部科学省 ARIM (JPMXP1224IT0028) の支援を受けて東工大ナノ構造造形支援において実施された。

- 参考文献 [1] K. Srinivasan and B. L. H. Stadler, (Review) Opt. Mater. Express, 12(2), 697-716 (2022).
 [2] Y. Shoji, S. Taniguchi, and S. Yajima, Opt. Mater. Express, 13(9), 2489-2496 (2023).
 [3] T. Murai et al., Optics Express, 28(21), 31675-31685 (2020).
 [4] T. Murai, Y. Shoji and T. Mizumoto, Opt. Express, 30(11), 18054-18065 (2022).
 [5] G. Takagi, T. Murai, Y. Shoji, Jpn. J. Appl. Phys. (accepted)

磁気光学効果のセンサ応用とスピンプラズモニクスへの展開

Magneto-optical activities for chemical sensing and spin-plasmonic applications

秋田産技センター¹, 秋田大², 千葉工大³ ○山根 治起¹, 長谷川 崇², 小林 政信³, 安川 雪子³

Akita Ind. Tech.¹, Akita Uni.², Chiba Inst. Tech.³, ○Haruki Yamane¹, Takashi Hasegawa²,

Masanobu Kobayashi³, Yukiko Yasukawa³, E-mail: yamane@aitc.pref.akita.jp

光と磁性体との相互作用である磁気光学効果は、照射する光の偏光状態および入射面と試料の磁化方向に依存して、出射される光の偏光角や強度が、磁化の向きに応じて変化する現象である。大きな磁気光学応答は、光情報通信/演算、光情報記録、あるいは、光検知式センサなど光機能デバイスの高性能化に繋がると期待されている。磁性体にナノ構造(積層構造、微粒子化、微細加工など)を付与することで、光との相互作用が大きくなり、磁気光学効果の増幅あるいは極性反転が生じる[1-5]。例えば、[磁性層/貴金属層]積層膜では、試料表面における伝導電子の集団的振動と光とが結合した表面プラズモンポラリトンが励起され、磁気光学効果は単層膜に比べて100倍程度にまで増幅される。一例として、[CoPt(2.0nm)/Ag(28.7nm)]二層膜の磁気光学シミュレーションを図1に示す。反射率が最小となる共鳴角において、急峻かつ大幅な増大が確認できる。表面プラズモン共鳴は、リアルタイムかつラベルフリーのバイオ化学センサとして実用化されている。急峻な応答を示す磁気光学信号は、通常のパラズモンセンサで計測する反射光強度に比べて、表面状態の変化に敏感であり、高感度化に有効である。我々は、表面媒質の屈折率変化を計測するグルコースセンサや、積層膜表面に水素感応層を形成した水素ガスセンサを提案している[1, 2]。さらに、磁性とプラズモンとの融合は、磁区構造を活用した磁気メタサーフェス、あるいは、スピン配列による磁化/光波/電気伝導の統一的制御を可能とする『スピンプラズモニクス』への展開も期待される[6, 7]。本研究の一部は、科研費(23K04619)の助成を受けて実施した。

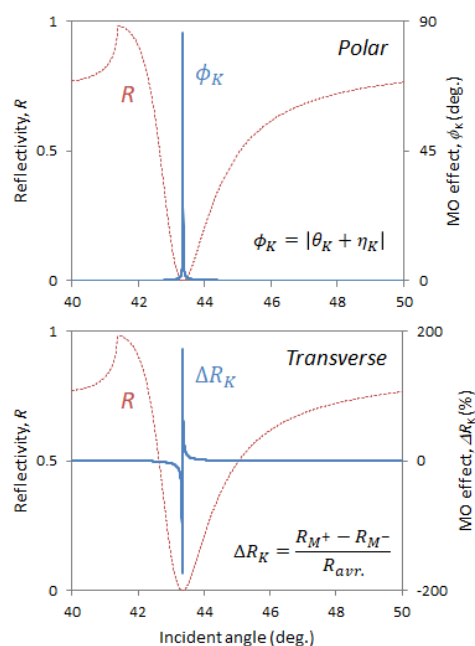
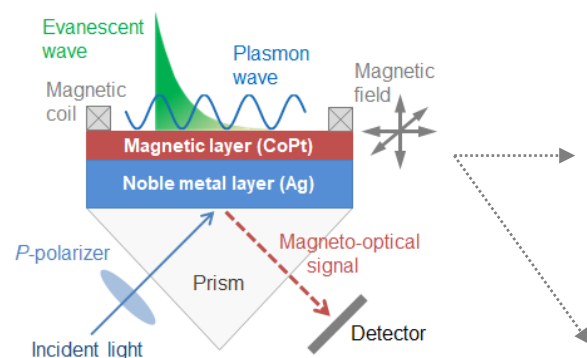


Fig.1 MO activities in CoPt/Ag bilayer.

- [1] H. Yamane, J. J. Appl. Phys. **60**, CCG01 (2021).
- [2] Y. Yasukawa *et al.*, APL Materials **12**, 061104 (2024).
- [3] H. Yamane *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 052409 (2015).
- [4] H. Yamane *et al.*, J. Appl. Phys. **124**, 083901 (2018).
- [5] H. Yamane *et al.*, J. J. Appl. Phys. **53**, 05FB04 (2014).
- [6] H. Yamane *et al.*, Scientific Reports **12**, 13871 (2022).
- [7] 山根他, 応用物理秋季講演会, 22p-P04-6 (2023).

熱アシスト磁気記録 (HAMR) 技術開発と製品化およびその実用化

HAMR (heat assisted magnetic recording) technology development, commercialization, and practical application.

日本シーグイト株式会社 横山 智弘 / 岩田 太郎

E-mail: tomohiro.yokoyama@seagate.com, taro.iwata@seagate.com

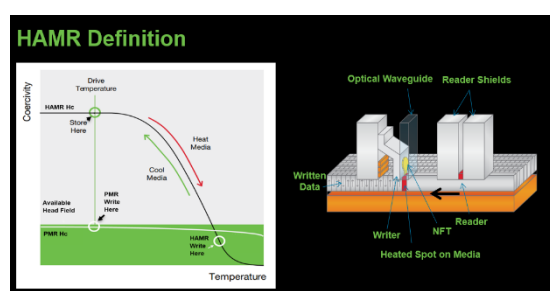
1. はじめに

昨今様々なインフラチャーターを支えているデータセンターでは、2つの制約要因が存在する。一つ目は限られた設置面積にて大量のデータ保存・運用の実現、二つ目は運用コストとしての消費電力低減。これらを解決するために、大容量 HDD のニーズがあるが、既存の PMR（垂直磁気記録方式）では、これ以上の高容量化に限界があり、新技術導入による大容量化が必要であった。この度、Seagate Technology では HAMR（熱アシスト磁気記録方式）を導入した大容量 HDD の製品化を行い、現在のデータセンターが抱える二つの大きな制約要因の解決に寄与する。

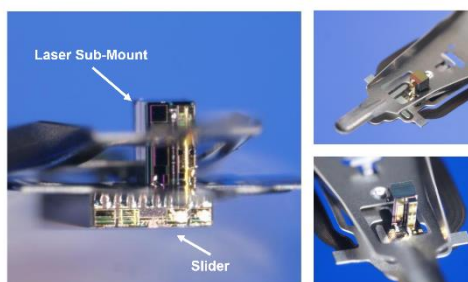
2. 講演内容

- HAMR の開発に至る歴史及び経緯。
- HAMR の概要と HAMR 製品化に必要な構成/部品技術の説明。
- HAMR が解決するデータセンターの制約条件。
- MOZAIC とは？ HAMR 技術の製品化とシステムとしての実用化。
- データセンターでのシステム運用ユースケース。
- 今後の更なる高容量化へマイルストーンとロードマップ。

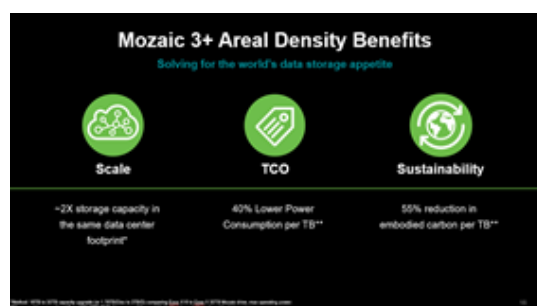
(HAMR 概要)



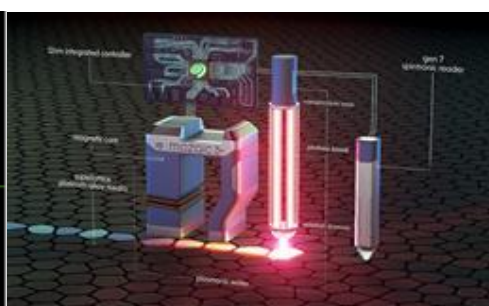
(HAMR ヘッド写真)



(データセンターの制約条件)



(MOZAIC の構成部品図)



磁性メタマテリアルを用いた光スピン流制御：メタ光スピントロニクス

Optical control of spin current using magnetic metamaterials: Meta opto-spintronics

東北大理¹, 東北大 CSIS², JST さきがけ³ ◯松原 正和^{1,2,3}

Dept. of Phys. Tohoku Univ.¹, CSIS, Tohoku Univ.², JST PREST³, ◯Masakazu Matsubara^{1,2,3}

E-mail: m-matsubara@tohoku.ac.jp

物質が示す様々な機能は、そこに内在する電子自由度の対称性と密接に結びついている。例えば、空間反転対称性の破れた系に光を照射すると、バイアス印加無し（ゼロバイアス）で直流電流が発生する。そのようなゼロバイアス光電流が観測される代表例が、半導体 p-n 接合界面を利用した太陽電池や光検出器である。他方、物質の結晶構造の空間反転対称性の破れに由来するゼロバイアス光起電力（光電流）発生はバルク光起電力効果と呼ばれ、これまで強誘電体・圧電物質・半導体などにおいて報告されており、近年ではトポロジカル物質の物性研究の新たなツールとしても関心を向けられている。さらに、光の偏光自由度と組み合わせ、電荷の流れ（電流）のみならずスピン角運動量の流れ（スピン流）をも生成・制御する新しいスピントロニクス機能として注目されている [1]。

本講演では、最近我々が行っている、物質の対称性を人工的に操作することにより新規なスピントロニクス機能を創出する試みについて紹介する。具体的には、ナノ空間の対称性を人工的に操作した物質（メタマテリアル）を用い、「空間反転対称性の破れ」や「時間反転対称性の破れ」に起因する光スピン流制御技術「メタ光スピントロニクス」について議論する (Fig. 1) [2-4]。

- [1] 例えば, J. W. McIver *et al.*, Nat. Nanotech. **7**, 96 (2012), P. Huang, K. Taniguchi, M. Matsubara *et al.*, Adv. Mater. **33**, 2008611 (2021).
 [2] M. Matsubara, T. Kobayashi, H. Watanabe, Y. Yanase, S. Iwata, T. Kato, Nat. Commun. **13**, 6708 (2022).
 [3] H. Taketani, T. Kato, M. Matsubara *et al.*, In preparation.
 [4] M. Hild, M. Matsubara, T. Kato, S. D. Ganichev *et al.*, Phys. Rev. B **107**, 155419 (2023).

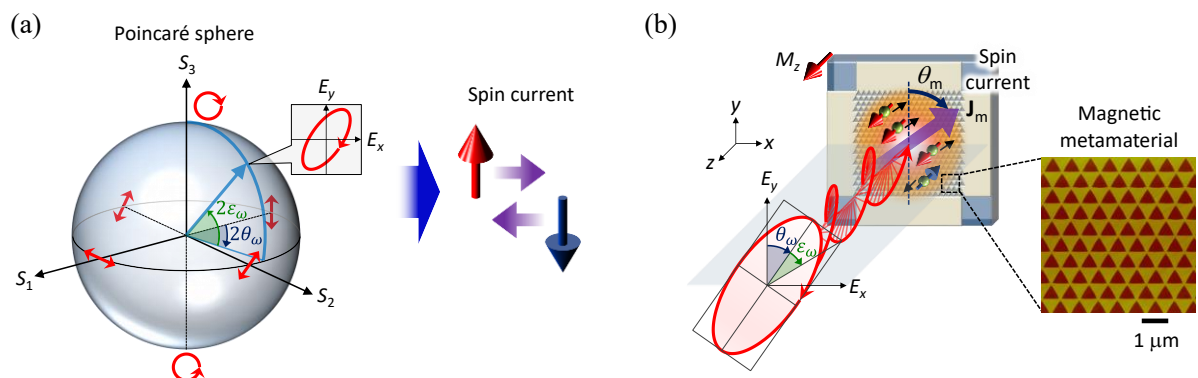


Fig. 1 (a) Poincaré sphere representing the polarization states of light. (b) By using magnetic metamaterials with artificially manipulated symmetry, spin current \mathbf{J}_m (the flow of spin angular momentum) is generated and controlled without any external bias fields, utilizing the polarization degrees of freedom of incident light (polarization angle θ_ω and ellipticity angle ε_ω).

光を用いた超高速磁化制御

Ultrafast manipulation of magnetization using light

日大理工¹ ○塚本 新¹

Nihon Univ.¹, °Arata Tsukamoto¹

E-mail: tsukamoto.arata@nihon-u.ac.jp

磁化・スピン依存現象の超高速操作と検出は、磁気デバイスやスピントロニクス/スピンオービトロニクスデバイスの将来的応用に向け非常に重要な課題である。固体へ超短時間作用を与える物理量として光に注目し超短パルスレーザーを用いる事は有望なアプローチの1つと考えられる。現代技術におけるエネルギーと角運動量を伴う作用素の一つとして、フェムト秒レーザーパルス我代表とし、様々な波長・パルス長の光が利用可能であり、磁化反転やスピン流などを引き起こす励起源として機能し得る。その時間スケールは、スピン歳差運動や典型的なスピン格子緩和時間などの基本量よりもはるかに短いオーダーから、マグノン・フォノン共鳴、準静的過渡制御まで幅広く選択できる。例として、パルス長 40 fs の可視パルス光を用い、室温で外部磁場印可無の条件下でフェリ磁性 GdFeCo 合金薄膜において決定論的な全光型磁気反転(AOS)現象が誘起可能、さらに作用後の磁化状態を入射円偏光の掌性により選択可能であることを報告している^[1]。

本講演では、超高速磁化制御技術への応用可能性を念頭に、主として光を用いた磁化反転操作に注目し、AOS や新たなスピンドYNAMIKSの機構解明、磁化制御技術としての可能性の追求において、さまざまな波長の超短パルス光による励起と時間分解観察が重要な役割を果たしていることを紹介する。主たる対象材料系として、GdFeCo 磁性体の新奇な磁気動的機構を追求するために、反強磁性体のような反平行結合した起源の異なるスピン秩序を持つフェリ磁性体における各副格子磁化ダイナミクスを解明することが望まれていた。超短パルスレーザー（可視光）による励起過程に対し、元素識別時間分解測定（X線磁気円二色性）により Gd と Fe では磁化の時間応答特性が異なるとともに過渡的な強磁性状態が出現する事が明らかとなり^[2]、後に、反平行結合した磁化応答にこのような違いがあることが決定論的 AOS 現象の発現において重要な役割を果たす事が判明した。また、AOS は光子エネルギーの低い THz パルス光でも励起可能であり、パルス長が重要な駆動条件の1つであることも明らかとなった^[3]。

さらに近年、磁性材料への直接的光作用ではなく、超短パルスレーザー光により生成した円偏波光学フォノンによっても、GdFeCo 薄膜磁性体の磁化を反転できる事を見出した^[4]。超高速のバーネット効果により説明可能な本超高速物理機構は、フォノンの掌性によって永久磁石材料の磁化反転方向が選択でき、また潜在的には普遍的な物理現象と考えられる事から、磁気に立脚したエレクトロニクスや情報処理への新たなアプローチ方法を切り開くものと期待される。

- 1) C. D. Stanciu, et. al., Phys. Rev. Lett., 99 (2007) 047601.
- 2) I Radu et. al., Nature, 472 (2011) 205.
- 3) CS Davies et al., Phys. Rev. Appl., 13 (2020) 024064.
- 4) CS Davies et. al., Nature, 628 (2024) 540.

反強磁性マグノン伝播の時間分解イメージング

Time-resolved imaging of the propagation of antiferromagnetic magnons

東工大理 佐藤 琢哉

Tokyo Tech, Takuya Satoh

E-mail: satoh@phys.titech.ac.jp

マグノンを基盤とする電流不要の技術、マグノニクスの実現のためには、マグノンの全光学的制御が基礎研究と実用的応用の両方において重要な技術となる。マグノン-ポラリトン、磁性体におけるマグノンとフォトン（光子）の結合状態であり、マグノンのような制御性とフォトンのような高速伝播を示すことが期待されている。最近の研究では、入射テラヘルツ波の変調としてマグノン-ポラリトンが観察されているが、マグノン-フォトン結合がマグノンの伝播特性に与える影響は未解明のままであった。本講演では、時間分解イメージング測定を通じてコヒーレントなマグノン-ポラリトンの時空間ダイナミクスを観察した結果を報告する [1]。マルチフェロイック BiFeO_3 は、マグノンとフォトンの間に強い結合が期待される。観察されたダイナミクス (図 1) は、反強磁性マグノンがフォトンとの強い結合を介して、数百 μm にわたり長距離伝播できることを示している。これらの結果は、光マグノニクスの道を拓くものと期待される。

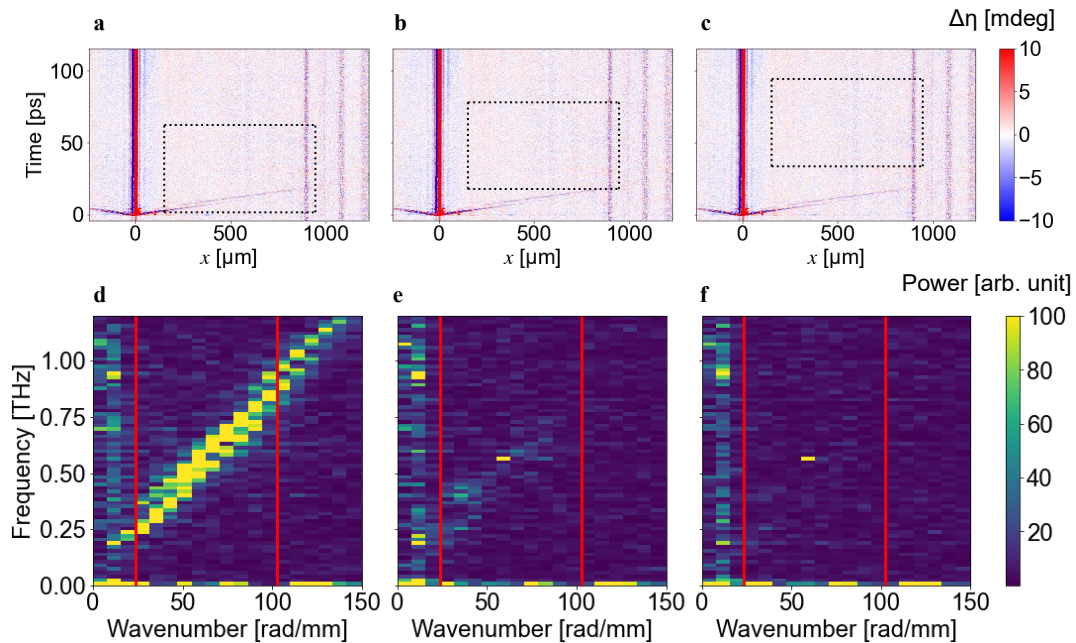


図 1: Coherent propagation of magnon-polaritons and phonon-polaritons. **a** The spatiotemporal waveform observed in the pump-probe imaging measurement. **b** and **c** shows the same waveform as **(a)** with different Fourier transform regions for **e** and **f**, respectively.

[1] R. Kainuma, K. Matsumoto, T. Ito, and T. Satoh, to be published in *npj Spintronics*, arXiv:2302.01821.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：ペロブスカイト太陽電池の新展開

[16a-C41-1~6] ペロブスカイト太陽電池の新展開

シンポジウムスポンサー



[16a-C41-1]

Greetings

○Tsunenobu Kimoto^{1,2}, Takao Someya^{3,4}, Todd M. Osman⁵ (1.JSAP President, 2.Kyoto Univ., 3.MRS President, 4.The Univ. of Tokyo, 5.MRS Executive Director)

[16a-C41-2]

Challenges and Perspectives of Perovskite Solar Cells - Lessons from 50 years of thin film solar cell development

○Makoto Konagai¹ (1.Tokyo City Univ.)

[16a-C41-3]

Open-Air Spray-Plasma Manufacturing of Large-Area Perovskite Solar Cells and Modules

○Reinhold H. Dauskardt¹ (1.Stanford University)

[16a-C41-4]

Technological Advances of Perovskite Solar Cells and Modules

○Hiroshi Segawa^{1,2} (1.Graduate School of Arts and Sciences, The Univ. of Tokyo, 2.RCAST, The Univ. of Tokyo)

[16a-C41-5]

Stability of Tin Halide Perovskites – from Additives through Two-Dimensional Materials

○Kenneth R Graham¹, Syed Joy¹, Tareq Hossain¹, Harindi Atapattu¹, Henry Pruett¹, Alex Boehm¹, Stephen Johnson² (1.Univ. of Kentucky, 2.Transylvania Univ.)

[16a-C41-6]

Perovskite solar cells consisting of tin

-Improvement of efficiency and stability-

○Shuzi Hayase¹ (1.Univ. Electro-Comm)

Challenges and Perspectives of Perovskite Solar Cells

- Lessons from 50 years of thin film solar cell development

Tokyo City University, Makoto Konagai
E-mail: mkonagai@tcu.ac.jp

Since 1972, our group has been developing high-efficiency and low-cost manufacturing technologies for GaAs, amorphous-Si, microcrystalline-Si, Cu(InGa)Se₂, CdTe, and other thin-film solar cells. Based on this expertise, we are currently working on issues toward the practical application of perovskite solar cells. In this presentation, based on our experience in the research and development of various thin-film solar cells, we will discuss the development of elemental technologies related to the manufacturing of interconnected modules of perovskite solar cells, the development of high-efficiency technologies using perovskite/Si tandem solar cells, and the power generation characteristics and degradation mechanisms of perovskite solar cells both indoors and outdoors.

1. Flexible perovskite solar cells with through-hole current collector electrodes

Flexible amorphous-Si solar cells using polyimide film substrates are already a mature technology and have been put into practical use at a scale of about 3MW per year. By using through-hole current collector electrodes, the area efficiency can be increased when manufacturing modules. In this study, we have developed a perovskite solar cell with a through-hole current collector electrode on a polyimide film substrate and have already achieved a conversion efficiency of about 12%⁽¹⁾.

2. Research and development of perovskite/Si tandem solar cells

Perovskite/Si tandem solar cells are one of the solar cells currently being developed worldwide. In this study, we are conducting research and development of perovskite/Si tandem solar cells using bendable Si wafers with a thickness of 80 μm . To date, we have achieved a conversion efficiency approaching 27% in a small-area cell with an area of 1 cm^2 ⁽²⁾. We will report the electrical characteristics evaluation of these solar cells and the detailed evaluation results of their cross-sections using SEM.

3. Outdoor power generation characteristics and degradation mechanism of perovskite solar cells

We have been conducting outdoor power generation characteristics of perovskite solar cells prepared at NIMS since 2022. As a result of these long-term measurements, it was observed that the cells deteriorated significantly, especially in the summer when the cell temperature rose. In particular, the deterioration of the fill factor was noticeable⁽³⁾. To clarify the cause of this degradation, cross-sectional SEM observation was performed, and a high-resistance layer due to phase transition was observed in all samples. These phase transitions were also observed in high-temperature light irradiation experiments indoors.

Acknowledgements

This work was supported in part by NEDO, JPNP21014, JPNP20015, and TCU "Key Research Promotion Program."

References

- (1) R. Ishikawa et.al, Proc. PVSEC-34, Shenzhen, China, Nov.6-10 (2023) pps.727-728
- (2) K. Saito et.al, Proceedings of EUPVSEC 2023, 020009-001-007 (2023)
- (3) M. Konagai et. al, Proc. PVSEC-34, Shenzhen, China, Nov.6-10 (2023) pps.222-225

Open-Air Spray-Plasma Manufacturing of Large-Area Perovskite Solar Cells and Modules

Reinhold H. Dauskardt

Ruth G. and William K. Bowes Professor

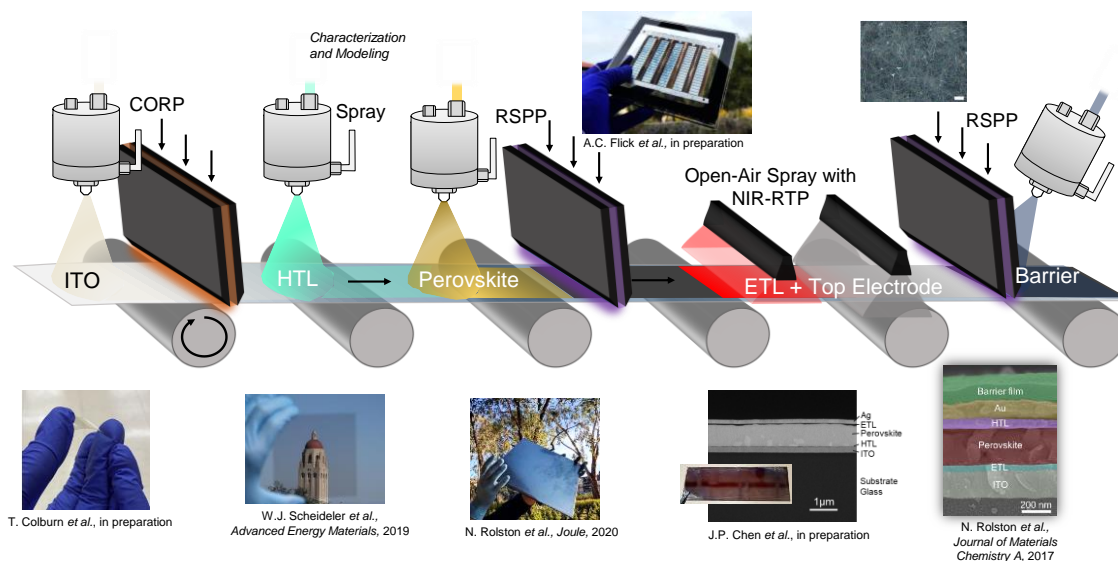
Materials Science, Mechanical Engineering and Surgery

Stanford University and the Stanford School of Medicine

Reinhold H. Dauskardt is the Ruth G. and William K. Bowes Professor of the Department of Materials Science and Engineering, the Department of Mechanical Engineering and the Department of Surgery in the Stanford School of Medicine. He is a Visiting Professor in the School of Materials Science at the Nanyang Technical University in Singapore. He has works on integrating new hybrid materials into emerging device, nanoscience, and energy technologies and also on the biomechanical function and barrier properties of human skin and other soft tissues. He is an internationally recognized expert on spray plasma processing of functional thin-films, and on the reliability and damage processes in device technologies.

Abstract: Open-air plasmas provide opportunities for versatile and low-cost materials synthesis and film deposition on large and/or complex shapes in laboratory air and at low temperature. The generally solvent-free process further allows for the simultaneous functionalization of, and deposition on, substrates in a single step. Advances in the use of jet plasma process together with precursor spray deposition have further expanded the utility of the deposition technique for a range of multi-functional films.

In-Line Manufacturing of Open-Air Processed Perovskite Solar Modules



I will describe our labs work to develop and demonstrate a scalable open-air plasma process to rapidly deposit and form perovskite cells and modules in open air at fast linear deposition rates. The process uses a combination of reactive species, UV and thermal energy to rapidly form the perovskite film after air spraying, forming high quality perovskite films. I will further mention an indirect laser scribing technique we have developed to efficiently form serially interconnected perovskite cells to form modules along with technoeconomic modeling of module manufacturing costs and LCOE estimates for pilot scale solar installations. I will discuss important aspects related to the stability of perovskite cells and modules and implications for module lifetimes.

ペロブスカイト太陽電池セル・モジュールの高性能化

Technological Advances of Perovskite Solar Cells and Modules

東大院総合¹, 東大先端研² ◯瀬川 浩司^{1,2}

Graduate School of Arts and Sciences, The Univ. of Tokyo¹, RCAST, The Univ. of Tokyo²

◯Hiroshi Segawa^{1,2}

E-mail: csegawa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

Organometal halide perovskite is one of the promising light absorption material for the light-weight and high-efficiency solar cells. Through the many studies related to the organometal halide perovskite solar cells (PSCs), the composition of the organometal halide perovskite is recognised as a key factor in the improvement of the stability and efficiency. Many groups investigated mixed cation and mixed halogen perovskite absorber toward the high efficiency, whereas unexpected ion migration and/or phase segregation were observed. For the improvement of the stability, several approaches have been investigated. In our study, K⁺-doped perovskite is good for the stabilization with keeping relatively high performance. It can be stabilized to some extent where it is not decomposed after 10, 000 h of heating. On the other hand, the crystal lattice structure of the organometal halide perovskite is also important for both absorption and photophysics of them, whereas the micro-structural aspects within the simple organometal halide perovskite are still controversial issue. In our study, direct observation of the microstructure of the thin film organometal halide perovskite using transmission electron microscopy was investigated. Unlike previous reports, it is identified that the tetragonal and cubic phases coexist at room temperature, and it is confirmed that superlattices composed of a mixture of tetragonal and cubic phases are self-organized without a compositional change. The organometal halide perovskite self-adjusts the configuration of phases and automatically organizes a buffer layer at boundaries by introducing a superlattice. These results show the fundamental crystallographic information for the organometal halide perovskite and demonstrates new possibilities toward high performance perovskite solar cells. As for the light-weight PSC, we accomplished 23.8% PCE for the PSC using the polyimide film substrate, which shows 46.9W/g.

References

- 1) Tae Woong Kim et.al., ACS Applied Materials and Interfaces 2023, 15, 21974-21981.
- 2) Motoshi Nakamura et. al., ACS Applied Energy Materials 2022, 5, 10409-10414.
- 3) Ching Chang Lin et. al, ACS Omega 2021, 6, 17880-17889.
- 4) Yuiga Nakamura et. al., Inorganic Chemistry 2020, 59, 6709-6716.
- 5) Tae Woong Kim et. al., Advanced Materials 2018, 30, 1705230.
- 6) Zeguo Tang et. al., Scientific Reports 2017, 7, 12183.

Stability of Tin Halide Perovskites – from Additives through Two-Dimensional Materials

University of Kentucky.¹, Transylvania University.², °Kenneth R. Graham,¹ Syed Joy,¹ Tareq

Hossain,¹ Harindi Atapattu,¹ Henry Pruett,¹ Alex M. Boehm,¹ Stephen Johnson²

E-mail: Kenneth.graham@uky.edu

Metal halide perovskites are promising materials for solar cells and light emitting diodes, with efficiencies rivaling commercialized material systems and the potential for significantly lower cost. The majority of research to date has focused on three-dimensional (3D) ammonium lead halides (APbX_3); however, lead presents a potential impediment to commercialization. The most promising alternative to lead-based halide perovskites (Pb-HPs) are those where Pb is substituted with tin (Sn-HPs). While Sn is much less toxic than Pb, the performance and stability of Sn-HPs must be improved for them to be competitive with Pb. Currently, record power conversion efficiencies (PCEs) of Sn-HPs have recently passed 15%, while their Pb counterparts are now over 26%. The primary shortfall of Sn-HPs is the tendency of Sn to oxidize from Sn^{2+} to Sn^{4+} , which introduces harmful defect states that limit performance. Additionally, Sn oxidation from Sn^{2+} to Sn^{4+} greatly limits Sn-HP stability. To increase both the PCE and stability of Sn-HPs, oxidation mechanisms must be understood, and appropriate processing and material chemistries developed.

Several approaches are now used to improve the performance and stability of Sn-HPs. The most widely of these is the incorporation of SnF_2 as an additive, with alternative or complementary approaches including incorporation of bulk ammonium ligands capable of forming two-dimensional (2D) phases, incorporation of reducing or coordinating additives in solution, tuning of the processing solvent system, and approaches to obtaining low SnI_4 concentrations in the precursor solution. Our laboratory has focused on the use of surface ligands, stabilizing additives, and 2D Sn-HPs to determine how additives and 2D phases impact device performance, defects, and material stability. From the perspective of surface ligands, we find that fluorinated surface ligands and those that increase hydrophobicity lead to increases in material and device stability. In the case of additives, we find that additives which can coordinate Sn^{2+} or undergo halide exchange with SnI_4 can limit Sn^{4+} formation and the concentration of defect states in the film. The acidity of the additive also exerts a large influence on stability, with more acidic additives promoting Sn^{2+} oxidation and basic additives stabilizing Sn^{2+} . Recently, we have gained insight into the role the structure of the bulky ammonium cation plays in stabilizing 2D Sn-HPs. Here, we find that steric hindrance near the ammonium group, the extent of horizontally oriented sheets, and the degree of hydrophobicity all impact material stability.

錫を含むペロブスカイト太陽電池の高効率化と耐久性向上

Perovskite solar cells consisting of tin-Improvement of efficiency and stability-

電気通信大学 早瀬修二

Info-Powered Energy System research Center, The University of Electro-Communications

E-mail: hayase@uec.ac.jp

錫を含むペロブスカイトの光吸収端はハロゲン化鉛ペロブスカイトよりも長波長域(〜1100 nm)にあり、単層太陽電池として最適なバンドギャップを有する。欠陥のない理想的な格子を有するハロゲン化錫ペロブスカイトの電子、ホールの有効質量はハロゲン化鉛ペロブスカイトと同程度であり、かつ ambipolar なため、太陽電池の光吸収層として高いポテンシャルを有する。現在錫鉛アロイ化ペロブスカイト太陽電池、鉛フリーペロブスカイト太陽電池の効率は 23-24%¹⁾, 15-16%²⁾と向上してきた。

ハロゲン化錫系ペロブスカイト太陽電池の効率向上を阻害している要因は、格子欠陥による電荷再結合サイトの存在である。鉛フリー錫ペロブスカイト太陽電池(ABX_3)の格子、界面には Sn^{4+} イオンの存在、A, B, X の欠損、置換、格子間挿入などの欠陥が存在する。特に Sn^{4+} による電荷再結合が顕著に起こるため、一般的に還元剤を添加する。我々は直接錫金属を錫系ペロブスカイトヘテロ界面に蒸着し Sn^{4+} イオンを減少させた³⁾。界面には多くのイオン欠損があるため、それらを修復する水素結合を利用した多官能性 additive の添加や表面パッシベーション処理される。我々はこれらの方法に加えて Ge イオンを添加することにより 15%を超える効率を有する太陽電池を作製している。我々はイオン拡散を防止することにより耐久性が改善されることを確認している。85°C, 1000 時間の安定した発電ができるという報告がある⁴⁾。光誘起層分離しないという利点がある。一方、ハロゲン化錫鉛ペロブスカイト太陽電池は単層太陽電池の光吸収層ばかりでなくペロブスカイト・ペロブスカイトタンデム太陽電池 (all-perovskite tandem solar cell) のボトム層として期待されている。鉛ペロブスカイト太陽電池と同様に低温で各層が作製できるため、プラスチック基板上に太陽電池を作製することが可能である。ワイドバンドギャップトップ層(1.7-1.8 eV)、狭バンドギャップボトム層(1.1-1.3 eV)の高効率化とともに、トップ層とボトム層の電流整合や中間層の開発が必要である。我々は 27%に迫る効率を報告している⁵⁾。世界最高効率は 29%を超えた⁶⁾。ハロゲン化錫ペロブスカイト太陽電池研究の中心は欠陥密度の低下に関するものであり、この問題を解決することにより将来有望な太陽電池に発展すると期待される。

参照文献 1) X. Zhou, et al., Adv. Mater. 2022, 34, 2205809. 2) Y. Shi, et al., ACS Energy Letter, 2024, 9, 1895-1897. 3) L. Wang, et al., Angewandte, 2023, 135, e202307228. 4) M. Hu, et al., Advanced Functional Materials, 2023, 33, 2300693. 5) ACS Energy Letters, 2023, 8, 3852-3859. 6) Martin Green, et al., Prog Photovolt. Res. Appl., 2024, 32, 3-13, Efficiency Table 63.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：ペロブスカイト太陽電池の新展開

[16p-C41-1~12] ペロブスカイト太陽電池の新展開

シンポジウムスポンサー



[16p-C41-1]

Materials theory of halide perovskites: defect and chirality

○Shuxia Tao¹ (1.Materials Simulation & Modelling, Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, The Netherlands)

[16p-C41-2]

Crystal growth in perovskite solar cells

○Tetsuhiko Miyadera¹ (1.AIST)

[16p-C41-3]

Molecular engineering of interfaces for efficient and stable perovskite solar cells

○Somin Park¹ (1.National Univ. of Singapore)

[16p-C41-4]

Structural Control of Pb or Sn-based 2D Perovskite Compounds

○Yuko Takeoka¹, Daizo Hishida¹, Hirona Kobayashi¹, Chunqing Li¹, Masahiro Fujita¹, Masahiro Rikukawa¹ (1.Sophia University)

[16p-C41-5]

Two-Dimensional (2D) Tin Halide Perovskite Semiconductors for Lasing

○Enzheng Shi¹ (1.Westlake University)

[16p-C41-6]

Understanding the stability of perovskite solar cells through an adlayer of FAPbI₃ quantum dots.○Svrcek Vladimir¹, Bruno Alessi¹, Zhihao Xu¹, Calum McDonald¹, Takuya Matsui¹ (1.AIST Tsukuba)

[16p-C41-7]

Rapid PbI₂ Precursor Evaporation toward Industrial Perovskite Solar Cells○(P)Abduheber Mirzehmet¹, Calum McDonald¹, Vladimir Svrcek¹, Hitoshi Sai¹, Takurou Murakami¹, Takuya Matsui¹ (1.AIST)

[16p-C41-8]

PbS-CQD Incorporated Perovskite (MASnI₃) Solar Cell with s-SWCNT as HTL○(M2)Md. Faiaad Rahman¹, Ahmed Zubair¹ (1.Bangladesh University of Engineering and Technology)

[16p-C41-9]

Organic and Perovskite Solar Cells Utilizing Carbon Nanotubes Thin-film Electrode

○Yutaka Matsuo^{1,2} (1.Nagoya Univ., 2.i-MI, Nagoya Univ.)

[16p-C41-10]

Electronic and Optical Properties and Defect Investigation of MASnX_3 (X = Cl, Br, and I) Perovskite Structures as Solar Cell Absorber

○Qing Wang¹, Aimi Hiratsuka², Satoshi Iikubo¹ (1.Kyushu Univ., 2.Kyushu Inst. of Tech)

[16p-C41-11]

Performance Optimization of Ge: Sn (1:1) Perovskite Solar Cells Using Doping Engineering

○(PC)Ajay Kumar Baranwal¹, Qing Shen¹, Shuzi Hayase¹ (1.Electro-Comm. Univ.)

[16p-C41-12]

Resolving the Light and the Thermal Stability Issues in the Tin-Lead Perovskite Solar Cells by Manipulating the Carrier Selective Layers with Dopant and/or Passivation

○(PC)Shahrir Razey Sahamir¹, Takeru Bessho², Hiroshi Segawa², Qing Shen¹, Shuzi Hayase¹ (1.Univ. of Electro-Com, 2.Univ. of Tokyo)

Materials Theory of Halide Perovskites: Defect and Chirality

Associate Professor Shuxia Tao, Materials Simulation & Modelling, Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, The Netherlands

Abstract

Halide perovskites have gained prominence in optoelectronics and quantum materials due to their chemical versatility, which allows for a broad range of interactions with light, electrons, spins, and lattice vibrations. My team employs first-principles methods like density functional theory, tight-binding models, and machine learning-accelerated molecular dynamics to explore their complex structure-property relationships. We focus on defect chemistry to enhance PV solar cell efficiency and stability, identifying and mitigating defects that cause losses and degradation through compositional adjustments and surface treatments.

Additionally, we explore the chirality of perovskites, using chiral ligands to introduce properties like chiral-induced spin selectivity and enhancing chiral optical activity. This exploration aims to harness these distinctive properties for pioneering applications in spin LEDs and chiral photodetectors, driven by a deep understanding of the relation between structural features and optoelectronic properties.

ペロブスカイト太陽電池と結晶成長

Crystal growth in perovskite solar cells

産総研 ○宮寺 哲彦

AIST, °Tetsuhiko Miyadera

E-mail: tetsuhiko-miyadera@aist.go.jp

Perovskite solar cells have been developing very rapidly and are already in the phase of mass production. Although its power conversion efficiency has been rapidly increasing, more fundamental research is needed for further development in order to distribute reliable products to the market. Especially, fabrication control of perovskite crystal is important because the reproducibility of the device performance is important issue for the perovskite solar cells. We have been focusing on vacuum deposition, aiming for precise control of perovskite fabrication. We also conducted real-time X-ray diffraction analysis using the synchrotron facility SPring-8 to investigate the dynamics of the perovskite crystallization process from the viewpoint of both solution process ^[1] and vacuum deposition process ^[2].

We implemented IR-laser deposition for the deposition of perovskite and demonstrated the benefit of the use of laser instead of resistive heater for the controllability of deposition rate of methylammonium iodide ^[3]. We also demonstrated the epitaxial growth of perovskite, where $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ crystals with atomically flat morphology were achieved ^[4]. Layer-by-layer growth during laser-deposition process is investigated by real-time XRD analysis ^[2]. We are attempting to fabricate the solar cells using this crystallization method ^[5].

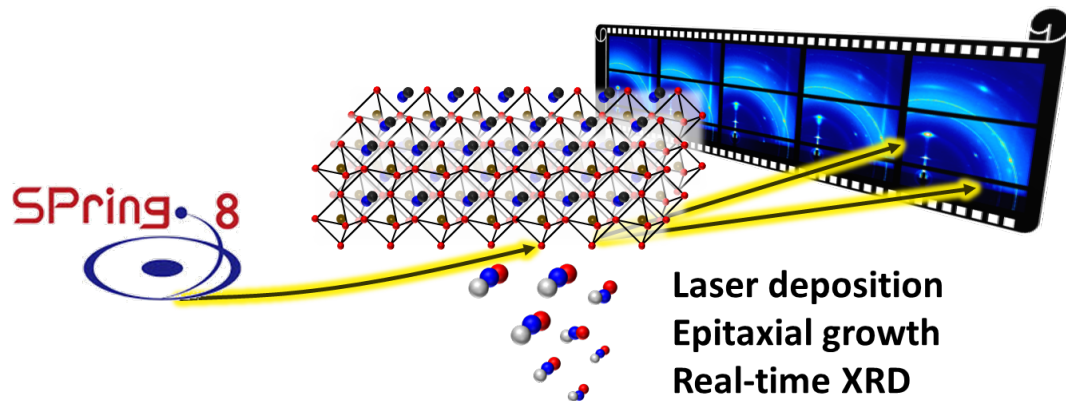


Fig: Schematic illustration of our research concept.

References:

- [1] T. Miyadera et al., *Nano Lett.* 15, (2015) 5630-5634.
- [2] T. Miyadera, et al., *ACS Appl. Mater. Int.* 13 (2021) 22559–22566.
- [3] T. Miyadera, et al., *ACS Appl. Mater. Int.* 8 (2016) 26013-26018.
- [4] T. Miyadera, et al., *APL Mater.* 8 (2020) 041104.
- [5] I. Kamikawa et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 63 (2024) 03SP86.

Extended Abstract of the Japan Society of Applied Physics**Molecular engineering of interfaces for efficient and stable perovskite solar cells****Somin Park****Department of Chemistry, National University of Singapore****Email: Somin.park.819@gmail.com**

Symposium Name: T14 New direction of perovskite solar cells

Abstract: Interfacial two- and three-dimensional heterostructures that incorporate ammonium ligand intercalation have enabled rapid progress toward the goal of uniting performance with stability in perovskite solar cells. However, as the field continues to seek ever-higher durability, additional tools that avoid progressive ligand intercalation are needed to minimize degradation at high temperatures. In this talk, I will present how the molecular structure, varying both the tail groups and alkyl chain lengths, influences the surface interactions and its energetics. I will focus on developing a series of anilinium derivatives that exhibit minimal reactivity with perovskites, leading to improved stability at the interface. Additionally, I will present our physical insights into the co-adsorbent self-assembled monolayers that reduce interfacial recombination and enhance electronic structures.

Structural Control of Pb or Sn-based 2D Perovskite Compounds

Sophia Univ., ^oYuko Takeoka¹, Daizo Hishida¹, Hirona Kobayashi¹, Li Chunqing,

Masahiro Yoshizawa-Fujita, Masahiro Rikukawa

E-mail: y-tabuch@sophia.ac.jp

Organic-inorganic perovskite compounds have attracted much attention since their initial application in photovoltaic solar cells by Miyasaka et. al. Among the Pb-based perovskites, three-dimensional (3D) organic-inorganic perovskites have been mainly used for solar cells. However, they are easily affected by moisture, oxygen, and heat, and are susceptible to degradation by water. To address this issue, utilization of lower-dimensional structures is expected. Our group have reported the series of organic-inorganic perovskites having three-, two-, one-, and zero-dimensional (3D, 2D, 1D, and 0D) network of lead halide octahedra $[\text{PbX}_6]^{4-}$ using various kinds of organic amines.^{1,2} Up to now, we can find out that the 2D and quasi-2D perovskite structures show high stability against moisture, which enables no degradation of exciton absorption peak and layered structure after one year as shown in Figure 1.

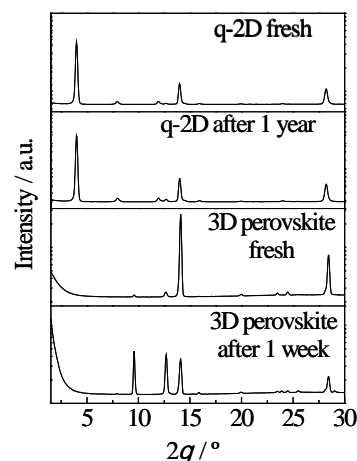


Figure 1. X-ray diffraction patterns of q-2D and 3D perovskite films as prepared and after storing.

On the other hand, orientation control is very important to use 2D and q-2D compounds as light absorbers for photovoltaic solar cells. Because 2D perovskites possess an organic amine layer that acts as an insulator and the $[\text{PbX}_6]^{4-}$ layers are connected two-dimensionally, the diffusion of photo generated carriers is limited to two directions. Typically, 2D and q-2D perovskites have a strong tendency to orient parallel to the substrate, rendering the migration of transport carriers in the vertical direction difficult.

To overcome this problem, based on the idea that the orientation of 2D and q-2D perovskites is affected by the crystallization process and the balance of various interactions such as ionic bonding, hydrogen bonding and van der Waals interactions, we prepared 2D and q-2D perovskites by using various organic ammoniums and several coting methods.^{3, 4} In some systems, the orientation of inorganic sheets was changed from parallel. In addition, we focused on the effect of symmetricity and ammonium grade (primary, secondary) on the orientation. In this presentation, the detailed analysis of these systems will be discussed.

References

- 1) Y. Takeoka, K. Asai, M. Rikukawa, and K. Sanui: *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **79**, 10, (2006) 1607.
- 2) Y. Takeoka, K. Asai, M. Rikukawa, and K. Sanui, *Chem. Lett.*, 34, 4 (2005) 602.
- 3) R. Hamaguchi, M. Yoshizawa-Fujita, T. Miyasaka, H. Kunugita, K. Ema, Y. Takeoka and M. Rikukawa, *Chem. Commun.*, **53**, (2017) 4366.
- 4) M. Akiyoshi, M. Yoshizawa-Fujita, Y. Takeoka, and M. Rikukawa: *Chem. Comm.* **57** (2021) 3395.

Acknowledgements

This work was partly supported by JST-ALCA-Next Program Grant Number JPMJAN23B2, Japan.

Two-Dimensional (2D) Tin Halide Perovskite Semiconductors for Lasing

Westlake University¹, Enzheng Shi¹

E-mail: shienzheng@westlake.edu.cn

Due to the highly tunable band structure, excellent optoelectronic properties, and low toxicity, tin halide perovskite semiconductors have attracted tremendous attention in the field of optoelectronics. In this talk, by employing the slow-cooling crystallization method and tuning the polarity of the growth solution, we obtained phase-pure 2D tin halide perovskite single crystals with tunable quantum-well thickness (n value) and hydrophobic π -conjugated organic ligands. Based on these lead-free perovskites, photogenerated carrier behaviors and lasing performance are systematically studied. Both high- n value ($n > 1$) and $n = 1$ tin perovskite thin flakes were successfully optically pumped to lase. Furthermore, the lasing from 2D tin perovskites could be maintained up to room temperature. Our findings highlight the tremendous potential of 2D tin perovskites as promising candidates for high-performance lasers.

Understanding the stability of perovskite solar cells through an adlayer of FAPbI₃ quantum dots.

Vladimir Svrcek¹, Bruno Alessi¹, Zhihao Xu¹, Calum McDonald¹, and Takuya Matsui¹

¹Renewable Energy Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568 Japan

E-mail: vladimir.svrcek@aist.go.jp

To enhance the stability of Formamidinium lead iodide (FAPbI₃) hybrid solar cells without compromising efficiency, we propose introducing a thin adlayer of FAPbI₃ quantum dots (QDs) (< 100 nm) on bulk FAPbI₃ film solar cells. In this study, we assess the specific impact of ligands and fs laser-engineered FAPbI₃ QDs adlayer on stability and performance. By carefully controlling particle size and transport properties through the synthesis and ligand engineering, we can effectively increase the energy gap of FAPbI₃-QDs. We report that substituting Octadecene with Octene as the supporting solvent at the same injection temperature leads to effective ligand exchange. Using Octene resulted in superior optical and transport properties. When applied to solar cells, FAPbI₃ QDs with Octene exhibited superior properties in all parameters (PCE, J_{sc}, Voc) except for the fill factor (FF) compared to those with Octadecene. This drawback was overcome by femtosecond (fs) pulsed laser treatment of the FAPbI₃ QDs.

Another crucial aspect is enhancing the stability of the FAPbI₃ perovskite layer with the fs laser-treated FAPbI₃-QDs adlayer. Unlike films containing a QDs adlayer, all solar cell parameters for the FAPbI₃ film were depressed even after storage in the dark in a dry box (RH~ 1%) only. This degradation further increased when the solar cells were placed in a humid chamber. Figure 1a shows the power conversion efficiency characteristics of solar cells exposed to continuous light for 0, 24, and 110 hours in a humid chamber (RH 30 %T=28°C). Our findings indicate a significant improvement in stability when utilizing the QDs adlayer compared to standard FAPbI₃ perovskite material, more pronounced for fs treated FAPbI₃ QDs. It also implies that air stable FAPbI₃ QDs not only broaden the energy gap but also act as a passivation layer for the FAPbI₃ layer surface, enhancing compatibility with the hole transport layer. Furthermore, Figures 1b and 1c show XRD spectra and peak identification for three sample types as a function of 24h exposure in a humid chamber. The QDs adlayer slows down the alpha to delta transition when films are exposed to light soaking in a humid chamber. Additionally, FAPbI₃ QDs treated with fs laser slow down the formation of PbI₂.

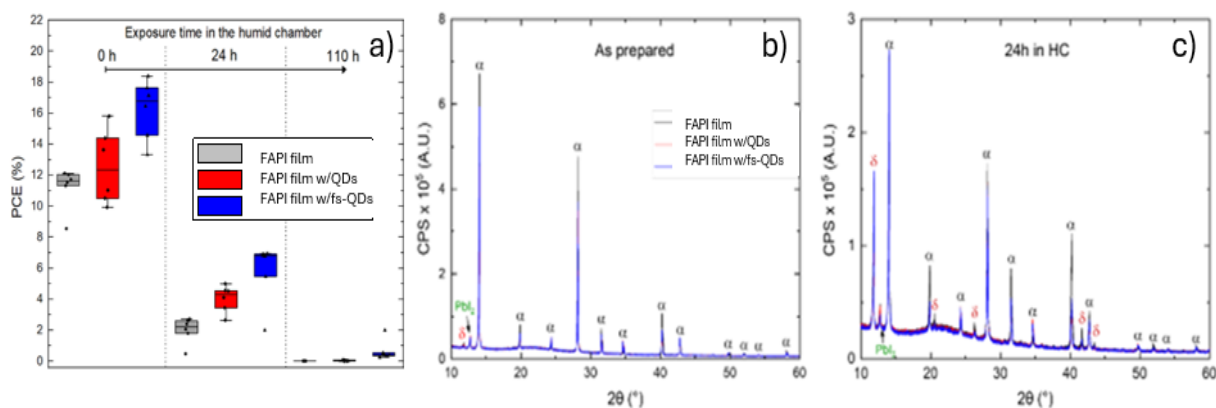


Figure 1. (a) Power conversion efficiency (PCE) of solar cells containing FAPbI₃, FAPbI₃ with an as-prepared QDs adlayer, and FAPbI₃ with an fs laser-treated FAPbI₃ QDs adlayer. (b) XRD spectra and peak identification for the three types of samples as prepared, and (c) after 24 hours of exposure to a humid chamber.

Rapid PbI₂ Precursor Evaporation toward Industrial Perovskite Solar Cells

Abduheber Mirzehmet^{1*}, Calum McDonald¹, Vladimir Svrcek¹, Hitoshi Sai¹, Takurou N.

Murakami², Takuya Matsui¹

Renewable Energy Research Center,¹ Global Zero Emission Research Center,² National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

abuduhebaier-m@aist.go.jp

Accelerating the adoption of perovskite solar cells is crucial for the evolution of renewable energy technologies. Achieving high-performance perovskite solar cells necessitates scalable processing of the perovskite light absorber, compatible with existing deposition techniques. Fast deposition offers advantages such as reduced production time, increased throughput, and lower manufacturing costs in industrial applications. Methods for forming perovskite thin films include solution processing (bar coating, spray, inkjet, etc.), thermal evaporation, and hybrid processes. A common hybrid process involves evaporating metal halide precursors like PbI₂ and then coating them with an organic halide solution (FAMAIBrCl in isopropanol) to form perovskite crystals [1,2]. This method has recently attracted attention for its ability to enhance film coverage on substrates and produce uniform perovskite films over large areas, potentially enabling the production of fully textured tandem perovskite/Si solar cells.

In this study, we used a hybrid evaporation-solution process to fabricate perovskite thin films. We first evaporated ~300-nm-thick PbI₂ films at various rates, with the shortest duration for the highest rate being about 8 minutes. (Fig.1) For the solution process, we tentatively applied a spin-coating method to coat the PbI₂ film with an organic halide solution (FAMAIBrCl in isopropanol). We found that increasing the evaporation rate resulted in an improvement in overall power conversion efficiency (PCE), comparable to that of spin-coated perovskite. The results indicate that even higher evaporation rates are possible while maintaining the solar cell performance, which is beneficial for industrial applications.

[1] Fu, F., *et al. Nat Commun.* **6**, 8932 (2015).

[2] Fu, F., *et al. Nat. Energy* **2**, 16190 (2017).

Acknowledgment: This work was conducted under a project commissioned by NEDO, Japan.

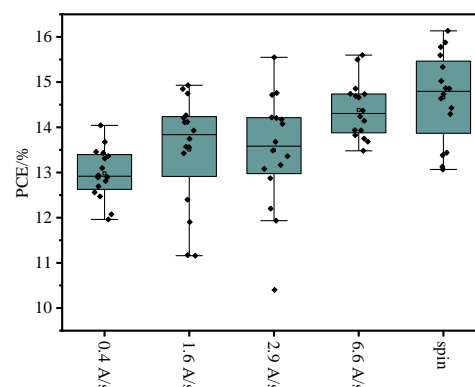


Fig. 1. Box charts illustrating the statistical distribution of power conversion efficiency (PCE) as a function the average evaporation rate of PbI₂ layers.

PbS-CQD Incorporated Perovskite (MASnI₃) Solar Cell with s-SWCNT as HTL

¹Bangladesh University of Engineering and Technology, [○]Md. Faiaad Rahman^{1,†}, Ahmed Zubair^{1,*,‡}

E-mail: [†]rahmanfaiaad1999@gmail.com, [‡]ahmedzubair@eee.buet.ac.bd

Abstract— In the pursuit of advancing solar cell technology, a novel p-i-n perovskite solar cell design is proposed featuring methyl ammonium tin iodide (MASnI₃) as the primary light-absorbing layer, PbS CQDs as the secondary absorber, (6,5)-SWCNT as HTL. For an optimized thickness 100 nm for MASnI₃, a maximum PCE of 22.203%, with J_{sc} of 30.31 mA/cm², V_{oc} of 0.862 V.

I. Introduction

The main focus of this design is the inclusion of MASnI₃, a perovskite material, as the primary absorber with a bandgap of 1.3 eV and an electron affinity (χ_p) of 3.93 eV [1], along with PbS colloidal quantum dots (CQDs) that serve as a secondary layer for absorbing light with band gap of 1.3 eV [2,3]. The incorporation of (6,5) SWCNT with 1.3 eV bandgap and electron affinity of 3.8 eV as the hole transport layer (HTL) to create a blocking barrier for electron diffusion [4] is a notable innovation that attempts to enhance the performance of the cell.

II. Materials and Methods

For modelling and building the structure, TiO₂ was used as the electron transport layer (ETL), MASnI₃ as the primary absorber, (6,5) SWCNT, a semiconducting SWCNT (s-SWCNT), as the HTL, colloidal PbS quantum dots as the secondary absorber, ITO as the front contact, and graphite as back contact as shown in Fig 1(a). Optoelectronic simulations were conducted in 3D at constant temperature (300K) using Ansys Lumerical tools. The optical simulation was performed, using FDTD methods to solve Maxwell's wave equations with Dirichlet and Neumann boundary conditions. Periodic conditions are applied in X and Y directions and a phase matched layer (PML) in the Z direction, under AM1.5G solar spectrum illumination (300 – 1000 nm). For electrical simulation, performance parameters like power conversion efficiency (PCE), short circuit current density (J_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}), and fill factor (FF) were calculated using Poisson's equation, drift-diffusion equations, and continuity equations.

III. Results and Discussion

For the initial opto-electronic simulation, layer thicknesses of ITO/TiO₂/MASnI₃/PbS-CQDs/s-SWCNT/C were set as 50nm, 90 nm, 200 nm, 800 nm, 800 nm, and 100 nm respectively. After executing simulations keeping centre-to-centre distance (CCD) between nanotubes at 20 nm, the device achieved a PCE of 17.48% with J_{sc} of 30.50 mA/cm², V_{oc} of 0.877 V, and FF of 65.36%. Fig. 1 (b) illustrate optical carrier generation rate, and (c) spectral power absorption with respect to the AM1.5G solar spectrum. Device performance results showed that increasing CCD, decreased performance of cell as the (6,5) SWCNT became less dense, reducing hole collection. Afterward, the thickness of the MASnI₃ layer was varied from 50 nm to 700 nm with N_A = 1×10¹⁶ cm⁻³ as shown in Fig. 1(d), keeping PbS-CQDs and (6,5) SWCNT thickness constant. The optimal MASnI₃ thickness was 100 nm, yielding a PCE of 22.18% with J_{sc} of 30.309 mA/cm², V_{oc} of 0.862V, and FF of 84.91%. The PCE peaked at 100 nm and declined beyond this due to increased electron-hole recombination and reduced hole collection. For J_{sc}, it increased with MASnI₃ thickness up to 350 nm before decreasing. The diffusion lengths (L_n and L_p) for MASnI₃ were calculated to be 322 nm, suggesting optimal electron and hole travel distances, and a maximum J_{sc} of 32.78 mA/cm². V_{oc} decreased slightly with MASnI₃

thickness up to 250 nm, then increased up to 700 nm, correlating with J_{sc} changes.

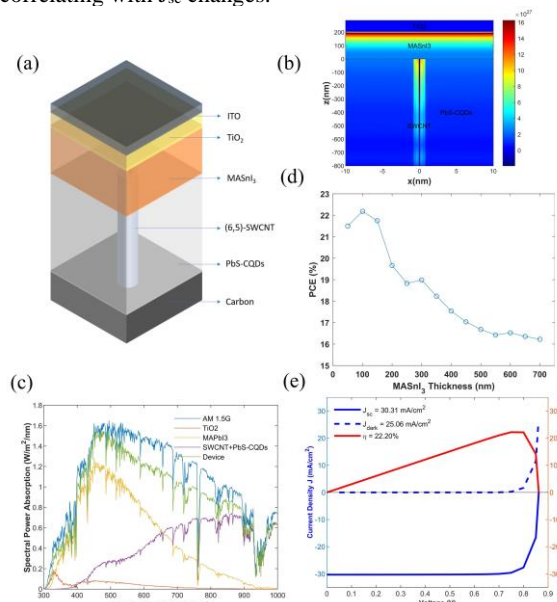


Fig. 1: (a) Device architecture. (b) Carrier generation rate, G ($\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$) in X-Z cross-section (c) Spectral power absorption density, P_{abs} vs photon wavelength for different absorber layer for AM1.5G solar spectrum. (d) PCE vs thickness of MASnI₃. (e) J-V and PCE(η)-V curves.

FF consistently decreased with increased thickness. To explore the effect of acceptor doping density (N_A) of MASnI₃ on device performance, N_A was varied from $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ to $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Performance remained stable up to $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, slightly decreasing marginally after $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. The optimal output was extracted with a PCE of 22.203%, J_{sc} of 30.31 mA/cm², V_{oc} of 0.862V, and FF of 84.98% with calculated dark current density (J_{dark}) of 25.06 mA/cm².

IV. Conclusions

In this work, the impact of incorporation of PbS-CQD, density of carbon nanotubes as HTL in perovskite solar, and thickness and effective doping density of MASnI₃ on the performance of device characteristics has been investigated. Further research can be implemented to optimize the device's efficacy even more.

References

- [1] Zandi, S., & Razaghi, M. (2019). Finite element simulation of perovskite solar cell: A study on efficiency improvement based on structural and material modification. *Solar Energy*, 179, 298-306.
- [2] Fooladvand, P., Eskandari, M., Fathi, D., & Das, N. (2023). Single-walled carbon nanotube as hole transport layer in perovskite solar cell: Efficiency enhancement. *Energy Reports*, 10, 3652-3664.
- [3] Majdi, M., Eskandari, M., & Fathi, D. (2021). Textured HTM-free perovskite/PbS quantum dot solar cell: Optical and electrical efficiency improvement by light trapping control. *Solar Energy*, 230, 618-627.
- [4] Lee, E. J., Lee, W., Yun, T. H., You, H. R., Kim, H. J., Yu, H. N., ... & Choi, J. (2024). Suppression of Thermally Induced Surface Traps in Colloidal Quantum Dot Solids via Ultrafast Pulsed Light. *Small*, 2400380.

単層カーボンナノチューブ薄膜透明電極を用いた有機薄膜およびペロブスカイト太陽電池

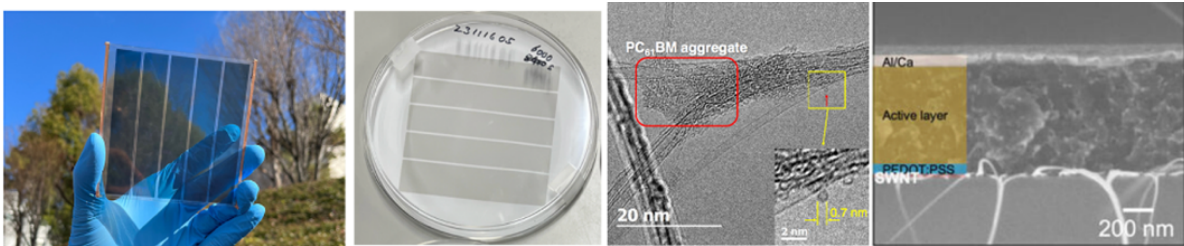
Organic and Perovskite Solar Cells Utilizing Carbon Nanotubes Thin-film Electrode

名大院工¹, 名大マテイノベ研² °松尾 豊^{1,2}

Sch. of Eng., Nagoya Univ.¹, i-MI., Nagoya Univ.², °Yutaka Matsuo^{1,2}

E-mail: matsuo.yutaka.h7@f.mail.nagoya-u.ac.jp

単層カーボンナノチューブ (CNT) 薄膜透明電極を用いた有機薄膜太陽電池 (OPV) およびペロブスカイト太陽電池 (PSC) の研究に関する最近の取り組みについて紹介する。特に CNT 薄膜透明電極を、電子を受け取る側の電極 (カソード) として用いるための CNT に対する n ドープについて詳細に議論する。



カーボンナノチューブ薄膜透明電極OPV n型CNT電極 ITOフリー下部CNT電極

図1. 両面受光型 10cm 角 CNT-OPV セミモジュール, CNT カソード, ITO を用いない OPV

表1. OPV or PSC, 順型 or 逆型, 上部 or 下部電極の計 8 種類の CNT-OPV, CNT-PSC

種類	下部電極 (透明電極)	上部電極 (裏面電極)	発電層材料	電子 輸送層	正孔 輸送層	変換 効率
順型OPV	ITO p型CNT	n型CNT Al	— PV-D4610/PCBM	— LiF	— PEDOT:PSS	— 8.0%
逆型OPV	ITO n型CNT	p型CNT Ag	PV-D4610/PCBM PV-D4610 /PCBM	ZnO ZnO	PEDOT:PSS PEDOT:PSS	5.5% 2.9%
順型PSC	ITO n型CNT	p型CNT Ag	MAPbI ₃ —	C ₆₀ —	(spiro) —	17.0% —
逆型PSC	ITO p型CNT	n型CNT Cu	MAPbI ₃ MAPbI ₃	PCBM C ₆₀	PEDOT:PSS PTAA	8.0% 17.2%
<両面CNT太陽電池>						
逆型PSC	p型CNT	n型CNT	MAPbI ₃	(PCBM)	(P3HT) PEDOT:PSS	7.3%

参考文献

- 1) Y. Matsuo, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **94**, 1080 (2021).
- 2) 大岩詩門, 松尾 豊, 車載テクノロジー 2023, Vol.10, No.11 (2023 年 8 月号), P58-61.

MASnX₃ (X=Cl, Br, I) ペロブスカイト構造の太陽電池光吸収層としての電子・光学的性質と欠陥評価

Electronic and Optical Properties and Defect Investigation of MASnX₃ (X = Cl, Br, and I) Perovskite Structures as Solar Cell Absorber

九大¹, 九工大² 〇王 青¹, 平塚 愛美², 飯久保 智¹

Kyushu Univ.¹, Kyushu Inst. of Tech.² 〇Qing Wang¹, Aimi Hiratsuka², Satoshi Iikubo¹

E-mail: wang.qing.095@m.kyushu-u.ac.jp

Organic-inorganic hybrid perovskite materials, such as MAPbI₃, have demonstrated exceptional potential as photovoltaic materials due to their high-power conversion efficiency, and solar cells based on MAPbI₃ have reached a power conversion efficiency (PCE) over 25% [1]. The commercialization of this technology is hampered by the toxicity of lead (Pb); however, tin (Sn), which is also a group 14 element like Pb, forms similar crystal structures and is considered the most promising alternative.

Despite similarities in electronic properties between MASnI₃ and MAPbI₃, the photoelectric efficiency and stability of tin halide perovskites are limited by self-p-doping and tin oxidation [2]. It is essential to investigate the microscopic origin of these phenomena to propose solutions and promote the use of lead-free perovskite solar cells. In this work, a detailed investigation of the electronic and optical properties and thermodynamic stability and trapping activity of native defects in MASnX₃ is carried out, which is achieved using density functional theory (DFT) calculations. The findings from such investigations may lead to novel approaches to overcome the issues associated with tin halide perovskites, thereby promoting the widespread use of lead-free perovskite solar cells.

The results of defect energy calculations (Fig. 1) based on first-principles indicate that Sn vacancies and X-site interstitial atoms are easily formed among several defects in MASnX₃. Among them, MASnCl₃ is found to be less likely to form Sn vacancies, and is considered to be more stable than MASnBr₃ and MASnI₃ due to the stability of its formation energy and its tolerance factor (0.95) being close to that of ideal perovskite. X-ray absorption near edge structure (XANES) theoretical calculations show a small discrepancy between the XANES spectrum with Sn vacancies and that of the defect-free structure, whereas with interstitial X-site atoms, there is a clear discrepancy with the XANES spectrum of the defect-free structure. This may be due to the fact that the crystal structure around the interstitial X-site atoms is distorted, while the change in crystal structure due to the Sn vacancies is minimal.

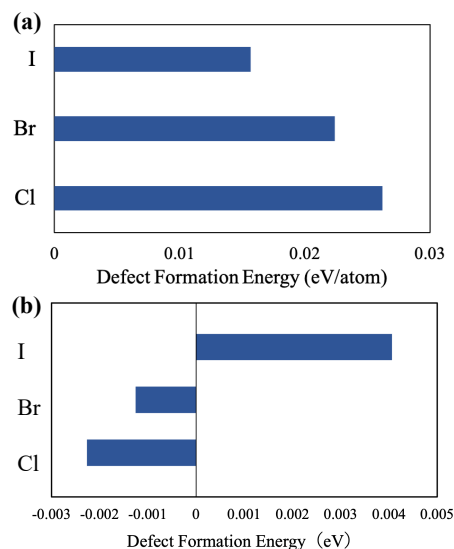


Fig. 1 The defect formation energy of (a) Sn vacancies and (b) interstitial X-site atoms in MASnX₃.

[1] Y. Yang, R. Chen, J. Wu, et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2024**, e202409689.

[2] D. Meggiolaro, D. Ricciarelli, A. A. Alasmari, et al. *J. Phys. Chem. Lett.* **2020**, 11, 3546-3556.

Performance Optimization of Ge: Sn (1:1) Perovskite Solar Cells Using Doping Engineering

Univ. Electro-Comm., °Ajay Kumar Baranwal, Qing Shen, Shuzi Hayase

E-mail: ajaybaranwal@uec.ac.jp

Lead-free materials are rigorously explored as substitutes for environmentally friendly photo-harvesting applications. Germanium (Ge) as a replacement of lead forms perovskite structure with promising theoretical optoelectronic results. However, its practical application is hindered by low octahedral factor values (≈ 0.33). Conversely, tin (Sn) has demonstrated exemplary experimental and theoretical results as a lead replacement. In this study, we fabricated a Ge: Sn /1:1 perovskite film with an improved octahedral factor of ≈ 0.43 , to harness the excellent optoelectronic properties of Ge-Sn alloyed film.

As a first step, we devised a dimethyl sulfoxide (DMSO) free solvent system, as DMSO rapidly oxidizes GeI_2 and SnI_2 . X-ray diffraction pattern, UV-vis spectra, and photo yield spectra measurements confirmed the successful formation of Ge-Sn (1:1) crystal, fabricated using simple spin coating methods.

Subsequently, we fabricated Ge-Sn films on PEDOT:PSS/FTO and deposited C60/BCP/Ag layers sequentially using thermal evaporation to complete the solar cells fabrication. However, the photoelectric performance was limited due to poor solubility of GeI_2 . To address this, in the next step, we employed an additive engineering which enhanced the solubility of GeI_2 and subsequently reduced the nonradiative recombination. An enhanced efficiency 3.23 % (FF=0.61, open circuit voltage=0.53V, short circuit current density=10.03mA/cm²) was obtained. Figure 1 shows the maximum power point tracking (MPPT) testing inside N₂ filled glove box. At the end of 1000 seconds measurements, 85% of initial efficiency was maintained. The complete device fabrication process and role of additives pertaining to the device performance enhancements will be discussed in the conference.

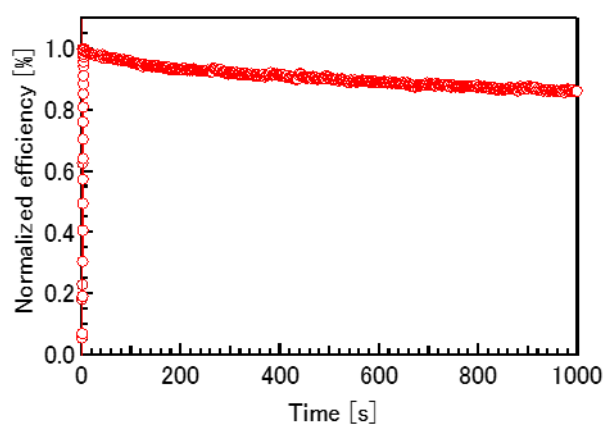


Figure 1: MPPT test of fabricated Sn-Ge perovskite solar cells

Resolving the Light and the Thermal Stability Issues in the Tin-Lead Perovskite Solar Cells by Manipulating the Carrier Selective Layers with Dopant and/or Passivation

The Univ. of Electro-Communications¹, Univ. of Tokyo², °Shahrir Razey Sahamir^{1*}, Takeru Bessho², Hiroshi Segawa², Qing Shen¹, Shuzi Hayase¹
E-mail: shahrir@uec.ac.jp, hayase@uec.ac.jp

The investigations into the stability issues in the tin-lead (SnPb) based perovskite solar cells (PSCs) have been increasing as of lately while the performance reaching more than 24% in efficiency has been reported ¹. It is important to achieve excellent stability under prolong light illumination and thermal exposure above the room temperature for the SnPb PSCs to compete with existing solar cells. Various reports are available on the stability improvement such as the introduction of additives or dopants in the active layer of the SnPb PSCs; substituting or passivating the PEDOT:PSS hole transport layer with non-acidic materials such as carbazole based self-assembled monolayer ^{2,3}, substituting the silver electrode with metal copper or carbon derived materials and many others. The core improvement of the stability based on these studies pin-point to the ion migrations as the main culprit for the stability issues in the PSCs. Thus, reinforcing the carrier selective layers seemingly important in order to mitigate the migrations of ions across the SnPb PSCs. In this research, we will demonstrate the effects of incorporating the carrier selective layers of the SnPb PSCs with dopant and/or passivation layer on their light and thermal stabilities. The preliminary results showed the PCE improvement to more than 22% efficiency and overall solar cell parameters such as FF, Jsc and Voc; due to the decrease in shunting and enhance recombination resistance which correlated well with the reduced migration of ions under XPS investigation near the electron transport layer. The light and the thermal stability studies were conducted on the SnPb PSCs with modified carrier selective layers showed enhanced stability under prolong exposure to light and elevated temperature.

Reference

- (1) Zhou, X.; Zhang, L.; Yu, J.; Wang, D.; Liu, C.; Chen, S.; Li, Y.; Li, Y.; Zhang, M.; Peng, Y. Integrated Ideal-Bandgap Perovskite/Bulk-Heterojunction Solar Cells with Efficiencies > 24%. *Adv. Mater.* **2022**, *34* (40), 2205809.
- (2) Kapil, G.; Bessho, T.; Sanehira, Y.; Sahamir, S. R.; Chen, M.; Baranwal, A. K.; Liu, D.; Sono, Y.; Hirotani, D.; Nomura, D. Tin-Lead Perovskite Solar Cells Fabricated on Hole Selective Monolayers. *ACS Energy Lett.* **2022**, *7*, 966–974.
- (3) Sahamir, S. R.; Kapil, G.; Bessho, T.; Segawa, H.; Shen, Q.; Hayase, S. Achieving High Efficiency and Enhanced Thermal Stability in Germanium-Encapsulated Tin-Lead Perovskite Solar Cells. *ACS Mater. Lett.* **2024**, *6* (4), 1241–1246.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスのフロンティア

[16a-C42-1~4] フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスのフロンティア

[16a-C42-1]

オープニング

○福田 憲二郎¹ (1.理研)

[16a-C42-2]

伸縮性エレクトロニクスの技術トレンドと電子皮膚

○染谷 隆夫^{1,2} (1.東大工、2.理研)

[16a-C42-3]

カーボンナノチューブ薄膜に基づくフレキシブルエレクトロニクス

○大野 雄高¹ (1.名大未来研)

[16a-C42-4]

有機強塩基を用いた低仕事関数電極の開発とフレキシブルOLEDへの応用

○深川 弘彦¹、佐々木 翼²、大野 拓²、岡田 拓也²、清水 貴央²、長谷川 宗弘³、桑田 健二³、森井 克行^{3,4} (1.千葉大先進、2.NHK技研、3.日本触媒、4.大阪大学)

伸縮性エレクトロニクスの技術トレンドと電子皮膚

Advancements in Stretchable Electronics and Electronic Skin Technology

東大工¹, 理研², °染谷 隆夫^{1,2}

Univ. Tokyo¹, RIKEN², °Takao Someya^{1,2}

E-mail: someya@ee.t.u-tokyo.ac.jp

大面積、多点、マルチモーダル、柔軟なセンサーとして機能する人間の皮膚は、圧力と温度パターンを同時に検出することを目的としたロボットの電子皮膚の開発のインスピレーションとなっている。柔軟性の向上により、電子皮膚はロボット工学における当初の用途を超え、次世代ウェアラブルエレクトロニクス技術へと拡大している。この進化は、極薄半導体膜を皮膚に直接貼り付けることができる段階に達している。このような電子機器と人間の皮膚のシームレスな統合により、長期間にわたる健康状態の継続的なモニタリングが可能になり、パーソナライズされた医療が可能になる。電子皮膚の究極の目標は、自然な環境における人間の活動を非侵襲的にキャプチャし、電子機器と人間の皮膚の相互作用的な相乗効果を促進することである。

本講演では、ロボット工学と次世代ヘルスケアウェアラブルへの応用に焦点を当て、伸縮性を有する薄膜電子機器の最近の進歩について説明する。また、この分野で直面している課題についても説明し、電子皮膚の潜在的な将来の展望を述べる。



Fig. Fingertip Sensor

The polyurethane and gold sensor can resist shear forces and rubbing. © 2020 Someya et al.

カーボンナノチューブ薄膜に基づくフレキシブルエレクトロニクス

Flexible Electronics Based on Carbon Nanotube Thin films

名大未来研 °大野 雄高

Nagoya Univ., °Yutaka Ohno

E-mail: yohno@nagoya-u.jp

近年、極めて高純度な半導体カーボンナノチューブの分離抽出が可能となるなど、半導体カーボンナノチューブの材料技術の成熟を背景として、その優れた電気伝導特性や機械的柔軟性を生かした電子デバイスの研究開発が急速に進んでいる。例えば、最近、Si MOSFET や GaAs FET の電流密度を凌駕する性能のカーボンナノチューブ電界効果トランジスタ [1]や 16-bit の RISC-V プロセッサ[2]を実現した例などが報告されている。Si VLSI 上へのハイブリッド三次元集積デバイスや成形可能なディスプレイやタッチセンサ、人体と親和性をもつフレキシブルなウェアラブルデバイスなど、従来材料では困難な電子デバイスの実現が現実味を帯びてきている。

特に、人体に親和性をもつフレキシブルセンサを実現しようとした場合、センサのみならず、増幅器やアナログ/デジタル変換器等の信号処理回路も柔軟性をもつ極薄のプラスチックフィルム状に形成し、“フル”フレキシブルなセンサシステムを構築する必要があるが、カーボンナノチューブはリソグラフィ等に基づく集積プロセスを適応でき、十分な性能と機能を提供できる。

本発表では、半導体カーボンナノチューブの電子デバイス応用の可能性と最近の進展を紹介した後、我々が取り組んでいるフレキシブル電子デバイスに関する研究から、外部歪みに応答しない薄膜トランジスタや集積回路の実現[1]、素子特性ばらつき耐性をもつアナログ回路設計とアナログ・フロントエンド回路の実証[2]などについて報告する。加えて、自己給電型センサの実現を目指した柔軟な摩擦帯電型エネルギーハーベスタ[3,4]についても紹介する。

参考文献

[1] Y. Nishio et al. Adv. Electron. Mater. 6, 2000674 (2021).

[2] T. Kashima et al. 10.21203/rs.3.rs-68702/v1.

[3] M. Matsunaga et al. Nano Energy 67, 104297 (2020).

[4] 松永正広ら 応用物理 90, 684 (2021).

有機強塩基を用いた低仕事関数電極の開発とフレキシブル OLED への応用

Development of low work function electrodes using organic strong bases

and their application to flexible OLEDs

千葉大先進¹, NHK 技研², 日本触媒³, 大阪大学⁴ ○深川 弘彦¹, 佐々木 翼²,

大野 拓², 岡田 拓也², 清水 貴央², 長谷川 宗弘³, 栗田 健二³, 森井 克行^{3,4}

Chiba Univ.¹, NHK STRL², Nippon Shokubai Co., Ltd.³, Osaka Univ.⁴ ○Hirohiko Fukagawa¹,

Tsubasa Sasaki², Taku Oono², Takuya Okada², Takahisa Shimizu², Munehiro Hasegawa³,

Kenji Kuwada³, Katsuyuki Morii^{3,4}

E-mail: hiro.fukagawa@chiba-u.jp

近年、フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスの進展は目覚ましく、例えばフレキシブルな有機 EL 素子(OLED)を用いたスマートフォンが商品化されるなど、身近なものになりつつある。今後、フレキシブルなトランジスタ/センサーによる生活利便性向上や、フレキシブル太陽電池による再生可能エネルギー比率の向上など、我々の生活を豊かに、持続可能なものにする各種デバイスの幅広い普及が期待されている。これらデバイスにおいては、その機能を発現するために電極と半導体との間で電荷のやり取りが必要である。例えば OLED 用の発光層材料の電子親和力は概ね 2.5 eV 以下であるため、電極-有機層間の電子のやり取りには仕事関数(work function: WF)が 3 eV 以下のアルカリ金属が不可欠であった。しかしながら、アルカリ金属は反応性が高いため厳密な封止を必要とするなど、電子デバイスへの応用は容易ではない。特に、ゴムを基板に用いたデバイスの幅広い普及に向けては、ボトルネックとなっている。

我々はこの問題を解決するために、アルカリ金属等を用いずに WF が低い電極を形成する技術開発を進めてきた(図 1a 参照)。有機強塩基と他の有機半導体との間の水素結合の形成を利用し ZnO 近傍の WF を 3.0 eV まで低減でき [1]、また、フェナントリン誘導体中の窒素と ZnO との間の配位反応を利用することで、ZnO 近傍の WF を 2.4 eV に低減できることを見出した[2]。そして、水素結合と配位反応の両方を活用可能な有機強塩基を用いることで、アルミニウムの WF を 4.1 eV から約 2.0 eV まで低減することに成功した[3]。この 2.0 eV という値は、アルカリ金属等の中でも最も WF が低い Cs と同等の WF である。本講演では、これらの WF 制御に関する取り組みとフレキシブル OLED への応用について紹介する。

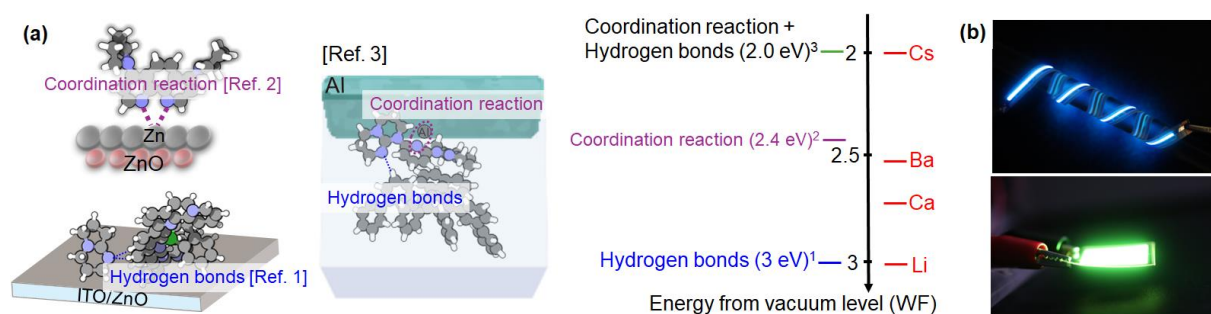


Fig.1: (a) Schematic illustration of change in WF caused by strong bases. (b) Pictures of flexible OLEDs.

<参考文献> [1] H. Fukagawa *et al.*, *Adv. Mater.* **31**, e1904201 (2019). [2] H. Fukagawa *et al.*, *Nat. Commun.* **11**, 3700 (2020). [3] T. Sasaki *et al.*, *Nat. Commun.* **12**, 2706 (2021).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスのフロンティア

[16p-C42-1~12] フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスのフロンティア

[16p-C42-1]

瞬時解析脳を搭載したフレキシブルエッジシステム

○竹井 邦晴¹ (1.北海道大学)

[16p-C42-2]

共役高分子を用いた伸縮性半導体

○芦沢 実^{1,2}、Yu Zheng²、Song Zhang²、Jiheong Kang²、Shayla Nikzad²、Zhiao Yu²、落合 優登²、Hung-Chin Wu²、Helen Tran²、Jaewan Mun²、Yu-Qing Zheng²、Jeffrey B.-H. Tok²、Xiaodan Gu³、Zhenan Bao² (1.東工大物質理工、2.スタンフォード大学、3.サザンミシシッピ大学)

[16p-C42-3]

有機薄膜トランジスタ型化学センサによる実サンプル分析

○南 豪¹ (1.東大生研)

[16p-C42-4]

データベースとAIを活用した有機半導体デバイス開発

○松井 弘之¹ (1.山形大ROEL)

[16p-C42-5]

Phase Segregation-Induced Highly Sensitive Printed Stretchable Strain Sensor Using PDMS/PEDOT-CB Composite

○Yifei Wang¹、Junya Yoshida²、Ayako Yoshida¹、Yasunori Takeda¹、Tomohito Sekine²、Daisuke Kumaki¹、Shizuo Tokito¹ (1.INOEL, Yamagata Univ., 2.Grad. School of Organic Materials Science, Yamagata Univ.)

[16p-C42-6]

ハイドロゲル製イオントロンニック医用デバイスの開発

○西澤 松彦¹ (1.東北大工)

[16p-C42-7]

ポリビニルアルコール・ポリウレタン混合ナノファイバーを用いた耐水性と伸縮性を有する皮膚電極

○(M2)三室 真帆¹、山岸 健人¹、李 成薫¹、横田 知之¹、染谷 隆夫¹ (1.東大院工)

[16p-C42-8]

生体組織に機械的に適合する超柔軟・伸縮性液体金属アンテナ

○山岸 健人^{1,2}、チン テリー²、チョウ ウェンシェン²、ファン シャオウィン²、橋本 道尚² (1.東大院工、2.シンガポール工科デザイン大)

[16p-C42-9]

光線力学療法に向けた薄膜状発光デバイスの開発と抗腫瘍能評価

○(D)齋藤 優人¹、登倉 大貴²、横式 康史³、徳田 崇⁴、野本 貴大^{2,5}、藤枝 俊宣^{1,6} (1.東工大生命理工、2.東大院総合文化、3.青学大理工、4.東工大工、5.東工大化生研、6.東工大ASMat)

[16p-C42-10]

植物葉面に貼付可能な透明超薄膜電極の開発と生体電位応答の計測

○(M1)堀 祐輔¹、堀井 辰衛¹、増田 真二¹、藤枝 俊宣¹ (1.東工大生命理工)

[16p-C42-11]

エラストスピンデバイスとナノ・エラストロニクス

○千葉 大地^{1,2,3,4} (1.東北大SRIS、2.阪大産研、3.阪大CSRN、4.阪大OTRI)

[16p-C42-12]

クロージング

○松久 直司^{1,2} (1.東大先端研、2.東大生研)

瞬時解析脳を搭載したフレキシブルエッジシステム**Flexible edge system powered by machine learning****北海道大学 竹井 邦晴****Hokkaido Univ., Kuniharu Takei****E-mail: takei@ist.hokudai.ac.jp**

様々なモノから情報を収集、解析、そしてフィードバックする Internet of Things(IoT)社会が加速的に発展している。さらに人工知能（機械学習を含む）を用いることでデータが自動解析され、私たちの生活が快適且つ便利になりつつある。更なる IoT 社会の発展には、人を含む三次元構造や柔らかい物体からの情報取得も今後必要になることは間違いない。実際、本実現へ向け曲げたり伸ばしたりすることができるトランジスタやセンサの研究開発が世界的な競争となりつつある。今後、更に多くのセンサからの情報取得が可能になると、計測された莫大なデータを効率且つ精度高く、そして省電力で解析する手法も必要になる。それには機械学習による自動解析、さらに機械学習をうまく利用することで 1 つのセンサで複数の出力を可能にするマルチタスクセンサが有力な候補として考えられる。これによりセンサ数を削減でき、結果として省電力化もできる。またクラウドなどの大規模演算システムの利用にはインターネット接続や計算機駆動でシステムとしての消費電力が大きくなってしまいう懸念がある。そのためできる限り簡単な学習・解析処理によりセンサをエッジ化することも重要となってくる。

そこで本発表では、この近い将来必ず必要となる機械的柔軟性を備えた多種フレキシブルセンサとリアルタイム解析を得意とするリザーバー計算（RC）を取り入れた瞬時解析脳を有したマルチモーダルセンサシステムについて我々の取り組みを紹介する。特にウェアラブル健康管理応用、ロボット応用に向けたフレキシブルセンサシステムについて議論する。

ウェアラブル健康管理応用では、皮膚表面から安定且つ高精度に多種バイタル情報を計測し、更に無線通信するスマートフォンに機械学習アルゴリズムを搭載したアプリを適用することで、計測されたデータを瞬時解析するエッジシステムについて紹介する。

ソフトロボット応用では、皮膚機能を模倣した触覚センサアレイ及びウィスカーセンサを紹介する。ここでは触覚センサやウィスカーセンサの出力の経時変化からセンサ表面での触覚・ジェスチャーや、ウィスカーの動き・状態を自動予測する。

本研究では機械学習とフレキシブルセンサを融合させた瞬時解析脳を有したマルチモーダルセンサシステムを提案し、それについての研究開発を行ってきた。これら技術はまだ発展途上にあり、実用化という点では多くの課題を解決する必要があるが、今後の実用化への一つのアイデアになることを期待している。

【謝辞】本研究は、科研費（JP22H00594、24H00887）、JST AIP 加速課題（JPMJCR21U1）、ALCA-Next（JPMJAN23F2）、村田学術振興財団、武田科学振興財団、ヒロセ財団の助成によって行われた成果である。

共役高分子を用いた伸縮性半導体

Stretchable semiconductor utilizing conjugated polymer

東工大物質理工¹, スタンフォード大学², サザンミシシッピ大学³ ◯芦沢実^{1,2}, Yu Zheng², Song Zhang², Jiheong Kang², Shayla Nikzad², Zhiao Yu², 落合優登², Hung-Chin Wu², Helen Tran², Jaewan Mun², Yu-Qing Zheng², Jeffrey B.-H. Tok², Xiaodan Gu³, Zhenan Bao²
Tokyo Institute of Technology¹, Stanford university², The university of Southern Mississippi³
◯Minoru Ashizawa^{1,2}, Yu Zheng², Song Zhang², Jiheong Kang², Shayla Nikzad², Zhiao Yu², Yuto Ochiai², Hung-Chin Wu², Helen Tran², Jaewan Mun², Yu-Qing Zheng², Jeffrey B.-H. Tok²,
Xiaodan Gu², Zhenan Bao²

E-mail: ashizawa.m.aa@m.titech.ac.jp

パイ共役系から構成される共役高分子は、ポリマー骨格に沿って非局在化したパイ電子を上手に制御することでそれぞれのデバイスに合った薄膜特性を付与することができる。一般的に、共役高分子は結晶性高分子であり、伸縮を伴う変形に対して脆弱である。次世代のウェアラブルエレクトロニクスにおいては軽い、柔らかいとともに「伸縮性」を新たなキーワードとして加えることが必要である。近年、共役高分子において伸縮性半導体高分子の開発が活発化している。大別すると2つのカテゴリーに分けられる。1つ目は共役高分子に伸縮性をもたらすエラストマーやクロスリンカーなどの低分子成分を加えることであり、2つ目は共役高分子骨格に長く柔軟い側鎖を導入することや、犠牲結合となり機械的特性を向上する共役系を切断するユニット (CB) を導入することである。Bao らのグループは水素結合に着目し、ピリジン系のアミドを用いた水素結合部位をアルキル鎖で連結した CB を共役系高分子の主鎖に導入することで高移動度と優れた伸縮性を実現した[1]。この結果は CB における水素結合の強さと連結鎖を調節することで、伸縮性を制御できることを意味する。

我々は、系統的に水素結合の強さの異なるウレア、アミド、ウレタン、そしてコントロールとしてカーボネートを用い、アルキル鎖とエーテル鎖で連結した CB を設計し、ジケトピロロピロール系の共役高分子の主鎖に 10 mol% の比率で導入した合計 8 種類の高分子を合成した (Figure 1)。本講演ではこれらの共役高分子を用いて CB の水素結合と連結鎖が、薄膜のモルフォロジー、伸縮性、電気的特性に及ぼす効果を調べたので報告する。

[1] Oh, J. Y.; Rondeau-Gagne, S.; Chiu, Y.-C.; Bao Z et al. *Nature*, **539**, 411–415 (2016).

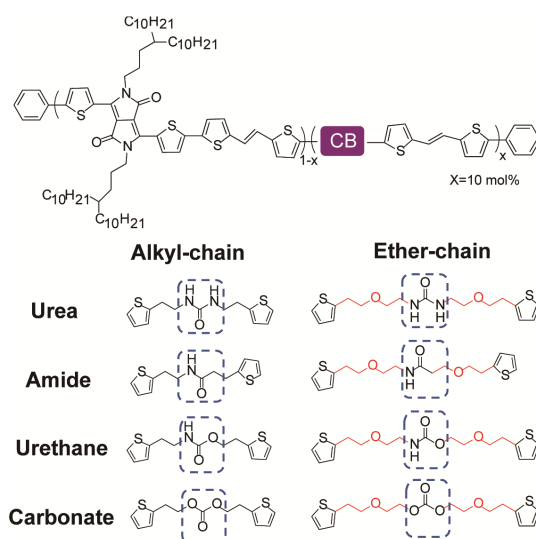


Figure 1 Polymer and CB structures in this study.

有機薄膜トランジスタ型化学センサによる実サンプル分析

Organic Thin-Film Transistor-based Chemical Sensors for Real-Sample Analysis

○東大生研

IIS, The Univ. of Tokyo, °Tsuyoshi Minami

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

化学情報は、病理診断や食品管理、環境分析において重要な指標となるが、社会実装が進む物理センサとは対照的に、化学センサの開発は未だ研究室レベルに留まっている。化学センサは、刺激を受容するレセプタ部位と刺激の認識情報を増幅・可視化するトランスデューサ（レポータ）部位の2種から構成されており、センサ能力は両者それぞれの設計と組み合わせに起因する。標的種を捕捉するための酵素や抗体は、固有の高い特異性が優れた選択性をセンサにもたらしめるために幅広く用いられている分子認識材料である。しかしながら、酵素や抗体のライブラリの種類によって検出可能な標的種が限定されるだけでなく、熱・化学的安定性による懸念は避けられない。体液や食品サンプル、環境水中には、様々な分子構造、電荷、サイズを持つ標的種が存在するため、それらを選択的に捕捉するための分子認識材料を合目的に設計・具現化する手法が求められる。光学、電気、質量変化などが含まれるトランスデューサの中でも、増幅機能を有するトランジスタは、数多くの夾雑物質が共存する条件下で高感度検出が望まれる実サンプル分析において有力な候補となる。^[1,2]とりわけ有機トランジスタは、可溶性デバイス材料を活用した塗布プロセスによって作製可能であるため、センサデバイス開発の観点から優位である。^[3] 登壇者は、超分子化学に基づき設計した人工分子認識材料を有機トランジスタに実装した化学センサを開発している。本講演では、実サンプル分析を指向して、ある特定の標的種に対する高選択的検出^[4]および類似構造を有する標的種の多成分分析^[5]を実現する有機トランジスタ型化学センサについて紹介する (Fig. 1)。

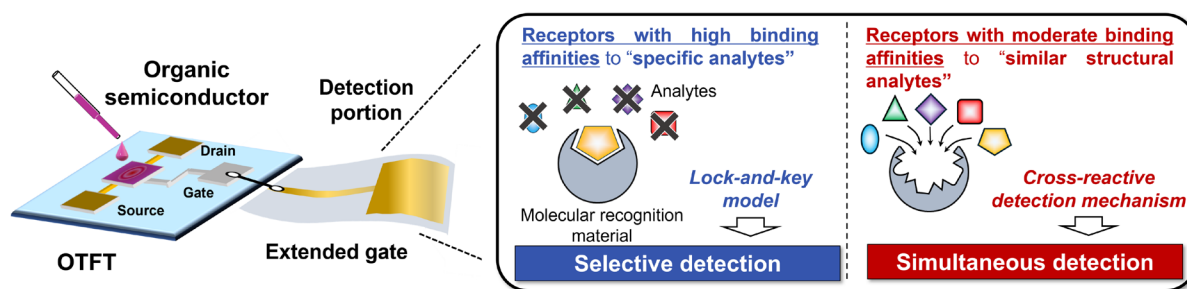


Fig. 1 Illustration of a concept of an organic thin-film transistor (OTFT)-based chemical sensor using an extended-gate structure. The molecular recognition materials are designed according to sensing purposes.

[1] T. Minami et al., Phys. Status Solidi A **220**, 2300469 (2023) (Invited Review, Cover).

[2] T. Minami et al., ACS Sens. **4**, 2571 (2019) (Invited Perspective, Cover).

[3] T. Minami et al., Commun. Mater. **2**, 8 (2021).

[4] T. Minami et al., Sens. Actuators B Chem. **382**, 133458 (2023) (Invited Paper).

[5] T. Minami et al., ACS Appl. Mater. Interfaces **14**, 22903 (2022) (Invited Paper, Cover).

データベースと AI を活用した有機半導体デバイス開発

Development of Organic Semiconductor Devices Using Database and AI

山形大 ROEL 〇松井 弘之

ROEL, Yamagata Univ., 〇Hiroyuki Matsui

E-mail: h-matsui@yz.yamagata-u.ac.jp

データベースや人工知能 (AI) を活用した研究が加速している。本講演では有機半導体や有機トランジスタに対してこれらを活用した三つの研究事例を紹介する。

【材料データベースからの候補物質・部分構造の探索】 ケンブリッジ結晶構造データベースと大規模 DFT 計算を組み合わせ、移動積分向上に有利な分子部分構造を探索した。元素ごとの移動積分への寄与^[1]を統計解析した結果、チオン (S=R) とアミン (NR₃) の間で移動積分の値が有意に大きいことが明らかとなった (Fig. 1) ^[2]。例えばチオンとアミンを持つチオ尿素 NH₂CSNH₂ は移動度~0.2 cm²/Vs の半導体と報告されており^[3]、水溶性・非芳香族といった稀な特徴を有する。

【機械学習による物性予測】 分子構造と物性の相関を学習した AI を分子エディタと統合することで、分子構造描画後に即座に HOMO, LUMO エネルギーや合成容易性を予測可能な Web システム YU canvas を構築した。HOMO, LUMO エネルギーの学習モデルには Ridge 回帰またはグラフ畳み込みニューラルネットワークを用い、予測精度は平均絶対誤差で 0.2 eV であった。合成容易性の学習モデルには LightGBM を用い、9 名の合成化学者が定めたスコアを教師データとした。本ツールは現在オンライン公開を行っている^[4]。

【ラボオートメーションによる有機トランジスタのベイズ最適化】 自動で有機トランジスタを作製・測定可能な Fig. 3 のシステムを構築し、ベイズ最適化 AI (PHYSBO) と組み合わせることで、作製→評価→次の条件提案→作製→…のループを自動化し、効率よく有機トランジスタの印刷条件を最適化するシステムを構築した。このシステムを活用した結果、2-C12-BTNT 有機トランジスタのデジタル印刷によって平均移動度 4.3 cm²/Vs を実現した^[5]。

本研究は JST, CREST (JPMJCR18J2) 及び科研費基盤 B (23K23199) の支援を受けて行われました。

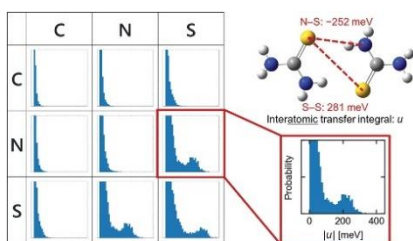


Fig. 1 Finding substructures leading to large transfer integrals in materials database

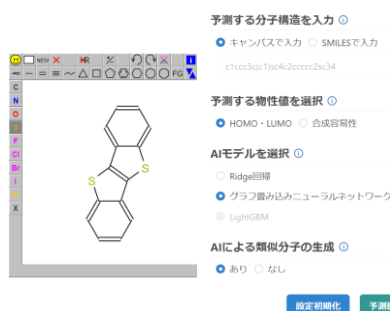


Fig. 2 AI-assisted molecular design tool: YU canvas



Fig. 3 Bayesian optimization of printed devices by lab automation

- [1] 原子間移動積分計算プログラム tcsl, <https://github.com/matsui-lab-yamagata/tcsl> [2] K. Ozawa *et al.*, *Sci. Technol. Adv. Mater.* **25**, 2354652 (2024). [3] S. Yoganarasimhan *et al.*, *Philos. Mag.* **22**, 1075 (1970). [4] AI 支援分子設計ツール YU canvas, <https://matsui-lab.yz.yamagata-u.ac.jp/software.html> [5] 小林亮太、他、応用物理学会 2024 春、24p-22B-2.

Phase Segregation-Induced Highly Sensitive Printed Stretchable Strain Sensor Using PDMS/PEDOT-CB Composite

°Yi-Fei Wang ¹, Junya Yoshida ², Ayako Yoshida ¹, Yasunori Takeda ¹, Tomohito Sekine ²,
Daisuke Kumaki ¹, and Shizuo Tokito ¹

1. Innovation Center for Organic Electronics (INOEL), Yamagata Univ.

2. Grad. School of Organic Materials Science, Yamagata Univ.

E-mail: wang@yz.yamagata-u.ac.jp

Stretchable strain sensors have emerged as highly desirable components for the next generation of biomedical devices, wearable electronics, and soft robotics [1]. Recently, stretchable conductive composites have garnered significant attention in the research community as promising materials for these sensors due to their cost-effectiveness, inherent stretchability, ease of processing, and tunable electromechanical performance [2]. Constructing a conductive composite that enables stretchable strain sensors to achieve high sensitivity while maintaining a wide sensing range is highly desired [3]. However, previous approaches have often relied on complex material synthesis and expensive manufacturing processes, presenting scalability challenges and severely limiting their practical applications.

This report highlights our latest advancements in materials design aimed at creating high-performance printed stretchable strain sensors. We have successfully formulated a simple, biocompatible, and printable ink by mixing PDMS, PEDOT:PSS (referred to as PEDOT), and CB. Due to the immiscibility between PDMS and the solvent of PEDOT, the PEDOT-CB exhibits spontaneous phase segregation from the PDMS, as shown in SEM images (Figure 1). Compared to the binary blends of PDMS/CB and PDMS/PEDOT, our PDMS/PEDOT-CB ternary blend offers significant advantages, including high sensitivity, a wide sensing range, and low hysteresis. Additionally, the material system and process are straightforward and biocompatible, making it superior to other reported composite systems. We have successfully developed a printed stretchable strain sensor with a high gauge factor of 2000 (@30% strain) and demonstrated its applicability in wearable sensor applications.

This study was partially supported by JSPS KAKENHI Grant Number 23K13806.

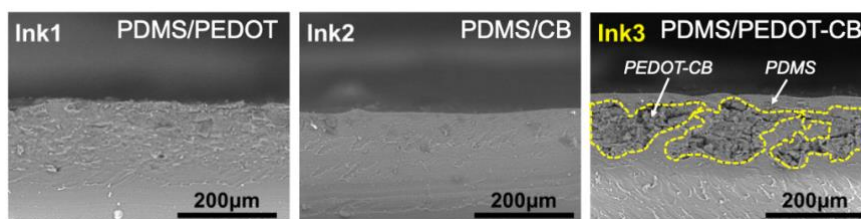


Figure 1. SEM images of printed composite films of PDMS/PEDOT, PDMS/CB, and PDMS/PEDOT-CB.

[1] S. Yao et al., *Adv. Mater.* **2020**, 32, 1902343. [2] D. C. Kim et al., *Adv. Mater.* **2020**, 32, 1902743. [3] Wang et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 12, 35282(2020).

ハイドロゲル製イオン트로ニック医用デバイスの開発

Developments of Iontronic Hydrogel Devices

西澤松彦

Tohoku Univ.

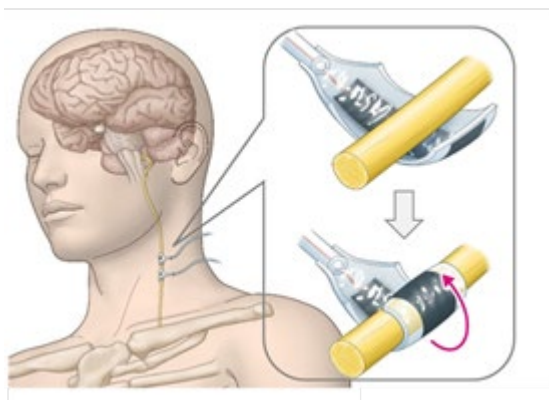
E-mail: nishizawa@tohoku.ac.jp

高齢社会に対応する高効率・低コストな IT 化医療システムの開発が全世界の英知を結集して急ピッチで進められており、その鍵を握るウェアラブル及び埋め込み型デバイスの生体親和性を追及する開発競争が激化している。電氣的な診断・治療（計測・刺激）を担う電極デバイスは、素子の微小化および基材の薄膜化が生み出したフレキシブルなウェアラブルデバイスとして製品化が進んでいる。さらに近年では、極薄のプラスチックフィルムを基材とするエレクトロニクス技術が進展し、体表および臓器表面の微細な凹凸にも対応して密着するフィルムデバイスの研究が盛んである。しかしながら、極薄とはいえプラスチックは硬い材料であり（ヤング率: 数 GPa）、柔らかい組織（ヤング率: 数 10KPa）とは明らかに異質である。また、体液の循環を遮るため生理環境を乱してしまう。本研究では、電極デバイスの構成材料を見直し、金属やプラスチックなどの硬い材料を、ソフトウェット材料であるハイドロゲルで置き換えるチャレンジを進めている。本発表では、ハイドロゲルの膨潤によるサイズ・形状の変化を活かしたデバイスの「体内患部への密着固定」、電気刺激による神経・筋組織のモジュレーション、並びに局所にも適用可能なハイドロゲル製の送液システムについて現況を報告する (Fig. 1)。

柔軟な伸縮性導電性高分子電極をハイドロゲルの表面に配線する技術の開発に成功し(1)、てんかん手術に用いる頭蓋内電極を作製し(2)、治験で脳波計測性能を確認した。カフ型電極は、ポリビニルアルコールシートをひずみ印加下で接合し、吸水膨潤時に生体組織に巻付き自己固定する機能を創製した(3)。ブタの迷走神経刺激実験において優れた操作性を確認することができた。電気刺激を伴わない高制御性ポンプについては、異極性（カチオン性・アニオン性）のアクリルアミド系ゲル各々について中性モノマーとの共重合比によってイオン密度を最適化し、EOF 効率を最大限に向上させた(4)。

(1) Adv. Healthcare Mater., 3 (2014) 1919-1927; (2) Sci. Reports, 9 (2019) 13379; (3) Adv. Healthcare Mater., 11 (2022) 2201627; (4) Adv. Functional Mater., 34 (2023) 2304946.

自己固定するゲル製カフ電極



両極性ゲルの接合ポンプ



Fig. 1 ハイドロゲル製イオン트로ニック医用デバイス

ポリビニルアルコール・ポリウレタン混合ナノファイバーを用いた 耐水性と伸縮性を有する皮膚電極

Water-Resistant, Stretchable On-Skin Electrodes Based on Polyvinyl Alcohol/Polyurethane Blend Nanofibers

東大院工¹ ○(M2) 三室 真帆¹, 山岸 健人¹, 李 成薫¹, 横田 知之¹, 染谷 隆夫¹

Univ. Tokyo¹ ○Maho Mimuro¹, Kento Yamagishi¹, Sunghoon Lee¹,

Tomoyuki Yokota¹, Takao Someya¹

E-mail: mimuro@ntech.t.u-tokyo.ac.jp

近年、ウェアラブルデバイスを用いた日常生活における生体信号計測が盛んに行われている。生体信号の一つである皮膚インピーダンスは、皮膚バリア機能の状態^[1]や発汗作用と関連のある心理状態^[2]を評価する指標として知られており、長時間計測することで、皮膚疾患の早期発見や診断、ストレスモニタリングなどへの応用が期待されている。これまでに、長時間計測を実現する通気性に優れたナノメッシュ電極が開発されたが、電極を構成するナノファイバーに水溶性のポリビニルアルコール(PVA)を材料としているため、耐水性と伸縮性に乏しいという問題があった^[3]。本研究では、PVAに水分散のポリウレタン(WBPU)を配合したナノファイバーを用いることで、ナノメッシュ電極の耐水性と伸縮性の改善を行った。

まず、15 wt%のPVA溶液と30 wt%のWBPU溶液を、PVAとWBPUの混合比が、10:0から3:7の異なる比率で混合した5種類の溶液を調製し、エレクトロスピンニング法を用いて直径300~900 nmのナノファイバーからなるナノメッシュを作製した。さらに、PVA/WBPUナノメッシュ上に厚さ100 nmの金を真空蒸着することで、ナノメッシュ電極を作製した。次に、それぞれのナノメッシュ電極の耐水性と伸縮性の評価を行った。耐水性試験では、人工皮膚表面にナノメッシュ電極を貼付し、水を入れたガラス瓶の中に入れて攪拌子を10分間回転(400 rpm)させ、残留したナノメッシュ電極の面積を計測することで水中での耐久性を評価した。その結果、Fig. 1に示すようにWBPUの割合が50%より小さい電極では、攪拌2分後で残留面積が半分以下になるのに対し、WBPUが50%と70%の電極では、10分の攪拌後もそれぞれ88%、96%の面積が残り、強い耐水性を示した。また、伸縮性試験では、人工皮膚シートに貼付したナノメッシュ電極に10%~80%の引張歪みを加え、電極抵抗の変化率を比較した。その結果、Fig. 2に示すようにPVA/WBPU = 5/5の電極のみ70%以上の歪みに対しても導電性を保持していた(皮膚の最大の伸び: 66%^[4])。以上より、PVAとWBPUを1:1の比率で混合したナノファイバーを用いることで、伸縮性と耐水性に優れた皮膚電極を実現した。

[1] Alexander, H. *et al.*, *J. Investig. Dermatol.*, 2018, 138(11), 2295-2300.

[2] Sharma, M. *et al.*, *Int. J. Med. Res. Prof.*, 2016, 2(6), 13-17.

[3] Miyamoto, A. *et al.*, *Adv. Healthcare Mater.*, 2022, 11, 2102425

[4] Harada, T. *et al.*, *繊維機械学会誌*, 1983, 36(6), 275-279.

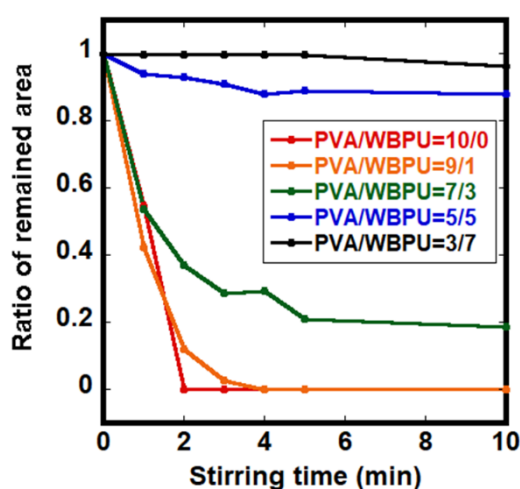


Fig. 1 Result of water stability test

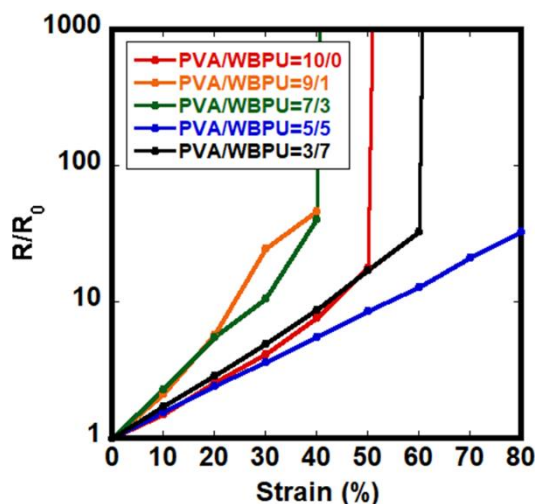


Fig. 2 Result of strain test

生体組織に機械的に適合する超柔軟・伸縮性液体金属アンテナ Highly flexible and stretchable liquid metal antennas mechanically conforming to biological tissues

東大院工¹, シンガポール工科デザイン大² °山岸 健人¹, チン テリー², チョウ ウェンシェン²,
ファン シャオウィン², 橋本 道尚²

UTokyo¹, SUTD², °Kento Yamagishi¹, Terry Ching², Wenshen Zhou², Shao Ying Huang², Michinao
Hahsimoto²

E-mail: yamagishi@ntech.t.u-tokyo.ac.jp

ガリウムを主成分とする共晶合金 (EGaIn やガリンスタン) は、常温で液体であり、高電気伝導性 ($>3 \times 10^6$ S/m) を有するため、伸縮可能な電子デバイスの開発に幅広く利用されている^[1]。また、低毒性であることから、生体組織と一体化したウェアラブル・インプラントブルデバイスへの応用も期待されている^[2]。液体金属を配線材料とする電子デバイスの作製法には、①液体金属を直接基材にパターニングして封止する方法と、②フォトリソグラフィなどを用いて形成したマイクロ流路に液体金属を注入する方法の主に 2 種類の手法がある。しかし、どちらの手法も基材を薄くすることに限界があり、これまで報告されている液体金属デバイスのほとんどは膜厚が 100 μm 以上と厚く、デバイス全体の柔軟性、接着性および生体組織への接着性に課題があった。

そこで我々は、直接インク描画 (DIW) 3 次元印刷技術を用いて、厚さ数〜数十ミクロンのエラストマー超薄膜上に液体金属からなる電子回路を形成する技術を新たに確立した。具体例として、アンテナコイル状に印刷されたシリコーン製のマイクロ流路に表面実装用の LED や IC チップを組み込んで、流路内に液体金属 (ガリンスタン) を注入することで、13.56 MHz の周波数を用いた近距離無線通信 (NFC) 規格に対応した無線発光デバイスや IC タグを製造した (図) ^[3,4]。この液体金属アンテナは曲げ・伸展・ねじりなどの変形に対して優れた柔軟性、伸縮性、耐久性を示した。さらに、基材となる薄膜表面に生体模倣型の接着性高分子ポリドーパミンを修飾することで、腸や心臓といった動きの伴う内臓組織に対する安定した接着性を実現した。この技術は、ヒト、動物、およびソフトロボットなどに機械的に適合する柔軟で伸縮可能な電子デバイスの設計・製造指針に新たな可能性を提供することが期待される。



図 液体金属アンテナ
からなる無線発光デバ
イス(上)と IC タグ(下)

【参考文献】

- [1] S. Chen et al., *Appl. Phys. Rev.* 10, 021308 (2023). [2] Y. Deng et al., *npj Flex. Electron.* 8, 12 (2024).
[3] K. Yamagishi et al., *Adv. Mater.* 33, 2008062 (2021). [4] K. Yamagishi et al., *Adv. Funct. Mater.* in press.
DOI:10.1002/adfm.202311219

光線力学療法に向けた薄膜状発光デバイスの開発と抗腫瘍能評価 Development of Thin-Film Light-Emitting Devices for Photodynamic Therapy and Evaluation of Anti-Tumor Effects

東工大生命理工¹, 東大院総合文化², 青学大理工³, 東工大工⁴, 東工大化生研⁵, 東工大 ASMat⁶

○(D)齋藤 優人¹, 登倉 大貴², 横式 康史³, 徳田 崇⁴, 野本 貴大^{2,5}, 藤枝 俊宣^{1,6}

○(D) Masato Saito¹, Daiki Tokura², Yasufumi Yokoshiki³, Takashi Tokuda³,

Takahiro Nomoto^{2,4}, and Toshinori Fujie^{1,5}

Tokyo Tech^{1,4,5,6}, UTokyo², and Aoyama Gakuin Univ.³ E-mail: t_fujie@bio.titech.ac.jp

【緒言】光線力学療法 (PDT) は、光照射によって光増感剤を励起し、一重項酸素を生じさせて腫瘍組織を選択的に攻撃するがん治療法である。臨床現場では一般的にレーザー光源 (約 100 mW/cm²) を 15 分程度腫瘍に照射するが、光の送達的面から適応個所に限界がある。メトロノミック PDT (mPDT) は微弱な光 (約 100 μW/cm²) を長時間・反復的に照射して光増感剤を励起させ続ける PDT の一類型^[1]である。チップ LED など照射可能な光量のため、生体内で動作する埋め込み型の発光デバイスを用いた治療が可能になり^[2], PDT の課題であった適応個所の制限を克服することが期待されている。本研究では、生体深部への mPDT 適応を見据えて、柔軟性と生体親和性に優れるポリ-D,L-乳酸 (PDLLA) 薄膜を基材に、印刷配線転写技術^[3]を活用した薄膜状発光デバイスを開発し、培養細胞と担がんモデルマウスを用いて PDT 効果を検証した。

【方法】①PDLLA 薄膜 (厚さ約 5 μm) 上に、印刷配線転写技術を用いて Au ナノインクで描画した平面状のコイル配線 (Φ: 20, 36 mm) を転写した。コイルの電気的性能を測定し、チップ LED (λ: 630, 535, 390 nm) を搭載した整流回路基板と接続することで薄膜状発光デバイスを作製した。デバイスの性能は、交流 (13.56 MHz, ~7 W) を印加する無線給電装置に設置した際の発光強度で評価した。②光増感剤 (Chlorin e6) を取り込ませたヒト乳がん細胞 (SK-BR-3-Luc) に対して、発光デバイス及びチップ LED を用いて 24 時間継続して光照射した。Live/Dead 染色法を用いて細胞スケールでの光増感作用を評価した。③モデルマウス (BALB/c, female) の背部皮内にマウス大腸がん細胞 (CT26) を移植した。定着後、腫瘍部に光が届くよう発光デバイスを皮下に埋植し (Figure 1.(a)), 光増感剤を投与した。マウスを 24 時間給電ケージ内で飼育することで mPDT を実施した。その後腫瘍サイズを経時測定することで治療効果を検証した。

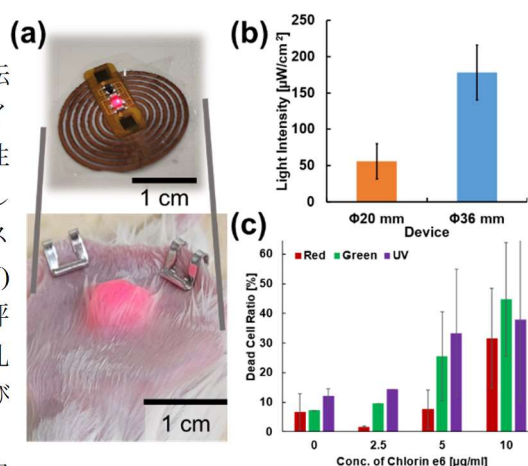


Figure 1. (a) Images of the Φ20 mm device in operation and implanted and activated in a mouse carcinoma model. The tumor area glows red due to the luminescence of the device. (b) Graph of luminescence intensity variation by coil size (Feeding power: 7 W). (c) Graph of cell death area percentage at different emission intensities and drug concentrations at various wavelengths.

【結果と考察】①デバイスの発光性能は、コイルサイズによるインダクタンス変化に加えて、給電ケージ内のデバイス設置場所やケージ底面に対する角度によって変化した (Figure 1. (b)). 発光強度は最大 815 μW/cm² (赤色) であった。②光増感剤を 24 時間取り込ませたがん細胞に対し、24 時間 LED 光を照射したところ、光増感剤濃度 (0-20 μg/ml) と LED 発光強度 (40-400 μW/cm²)、照射波長を調整することで、局所的に細胞死領域を形成できることが示された (Figure 1. (c)). ③担がんモデルマウスにデバイスを埋植して mPDT を実施したところ、治療を施さなかった群と比較して、腫瘍サイズの増大が抑制される傾向が示唆された。

【参考文献】 [1] S. Bisland, *et al.*, *Photochem. Photobiol.*, **2004**, 80, 22-30. [2] K. Yamagishi, *et al.*, *Nat. Biomed. Eng.*, **2019**, 3, (1), 27-36. [3] M. Saito, *et al.*, *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31, (32), 2102444

植物葉面に貼付可能な透明超薄膜電極の開発と生体電位応答の計測

Ultra-Thin Transparent Electrodes Conformable to Leaf Surface for Measurement of Plant Biopotential Response

東工大生命理工¹ ○(M1)堀 祐輔¹, 堀井 辰衛¹, 増田 真二¹, 藤枝 俊宣¹

Sch. Life Sci. and Tech.¹, Tokyo tech, [○]Yusuke Hori¹, Tatsuhiko Horii¹, Shinji Masuda¹, Toshinori Fujie¹

E-mail: t_fujie@bio.titech.ac.jp

【緒言】植物は周辺環境や外部刺激に対して応答を示し、電気信号として全体に情報を伝達することで生理活性を変化させている^[1]。この信号を生体電位として測定すれば、植物の健康状態を連続的に評価できると考えられる。一般に、針電極^[1]、脳波用皿電極^[2]やゲル電極^[3]が植物の生体電位計測に使用されてきたが、長期間測定時の植物への侵襲性は十分に検討されてこなかった。我々はこれまでに polystyrene-*block*-polybutadiene-*block*-polystyrene triblock copolymer (SBS) 超薄膜 (ナノシート) 上に単層カーボンナノチューブ (SWCNT) からなる薄層を塗布した導電性ナノシートを作製し、皮膚組織に対して接着剤なしで貼付でき、かつ、追従性に優れるナノシート電極を開発してきた^[4]。本研究では、SWCNT-SBS ナノシート電極を葉面に貼付し、光合成時に生じる光誘起性生体電位 (LIB) を長期間測定した。また、光合成阻害剤 (3-(3, 4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea (DCMU)) 溶液を浸漬させた葉面の LIB を測定し、薬剤処理に対する応答を評価した。

【実験方法】グラビアコート法で作製した SBS ナノシート上に SWCNT 水分散液 (0.2 wt%) を塗布し、SWCNT-SBS ナノシートを作製した。ナノシート電極 (20 mm×25 mm) は中央脈を挟んだ位置に電極間距離約 3 cm で貼付し、LED 明滅時の LIB を連続測定した。この時、心電図用ゲル電極 (20 mm×25 mm) と脳波用皿電極 (直径 10 mm) も同じ位置に貼付し、貼付直後と約 2 週間後の葉の状態を比較した。また、DCMU 水溶液 (400 μ M) にポトスの葉を 27 時間浸漬することで処理した。同じ葉にて処理前後の LIB を測定し、LED 点灯直後の振幅変化を比較した。

【結果と考察】SWCNT-SBS ナノシート (膜厚: 485 nm, 重量: 9.6 mg) は、ゲル電極 (852 mg) や皿電極 (439 mg) と比べて約 1/50 以下の重量であった。ナノシート電極を用いて測定した LIB は、ゲル電極を用いた既報研究^[3]と同様に、点灯直後に大きく減少し、約 12 分間増加した後、点灯前の値付近に戻った。ナノシート電極やゲル電極での測定では貼付から 14 日後においても同様の波形を示した (Fig. 1)。この時、皿電極では貼付から 2 週間後に葉が茶に変色し、貼付部位組織の枯死が観察された (Fig. 2 (a))。一方、ゲル電極やナノシート電極を貼付した葉では、2 週間以上貼付しても変色は認められなかった (Fig. 2 (b))。次に、DCMU を処理した葉の LIB を測定したところ、処理後 1、2 日目では未処理の葉と比較して有意に LIB の振幅が減少した。さらに、処理後の日数経過とともに振幅は増加し、14 日後には未処理葉と同様に 30-40 mV の振幅を示した (Fig. 3)。この結果より、DCMU 処理直後では光合成が阻害されるものの、阻害効果は経時的に弱まることが示唆された。以上より、ナノシート電極は、LIB を 14 日以上連続的に測定可能であり、植物が受ける生理学的なストレスの評価に有用であると期待される。

【参考文献】

- [1] M. Dolfi *et al.*, *Sens. Bio-Sens. Res.*, **32**, 100420 (2021).
- [2] K. Ando *et al.*, *IEEEJ Trans. Sens. Micromachines*, **131**, 9 (2011).
- [3] J. Li *et al.*, *Front. Plant Sci.*, **10** (2019).
- [4] T. Horii *et al.*, *NPG Asia Mater.*, (2024). doi: 10.1038/s41427-024-00553-9

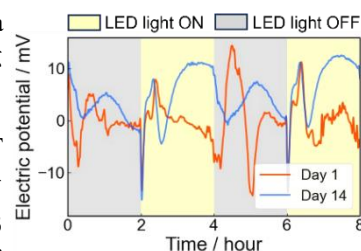


Figure 1. Comparison of LIB on Day 1 and Day 14 of nanosheet electrode attachment.

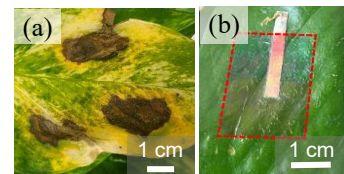


Figure 2. Image of Pothos leaf after attaching electrode. (a) Invasiveness of disk electrode. (b) Non-invasiveness of nanosheet electrode. Area in the dashed line indicates a nanosheet electrode.

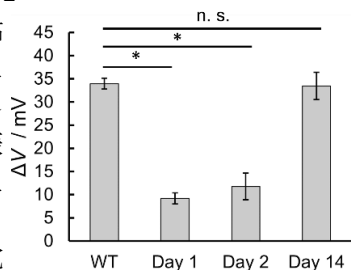


Figure 3. Comparison of LIB between wild-type (WT) and DCMU treated leaf. LIB amplitudes were compared at each lapsed date from the DCMU treatment. Error bars denote SD. Student's t-test was used to compare two groups. * $p < 0.05$. ns, no significant difference.

エラストスピンドバイスとナノ・エラストロニクス

Elasto-spin devices and Nano Elastronics

東北大 SRIS¹, 阪大産研², 阪大 CSRN³, 阪大 OTRI⁴

○千葉 大地^{1,2,3,4}

SRIS, Tohoku Univ.¹, SANKEN, Osaka Univ.², CSRN, Osaka Univ.³, OTRI, OSAKA Univ.⁴

○Daichi Chiba^{1,2,3,4}

E-mail: dchiba@tohoku.ac.jp

スピントロニクスは高感度磁界センサや不揮発性磁気メモリ(MRAM)などを支える学問領域として発展してきた。新たな物理現象が社会実装され続け、高度な発展を遂げている。我々は、身の回りにあふれる力学量を高度にセンシングするため、スピントロニクス素子に別な角度から注目をして研究を進めている。

スピントロニクス素子は磁性体や絶縁体のナノ薄膜の積層構造によって形成されている。これに外部から力学的アクション(ひずみ)を加えると、磁性体の原子間隔が変化し、磁化の方向が変化する。これにより、素子の電気抵抗は大きく変化する。この特徴により、ひずみの方向[1,2]や量[3]を高感度にセンシング可能となった。MRAM などですでに利用されている磁気トンネル接合(MTJ)をフレキシブル基材上に形成した素子においては、従来のフィルム型の金属箔ひずみゲージに比べ、500 倍もの感度を示すことを実証している[3]。

MTJ は低電圧駆動が可能であり、消費電力も小さいことから、従来の力学センサを置き換える可能性を秘めている。また、これらのエラストスピンドバイスを集積化することにより、生体表面のひずみのマッピングや、無電源で力学イベントを常時モニタリングし不揮発情報記録するスマートセンサなどを開発中であり、将来的に新たな市場を獲得できる可能性も秘めている。

全ての背景にあるものは、原子間隔が変化することによりもたらされる新しい機能である。ナノ薄膜によって形成された素子は、%オーダのひずみによっても破壊が起こりにくいエラストイックな性質がある。物質材料の垣根なく新たなエラスト現象を追求し、ナノ・エラストロニクスという分野を切り拓きたいと考えている。

本研究は、科研費基盤研究(A) [23H00183]、JST CREST [JPMJCR20C6]・A-STEP [JPMJTR20T7, JPMJTR233A]・共創の場形成支援プログラム [JPMJPF2115]、文部科学省 次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 [JPJ011438]・ナノテクノロジープラットフォーム事業微細構造解析プラットフォーム(大阪大学ナノテクノロジー設備供用拠点)・マテリアル先端リサーチインフラ事業(大阪大学マテリアル先端リサーチインフラ設備供用拠点)、Spintronics Research Network of Japan、株式会社鷺宮製作所の支援を受けて行われました。

[1] S. Ota, A. Ando, and D. Chiba, *Nature Electronics* **1**, 124 (2018). [2] H. Matsumoto, S. Ota, A. Ando, and D. Chiba, *Appl. Phys. Lett.* **114**, 132401 (2019). [3] K. Saito, A. Imai, S. Ota, T. Koyama, A. Ando, and D. Chiba, *Appl. Phys. Lett.* **120**, 072407 (2022).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 有機系vs無機化合物系 薄膜太陽電池バトルロワイアル

[17a-A21-1~5] 有機系vs無機化合物系 薄膜太陽電池バトルロワイアル

[17a-A21-1]

有機系vs無機化合物系 薄膜太陽電池バトルロワイアル はじめに

○今泉 充²、仁木 栄¹ (1.NEDO、2.三条市大)

[17a-A21-2]

有機薄膜太陽電池の将来展望

○尾坂 格¹ (1.広大院先進理工)

[17a-A21-3]

III-V化合物薄膜太陽電池シートの開発

○高本 達也¹、山口 洋司¹、十楚 博行¹、鷺尾 英俊¹ (1.シャープSESJ)

[17a-A21-4]

ガラス建材一体型ペロブスカイト太陽電池の開発

○松井 太佑¹ (1.パナソニックホールディングス株式会社)

[17a-A21-5]

Siタンデム太陽電池の高効率化と車載応用

○山口 真史¹、中村 京太郎¹、尾崎 亮¹、小島 信晃¹、大下 祥雄¹ (1.豊田工業大学)

有機系 vs 無機化合物系 薄膜太陽電池バトルロワイアル はじめに Organic vs. Inorganic Compound Materials, Thin-film Solar Cell Battle Royale, Introductory Talk

1 NEDO, 2 三条市大 仁木 栄¹, °今泉 充² (代表世話人)

1 NEDO, 2 Sanjo City Univ., Shigeru Niki, °Mitsuru Imaizumi

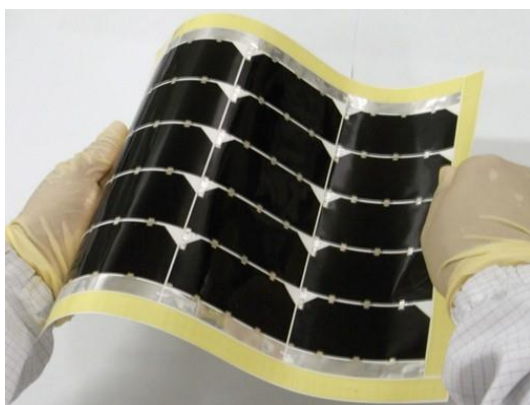
E-mail: imaizumi.mitsuru@sanjo-u.ac.jp

2022 年に太陽光発電(PV)は大きなマイルストーンである累積導入量 1TW を超え、PV はテラワット時代へと突入した。PV は 2050 年カーボンニュートラル(CN)の実現に向けて中心的な役割を求められている。IEA によると、2050 年 CN 実現には 19TW の PV が必要と見通されるなど、今後さらなる導入加速が求められている。持続可能な PV の導入拡大には、①PV 分野の省資源化・資源循環、②サプライチェーンの多様化 と産業競争力の強化、③PV の用途拡大、④フレキシビリティの確保と電力系統安定化、⑤社会受容性向上、というさまざまな課題を解決する必要がある。本講演ではまず最初に国内外の PV の現状と動向、そして CN に向けた課題を参加者と共有する。

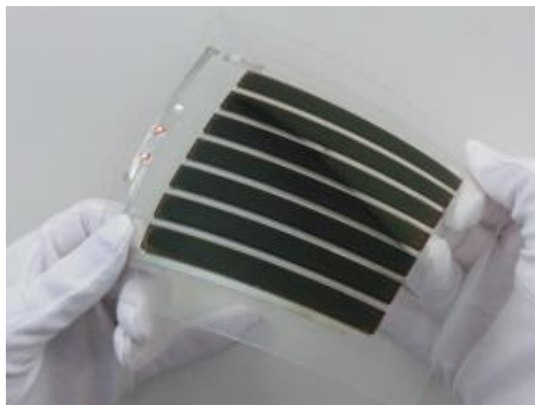
そして上述の課題を解決するためには、既存の太陽電池では実現不可能であった超高効率、軽量、フレキシブル、省資源、特殊な環境での長期信頼性等の高性能を有する次世代型の太陽電池の開発が必要となる。

現在主力となっている結晶シリコン系の太陽電池以外に、これまで非晶質シリコンからカルコゲナイド、Ⅲ-Ⅴ族化合物に代表される無機系の太陽電池や、各国が研究開発を加速しているペロブスカイトに代表される有機材料など、様々な材料を用いた太陽電池の研究開発が進められてきた。研究開発に求められる専門性の違いや所属する学会・研究会が異なるために、これまで材料別に議論されることが多く、俯瞰的に議論される機会がこれまで少なかった。したがって、太陽光発電のユーザーすなわち第三者には、両者を同時かつ平等に比較検討するような機会がほとんどなかったというのが現状と考える。

そこで、無機、有機系の研究者が、ライバルを目の前にして、自らの長所と相手の欠点を堂々と訴えて正当性や優位性を主張し合う、聴衆という第三者に”面白かつ稀で貴重な”機会、言い換えればフェアな比較の場を提供するのが本シンポジウムの目的である。またそれぞれの研究開発担当者にあたっては、自己側の長所だけでなく短所や欠けている部分を冷静に(再)認識し、課題を明らかにしてその後の研究に資する情報とエネルギーを得ることも、本シンポジウムのもう一つの大きな、そして大事な目的である。結果的に、切磋琢磨による薄膜太陽電池の研究開発や製品・産業、そして市場の成長に資する場となり、ひいては今後の再生可能エネルギーの普及・発展に繋がることを目指したい。



(a) InGaP/GaAs/InGaAs triple-junction solar cells



(b) Perovskite solar cells

Fig. 1. Examples of lightweight, thin and flexible solar cell array sheets: (a) the space solar sheet by SHARP with InGaP/GaAs/InGaAs inverted metamorphic (IMM) triple-junction solar cells (super high efficiency but relatively costly), and (b) the long-life solar sheet by Saule Technologies with perovskite solar cells (low cost but relatively low performance).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：有機系vs無機化合物系 薄膜太陽電池バトルロワイアル

[17a-A21-1~5] 有機系vs無機化合物系 薄膜太陽電池バトルロワイアル

[17a-A21-2] 有機薄膜太陽電池の将来展望

○尾坂 格¹ (1.広大院先進理工)

キーワード：有機薄膜太陽電池、薄膜太陽電池、有機半導体

有機薄膜太陽電池の性能は、新しい材料の登場とともに向上し、現在では20%を超えている。本講演では、実用化に向けた有機薄膜太陽電池の現状と課題について紹介し、参加者と一緒にその将来展望について考えたい。

III-V 化合物薄膜太陽電池シートの開発

Development of III-V Compound Thin-film Solar Cell Sheet

シャープ SESJ °高本達也、山口洋司、十楚博行、鷲尾英俊

Sharp SESJ, °Tatsuya Takamoto, Hiroshi Yamaguchi, Hiroyuki Juso and Hidetoshi Washio

E-mail: takamoto.tatsuya@sharp.co.jp

本 III-V 化合物薄膜太陽電池は、InGaP トップ ($E_g=1.88\text{eV}$)、GaAs ミドル (1.43eV) および InGaAs (1.0eV) ボトム の 3 つの太陽電池層から成る 3 接合型で、MOCVD 法によって GaAs 基板上にエピタキシャル成長した単結晶薄膜の太陽電池層をフィルム上に転写して作製される。従来の Ge (0.67eV) 基板をボトムとする 3 接合バルク型に比べ、ボトム層のバンドギャップの最適化による変換効率の向上 (30%→32%)、基板を取り除くことによるセル重量の低減 ($85\text{mg}/\text{cm}^2 \rightarrow 12\text{mg}/\text{cm}^2$) を実現している。フィルム上の太陽電池層は薄くてフレキシブル性があるため、軽量フレキシブルなモジュール (シート) が可能となる。しかしながら、実際は使用環境で要求される耐久性に応じてシート構造 (材質や厚さ) ひいては重量が決定されるし、設置方法や使用のされ方によって要求されるフレキシブル性は変わる。宇宙人工衛星への搭載を目的とした薄膜太陽電池シートについては、使用環境は設置方法に応じて、以下の試験を繰り返しながら、シートを構成する配線材料、封止材料、カバー材料の選択、厚さなどの最適化を行ってきた。

【薄膜太陽電池シートへの要求項目】

- ・ 電子線、陽子線照射。UV 照射。原子状酸素照射に対する劣化の抑制
- ・ マイナス 100°C 以下からプラス 100°C 以上での数千回の温度サイクルに対する耐性
- ・ 高温高真空放置 (アウトガス評価含む) で変化がないこと

特に、温度サイクル試験では、封止材料の剥離や配線材料の亀裂の有無だけでなく、単結晶薄膜に存在する結晶欠陥を起点としたクラックやピンホールなどの伸展がないかを EL イメージ像で細かくチェックされた。また、実際のフライト試験を通じて発覚した熱暴走問題 (シート内の並列接続された領域において温度不均一が生じた場合、温度が高いところに電流が集中する問題) への対策がなされた。このように軽量フレキシブルシートは構造上、耐環境性が懸念されるため、数々の厳しい試験による検証が必要とされた。結果として、昨今、世界で初めて月面への高精度着陸に成功し、その後、月面での越冬を達成した小型月着陸実証機「SLIM」の電源として、偉業の一端の担うことができた。

III-V 化合物薄膜太陽電池は、高効率、軽量、フレキシブル、高耐久性の長所を有する反面、製造において高価な単結晶基板を必要とし、精密な温度制御、ガス制御を行う高価な成膜装置が必要となるため、現状では高コストが課題となっている。しかしながら、高効率で高信頼性が要求される宇宙用途には確かな市場が存在する。今後の宇宙市場においては、軽量化に加えて、コンパクトに収納して大面積に展開できるようなフレキシブルパネルへの期待も大きい (ただし、バルク型セルであっても蛇腹構造等によりある程度のフレキシブル性を実現することは可能であるため、セルのフレキシブル性は必須ではない)。将来は、基板再利用等の技術革新や大量生産による低コスト化を実現し、宇宙に限らず、成層圏飛行体や電動車等の移動体用途への適用を期待したい。

ガラス建材一体型ペロブスカイト太陽電池の開発

Development on glass integrated perovskite solar cells

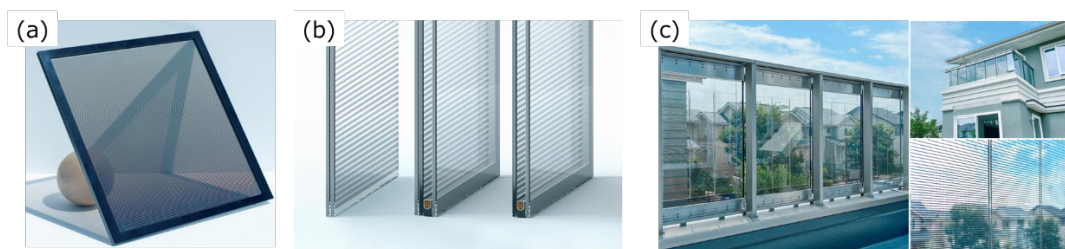
パナソニックホールディングス株式会社¹ ○松井 太佑¹

Panasonic Holdings Corporation¹ Taisuke Matsui¹

E-mail: matsui.taisuke@jp.panasonic.com

近年開発が盛んに行われている、塗布型で高効率なペロブスカイト太陽電池は、現在広く使われている結晶シリコン太陽電池と比較して、低コスト・軽量・フレキシブル化が可能ななどの特徴により、これまで太陽電池の設置が困難であった場所への展開が期待されている。ラボレベルの小面積セルの変換効率は、結晶シリコン太陽電池とほぼ同等レベルにまで到達しており、実用化が近づきつつある。

当社は2014年よりペロブスカイト太陽電池の開発を開始し、当社独自の材料組成やプロセスの工夫により、大面積でも高効率を保つことに成功しており、実用サイズの804cm²にて世界最高レベルの発電効率(18.1%)を有するペロブスカイト太陽電池を実現している。また、当社でこれまで培った独自のインクジェット技術を用いて、凹凸やうねりを有する建材ガラス上にペロブスカイト太陽電池を直接、均一に塗布・形成することができ、太陽電池としての信頼性向上と建材としての剛性を確保することを目指しています。これにより、水・酸素に弱いペロブスカイト太陽電池の弱点を克服しつつ、透過率の制御やグラデーション加工等のデザインの自由度やサイズの自由度を高め、建材一体型太陽電池として求められる性能の達成が可能となります。この技術を活用することで、従来設置が困難とされていた窓・壁等ガラスが利用されるあらゆる個所に意匠性を害することなく、まち・くらしに調和しながら発電することを目指しています。



(a) Picture of 30cm×30cm semi-transparent perovskite PV module

(b) Structure of glass integrated perovskite solar cell (CG)

(c) Demonstration of balcony integrated perovskite PV at Fujisawa SST

Si タンデム太陽電池の高効率化と車載応用

Development of High-efficiency Si Tandem Solar Cells for Solar-powered Vehicles

豊田工大 [○]山口真史, 中村京太郎, 尾崎亮, 小島信晃, 大下祥雄

Toyota Tech. Inst., [○]Masafumi Yamaguchi, Kyotaro Nakamura, Ryo Ozaki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita

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

1. はじめに

再生可能エネルギーによるクリーンエネルギー社会の創成のためには、高性能太陽電池の開発が必要である。図1に示すように、Si 太陽電池の効率は、Shockley-Queisser limit 32~33%に近づいており、29.4%が限界である。太陽光スペクトルの有効利用をはかった多接合太陽電池[1]やSi タンデム太陽電池[2]が有望で、図1に示すように、2、3接合セルで、図1に示したように、37.5%、43.5%の高効率化が期待できる。タンデム太陽電池高効率化に関する解析結果と取組を報告する。

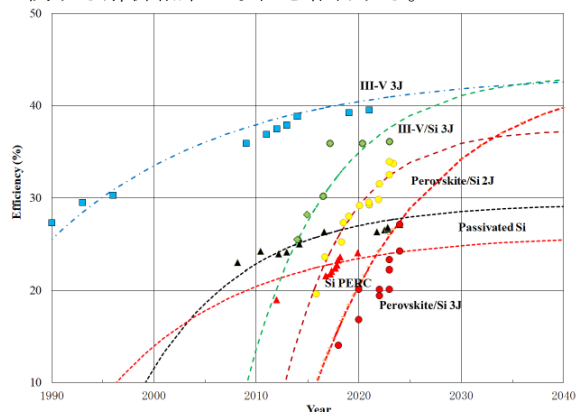


Fig. 1. Chronological efficiency improvements of Si PERC and passivated solar cells, and various tandem solar cells under 1-sun condition.

2. タンデム太陽電池の高効率化に関する考察

外部発光効率 (ERE : External Radiative Efficiency) をベースにした解析手法に[3]により、タンデム太陽電池の高効率化の可能性を解析した。III-V 3接合セルの効率39.5%、III-V/Si 3接合およびペロブスカイト/Si 2接合タンデム太陽電池で、効率、各々、39.5%、36.1%、33.9%の現状[4]だが、ERE=20%が限界とした場合、2、3接合セルで、各々、37.6%、43.4%が実用可能効率であり、図1の外挿による限界効率に一致する。講演では、種々のタンデム太陽電池に関する解析結果も報告する。

3. 車載用太陽電の開発に向けた Si タンデム太陽電池の取組み

車載用太陽電池の高効率化は、太陽電池搭載自動車 (Solar-EV) の走行距離延長、CO₂排出量削減、充電コスト低減に有効である。高効率化と同時に、

低コスト化が必要であり、Si タンデム太陽電池に取り組んでいる。シャープとの共同研究を進め、面積775cm²の4端子InGaP/GaAs/Si 3接合タンデム太陽電池モジュールで、33.7%の世界最高効率を達成している。トヨタ自動車の実証試験車やSono Motors Sionの走行試験データをもとに、名古屋の平均日射条件 (4kWh/m²/day) 下で試算した走行距離のモジュール効率依存性を図2に示す。Si 太陽電池モジュールの20.5km/dayに対して、3接合タンデムモジュールは27.9km/dayと走行距離延長が期待できる。1日の走行距離30kmの実現のためには、効率35%以上の高効率化が必要である。

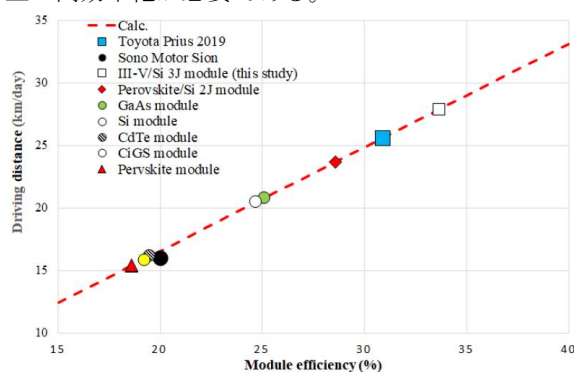


Fig. 2. Changes in daily driving distance of solar-powered vehicles installed with various candidate modules as a function of module efficiency in comparison with actual data of Toyota demonstration car and Sono Motors Sion.

4. 要約

Si タンデムセルは、2接合、3接合セルで、効率37.6%、43.43%が期待できる。高効率化のためには、非輻射再結合損失、抵抗損失、光学損失の低減が必要である。30km/dayの実現のためには、効率35%以上の高効率化が必要である。

謝辞

NEDO のサポートに感謝致します。

参考文献

- [1] M. Yamaguchi *et al.*, J. Appl Phys. **129**, 240901 (2021).
- [2] M. Yamaguchi *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 133002 (2018).
- [3] M. Yamaguchi *et al.* Prog. Photovolt. **26**, 543 (2018).
- [4] M.A. Green *et al.*, Prog. Photovolt. **30**, 3 (2022).
- [5] M. Yamaguchi *et al.* Prog. Photovolt. **29**, 684 (2021).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：有機系vs無機化合物系 薄膜太陽電池バトルロワイアル

[17p-A21-1~9] 有機系vs無機化合物系 薄膜太陽電池バトルロワイアル

[17p-A21-1]

Spalling工程による薄膜タンデム太陽電池の作製と評価

○宮下 直也¹、庄司 靖²、菅谷 武芳²、曾我部 東馬¹、山口 浩一¹、岡田 至崇³ (1.電通大、2.産総研、3.東大先端研)

[17p-A21-2]

高効率・高耐久性全ペロブスカイト3接合太陽電池モジュール：電圧整合 vs. 電流整合

○竹田 康彦¹、山中 健一¹、加藤 直彦¹ (1.豊田中研)

[17p-A21-3]

界面の分子工学で進化するペロブスカイト太陽電池

○宮坂 カ¹ (1.桐蔭横浜大学)

[17p-A21-4]

HVPE及びスマートスタックによるIII-V族多接合太陽電池の低コスト作製技術

○菅谷 武芳¹ (1.産総研)

[17p-A21-5]

太陽電池素子を応用した放射線センシング技術開発

○奥野 泰希^{1,5}、小林 知洋¹、大竹 淑恵¹、今泉 充²、上川 由紀子³、岡本 保⁴、栗本 裕司⁴、陣場 優貴⁵、荻野 靖之⁵、笠田 竜太⁴、中村 徹哉⁶ (1.理研光量子センター、2.三条市大、3.産総研、4.木更津高専、5.東北大、6.宇宙機構)

[17p-A21-6]

異種太陽電池の耐放射線性比較法

○中村 徹哉¹、秋山 英文²、岡田 至崇³ (1.宇宙機構、2.東大物性研、3.東大先端研)

[17p-A21-7]

薄膜太陽電池三兄弟は敵か味方か？

○杉本 広紀¹ (1.㈱ PXP)

[17p-A21-8]

無機化合物薄膜太陽電池とペロブスカイト太陽電池の得手、不得手

○根上 卓之¹ (1.立命館大)

[17p-A21-9]

薄膜太陽電池のキャリア挙動は理解できているのか？

○金光 義彦¹ (1.京大化研)

Spalling 工程による薄膜タンデム太陽電池の作製と評価 Characterization of Thin Film Tandem Solar Cells via Spalling Process

電通大¹, 産総研², 東大先端研³ °宮下 直也¹, 庄司 靖²,

菅谷 武芳², 曾我部 東馬¹, 山口 浩一¹, 岡田 至崇³

Univ. of Electro-Commun.¹, AIST², RCAST, Univ. of Tokyo³, °Naoya Miyashita¹, Yasushi Shoji²,

Takeyoshi Sugaya², Tomah Sogabe¹, Koichi Yamaguchi¹, Yoshitaka Okada³

E-mail: n.miyashita@uec.ac.jp

【はじめに】Si や Ge, GaAs など多様な半導体に適用可能な薄膜デバイス作製手法として Spalling 法が提案されている^[1,2]。Spalling では半導体表面に形成した応力印加層の作用により、面内方向に劈開を進めることで、基板から表層部を分離することができる。薄膜デバイス作製に加え、基板を再利用することによる製造コストの低減策としても期待される。本研究では、Spalling 法を用いた半導体薄膜層の分離技術の検討を行い、薄膜 2 接合太陽電池を試作、評価した。

【実験方法と結果、考察】本研究では、応力印加層として Ni 膜を適用した。試料には GaAs(001)基板および MO-CVD 法で製膜した逆積み構造の InGaP/GaAs 2 接合太陽電池構造を用いた。Spalling の深さ制御により、デバイス層下部の基板領域の深さ位置で分離を行った (図 1)。分離後の表面には波状の構造が観察された。分離後の薄膜を用いたデバイス化においては、エッチストップ層を用いた選択エッチングにより、波状の基板領域を除去したのち、標準的なデバイス化プロセスにより薄膜 2 接合セルを作製した。

分光感度測定により、各サブセルにおける明瞭な EQE スペクトルを確認した。図 2 には光電流電圧特性を示す。ソーラーシミュレータを用いた 1sun 光照射下において、変換効率 20.0%, 短絡電流 9.44 mA/cm², 開放電圧 2.41 V, 曲線因子 0.880 を得た (反射防止膜非適用)。Spalling を含む一連の薄膜セル化プロセスを、セル特性の劣化を生じさせることなく行えることを確認した。

【謝辞】本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、および JSPS 科研費 (20K05682) の支援により実施されたものであり、関係各位に感謝致します。

【参考文献】[1] S.W. Bedell *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **46**, 152002 (2013). [2] K.L. Schulte *et al.*, Joule **7**, 1529 (2023).

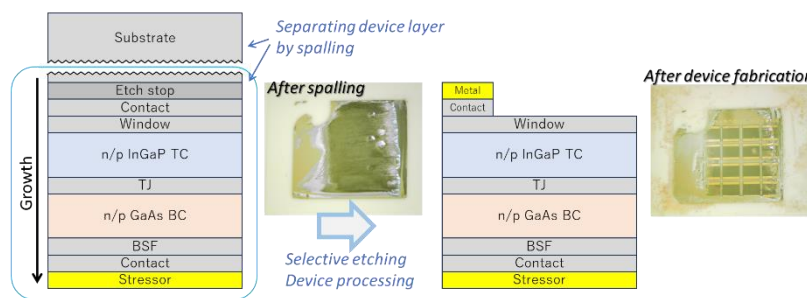


Fig.1 Schematics of spalling device process.

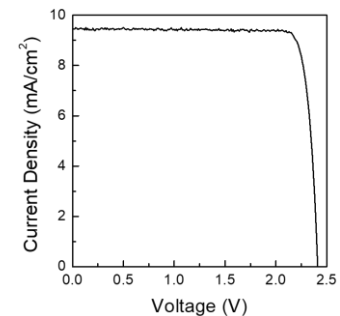


Fig.2 I-V characteristics of spalling thin-film InGaP/GaAs 2J SC.

高効率・高耐久性全ペロブスカイト 3 接合太陽電池モジュール： 電圧整合 vs. 電流整合

Highly efficient and durable all-perovskite triple-junction solar modules:
voltage matching vs. current matching

豊田中研 °竹田 康彦, 山中 健一, 加藤 直彦

Toyota Central R&D Labs., Inc. °Yasuhiko Takeda, Ken-ichi Yamanaka, Naohiko Kato

E-mail: takeda@mosk.tytlabs.co.jp

有機-無機ハイブリッドペロブスカイト(PVK)太陽電池の多接合化は、変換効率の点では結晶シリコン太陽電池との組み合わせが優位である。しかし、モジュールの大型化や軽量化、更に量産性の観点からは、モノリシック直列接続構造をもつ全 PVK 多接合モジュールが望まれる。しかし、何れにしても PVK セル、特にワイドバンドギャップトップセルの耐久性は十分ではない。そこで、高い変換効率の観点に加えて、トップセルの劣化の影響を最小限に抑える観点から、3 接合モジュールの構成を設計、選定した[1]。

バンドギャップの異なる PVK 単接合セルの既報データを基にして、電流密度－電圧 ($j[v]$) 特性を

$$j[v] = j_{ph} - j_1 \exp\left[\frac{q(v + r_s j[v])}{(k_B T_{cell})}\right] - j_2 \exp\left[\frac{q(v + r_s j[v])}{(2k_B T_{cell})}\right]$$

により表した。これを用いて、図 1 に示される 3 種類のモジュールの変換効率を計算し、PVK のバンドギャップ、セル幅、透明導電膜厚さを最適化した。トップセルの光電流密度 (j_{ph})、SRH 再結合電流密度の比例係数 (j_2)、及び直列抵抗 (r_s) が劣化により変化したときのモジュール効率への影響を調べた。

2T モジュールを用いて高い変換効率を得るためには、電流整合の要請により I, Br 混合アニオン組成であるバンドギャップ 2.15–2.2 eV のトップセルの使用が必須である。しかし現状では、この組成は I リッチ相と Br リッチ相に分離しやすいため、高い耐久性は望めない[2]。一方、SPVM, SSCM の場合は、セル幅の調節によりバンドギャップ 2.3 eV の CsPbBr₃ を用いることができるので、相分離の問題が回避される。

両者に用いられるトップセルの j_{ph} , j_2 , r_s がそれぞれ単独で変化し、トップセルの変換効率が初期値の 80% (相対値) となったときのモジュール効率を求めた結果が図 2 である。初期の両者の効率は同等である。劣化により j_{ph} が低下すると、SSCM の場合はミドル-ボトムモジュールの電流密度も小さくなるのでモジュール効率が著しく低下するのに対し、SPVM の効率低下はトップモジュール効率の低下分のみに抑えられる。逆に j_2 が増大するとセルの最大出力電圧が小さくなるので、SPVM への影響がより大きい。一方 r_s が増大しても、SPVM, SSCM のどちらもモジュール効率の低下は小さい。従って、トップセルの劣化要因によってモジュールの構成を使い分ければ、モジュール効率の低下が最小限に抑えられる。

[1] Y. Takeda, et al., Prog. Photovolt.: Res. Appl., doi: 10.1002/pip.3786 (2024).

[2] L. P. Duan, et al., Nat. Rev. Mater. **8**, 261 (2023).

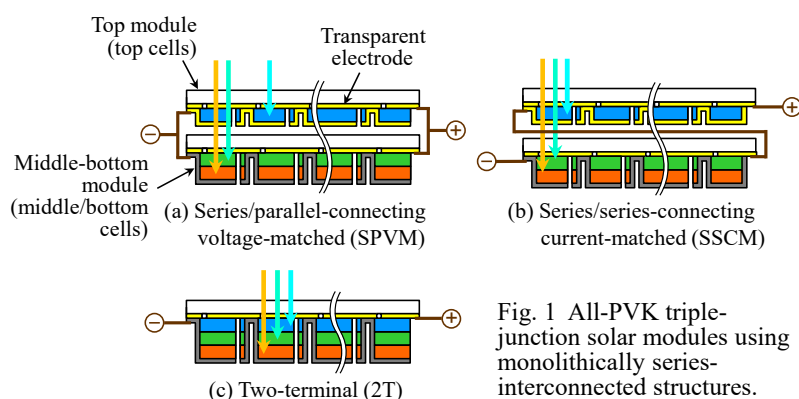


Fig. 1 All-PVK triple-junction solar modules using monolithically series-interconnected structures.

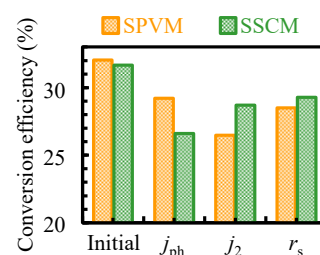


Fig. 2 Initial conversion efficiencies of SPVM and SSCM modules and efficiencies when the top cells degraded owing to j_{ph} decrease, j_2 increase, and r_s increase, respectively.

界面の分子工学で進化するペロブスカイト太陽電池

Molecular engineering of interfaces to advance perovskite solar cells

桐蔭横浜大 宮坂 力

Toin University of Yokohama, Tsutomu Miyasaka

E-mail: miyasaka@toin.ac.jp

ペロブスカイト太陽電池は結晶粒子界面の改良技術によって変換効率と耐久性が改善し、シングルセルの効率は 26%、タンデムでは 34% 以上に達している[1]。現在の研究開発は、欠陥パッシベーションのための界面工学、耐久性の向上のための組成改良、大面積モジュールと多接合タンデムセルの製作が活発化している。筆者らは変換効率、界面構造の改良によって光電変換性能における電圧出力を理論限界に近いレベルに高めることに注力してきた[2,3]。また高温耐久性を高めるために有機無機複合ペロブスカイト（120℃まで安定）から全無機組成のペロブスカイト（CsPbX₃ (X=I, Br)、400℃以上まで安定）に換えて高効率化に取り組んできた。耐久性の確保にはヨウ素イオンなどのイオンの拡散の問題を解決する技術が必要である。順層構成では、正孔輸送材料（HTM）に拡散性ドーパントを必要としない高分子材料を使用し、電子輸送層には SnO₂ の界面をアモルファスの SnO_x 超薄膜を被覆して改質した。この方法によって電圧出力が 1.4V から 1.5V の単セルが実現した。電圧が高まった効果として、低光量の屋内 LED 照明のもとでも 1.1V から 1.2V の電圧を維持し効率は 34% に達する[3]。これらは、界面の構造改質による結果であるが、現在、数多くの有機化合物が、結晶の粒界のパッシベーションに有効とわかり、また電極とペロブスカイトの界面には電流を整流する自己組織化単分子膜として大きな効果を示している。後者によって HTM が不要となるシンプルな構造が高性能を実現しており、この研究の流れは、今後、新しい薄膜構造の素子を高効率化することにつながると考える。

実用化においては、低光量下の高電圧を特長とする光電変換素子は太陽電池としてのみならず、屋内用の IoT デバイスの電源としても有用である。ペロブスカイトはインクジェットなどを使う印刷工程によって、プラスチックフィルムに成膜した極めて軽い素子として作製することできる。軽量フレキシブルな太陽電池は、車載用のみならず宇宙衛星への応用にも期待される。これはペロブスカイトが高エネルギー粒子(陽子および電子ビーム) への暴露に対して高い耐性を示すためである[4]。しかし、大面積モジュールの開発は、生産技術に大きな技術課題を残している。講演では生産技術の課題にも触れる。

1. 宮坂 力、「ペロブスカイト太陽電池」、共立出版、2024 年。
2. G. M. Kim, T. Miyasaka, et al., *Adv. Energy Mat.* **2022**, 12, 2102856.
3. Z. Guo, T. Miyasaka, et al., *Adv. Func. Mat.* **2021**, 31, 2103614.
4. Y. Miyazawa, T. Miyasaka, et al., *iScience* **2018**, 2, 148.

HVPE 及びスマートスタックによるⅢ－Ⅴ族多接合太陽電池の低コスト作製技術

Low-cost fabrication technology for III-V multijunction solar cells using HVPE and smart stack

産総研、○菅谷武芳

AIST, ○T. Sugaya, E-mail: t.sugaya@aist.go.jp

【序論】現在最も変換効率の高い太陽電池は、無機系のⅢ－Ⅴ族化合物半導体多接合太陽電池である。用途として主に宇宙用で使われており、その高性能性、信頼性、耐久性についても最も優れていると言って良い。しかしながら製造コストも最も高いと思われ、用途拡大のためにはコストの低減が最も重要な課題である。高コストの主な要因としては、①Ⅲ－Ⅴ族化合物半導体の結晶成長コスト、②Ge あるいは InGaAs を用いるボトムセルのコスト、③結晶成長を行う基板コスト、の3点が挙げられる。我々は、①について、Ⅲ－Ⅴ族の低コスト成長法として期待されているハイドライド気相成長法 (HVPE) の研究開発を行っている。②については、低コストのボトムセルである Si、あるいは CIGS とⅢ－Ⅴ族化合物半導体を簡便に接合可能なスマートスタック技術を開発している。現在、NEDO の移動体プロジェクトにおいて、③の基板再利用技術の開発と合わせ、製造コスト 200 円/W を目指した研究開発が行われている。本講演では、①と②のそれぞれについて、我々のこれまでの研究成果や今後の展望を含め、現状のⅢ－Ⅴ族太陽電池の低コスト化技術の進展について述べる。

【本論】現在Ⅲ－Ⅴ族化合物半導体の結晶成長技術として広く使用されている有機金属気相成長法(MOVPE)に比べて、HVPE はⅢ族原料に安価な金属塩化物を用いることができ、また高速成長が可能である。加えて低Ⅴ/Ⅲ比での結晶成長も可能であり、MOVPE 法と比較して成長コストを格段に下げることができる。我々はこれまで、GaAs、InGaP でそれぞれ成長速度 500 $\mu\text{m/h}$ 、220 $\mu\text{m/h}$ を達成しており、特に InGaP については通常の MOVPE の 20 倍以上の高速成長が可能となっている。HVPE の問題点としては、Al 系材料の成長が困難であることが挙げられたが、Al と HCl ガスを 500°C 程度の低温で反応させることでそれを克服し、AlInGaP 層を導入することで変換効率 28.3%を達成した²⁾。この値は、HVPE で成長した太陽電池では世界最高の変換効率で、MOVPE で成長したものとほぼ遜色ない性能が得られつつある。

また、スマートスタック技術の特徴は導電性金属ナノ粒子配列を利用していることであり、様々な種類の半導体を簡便な方法で直接接合することができる³⁾。これまで、本技術を用いて作製した InGaP/AlGaAs/Si 3 接合太陽電池で 30.8%⁴⁾、InGaP/GaAs/CIGS 3 接合太陽電池で 29.3%⁵⁾の変換効率を達成している。CIGS をボトムセルとした 3 接合では、この効率は世界最高記録として承認されている。また最近では大面積化も進んでおり、2 インチ以上の接合も可能となっている。

当日は上記二つの技術を詳細に述べると共に、有機系太陽電池に関しても言及する予定である。

【謝辞】本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務 (JPNP20015) の結果得られたものである。【参考文献】1)大島他, 応用物理, 89, 333 (2020). 2)庄司他, 応用物理, 92, 540 (2023). 3) H. Mizuno et al., Appl. Phys. Lett., 101, 191111 (2012). 4)Makita et al., Prog. Photovolt., 28, 16 (2020). 5)Makita et al., Prog. Photovolt., 31, 71 (2023).

太陽電池素子を応用した放射線センシング技術開発

Development of radiation sensing technology based on solar cell

理研光量子センター¹, 三条市大², 産総研³, 木更津高専⁴、東北大⁵、宇宙機構⁶、

○奥野 泰希^{1, 5}, 小林 知洋¹, 大竹 淑恵¹, 今泉 充², 上川 由紀子³, 岡本 保⁴,

栗本 裕司⁴, 陣場 優貴⁵, 荻野 靖之⁵, 笠田 竜太⁵, 中村 徹哉⁶

RIKEN RAP¹, Sanjo city univ.², AIST³, NIT Kisarazu Coll.⁴, Tohoku univ.⁵, JAXA⁶,

○Yasuki Okuno^{1, 5}, Tomohiro Kobayashi¹, Mitsuru Imaizumi², Yukiko Kamikawa³, Tamotsu

Okamoto⁴, Yuji Kurimoto⁴, Yuki Jimba⁵, Yasuyuki Ogino⁵, Ryuta Kasada⁵, Tetsuya Nakamura⁶,

E-mail: yasuki.okuno@riken.jp

我々は、新たな放射線検出方法として、高放射線耐性の太陽電池を用いた太陽電池型放射線検出素子の開発を進めてきた[1]。太陽電池素子は、外部電位を印加せずに動作可能であることから、小型化・軽量化・省電力な放射線検出器が実現可能となる。先行研究において、シリコン型太陽電池を用いた線量計では放射線耐性が低く、検出と同時に劣化が生じるため、信号の信頼性に課題があった。InGaP、CdTe および、CIS 太陽電池は、宇宙利用のための放射線照射試験において、特に高い耐放射線性が報告されてきており、高い線量レベルの放射線環境中における長時間の安定動作に耐えることが期待される。近年では、有機無機ハイブリッドペロブスカイト(HOIP)太陽電池も、高い放射線耐性を有していることが報告されており、放射線検出素子としての応用研究を進めている [2]。

例として、CIS、InGaP、HOIP 太陽電池の Co-60 ガンマ線挙動を取得した結果を図 1 に示す。それぞれの素子においては、ガンマ線線量に比例した電流増加傾向が観察された。一方それぞれの電流増加率を比較すると、CIGS が最も高く、HOIP が最も低い結果となった。これは、CIGS、InGaP、および HOIP の膜厚がそれぞれ 2、1、および 0.5 μm であり、その比例関係とおよそ一致している。これは、ガンマ線から素子へ付与されるエネルギー量は、膜厚が厚くなることで増加するからであると考えられる。

本発表では、これまで Si、CdTe、InGaP、CIGS および、HOIP 太陽電池を用いて、ガンマ線、電子線、イオンビーム、中性子線に対する放射線検出特性を明らかにしてきた結果を下に、それぞれの特徴および産業ニーズとの結びつきについて報告する。

謝辞 本研究は、英知を結集した原子力科学 技術・

人材育成推進事業および東北大学-東京電力共同研究の一部として実施した。

[1] Y. Okuno, et al., J. Nucl. Sci. Technol. **56**, 851–858 (2019).

[2] Y. Okuno, et al., ACS Appl. Electron. Mater. **4**, 3411 (2022).

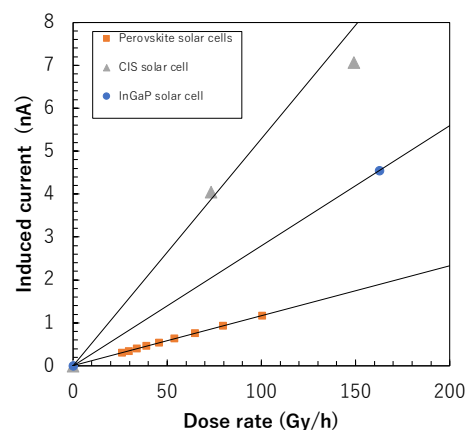


図 1. 太陽電池の γ 線線量検出特性

異種太陽電池の耐放射線性比較法

Evaluation method for comparing the radiation resistance of different solar cells

宇宙航空研究開発機構¹, 東大物性研², 東大先端研³, [○]中村 徹哉¹, 秋山 英文², 岡田 至崇³

JAXA¹, ISSP, Univ. Tokyo², RCAST, Univ. Tokyo³ [○]T. Nakamura¹, H. Akiyama², Y. Okada³

E-mail: nakamura.tetsuya@jaxa.jp

ペロブスカイト型やカルコパイライト系の薄膜太陽電池は、現在宇宙用として主流の III-V 族化合物太陽電池と比較して耐放射線性が高いという報告が散見される。しかし、このような耐放射線性の優劣に関する議論については曖昧さが含まれていると考えられる。本発表では、異種太陽電池の耐放射線性を、より多角的に評価する方法を提案する。

まず耐放射線性に影響を与える代表的な 5 つの要素を挙げる。1 つ目は放射線欠陥そのものの特性である。これは欠陥導入係数と捕獲断面積の積に比例するキャリア寿命に関する放射線損傷係数 K_f を用いて定量的に優劣を議論できる。しかし、 K_f が小さければ太陽電池特性の劣化量が小さいかというと、必ずしもそうではない。これは、2 つ目の要素である真性キャリア密度等の材料パラメータによって説明できる。例えば、空乏層では非発光再結合レートは真性キャリア密度と相関があり、同じ特性を持つ放射線欠陥ができたとしても、真性キャリア密度が小さい（＝バンドギャップが大きい）ほど電気特性への影響が小さくなる傾向がある。また特性値の変化量という観点では、耐放射線性は初期特性にも大きく依存する（3 つ目）。4 つ目は太陽電池構造である。材料内への放射線欠陥導入を防ぐことは難しいが、導入された放射線欠陥を再結合中心として機能させない構造は実現できる。最後 5 つ目は放射線欠陥の回復（アニール効果）である。

このように、耐放射線性を決定する要素は多岐にわたるため、その優劣を述べることは簡単ではない。ここでは特に前述の 4 つ目以外の要素について議論する場合の一例として、バンドギャップ、SRH 再結合係数 (A)、変換効率の相関関係を用いた評価法について述べる。図 1 は例として変換効率が空乏層での再結合に支配される場合の相関図（計算）を示す[1]。 K_f に相当する値は照射前後の SRH 再結合係数の差分から求められる。しかし、 K_f の大小と変換効率の変化量は、バンドギャップや初期値に大きく依存することが分かる。バンドギャップや初期特性が異なる太陽電池でも、この図を用いることで、放射線照射あるいはアニールによってどのような変化が起こったのか定量的な比較が可能と考えられる。

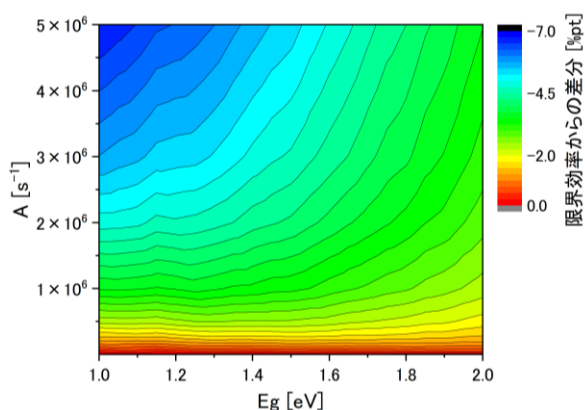


Fig. 1 Correlation between bandgap, SRH recombination coefficient (A), and conversion efficiency.

[1] 中村徹哉, 博士論文 (2020).

薄膜太陽電池三兄弟は敵か味方か？

Enemy or ally? Sphalerite, Chalcopyrite and Perovskite thinfilm PV

株式会社 PXP, °杉本 広紀

PXP Corporation, °Hiroki Sugimoto

E-mail: Hiroki.Sugimoto@pxpc.jp

太陽電池の新たな可能性を求めて、軽量で曲げることができ、割れない薄膜太陽電池が注目を集めている。特に光電変換効率が 20%を上回るフレキシブル型の薄膜太陽電池であるスファレライト構造の GaAs 系太陽電池、カルコパイライト構造の CIS 系太陽電池、ペロブスカイト構造の FAPI 系太陽電池の三兄弟の活躍が期待されている。長男のスファレライト太陽電池は、すでに多接合太陽電池が実用化され、変換効率は 40%近くが実証されており、宇宙空間における主要太陽電池となっている。二男のカルコパイライト太陽電池は、変換効率が 20%を若干上回る程度であるが、低コストであることから地上用のアプリケーションに実用化されている。また、高い放射線耐性を有するため、今後、宇宙用への応用が期待されている。三男のペロブスカイト太陽電池は、変換効率が 25%を上回り且つ低コストが見込まれることから、今後、様々な地上用のアプリケーションで活躍が期待されている。しかしながら、スファレライト太陽電池は高いコスト、カルコパイライト太陽電池は比較的低い変換効率、ペロブスカイト太陽電池は不十分な耐久性と量産化の問題を抱えており、本格的な普及には多くの課題が残されている。本発表では、薄膜太陽電池三兄弟の強み弱みと、今後の展望について議論する。






		Flexible Brothers				
Now 2025~ 2030~ 2035~		Sphalerite (GaAs) (Eldest brother)	Galli./Galli./Chalco. Tandem	Chalcopyrite (CIS) (Second brother)	Pero./Pero./Chalco. Tandem	Perovskite (FAPI) (Youngest brother)
						
Structure	Ultra light	○	○	○	○	○
	Flexible	○	○	○	○	○
	Non-fragile	○	○	○	○	○
	Semi-transparent	×	×	×	×	○
Cost	Low cost	×	△?	○	○	○
	Super high Eff	○	○	△	○	△ (→○?)
Performance	High Eff @ dim light	○	△	×	△	○
	Small temp. coef.	○	○	△	○	○
Fundamental Durability	Light	○	○	○	○	○
	Thermal circle	○	○	○	○	○
	Humidity & Thermal	○	△ (Cap○)	△ (Cap○)	×	×
	Light & Thermal	○	○	○	×	×
	Reverse bias	○	○	○	○?	×
Specific Durability	Vibration	○	○	○	○	○
	High temp.	○	○	○	×	×
	Thermal shock	○	○	○	○?	○?
	Super UV	○	○	○	×	×
	Radiation	△ (→○?)	○	○	○	○

Fig. 1. Comparison of characteristics among Sphalerite, Chalcopyrite and Perovskite thinfilm PV.

無機化合物薄膜太陽電池とペロブスカイト太陽電池の得手、不得手

Strengths and Weaknesses of Inorganic Compound and Perovskite Solar Cells

立命館大 ○ 根上 卓之

Ritsumeikan Univ., °Takayuki Negami

E-mail: tnt24345@fc.ritsumei.ac.jp

ペロブスカイト太陽電池および有機薄膜太陽電池の最大の特長の一つは、低温形成が可能でかつ高効率であることが挙げられる。このことから樹脂フィルムへの作製が可能であり、軽量・フレキシブル太陽電池を製造できるという得意な点(得手)が取り上げられている。しかしながら、低温形成ということから、動作環境における高温暴露での分解、相分離といった変質が懸念される。太陽電池モジュールの型式認証試験 IEC61215 のテストシーケンスでは[1]、特に 85°C/85%RH での高温高湿試験(Damp Heat test)での耐久性がよく議論されているが、案外、同試験をパスする見通しが報告されている[2,3]。それ以上に、IEC61215 のテストにはないが、最近、高温保持して連続光照射する試験での劣化が課題になってきている[4]。一方、無機化合物薄膜の Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)太陽電池は、高温での光照射(heat-light soaking)による特性向上が知られている[5]。日射量の多い高温地帯は CIGS 太陽電池が得意とするところである。ただし、この光照射(light soaking)が DH テストで課題となっていた。DH テストは暗状態で行うため、CIGS 太陽電池を長時間暗状態で保持した後に I-V 測定を行うと効率が低下する。その後、光照射することで効率は回復するが、1000 時間の DH テストでは、試験前まで回復せず、パスできないということが起こった。しかしながら、長時間暗状態とはならない屋外暴露では、そのような低下は観測されず、また光照射しながら DH テストを行うと効率は低下しない[6]。そこで、光照射と同様な状態となる電流注入しながら DH テストを行う試験法が提案され、規格として承認された[1]。ペロブスカイト太陽電池においても動作環境とは異なる長時間の高温光照射試験よりも、昼夜を模擬する繰り返しの光照射での高温曝露試験での評価が検討されている[7]。CIGS 太陽電池の取り組みを参考にして、実環境に即した試験法を規格化することが今後求められる。この他に Si 太陽電池や化合物薄膜太陽電池の実用上の取り組みについて紹介する予定である。ペロブスカイト太陽電池の実用化に当たり、これら先達からの教訓と知恵を活かすことを望む。

謝辞: 本研究の一部は NEDO 委託研究の一環として実施されたものであり、関係各位に感謝する。

[1] IEC 61215 Ed.2.0:2021 “Terrestrial photovoltaic (PV) modules-Design qualification and type approval”

[2] T. Matsui et al., Adv. Mater. 1806823 (2019).

[3] News of Microquanta company, <https://www.microquanta.com/#/pc/new/127>, accessed: June 2024.

[4] T. Duong et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 188, 27 (2018).

[5] J. Nishinaga et al., Appl. Phys. Express, 10, 092301 (2017).

[6] K. Sakurai et al., Proc. 32nd EUPVSEC, Munich (2016) 1690.

[7] M. V. Khenkin et al. Nat. Energy, 5, 35 (2020).

薄膜太陽電池のキャリア挙動は理解できているのか？

Photocarrier dynamics of thin-film solar cells

京大化研 金光 義彦

Kyoto Univ.

E-mail: kanemitu@scl.kyoto-u.ac.jp

1954 年に最初のシリコン太陽電池が報告されて以来[1]、太陽電池の絶対王者であるシリコンに対していろいろな材料が挑戦を続けてきたが、未だにシリコンのチャンピオンの座は不動のものである。また、太陽電池の基礎物理はこれまでに深く議論されており[2-4]、大きなブレークスルーを生み出すのは容易でないのが太陽電池の分野である。最近では、ペロブスカイト太陽電池や非フラーレン型有機太陽電池の研究が非常に活発に行われ、実用化への期待は高い。我々の研究グループは、無機半導体、有機半導体、有機無機ハイブリッドペロブスカイトなどの基礎物性の研究に加え、太陽電池デバイスにおけるキャリア挙動の研究も行ってきた。講演では、光物性物理学の立場から、有機太陽電池、無機太陽電池、ペロブスカイト太陽電池の特徴を比較し、薄膜太陽電池への期待と課題について述べる。

講演の内容は、多くの研究者との共同研究の成果に基づいている。特に、秋山英文教授、若宮淳志教授に感謝します。NEDO-GI (JPNP21016)、JST-CREST (JPMJCR21B4)、JST-CREST (JPMJCR16N3)、科研費・特別推進研究(JP19H05465)の支援による。

文献

1. D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *J. Appl. Phys.* **25**, 676 (1954).
2. W. Shockley and H. J. Queisser, Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *J. Appl. Phys.* **32**, 510 (1961).
3. D. Miller, E. Yablonovitch, and S. R. Kurtz, Strong internal and external luminescence as solar cells approach the Shockley–Queisser limit. *IEEE J. Photovoltaics* **2**, 303 (2012).
4. S. Chen, L. Zhu, M. Yoshita, T. Mochizuki, C. Kim, H. Akiyama, M. Izumitani, and Y. Kanemitsu, Thorough subcells diagnosis in a multi-junction solar cell via absolute electroluminescence-efficiency measurements. *Sci. Rep.* **5**, 7836 (2015).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 有機・イオン熱電変換材料の開発とデバイス応用

[17a-A24-1~6] 有機・イオン熱電変換材料の開発とデバイス応用

[17a-A24-1]

オープニング

○堀家 匠平¹、衛 慶碩² (1.神戸大院工、2.産総研)

[17a-A24-2]

有機半導体における巨大ゼーベック効果

○中村 雅一¹、阿部 竜¹、小島 広孝^{1,2}、林 正太郎³、平本 昌宏¹ (1.奈良先端大、2.舞鶴高専、3.高知工科大)

[17a-A24-3]

有機金属半導体を用いたn型熱電フィルムの開発

○村田 理尚¹ (1.阪工大工)

[17a-A24-4]

キャリアドーピング技術を駆使したカーボンナノチューブ熱電材料の開発

○藤ヶ谷 剛彦^{1,2,3}、田中 直樹^{1,3,2} (1.九大院工、2.九大I2CNER、3.九大CMS)

[17a-A24-5]

ジピラニリデン誘導体を基盤とするn型分子ドーパントの開発

○瀧宮 和男^{1,2,3}、松尾 崇也² (1.理研CEMS、2.東北大院理、3.東北大AIMR)

[17a-A24-6]

クロスリンク型有機超塩基ドーパントによる高安定性n型カーボンナノチューブの創出と熱電モジュール応用

○西中 茉佑子¹、小柴 康子^{1,2}、衛 慶碩^{3,4}、舟橋 正浩^{1,2}、堀家 匠平^{1,2,3,5} (1.神戸大院工、2.神戸大先端膜工学セ、3.産総研ナノ材、4.筑波大院理、5.神戸大環境セ)

有機半導体における巨大ゼーベック効果

Giant Seebeck Effect in Organic Semiconductors

奈良先端大¹, 舞鶴高専², 高知工科大³○中村 雅一¹, 阿部 竜¹, 小島 広孝^{1,2}, 林 正太郎³, 平本 昌宏¹NAIST¹, KOSEN Maizuru College², Kochi University of Technology³,○Masakazu Nakamura¹, Ryo Abe¹, Hiroataka Kojima^{1,2}, Shotaro Hayashi³, Masahiro Hiramoto¹

E-mail: nakamura.masakazu@naist.ac.jp

環境発電技術のターゲットの一つは、人体や生活環境から出る廃熱を利用して発電することである。そのため、フレキシブルな熱電変換素子の開発が急務であり、有機熱電材料に関する研究が盛んになっている。本講演では、有機半導体における不思議な現象である巨大ゼーベック効果 (GSE) について、我々の 10 年以上におよぶ研究から実験的に明らかになった事実を紹介し、未解明の謎について議論するほか、実用化の可能性についても議論する。

GSE は高純度 C₆₀ 薄膜で初めて発見され[1]、やがて様々な有機半導体で普遍的に起こることが確認された[2] (図 1)。構造相転移がないにもかかわらず、ゼーベック係数は温度に対して比較的敏感であった。ゼーベック効果に関する従来のモデルでは室温領域での極めて大きなゼーベック係数を説明できないことから、物性物理学的見地からも GSE は非常に興味深い。これまでに最大で 0.24 V/K に至るゼーベック係数が観測されており[3]、単位電荷によって運ばれるエントロピーとしては大きすぎることから、キャリアが単純な電子や正孔ではないことが示唆される。そのため、分子性固体における強い電子格子相互作用が、この現象の駆動力であると考えている (図 2) [5]。分子振動 (熱) とポーラロン (電荷) のホッピング速度が似ていることも、両者間の強い相互作用を強めている可能性がある[4]。スモールポーラロン特有の現象[5]と考えることもできるかもしれないし、高温側から低温側に伝播してゆく分子振動が「無自覚なマックスウェルの悪魔」として確率的にキャリア拡散に方向性を持たせていると考えることもできるかもしれない。

応用的に最大の利点は、極めて大きなゼーベック係数で電力を得ることができることから、従来のような多数の p 型ブロックと n 型ブロックの直列接続から解放され、単一熱電材料を電極で挟むだけの革新的に単純な熱電モジュールを生み出すことが可能となる点である[5]。期待される特性の一つである十分な機械的柔軟性が得られるかが課題ではあるが、大きな弾性変形が可能な単結晶を形成する低分子でも GSE が観測されており[5]、最近になってポリマー半導体でも GSE が観測されたことから[6]、フレキシブルデバイス化は十分可能であると考えている。

- 1) H. Kojima et al., *Appl. Phys. Express* **8**, 121301 (2015). 2) H. Kojima et al., *Mater. Chem. Front.* **2**, 1276 (2018). 3) K. Okayama et al., *Chem. Lett.* **53**, upad054 (2023). 4) H. Kojima et al., *Chem. Lett.* **47**, 524 (2018). 5) M. Nakamura et al., *Faraday Discuss.* **250**, 361 (2024). 6) 木村他, 2024 年秋応物講演会。

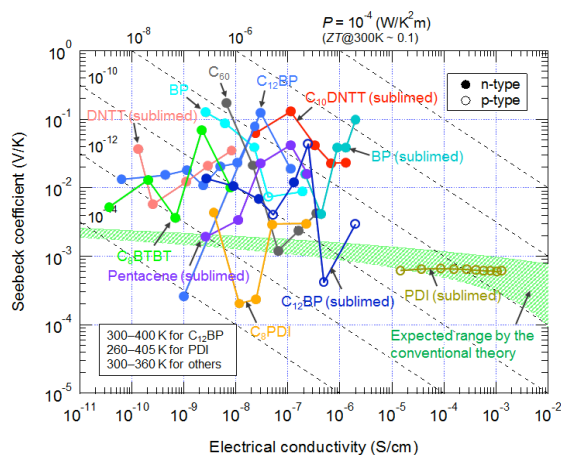


Fig. 1. Temperature dependences of Seebeck coefficient and electrical conductivity in various organic semiconductors.

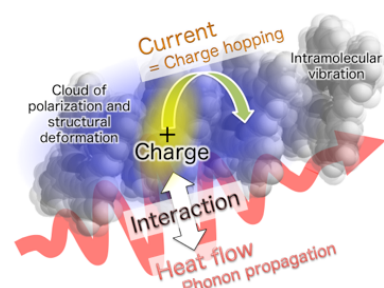


Fig. 2. Conceptual scheme of the Giant Seebeck Effect.

有機金属半導体を用いた n 型熱電フィルムの開発

Thermoelectric Properties of n-Type Organometallic Semiconductors

阪工大工, °村田 理尚

Osaka Inst. Tech., °Michihisa Murata

E-mail: michihisa.murata@oit.ac.jp

フレキシブル熱電変換素子には, p 型および n 型半導体材料の両方を開発することが求められるが, 有機系材料に関しては n 型材料の研究が遅れている。π 共役高分子は有望な材料である一方, π 共役を金属の d 軌道により拡張した一次元金属錯体も, 大気安定な n 型半導体として興味深い材料である。とくにジチオレン型有機金属錯体である Ni-ETT は, 如何なる溶媒にも溶解しない黒色固体とみなされているが, 合成ルートは短く, 高い大気安定性をもつ n 型熱電材料として魅力的である。我々の研究グループでは, Ni-ETT に関連する有機金属半導体に関して, フレキシブル熱電変換デバイスへの応用を指向した研究に取り組んできた¹⁻³⁾。

NiETT を起点とする構造設計においては, 中心金属の種類のみでなく, 配位子の構造も半導体特性に大きなインパクトを与える (Figure 1)。例えば, NiETT のエテン部位をベンゼン骨格に置き換えた NiBTT は, ペレット状態において電気伝導性が確認され, p 型熱電変換特性を示す⁴⁾。これは NiETT が n 型特性を示すこととは対照的である。

一方, 我々の研究グループでは, 配位子を短段階で合成する手法をもとに, 一連の π 共役配位子を含む一次元ニッケル錯体を合成し, 塗布膜における熱電変換特性の解明を進めている¹⁾。チエノチオフェン構造を導入した NiT2TT は, ポリフッ化ビニリデン (PVDF) との混合膜として, 溶液プロセスにより製膜することができ, 大気安定な n 型材料の塗布膜としては, きわめて高い電気伝導性 ($\sigma > 200 \text{ S cm}^{-1}$) を示すことがわかった²⁾。また, 有機系材料の塗布膜においては一般に配向制御が重要となる。ジチオレン型有機金属錯体の膜中での配向が, 配位子の設計により制御可能であることを初めて見出した。

本講演では, 一次元有機金属錯体の塗布法の開発および新構造の探索について紹介させていただく。

- 1) K. Ueda, H. Nakanishi, Y. Tsuboi, M. Murata, *J. Synth. Org. Chem. Jpn.*, **80**, 930–940 (2022).
- 2) K. Ueda, R. Fukuzaki, T. Ito, N. Toyama, M. Muraoka, T. Terao, K. Manabe, T. Hirai, C.-J. Wu, S.-C. Chuang, S. Kawano, M. Murata, *J. Am. Chem. Soc.*, **144**, 18744–18749 (2022).
- 3) K. Ueda, Y. Yamada, T. Terao, K. Manabe, T. Hirai, Y. Asaumi, S. Fujii, S. Kawano, M. Muraoka, M. Murata, *J. Mater. Chem. A*, **8**, 12319–12322 (2020).
- 4) Z. Liu, T. Liu, C. N. Savory, J. P. Jurado, J. S. Reparaz, J. Li, L. Pan, C. F. J. Faul, I. P. Parkin, G. Sankar, S. Matsuishi, M. Campoy-Quiles, D. O. Scanlon, M. A. Zwijnenburg, O. Fenwick, B. C. Schroeder, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 2003106 (2020).

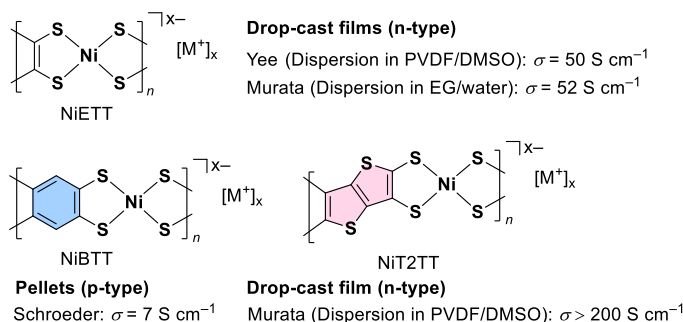


Figure 1. (a) Structures and reported conductivities of organometallic nickel complexes NiETT and NiBTT. (b) Nickel complex NiT2TT, which contains thieno[3,2-b]thiophene units (this work).

キャリアドーピング技術を駆使した カーボンナノチューブ熱電材料の開発

Developments of carbon nanotube thermoelectric material via carrier doping

九大院工¹, 九大 I²CNER², 九大 CMS³ 田中 直樹^{1,2} ○藤ヶ谷 剛彦^{1,2,3}

Kyushu Univ. Grad. Sch. of Eng.¹, I²CNER², Kyushu Univ., Kyushu Univ. CMS.³

Naoki Tanaka¹, ○Tsuyohiko Fujigaya^{1,2,3}

E-mail: fujigaya.tsuyohiko.948@m.kyushu-u.ac.jp

トリリオンセンサーの時代において電池交換不要かつ、貼り付けや持ち運びができるように低コストで軽くフレキシブルな熱電発電の必要性が高まっている。このようなフレキシブルな熱電変換デバイスの実現のために、従来のビスマス、テルリウム、アンチモン等を用いた無機材料系から、導電性高分子やカーボンナノチューブ (CNT) が注目されている。高い ZT 値を誇る無機系材料に対して、導電性高分子やカーボンナノチューブは ZT こそ大きく劣るものの、毒性は低く、安価で柔軟性も高いことから、近年注目されている。特に CNT においては少なくとも導電性高分子のように化学ドーピングせずとも高い p 型半導体として振舞う利点があり、ドーピング処理により n 型半導体の性質も示す。さらに、単層 CNT であれば 1 次元性に由来する高いゼーベック係数を示すことも知られている。これまでの研究から、CNT を用いた熱電材料においては ZT の向上はもちろんのこと、高集積化による起電力向上も必要であることが指摘されており、集積手法の開拓も行われている。

そこで必要となる技術は CNT シートや糸を部分的に n 型ドーピングする技術であり、当研究室では、ドーパント溶液の塗布によるパターンニングの他、ドーパントの蒸着パターンニングおよび光反応性ドーパントによるフォトリソパターンニングも開発してきた。それらのメカニズムや安定性、集積化による出力密度などについてご紹介する。

ジピラニリデン誘導体を基盤とする n 型分子ドーパントの開発

Development of n-type molecular dopants based on dipyranylidene derivatives

理研 CEMS¹, 東北大院理², 東北大 AIMR³ °瀧宮和男^{1,2,3}, 松尾崇也RIKEN CEMS¹, Graduate School of Science, Tohoku University², Tohoku University AIMR³,°Kazuo Takimiya^{1,2,3}, Takaya Matsuo²

E-mail: takimiya@riken.jp

多くの有機半導体は閉殻構造の中性分子であるため、キャリア密度は一般に低い。このため、有機熱電変換素子へ有機半導体を応用する場合、電気抵抗の低減のためにキャリアドーピングが行われる。また、有機電界効果トランジスタにおいても、低キャリア密度に起因する金属電極との接触抵抗が、性能低下の要因となる。これに対してもコンタクトドーピングは有効な手法である。

有機半導体へのキャリアドーピングはホストである有機半導体とドーピング剤（ドーパント）との電荷移動によるキャリア生成であるので、それぞれの材料のフロンティア軌道のエネルギー準位が重要となる。「p 型」有機半導体へのホールドーピングには F₄TCNQ などの強い電子アクセプターが有用である一方で、「n 型」半導体に対して電子ドーピングが可能なほど十分に強い電子ドナー分子は非常に限られている。また、多くの強い電子ドナー分子（即ち高い HOMO 準位 (E_{HOMO}) をもつ）は、大気中で酸化されるため、安定な n 型分子ドーパントは希少である。このため、n 型ドーパントとしては、N-DMBI のような熱分解により高い SOMO 準位をもつ中性ラジカルを生じる前駆体型の材料が一般に用いられている。

これに対し、我々は中性閉殻構造から成る多段階レドックス分子を基盤として、 E_{HOMO} を上昇させる分子修飾により、n 型ドーパントとして機能する材料の開発を検討してきた。具体的には、代表的な電子供与体分子であるテトラチアフルバレン (TTF, $E_{\text{HOMO}} \sim -4.6$ eV) と類似の多段階レドックス分子であるテトラフェニルジピラニリデン (DP0) を基本骨格に、1) 芳香環導入による π 系の拡張¹⁾、2) 電子供与性置換基の導入²⁾、3) キノイド構造の挿入³⁾、といった異なる分子修飾により、n 型ドーパントとして機能し得る安定な化合物の開発を試みた。その結果、電子供与性置換基の導入が最も効果的で、N,N-ジメチルアミノフェニル基を持つ誘導体 (DP3, DP7) は、 E_{HOMO} が -4.1 eV 程度となり、代表的な n 型半導体高分子である polybenzimidazobenzophenanthroline (BBL) に対し、電子ドーパントとして機能することが明らかとなった。また、その熱電変換特性は、報告されている N-DMBI によりドーピングされた BBL と同程度であったことから、多段階レドックス分子を基盤とする n 型ドーパントの有用性も確認できた²⁾。一方、キノイド構造の挿入でも E_{HOMO} が上昇し、更にジメチルアミノフェニル基の導入で E_{HOMO} は -3.9 eV まで上昇したものの、大気中で容易に酸化されるため、ドーパントとしての実用性は高くないことも分かった。開発した DP 系分子ドーパントの中で、DP7 は熱的にも安定で、真空蒸着が可能なることから、コンタクトドーピングにも応用でき、C60 を活性層に用いた n 型トランジスタにおいて、顕著な接触抵抗の低減の効果も確認された⁴⁾。本発表では、これら DP 系 n 型ドーパントの分子設計、合成、分子構造などについても報告する。

【参考文献】 1) T. Matsuo *et al.*, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **2022**, 95, 1047. 2) T. Matsuo *et al.*, *Adv. Energy Sustainability Res.*, **2021**, 2, 2100084. 3) T. Matsuo *et al.*, submitted. 4) T. Matsuo *et al.*, *Adv. Mater.*, **2024**, 36, 2311047.

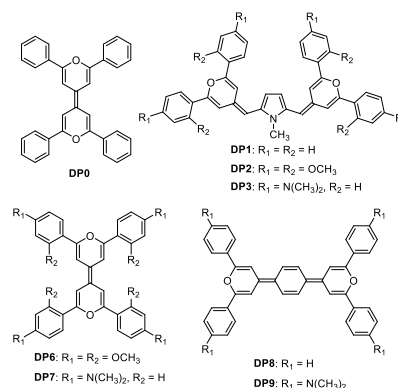


図 1. DP 系 n 型ドーパント

クロスリンク型有機超塩基ドーパントによる 高安定性 n 型カーボンナノチューブの創出と熱電モジュール応用 Highly stable n-type carbon nanotubes doped by cross-linked organic superbase for thermoelectric module application

神戸大院工¹, 神戸大先端膜工学セ², 産総研ナノ材³, 筑波大院理⁴, 神戸大環境セ⁵

○(M2) 西中茉佑子¹, 小柴康子^{1,2}, 衛慶碩^{3,4}, 舟橋正浩^{1,2}, 堀家匠平^{1,2,3,5}

Kobe Univ.¹, Res. Ctr. Membrane & Film Tech., Kobe Univ.², AIST³, Univ. Tsukuba⁴, Ctr. Environ. Mgmt., Kobe Univ.⁵

○M. Nishinaka¹, Y. Koshiba^{1,2}, Q. Wei^{3,4}, M. Funahashi^{1,2}, S. Horike^{1,2,3,5}

E-mail: horike@crystal.kobe-u.ac.jp

1. 研究背景

排熱から電気を生み出す熱電発電は、IoT センサの自立電源として期待されている。カーボンナノチューブ (CNT) は優れた導電率やゼーベック係数のほか、ドーピングによる極性 (p 型/n 型) 制御性ゆえに新規熱電材料として注目されている。熱電素子は一般に、起電力を加算するために多数の p 型/n 型材料を組み合わせるモジュール化が必須であることから、CNT の極性制御性は特に重要な性質と言える。一方、n 型 CNT は空気・熱・湿度に対する安定性に乏しいため、熱電素子の安定な発電動作を可能とするドーピング剤の開発が望まれている。

我々はこれまで、二環式グアニジン有機超塩基 (TBD) ドーピングにより、空气中 100 °C にて半年以上 n 型極性を保持可能であることを報告してきた¹。しかし、導電率の低下など、部分的に脱ドーブが生じることが課題となっていた。さらに、湿度等の外部因子に対する影響も明らかになっていなかった。

今回、n 型 CNT の更なる安定化を目指し、デシル基にて TBD を 2 分子クロスリンクさせた 2TBD-C10 を合成し (Fig. 1a)、ドーパントとして用いた。『2 つの TBD ユニットによる 1 分子内での CNT に対する多点吸着』、『分子量増加に伴う揮発性の低下』によるドーパントの脱着抑制、『疎水性アルキル鎖導入による水分子の吸着抑制』により、熱・空気・湿度に対する耐久性向上を期待した。さらに、n 型 CNT 膜を用いたオール CNT 熱電モジュールを構築し、IoT センサへの給電に成功したので報告する。

2. 実験方法

NaH 共存下、TBD とジブロモデカンのテトラヒドロフラン溶液を Ar フロー下にて一晩攪

拌することで 2TBD-C10 を合成した²⁾。CNT 自立膜 (膜厚~30 μm) を 2TBD-C10 アセトン溶液に浸漬することでドーピングした。ドーブ試料を空气中 100 °C、空气中室温 (~25 °C)、または室温高湿下 (>80%) にて保管し、ゼーベック係数 (S) と導電率 (σ) の経時変化を調べた。ポリイミド絶縁膜を介し、未ドーブ CNT 膜 (p 型) と 2TBD-C10 ドーブ CNT 膜 (n 型) を交互に 10 対積層することでモジュールを作製した。モジュール両端に温度差を付与し、電流電圧特性を評価することで出力特性を調べた。

3. 結果と考察

TBD、2TBD-C10 いずれを適用した場合でも CNT のゼーベック係数は負に反転したことから、n 型化が確認された。それぞれの CNT 膜を空气中 100 °C で保管した際の S と σ の経時変化を Fig. 1b に示す。TBD を適用した試料では σ の減少と S の絶対値の増加から脱ドーブの進行が確認される。一方、2TBD-C10 を用いてドーピングした試料では双方の変化が抑えられていることから、ドーパントの一次構造の改良が安定性の向上に直結すると言える。

試作した熱電モジュールに温度差 $\Delta T \sim 65$ K を付与しながら I - V 測定を行った結果、起電力 12 mV にて最大電力 35 μW の良好な出力が得られた。講演では、n 型 CNT の安定性に対する湿度の影響のほか、モジュールによるワイヤレスセンサの駆動についても報告する。

謝辞 本研究の一部は、JST A-STEP、科研費若手研究の支援を受けて実施されました。

参考文献

- 1) Horike *et al.*, *Nat. Commun.* **13**, 3517 (2022).
- 2) Nakayama *et al.*, *Mater. Chem. Front.* **4**, 3616 (2020)

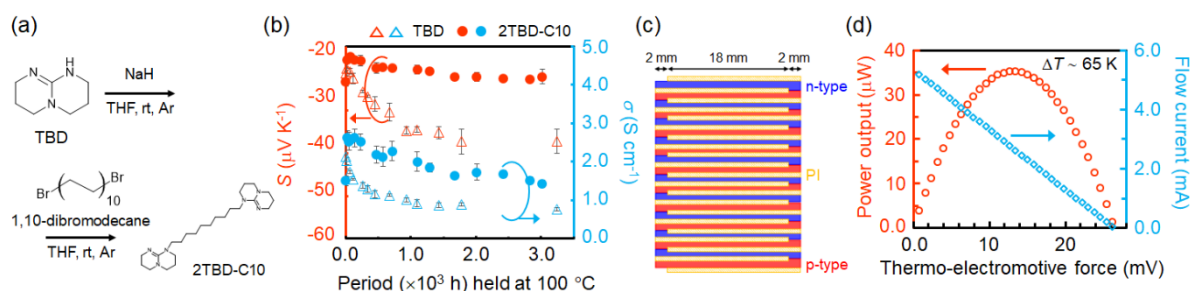


Fig.1 (a) Synthetic scheme of 2TBD-C10. (b) Temporal changes in S and σ of doped CNT films during incubation at 100 °C in air. (c) Schematic of all-CNT TE module. (d) Power output and flow current according the thermo-electromotive force from the module at ΔT of ~65 K.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 有機・イオン熱電変換材料の開発とデバイス応用

[17p-A24-1~6] 有機・イオン熱電変換材料の開発とデバイス応用

[17p-A24-1]

CNT熱電材料に求められる要素技術の開発

○野々口 斐之¹ (1.京都工繊大)

[17p-A24-2]

カーボンナノチューブ-高分子複合熱電材料の π 型モジュール化に関する研究○末森 浩司¹ (1.産総研)

[17p-A24-3]

導電性高分子熱電デバイスのIoT電源応用

○向田 雅一¹ (1.産総研)

[17p-A24-4]

分子の熱応答性を利用した熱化学電池による熱電変換

○山田 鉄兵¹ (1.東大院理)

[17p-A24-5]

Self-Powered Sensors Utilizing Thermocells

○Lixian Jiang¹, Shohei Horike², Qingshuo Wei^{1,3} (1.AIST, 2.Kobe Univ., 3.Univ. Tsukuba)

[17p-A24-6]

クロージング

○衛 慶碩¹、堀家 匠平² (1.産総研、2.神戸大)

CNT 熱電材料に求められる要素技術の開発

Exploring Key Technologies for CNT-based Thermoelectrics

京工織大¹, °野々口 斐之¹Kyoto Inst. Tech.¹, °Yoshiyuki Nonoguchi¹

E-mail: nonoguchi@kit.ac.jp

熱電材料によるエネルギーハーベスティングは、センサーやワイヤレス通信を駆動する発電技術として重要な課題とみなされるようになった。単層カーボンナノチューブは、狭バンドギャップや優れたキャリア移動度を持つことから、潜在的に有望な熱電変換材料と考えられており、あらゆる廃熱を回収できる柔軟な熱電発電モジュールに組み込むことが可能である。カーボンナノチューブを用いた熱電材料の開発には、1) 熱電特性を調整するための化学的ドーピング、2) 構造-物性相関を明らかにするための構造選別と成膜、といった課題がある。カーボンナノチューブの熱電変換の理解には物性物理学のほか、熱工学、さらには材料調製では分子認識を含む化学プロセスの知見が求められる。本講演では、単層カーボンナノチューブを用いた熱電材料の開発に関する我々の取り組みについて述べる。n型ドーピングのコンセプト化 (Fig. 1)¹、体系化²に加えてp型ドーピングへのコンセプト適用³、半導体性カーボンナノチューブにみられる構造物性相関の検討^{4,5,6}、デバイス・ジェネレータへの展開^{7,8}についても紹介したい。

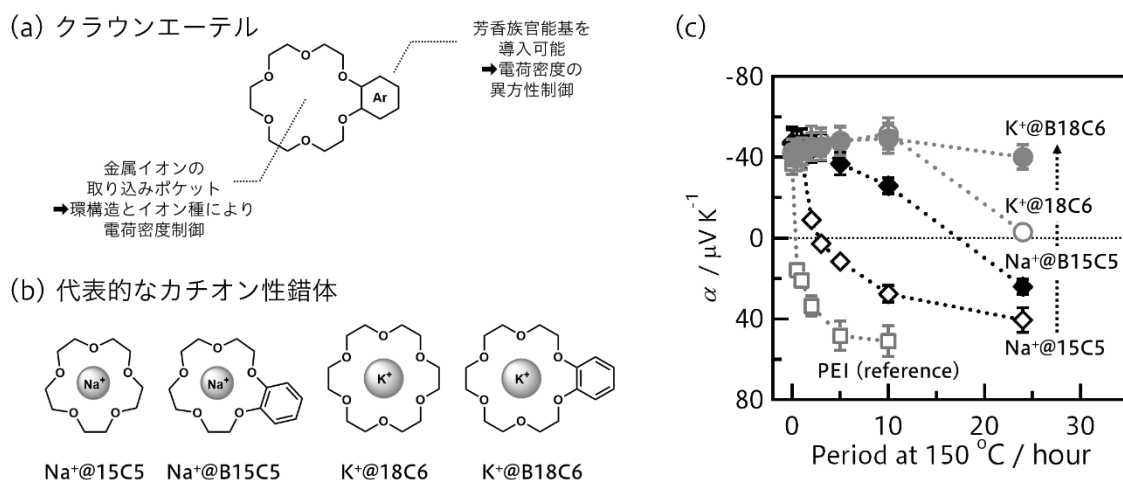


Fig. 1 クラウンエーテルを用いた n 型ドーピング. (a) クラウンエーテル構造の特徴. (b) 代表的なクラウンエーテル錯体. (c) クラウン処理後のカーボンナノチューブ膜のゼーベック係数の経時安定性 (150°C).

1) Y. Nonoguchi *et al.* *Adv. Funct. Mater.* **2016**, 26, 3021–3028; 2) Y. Nonoguchi *et al.* *J. Mater. Chem. A* **2018**, 6, 21896–21900; 3) M. Nakano *et al.* *Small* **2017**, 13, 1700804; 4) J. Komoto *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **2021**, 118, 261904; 5) Y. Nonoguchi *et al.* *Sci. Technol. Adv. Mater.* **2018**, 19, 581–587; 6) T. Yagi *et al.* *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, in press; 7) M. Ishimaru *et al.* *MRS Advances* **2019**, 4, 147–153; 8) D. Suzuki *et al.* *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15, 9873–9882.

カーボンナノチューブ-高分子複合熱電材料の π 型モジュールに関する研究 π -structured thermoelectric modules composed of polymer/CNT composites

産総研, 末森 浩司

AIST, Kouji Suemori

E-mail: kouji-suemori@aist.go.jp

緒言: 高分子/CNT 複合材料をウェアラブル熱電変換素子に用いる場合、ヒートシンクが取り付けられないので、自然対流下で発電させることとなる。自然対流下でも熱電材料に十分な温度差を付加するためには、膜厚の厚い熱電変換層が必要となる。そのため、図1のように高分子/CNT 複合材料膜を直立させ、束ねて、厚膜化したものが良く用いられる。しかし、この材料はCNT配向に起因して、温度差が形成

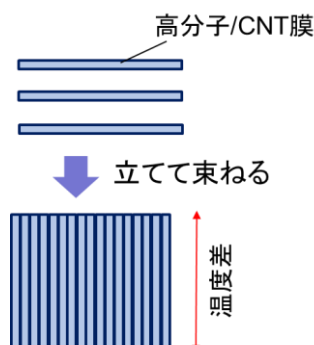


図1

される方向(図1の垂直方向)に高い熱伝導性を示す。これは、熱電変換層に温度差を形成する上で好ましくない。本研究では、ウェアラブル熱電素子として想定される使用環境である空冷環境下では、垂直方向の熱伝導率を低下させることで大幅な発電量の向上が見込めることを計算により明らかとした。また、実際に垂直方向に低熱伝導性を有する π 型フレキシブル熱電変換モジュールを作製したので報告する。

		ゼーベック係数($\mu\text{V/K}$)	電気伝導率(S/cm)	熱伝導率(W/Km)	ZT
素子1	P-layer	87	2230	24	0.021
	N-layer	-82	1780	18	0.02
素子2	P-layer	47.3	7.2	1.3	0.0003
	N-layer	-48.7	19.19	1.3	0.001

実験結果と考察: ウェアラブル素子(膜厚=1.2mmで3対のpn対をもつ π 型素子)として、表の2つの素子の自然対流下での発電量を計算した。素子1は図1の熱電変換層を持つ場合を想定したもので、垂直方向に高い電気伝導率と熱伝導率を持つ。素子2は垂直方向の熱伝導率と電気伝導率の両方を下げたもので、CNT配向を水平配向させた材料を用いた場合を想定している。熱電材料/電極界面の接触抵抗は、実際の素子と同じ 0.72Ω として計算した。図2に計算より得られた自然対流下での発電量を示す。素子2は材料のZTが低いにもかかわらず、素子1より発電量が約2桁高い値となった。この理由は下記(I)と(II)による。(I). 熱電変換層の垂直方向熱伝導率が低いため、素子2は素子1よりも熱電変換層に形成される温度差が1桁以上大きい。(II). 熱電変換層の電気抵抗は素子1の方が素子2より小さいが、熱電材料/電極界面の接触抵抗(0.72Ω)が大きすぎ、発生電力にそれほど大きな影響を及ぼさない。この結果は、熱電変換層の垂直方向の熱伝導率を低下させることで、自然対流下における発電量が大きく向上できることを示している。図3は、我々が開発したCNTを平行配向させた厚膜ペレットの形成方法である。この作製方法を用いて、素子2と同じ性能の材料を形成し、膜厚=1.2mmで3対のpn対をもつ π 型素子(図3の写真)を作製した。発電量は図2の●印に示す通り、計算と同等の高い値が得られた。

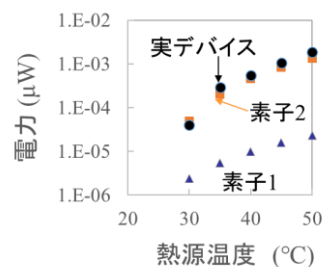


図2

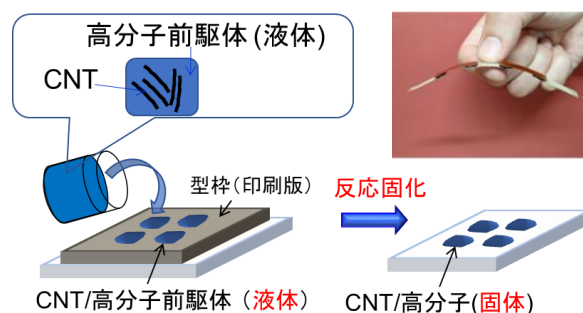


図3

導電性高分子熱電デバイスの IoT 電源応用

Conducting Polymer Thermoelectric Devices for IoT Power Supply

産総研¹ ○ 向田 雅一¹

AIST¹ °Masakazu Mukaida¹

E-mail: mskz.mukaida@aist.go.jp

IoT (Internet of Things) によって、自動運転、健康モニタリングや環境モニタリング、並びに様々な検知システム等が実用化され、生活はより便利になっていくことが予想される。この IoT にかかせないのが、無線通信技術とともに配線のいらない自立型電源である。自立型電源としては、バッテリーが考えられるが、電力不足による通信不調が重大な事故を招くことも考えられるため、電池残量確認や充電を頻繁に行う必要がある。しかしながら、簡単に確認や充電をできない場所や危険回避のためにバッテリー自体を使用できない場所もある。さらに、電気コンセントから充電を行う場合、IT 関連機器に必要な電力は小さいため、100V から数 V~数十 V に降圧しなければならず、アダプター（整流変圧器）によって残ったエネルギーを熱で捨てている。電気コンセントを使用せずに、未利用の熱源、将来的には人間を含む生物等の熱源で充電できれば、二酸化炭素排出量を大きく削減できるはずである。

ご存じのように、熱電変換は、半導体の性質を利用して熱エネルギーを直接電気エネルギーに変えることができる技術であり、熱源があれば 24 時間 365 日連続して電力を供給できる。未利用熱のほとんどが、エネルギー回収するには難しい 200°C 以下の温度であり、その温度域であれば有機材料が使用できることから、2010 年頃からは有機熱電材料の実用化研究が活発に行われるようになった。有機熱電材料は、無機材料を用いた場合より得られる電力は小さいものの、原料資源量、比較的シンプルな製造プロセス、フレキシブル性等にその特徴がある。ただし、現状で安定的な有機熱電材料が p 型のみのため、そのモジュールはユニレグ型で設計する必要がある。

講演では、IoT 機器用電源や市販リチウムイオン二次電池の充電器として使える、有機熱電素子及びそのモジュール (Fig.1) の開発過程を紹介する。主材として、PEDOT/PSS (poly(3, 4-ethylenedioxythiophene)/poly(styrenesulfonate)) という導電性高分子の膜を用い、接続用部材として金属 Ni 膜を用いた。縦 22mm×横 22mm×幅 20mm、積層数 300 枚のモジュールは、100°C の熱源に置くだけで自然放熱のまま 50 度の温度差を得て、約 $40 \mu \text{W}/\text{cm}^2$ の出力密度を達成した。部材間の接触界面電気抵抗削減技術、熱伝導性マッチングによる温度差拡大技術、有機材料の構造異方性を利用した素子膜厚制御技術、充電器として利用するための設計方法等を詳細に説明する。

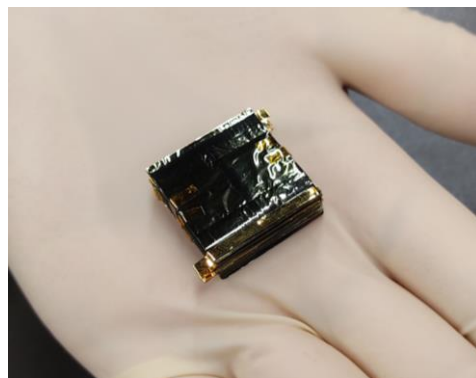


Fig. 1 Developed organic thermoelectric module.

分子の熱応答性を利用した熱化学電池による熱電変換

Thermoelectric conversion by thermocell using the thermoresponsiveness of molecules

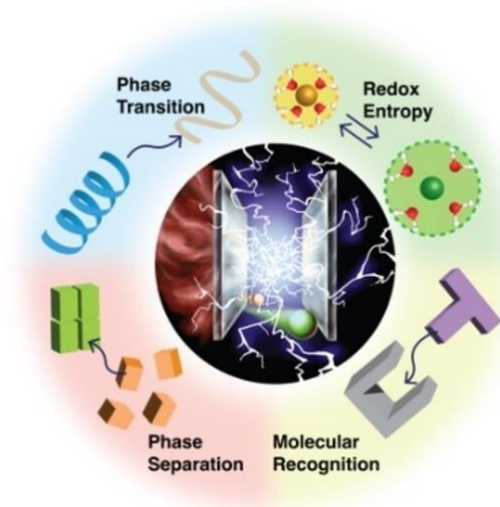
東大院理 ○山田 鉄兵

Univ. Tokyo, °Teppei Yamada

E-mail: teppei@chem.s.u-tokyo.ac.jp

熱化学電池は溶液を用いた熱電変換システムである。酸化還元活性な分子の溶液に温度差を与えると、酸化還元平衡が温度によりシフトし、低温側ではエンタルピー的に有利な反応が、高温側ではエントロピー的に有利な反応がそれぞれ優勢になる。それにより、外部に電気エネルギーを得ることができる。熱化学電池は比較的高いゼーベック係数(単位温度差あたりの電圧)を有することや、多様な有機・無機小分子を利用できるといった特徴がある。

我々は、ここに様々な温度応答性の物理化学現象を導入することでゼーベック係数が向上することを報告してきた。これまでに、酸化還元分子のホストゲスト反応、プロトン共役電子移動反応、高分子の相転移、ミセル化濃度の温度依存性などが利用できることを報告してきた。本シンポジウムではこれらの熱化学電池について、最近の進捗も含めて報告する。



1. Exploring the local solvation structure of redox molecules in a mixed solvent for increasing the Seebeck coefficient of thermocells, H. Inoue, H. Zhou, H. Ando, T. Yamada et al., *Chem. Sci.*, 15, 146, 2023.
2. Aqueous Vanadium Complex for the Superior Electrolyte of a Thermo-Electrochemical Cell, T. Yamada, N. Kimizuka, H. Zhou et al., *Sustain. Energy Fuels*, 8, 684-688, 2024.
3. Direct Conversion of Phase-Transition Entropy into Electrochemical Thermopower and the Peltier Effect, H. Zhou, T. Yamada et al., *Adv. Mater.*, 35, 2303341, 2023.
4. Advancement of Electrochemical Thermoelectric Conversion with Molecular Technology, H. Zhou, T. Yamada et al., *Angew. Chem., Int. Ed.*, 62, e202213449, 2022.
5. Supramolecular Thermocells based on Thermo-Responsiveness of Host-Guest Chemistry, H. Zhou, T. Yamada, N. Kimizuka, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 94, 1525, 2021.
6. High Seebeck Coefficient in Middle-Temperature Thermocell with Deep Eutectic Solvent, N. F. Antariksa, T. Yamada, N. Kimizuka, *Sci. Rep.*, 11, 11929, 2021.
7. Inversely polarized thermo-electrochemical power generation via the reaction of an organic redox couple on a TiO₂/Ti mesh electrode, H. Eguchi, T. Yamada, T. Ishimoto, M. Yamauchi et al., *Sci. Rep.*, 11, 13929, 2021.
8. High Positive Seebeck Coefficient of Aqueous I⁻/I₃⁻ Thermocells Based on Host-Guest Interactions and LCST Behavior of PEGylated α -Cyclodextrin, Y. Liang, J. K.-H. Hui, M. Morikawa, T. Yamada, N. Kimizuka et al., *ACS Appl. Energy Mater.*, 4, 5326, 2021.
9. Thermocells Driven by Phase Transition of Hydrogel Nanoparticles, B. Guo, Y. Hoshino, Y. Miura, N. Kimizuka, T. Yamada, *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 17318, 2020.

Self-Powered Sensors Utilizing Thermocells

AIST¹, Univ. Tsukuba², Kobe Univ.³, °Lixian Jiang¹, Shohei Horike³, Qingshuo Wei^{1,2}

E-mail: qingshuo.wei@aist.go.jp

Thermocells, also known as thermogalvanic or thermo-electrochemical cells, are devices that convert heat directly into electrical energy using the principles of electrochemistry. Due to the substantial reaction entropy in redox reactions, the Seebeck coefficient of a thermocell typically reaches as high as 1 mV/K.

We have been studied the thermocells using magnetic ionic liquid [1], $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$, and $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$ with different additives [2-4]. In this talk, we will present the development of self-powered sensors using single-leg thermocells of $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]/GdmCl$ to harvest body heat and solar thermal energy [5]. A pyrolytic graphite sheet (PGS) was selected for its low water vapor permeability, and its surface was modified to reduce the interfacial resistance. Two types of DC-DC converters, Asahi Microdevices AP4473 and Matrix Mercury, were evaluated for compatibility with these thermocells. The compact 1.5cm³ (1 cm×1 cm×1.5 cm) device successfully powered the AP4473 converter to illuminate a light-emitting diode. A larger device (2.5 cm× 2.5 cm× 1.5cm) effectively drove the Matrix Mercury converter with blue tooth low power sensors. These self-powered sensors were able to wirelessly provide humidity and temperature data using solar thermal energy for approximately 4 hours per day during peak temperature difference in January.

In the later part, we will report the fabrication of thermocell devices comprising 35 legs using a modified soldering method and electrode treatment to enhance performance and reliability [6]. The devices exhibited a peak voltage of 3.5 V at hot side temperature of 60 °C under natural cooling conditions. The thermocells integrated with a voltage detector IC and beacon, starting to drive the beacon in 100 seconds and transmitting signals over 600 times in a 15-minute period. Our results demonstrate the feasibility of thermocells as an alternative energy source, offering a cost-effective and streamlined solution for energy harvesting application.

[1] L.X. Jiang et al., *Chem. Phys. Lett.* 776 (2021) 138663

[2] B.Y. Yu et al., *Science* 370(6514) (2020) 342-346

[3] L.X. Jiang et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14(20) (2022), 22921-22928

[4] L.X. Jiang et al., *Global Challenges* 7 (6) (2023)

[5] L.X. Jiang et al., *RSC advances* under review (2024)

[6] L.X. Jiang et al., *Materials Today Energy* under review (2024)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】最先端ロジック半導体と連携・協働する材料・プロセス・実装技術の最前線 ～再起する日本の先端ロジック半導体・その2～

[16p-A41-1~9] 【一般公開】最先端ロジック半導体と連携・協働する材料・プロセス・実装技術の最前線 ～再起する日本の先端ロジック半導体・その2～

[16p-A41-1]

オープニング

○井田 次郎^{1,2} (1.金沢工業大学、2.シリコンテクノロジー分科会 幹事長)

[16p-A41-2]

AI・コンピューティング・半導体戦略について

○金指 壽¹ (1.経済産業省)

[16p-A41-3]

先端ロジックデバイスの技術トレンドー過去、現在、未来ー

○平本 俊郎¹ (1.東大生研)

[16p-A41-4]

後工程の新しい幕開け：革新的チップレット技術の未来

○折井 靖光¹ (1.Rapidus株式会社)

[16p-A41-5]

最先端Logic半導体を支えるウエーハ技術

○松川 和人¹ (1.SUMCO)

[16p-A41-6]

先端ロジックデバイスにおけるプラズマエッチング技術

○伊澤 勝¹ (1.日立ハイテク)

[16p-A41-7]

先端ロジックと連携する実装技術 ～有機インターポーザを用いた基板開発～

○三木 翔太¹ (1.新光電気工業株式会社)

[16p-A41-8]

高度化するAIと協同する車載チップレット技術

○岩城 隆雄¹ (1.ミライズ)

[16p-A41-9]

クロージング

○宮下 桂^{1,2}、中塚 理^{3,2} (1.東芝デバイス&ストレージ株式会社、2.シリコンテクノロジー分科会・副幹事長、3.名古屋大学)

先端ロジックデバイスの技術トレンドー過去，現在，未来ー

Technology Trends of Advanced Logic Devices: Past, Present, and Future

東大生研 °平本 俊郎

IIS, The University of Tokyo, °Toshiro Hiramoto

E-mail: hiramoto@nano.iis.u-tokyo.ac.jp

最近の生成 AI の驚くべき進歩を可能ならしめているのは、間違いなく半導体技術であろう。我が国は 2021 年、半導体を戦略物資と位置づけ、国を挙げて半導体に注力することを打ち出した。2022 年には 2nm ロジック量産を目指す Rapidus 社と 2nm 以降の技術開発を行う LSTC (Leading Edge Semiconductor Technology Center)が設立され、急ピッチで工場建設と技術開発が進行中である。

図 1 は、1980 年以降における半導体ロジックの技術ノードの年次推移を、主要国際会議での発表をもとにプロットしたものである[1]。過去 40 年以上にわたり 20 世代以上の技術ノードが繰り返しほぼ同じペースで繰り返し実用化されてきたことは驚嘆に値する。現在は、3nm ロジック技術が量産されている。図 1 には、半導体ロードマップ (IRDS) [2]で予測されている将来のロジック技術ノードの推移も示した[1]。過去と同じペースで技術ノードが進展すると予測されている。本講演では、ロジック半導体における各種パラメータの過去から現在までの推移をもとに、将来のロジック半導体デバイス技術の動向を俯瞰する。

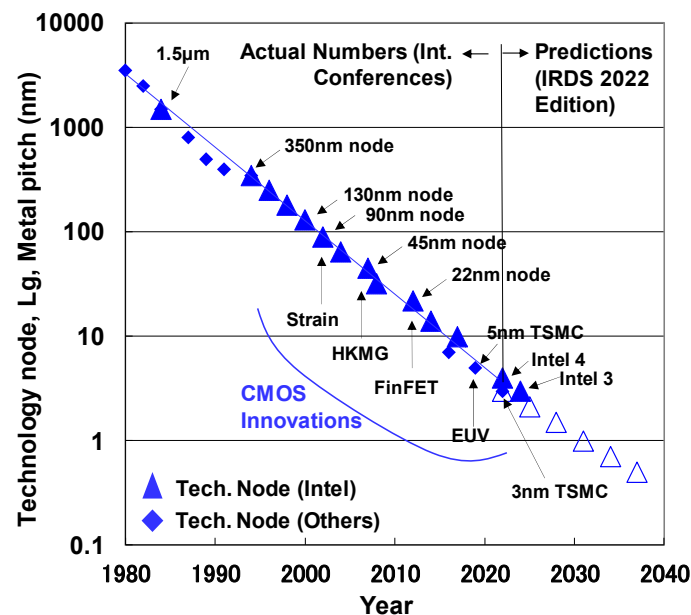


図 1. ロジック半導体における技術ノードの年次推移 [1]。過去のデータは国際会議 (IEDM) による。将来予測は IRDS による。詳細は[1]を参照のこと。

References

- [1] T. Hiramoto and H. Wakabayashi, IEEE Silicon Nano-electronics Workshop, June, 2024.
- [2] International Roadmap for Devices and Systems (IRDS), 2022 Edition, <https://irds.ieee.org/>.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】最先端ロジック半導体と連携・協働する材料・プロセス・実装技術の最前線 ～再起する日本の先端ロジック半導体・その2～

[16p-A41-1~9] 【一般公開】最先端ロジック半導体と連携・協働する材料・プロセス・実装技術の最前線 ～再起する日本の先端ロジック半導体・その2～

[16p-A41-4] 後工程の新しい幕開け：革新的チップレット技術の未来

○折井 靖光¹ (1.Rapidus株式会社)

キーワード：チップレット、半導体パッケージ

先端半導体とパッケージング技術の進歩は、半導体業界の革命をもたらしています。チップレットと呼ばれるSoCチップの機能ごとの分割により、歩留まり向上、設計開発期間の短縮、低コスト化など多くの利点が生まれます。しかし、その一方で、パッケージ構造は複雑化し、設計の難易度が増加しています。これらの課題を克服するには、業界全体が協力して前工程と後工程の融合を推進し、チップレットエコシステムを構築することが期待されています。

最先端 Logic 半導体を支えるウエーハ技術

Wafer technology supporting Leading-edge Logic Devices

SUMCO¹, ○松川 和人¹SUMCO¹, ○Kazuhito Matsukawa¹,

E-mail: kmatsuka@sumcosi.com

生成 AI 等の普及により、半導体デバイスは、より高機能、高性能、低消費電力、低コストに向けた開発・実用化が望まれている。先端 Logic デバイスは上記の多種多様な要求を満たすべく技術開発が続けられている。その中でも微細化、低消費電力化は重要な技術開発であり、Logic は微細化を牽引する重要なデバイスと位置づけられている。CMOS の高性能化を進めるにあたり、従来の古典的なスケーリングだけで所望の性能は得られず、 $\leq 2\text{nm}$ 世代の最先端プロセスでは、デバイス構造が FinFET から GAA 構造への移行や低消費電力対応として裏面電源配線構造 Back-Side Power Delivery Network (BSPDN)の導入、さらには微細化・高機能化を迫及した”3D”構造や Chiplet 技術への移行に伴う Wafer to Wafer の貼合技術など従来のプロセス技術開発に加えて様々な材料開発に依存する割合が多くなってきている。そこで上述したような最先端 Logic プロセス&構造変化に対するウエーハ技術の技術課題や方向性につき述べる。

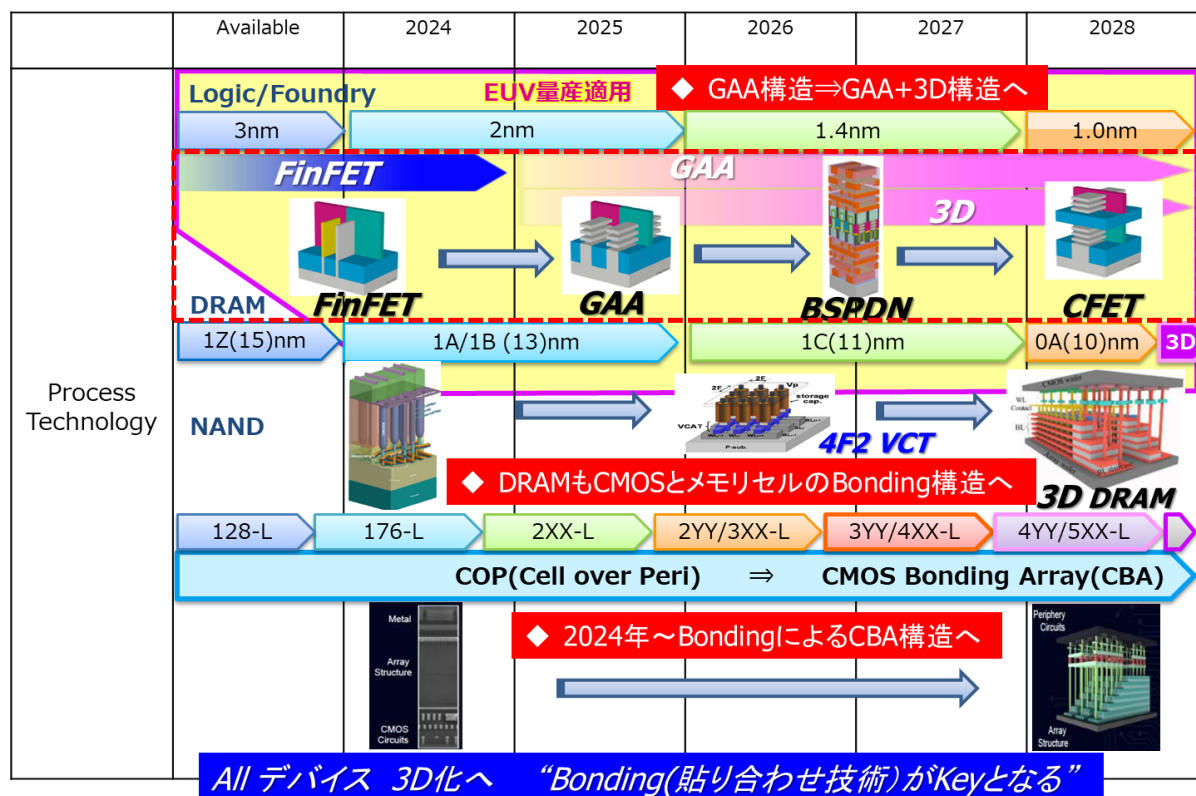


図 1. 先端半導体デバイス 技術ロードマップ

先端ロジックデバイスにおけるプラズマエッチング技術

Plasma Etching technologies for leading-edge Logic LSI

日立ハイテク ○伊澤 勝

Hitachi High-Tech Corp, ○Masaru Izawa

E-mail: masaru.izawa.jj@hitachi-hightech.com

半導体ロジックデバイスは、Pitch Scaling (微細化)だけでなく DTCO (Design technology Co-Optimization)などを用いた Cell サイズ縮小による集積化が進み、今後は立体構造(GAA や CFET)による集積化が検討されている[1]。プラズマエッチング技術では、FinFET などの立体構造に加え DTCO の採用により、nm 精度の高選択垂直加工に加えて、複雑な構造に合わせた加工が求められるようになった。

Fin 加工では、異種の fin 材料(SiGe と Si)に対し同じ CD 値とエッチング深さが求められる。この加工に対し、M-ECR 装置を用い放電や RF のパルス制御および高速ガス切替技術に加え、H₂ ガス添加を添加することで、異種材料で同形状を得ている[2]。この技術は Si/SiGe を積層した GAA FET の加工でも応用されている。WFM (Work Function Metal) patterning では、Fin top の Damage を抑制と nm レベルの space の残渣除去が重要である。マスクチャージアップを除去する DC pulse 技術の適用し、このトレードオフを改善した[3]。その他、SDB (Single Diffusion Break)加工や MGC (Metal Gate Cut)では S/D Epi 層へのダメージ抑制と下部逆テーパ形状に対する残渣除去性の両立が求められている[4]。SAC (Self aligned contact)構造では、WFM Gate リセス加工において HK/WFM の平坦除去と Seam への対応、SAC 加工における選択性と開孔性の両立が求められる。SAC 構造構築やその加工においては ALE 技術が応用されている[5]。

近年量産が見込まれている GAA FET では、FinFET 世代で築いたエッチング技術に加え、横方向加工が重要になる。GAA の SiGe recess や inner spacer の加工では高い選択性と横方向に精度の高い加工が求められる[6]。BS-PDN (Back side power delivery network)が検討されており、ウエハ裏面からの S/D へのコンタクト加工技術が必要になる[7]。さらに GAA FET に続くデバイスとして CFET が検討されている。CFET は p-mos と n-mos の積層構造になるため、より高いアスペクト比の加工が必要になる[8]。加えて上層と下層の分離のため nm レベルの space で均一な横方向加工も重要になる。高精度な横方向加工を実現するため、プラズマ源に IR ヒーターを搭載した DCR (Dry Chemical Remove)装置を開発し、高選択で microloading のない conformal な SiN 加工を実現した[9]。

本発表では、先端デバイスにおけるエッチングの技術課題と取組について説明する。

参考文献: [1] IRDS, <https://irds.ieee.org/editions/2022>, [2] Y. Ishii *et al.*, JJAP 57, 06JC04 (2018), [3] R. Ochiai *et al.*, JSAP spring meeting, 2021, 19a-P04-9, [4] A.J. Strojwas *et al.*, EDTM 2019, p. 319, [5] M. Izawa, SSDM2023 SC B-03, [6] N. Loubet *et al.*, IEDM, 2019, p. 242, [7] M. Kobrinsky *et al.*, IEDM 2023, 19-1, [8] N. Horiguchi, SSDM 2023 SC-B02, [9] M. Izawa, Proc. of Symp. Plasma Process. 2024.

先端ロジックと連携する実装技術 ～有機インターポーザを用いた基板開発～

Development of Package Substrate with Organic Interposer linked to Advanced Logic Device

新光電気工業株式会社, ○ 三木 翔太,

SHINKO ELECTRIC INDUSTRIES CO., LTD., °Shota Miki

E-mail: sy.miki@shinko.co.jp

1. はじめに

デジタル化社会の発展に伴い、AI (Artificial Intelligence) や HPC (High Performance Computing) を活用し、大容量データを高速処理することが求められる。半導体パッケージにおいては、HBM (High Bandwidth Memory) やチップレットを用いたパッケージ構造が重要視され、1つの基板上で、複数のチップ間を接続するパッケージング技術が注目を集めている。また、これらの半導体パッケージは、高性能化のためチップ搭載数が増加し、基板サイズの大型化が加速している。そこで、大型化に有利であり異種チップおよびチップレット集積に対応したパッケージ基板である i-THOP® (integrated-Thin film High density Organic Package) の基板開発について述べる¹⁾。

2. パッケージ構造

* i-THOP は新光電気工業㈱の登録商標です

i-THOP®は、図1、2に示すように配線幅 $2\mu\text{m}$ 、フリップチップパッド間ピッチ $40\mu\text{m}$ の有機インターポーザとビルドアップ基板を低融点の Sn-Bi はんだで接続した微細かつ高密度なデザインルールのパッケージ基板である。今後の基板大型化への対応のため、インターポーザサイズ $70\times 70\text{mm}$ を用いたパッケージ基板を作製した。作製した基板外観写真を図3に示す。次に、大型インターポーザの接続信頼性評価のため温度サイクル試験 (JESD22-A104, Condition B) を実施した。図4の結果から、インターポーザ外周部と中央部の接合部の抵抗変化率は、2000 サイクルまで判定基準の 10%未満で推移し、インターポーザ接合部は良好であることを確認した。

3. 今後の取り組み

大型インターポーザを用いてパッケージレベルでの信頼性評価、配線幅 $1.5\mu\text{m}$ 、フリップチップパッド間ピッチ $35\mu\text{m}$ への更なる微細化および高密度化に向けた技術開発を進めている。

参考文献

- 1) 三木翔太, 他: “有機インターポーザを用いた高密度パッケージ基板,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol.26, No.4, 2023

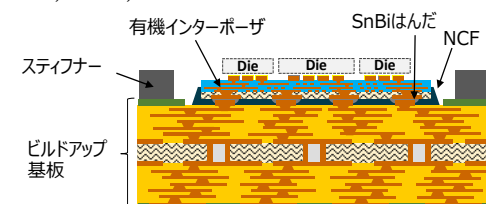


図1 パッケージ構造

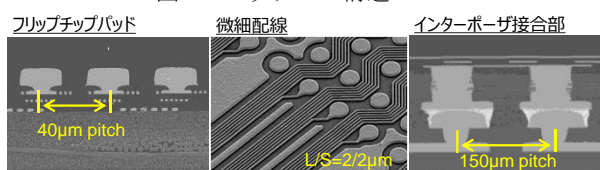


図2 基板デザイン観察結果

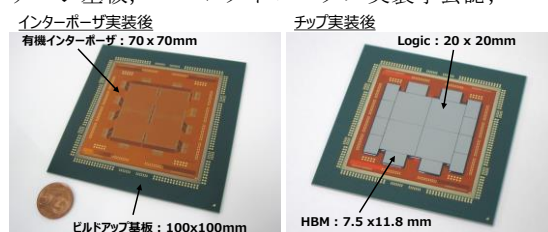


図3 パッケージ基板 外観写真

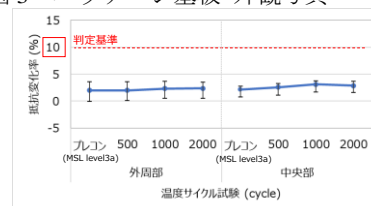


図4 温度サイクル試験結果

高度化する AI と協同する車載チップレット技術

Automotive Chiplet Technologies Cooperating with Advanced AI

ミライズ¹ ○岩城 隆雄¹

MIRISE¹, ○Takao Iwaki¹

E-mail: takao.iwaki.j3u@mirise-tech.com

2012 年 9 月、物体認識の精度を競う ISLVRc で、トロント大の AlexNet が 2 位を大きく引き離す高い認識率を示した¹⁾。これを起点に AI 技術は飛躍的な進歩を遂げ、最新 AI 技術はスマートフォンの顔認証技術や対話型 AI サービスなど、日々の生活に欠かせないものとなっている。

高度化した AI 技術の車載応用も急速に進んでいる。CNN(Convolutional Neural Network)や Transformer による車載カメラ画像の物体認識技術に始まり、鳥観図 (Bird's Eye View) 認識や軌道計画、さらには操舵も含めた自動運転のほぼ全ての工程を AI が行う実証実験も始まっている²⁾。

これに伴い車載 SoC(System on a Chip)への要求も急激に高まっている。高度運転支援や自動運転では、多数の高解像度カメラ画像を走行中に数 10ms 毎に処理する必要がある。これに必要な AI 演算性能は 10 年間で 100 倍以上にもなり 1,000TOPS を超える車載 SoC が提案されている³⁾。

高度な車載 SoC は 3-7nm 等の微細プロセスで製造される。微細化とともに増加した SoC の開発コストは 1 品種あたり数 100 億円にもなる。軽自動車、小型車、高級車、スポーツカー、商用車など、用途やグレード毎に必要な AI 性能が異なるため、一世代で数 TOPS~1,000TOPS 超の幅広いレンジをカバーする多数の SoC が必要となる。これら全てを別々に開発するのは現実的ではない。

この問題の解決策として着目されているのがチップレット技術である。これは複数の小さなチップ個片 (チップレット) を 1 パッケージに収め、一つのチップのように扱う技術である。元々はサーバー用 SoC の大面積化に伴って低下した歩留まりを、チップ分割により向上させることを目的に発展した技術である。自動車分野では、開発した少数チップをレゴブロックのように組み合わせることで多数のバリエーションを効率的にカバーできる次世代の必須技術と考えられる。

サーバー等の民生製品ではチップレット技術を用いた SoC が既に商品化されているが、本格的に車載搭載するためには解決すべき技術課題がいくつか存在する⁴⁾。①複数のチップレットの境界を隠蔽するハードウェア・ソフトウェア技術、②機能安全・リアルタイムを実現するチップレット間的高速・高信頼なインターフェース技術、③熱・ノイズ・振動などの厳しい車載要件に耐えられるパッケージング技術、等である。これらの技術課題と対応の概要について議論したい。

参考文献

1) Alex Krizhevsky et al., Communications of the ACM 60 (6), p.84–90.

2) Matt Vitelli, et al., IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, p.897, Philadelphia 2022, p.897

3) <https://www.nvidia.com/ja-jp/about-nvidia/press-releases/2022/>

4) https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/post5g/pdf/240329_theme_01.pdf

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): グリーン・サステナブル半導体製造に貢献する材料

[17p-C302-1~9] グリーン・サステナブル半導体製造に貢献する材料

シンポジウムスポンサー

RESONAC

[17p-C302-1]

はじめに

○内田 紀行¹ (1.産総研)

[17p-C302-2]

三井化学における半導体製造のサステナビリティへの貢献に向けて

○小野 昇子¹ (1.三井化学株)

[17p-C302-3]

グリーン・サステナブルに貢献するレゾナックの取組み

○高橋 宏明¹ (1.レゾナック)

[17p-C302-4]

シリカを原料とするケイ素化学基幹原料の直接合成

○深谷 訓久¹ (1.産総研)

[17p-C302-5]

自己治癒セラミックスの基礎と応用 一半導体製造での応用を目指してー

○南口 誠¹ (1.長岡技大)

[17p-C302-6]

グリーン半導体製造に向けた材料のCO₂排出原単位の評価

○山木 雄大¹、Nguyen Thuy¹、片岡 祥¹ (1.産総研)

[17p-C302-7]

SEMI半導体気候関連コンソーシアムの展望と進捗報告

○枝 礼子¹ (1.SEMIジャパン)

[17p-C302-8]

The embodied environmental impact of integrated circuit manufacturing

○Lars-Ake Ragnarsson¹ (1.imec)

[17p-C302-9]

クロージング

○金山 敏彦¹ (1.産総研)

三井化学における半導体製造のサステナビリティへの貢献に向けて Contribution to Sustainability of Semiconductor Manufacturing by Mitsui Chemicals

三井化学株式会社研究開発本部 ICT ソリューション研究センター

小野昇子¹

Innovative Solutions Center for ICT, R&D Center, Mitsui Chemicals, Inc.¹

E-mail: shoko.ono@mitsuichemicals.com

安全・快適なインフラ、健康な暮らし、持続可能な地球環境を支えるには、ICT (Information and Communication Technology : 情報通信技術) が不可欠である。一方で、スマホや生成 AI 等の普及により、データ通信量および消費エネルギーが急増し、電力消費や環境負荷を下げるのが喫緊の課題となっている。

半導体製造においては、そのグリーン化に向けて CO₂ エミッションの試算が進行している。GHG プロトコル Scope 1 (GHG ガスの直接排出)、Scope 2 (再生可能エネルギーの活用) に関しては、TSMC 社の 2021 年の Annual Report (GHG Scope 1+2, ウェーハ出荷量の世界シェア) を元に試算すると、世界全体で 1 億 (100M) -CO₂ ton 急増中と見積もれるまでになっている (Uchida et al. 2023)。今後は、半導体材料などを含む Scope3 (原材料、輸送、使用、廃棄) の寄与分の算出が争点になるが、試算するためには、多種類の半導体材料について、個々に何をどのくらい用いどう運ばれるか等、複数の視点からデータを補完、集積する必要がある。

三井化学グループは、環境と調和した循環型社会、多様な価値を生み出す包摂社会、健康・安心に暮らせる快適社会の実現を目指し、環境に配慮した製品の開発や、資源の有効活用、エネルギーの効率化に重点を置いている (下図)。気候変動の進行を緩和する策として、GHG 削減を推進し、自社における GHG 排出量の削減を進めるとともに、製品・サービスを通じたバリューチェーン全体での脱炭素化に取り組み、2050 年のカーボンニュートラルを目指す。また、ICT ソリューション領域を重要な事業領域の一つと捉え、2022 年度から半導体・実装、イメージング、バッテリーの領域の研究開発を集約し、様々な材料の開発を行っている。

本発表では、半導体製造のサステナビリティへの貢献に向けた当社の取り組みを紹介するとともに、サプライチェーン全体を俯瞰し適切に対応するために何が必要か議論する。



Material Topics in Mitsui Chemicals Group

グリーン・サステナブルに貢献するレゾナックの取組み

Resonac's Initiatives Contributing to Green and Sustainable Development.

株式会社レゾナック エレクトロニクス事業本部 開発センター 高橋 宏明

Resonac Corporation. Electronics Business Headquarters. R&D-center Hiroaki Takahashi

E-mail: takahashi.hiroaki.xikrq@resonac.com

2.xD-PKG 構造を用いた先端半導体はデータセンター向け GPU や AI/HPC ソリューション等に用いられており、大容量のデータを高速処理できるよう高集積化が進み、パッケージ全体での機能実現にむけ、その設計プロセスは高度かつ複雑化している。

当社は 2023 年 1 月 1 日、昭和電工(株)と昭和電工マテリアルズ(株)(旧日立化成(株))が合併し、統合新会社「レゾナック」となり、世界トップクラスの機能性化学メーカを目指して更なる変革を進めている。「化学の力で社会を変える」を存在意義とし、先端材料パートナーとして時代が求める機能を創出し、グローバル社会の持続可能な発展に貢献することを目指しており、その中でも半導体・電子材料部門を今後の成長事業と位置づけ、集中的な投資を行っている。特に後工程を中心とした半導体材料製品群と高いマーケットシェアを保有していることを強みに、共創型イノベーション創出を推進させ、次世代半導体パッケージ用材料やプロセス開発を加速している。

また、経営の根幹にサステナビリティの概念を据える必要があると考え、「サステナビリティビジョン 2030」を設定するとともに、サステナビリティ重要課題（マテリアリティ）を特定し、長期ビジョンの達成につなげている。

「地球との共生」を化学の力で実現することを目指し、気候変動への対応にも取り組んでいる。当社は製品やサービスのライフサイクルにおける環境負荷を定量的に評価するライフサイクルアセスメント法に基づき、製品毎の温室効果ガス(GHG)排出量を算出する体制を構築し、既存技術の延長により 2030 年で 2013 年比 30%GHG 削減を必達し、2050 年に向けカーボンニュートラルに挑戦する。当社は多くの事業領域でサステナブル社会に貢献する材料や活動に取り組んでおり、特に半導体関連製品に関しては、自社の生産活動に伴う排出(Scope1)や購入材料のエネルギー(Scope2)だけでなく、事業者の活動に関連する他社の排出(Scope3)も算出することで社会にとって影響度の高い製品群を特定し先行開発を行っている。これらの活動は取引先企業との連携強化も必要であり、更なる信頼性向上につなげていきたい。



SDGs への貢献(化学の力で実現したい未来)

シリカを原料とするケイ素化学基幹原料の直接合成

Direct Synthesis of Silicon Chemical Raw Materials from Silica

産総研 ○深谷 訓久

AIST, °Norihsa Fukaya

E-mail: n.fukaya@aist.go.jp

テトラアルコキシシランは、セラミックスや電子デバイス用の保護膜・絶縁膜の原料として幅広く利用されているケイ素化学産業の基幹原料の一つである。テトラアルコキシシランは、現状の工業的生産では、天然のケイ石（シリカが主成分）を出発原料に、大量の電気エネルギーを用いて高温で熔融し炭素と反応させることで、一旦、金属ケイ素に還元したのち、これを塩素と反応させて四塩化ケイ素とし、さらにアルコールと反応させる方法、又は金属ケイ素を直接アルコールと反応させる方法により製造されている（Figure 1）。しかし、いずれの方法も、高温を要する金属ケイ素の製造工程を経るため、典型的なエネルギー多消費プロセスである。

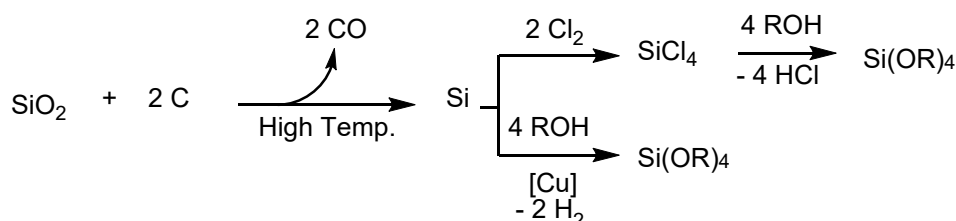


Figure 1. Industrial Production Route for Tetraalkoxysilane

本研究では、ケイ素化学産業の基幹原料であるテトラアルコキシシランについて、安価で豊富に存在する砂、植物燃焼灰、産業副産物などをケイ素源としてアルコールと反応させて、一段階で高効率に直接合成できる技術を開発した（Figure 2）。この技術では、汎用されている無機脱水剤のモレキュラーシーブによって反応中に副生する水を吸着除去することで、平衡制約を超えて目的物の収率を大幅に向上させることが可能となった。本技術は、安価で豊富に存在するさまざまなケイ素源を有効活用し、有機ケイ素原料の省エネルギー・低コスト製造に新たな道を拓くものである。



Figure 2. Direct Synthesis of Tetraalkoxysilane from Silica

自己治癒セラミックスの基礎と応用 —半導体製造での応用を目指して—

Fundamentals and Applications on Self-healing Ceramics -toward Applications in Semiconductor Manufacturing Processes-

長岡技大 [○]南口 誠

Nagaoka Univ. Tech.¹, Makoto Nanko

E-mail: nanko@mech.nagaokaut.ac.jp

【はじめに】自己治癒セラミックスは、横浜国大・安藤らによって発見されて以来、日本国内のみならず、世界各国で研究開発が盛んに行われるようになった。炭化ケイ素のような単相セラミックスでも自己治癒機能を発現するものはあるが、効率的な自己治癒機能を有するセラミックスは、炭化物や金属などの非酸化物粒子を構造用セラミックスに分散した複合材料となっており、熱酸化により表面の亀裂が酸化生成物によって充填されることで強度回復が起きる。この材料をドライエッチング装置などの構造部品として用いることができれば、構造部材として長寿命が期待できる。本発表では、自己治癒セラミックスの基礎と応用に解説するとともに半導体製造分野への適用に対する展望について報告する。

【自己治癒メカニズム】セラミックスは脆性材料であるので、材料に存在する最も大きい欠陥に応力集中して、そこが破壊源となって破壊する。そのため、表面に大きなクラックがあればそこから破壊することになる。一般にセラミックス部品を製造するときに研削加工を行うと表面には数十ミクロンといった大きいクラックが導入されることがある。また、装置として利用中にも熱衝撃や機械的衝撃でクラックが導入されることがある。結果として、構造部品が小さな応力で破壊したり、疲労破壊したりする場合がある。

自己治癒セラミックスでは、熱酸化により非酸化物粒子が酸化してクラック内部で体積膨張を起こしてクラックが充填されることで、そのクラックにおける応力集中が緩和される。結果的に、材料内部の内因的なクラックや欠陥が再び破壊源となって強度回復が起きる。クラックの閉口は、上記のようなメカニズム以外に、非酸化物粒子が材料内部で酸化した際の体積膨張で起きる場合、陽イオンが材料表面に拡散して酸化雰囲気中の酸素などと反応してクラック内部に酸化生成物が形成する場合も想定される。これらは、マトリックスとなるセラミックスの拡散特性や非酸化物粒子の酸化特性によって異なる。

【半導体製造分野への展開】これまでに、自己治癒セラミックスとして、SiC 分散 Al₂O₃ (以降、SiC/Al₂O₃ と表記) のほか、SiC/ムライト、Ti₂AlC/Al₂O₃、Ni/Al₂O₃、Ni/ムライト、SiC/Y₂SiO₅、SiC/Y₂Si₂O₇ などが開発されている。ドライエッチング装置では、ハロゲンプラズマにより激しい腐食が生じるため、Y₂O₃ や YAG などが構造材料として利用されている。これらの構造用セラミックスに適切な非酸化物粒子を分散することで自己治癒化は可能であると考えられる。

グリーン半導体製造に向けた材料の CO₂ 排出原単位の評価

Estimation of CO₂ Emissions Factor of materials for Green Semiconductor Manufacturing

産総研¹ ○山木雄大¹, Nguyen T. H. Thuy¹, 片岡祥¹

AIST¹ ○Takehiro Yamaki¹, Thuy T.H. Nguyen¹, Sho Kataoka¹

E-mail: takehiro-yamaki@aist.go.jp

1. はじめに

半導体製造は、製品の歩留まりを高めるために、資源を大量投入し、大量廃棄するリニアエコノミーとなっている。さらに、半導体製造に係る CO₂ 排出量も多く、鉄鋼業の約 15 分の 1 や、化学工業の約 5 分の 1 の CO₂ 排出量に達しており、半導体製造は CO₂ 排出量が多い産業である。この半導体製造においてもグリーン化の機運が高まっており、半導体製造に係る CO₂ 排出量の見える化が進められている。CO₂ 排出量を評価する際には、インベントリデータベースに収録されている薬液・ガスの CO₂ 排出原単位が使用されるが、インベントリデータベースに収録されている CO₂ 排出原単位の多くは化学グレードの値であり、半導体製造に用いられる高純度の薬液・ガスの CO₂ 排出原単位はほとんどない。半導体グレードの CO₂ 排出原単位がなければ、半導体製造からの CO₂ 排出量を正しく評価することはできない。

本研究では、プロセスシミュレーションを活用して、半導体製造に用いられる薬液・ガスの CO₂ 排出原単位を評価する。半導体製造の材料ガスの一つであるテトラエトキシシラン (TEOS) を対象に、化学グレードから半導体グレードへの高純度化に係る精製プロセスをモデル化し、CO₂ 排出量の評価を通して、半導体グレードの CO₂ 排出原単位を推定する。

2. 計算方法

TEOS は、半導体製造に用いられる代表的な酸化膜 CVD 用の材料である。これまでに、我々の研究グループでは、金属シリコンから TEOS を合成する場合と、籾殻に含まれるシリカから TEOS を合成する方法について、エネルギー消費量や CO₂ 排出量を評価してきた¹⁾。ここでは、TEOS の純度は 99.5% (化学産業での利用) と設定した。一方で、半導体製造で用いるためには、99.9999% (6N) 以上に高純度化させる必要がある。そこで、まずは 99.5% から 6N への高純度化に係る精製プロセスのモデル化と CO₂ 排出量の評価を行った。

TEOS の高純度化は 2 段階で行うと設定した。1 段階目は揮発性不純物の除去であり、2 段階目は金属成分の除去である。いずれも蒸留分離により精製を行うとしてモデルを作成して、精製に必要なエネルギー消費量と TEOS の損失を考慮して、TEOS 1 kg あたりの高純度化に伴う CO₂ 排出量 [kg-CO₂/kg-TEOS] を評価した。

3. 計算結果

TEOS の高純度化の 1 段階目の揮発性不純物としてエタノール (EtOH) を設定した。EtOH と TEOS は沸点差が大きく、また、共沸も存在しないため、比較的容易に TEOS を高回収率で精製することができた。2 段階目の金属成分の除去では、添加剤を加えて金属成分を含む高沸点錯体を形成させて TEOS と分離を行うと設定した。TEOS と錯体も、比較的沸点差があることから容易に分離が行われたが、一方で、TEOS の回収率 (言い換えると、TEOS のロス分) が CO₂ 排出原単位に強く影響することがわかった。今回の検討から、高純度化に伴う CO₂ 排出量は多いことから、半導体製造の評価を行う際には、化学グレードの CO₂ 排出原単位と高純度化に伴う CO₂ 排出量を合わせて用いる必要があることを示唆している。

引用文献: 1) T. Nguyen *et al.*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2019, 57, 2192-2199.

SEMI 半導体気候関連コンソーシアムの展望と進捗報告

SEMI Semiconductor Climate Consortium Outlook and Progress

SEMI ジャパン, 枝 礼子

SEMI Japan, Reiko Eda

E-mail: reda@semi.org

2030 年、半導体市場が 1 兆米ドルに達することが見込まれる中、気候変動と PFAS 規制が業界に課題をもたらしている。SEMI は、半導体の国際業界団体として、サステナビリティ・イニシアティブを通じて、持続可能な社会と半導体産業の発展を推進している。

2022 年 11 月に発足した SEMI 半導体気候関連コンソーシアム (SCC, Semiconductor Climate Consortium) では、半導体のグローバルサプライチェーンを代表する 90 社以上が参画・協調して、温室効果ガス排出量の把握、目標設定、削減に向けた活動を加速させている。

また、2023 年 11 月、SEMI と SCC は、世界の半導体産業による炭素排出量削減を目指して、アジア太平洋地域における低炭素エネルギー源導入を促進するための SCC エネルギーコラボレイティブ (SCC-EC) を設立した。

本講演では、SCC、SCC-EC の展望と活動進捗報告を行うとともに、PFAS に関する SEMI の取り組みについても紹介する。

The embodied environmental impact of integrated circuit manufacturing

Lars-Åke Ragnarsson, Imec, Kapeldreef 75, 3001 Leuven, Belgium

E-mail: Lars-Ake.Ragnarsson@imec.be

The manufacturing of integrated circuits is a very complex and energy demanding endeavor using many process steps, advanced processing tools and infrastructure. It is estimated [1] that in 2020 ~177MtonCO₂eq was associated with chip production. This is around 0.5% of the total global emissions. However, due to the very strong growth of the industry, its emissions are expected to double in the next 10 years, thus significantly increasing the relative contribution and making it extra challenging to meet net-zero goals by 2050.

To take actions towards reduced impact, it is imperative to understand what parts of the process and supply chain contribute the most. To gain such insights we use imec.netzero [1], a bottom-up virtual fab model built to address such questions. It uses process flows, process tool data and fab models to model the environmental impact of IC manufacturing. Shown in Figure 1 is the total emissions (in CO₂eq/Wafer) for various logic technology nodes by process area. From the figure

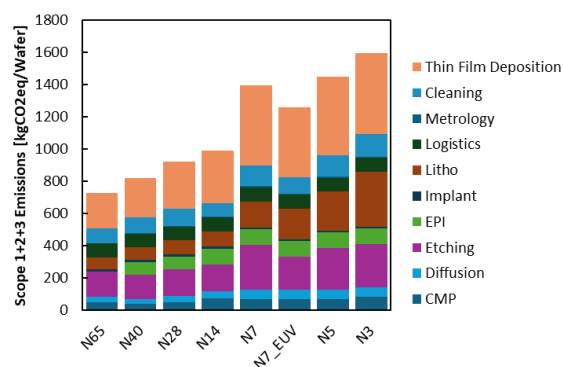


Figure 1 The total emissions for IC manufacturing of different logic technologies by process area. Results were produced with the partner version (3.3) of imec.netzero [1] with default settings and includes wafer level packaging.

it is clear that a) more advanced technologies have more associated emissions than older technologies, b) different process areas contribute to a different degree, and c) process options have a large impact (N7 vs N7_EUV [1]).

Similarly, using the scope definitions in [1], the impact can be divided between the Fab and the supply chain (Figure 2). The electricity (scope 2) of the Fab is dominating the emissions, to be addressed by sourcing fab electricity from low carbon energy production. Next, the large contribution of the production of materials (gases, chemicals, wafers) shows that for efficient reduction, the full supply chain must work together to reduce its climate impact.

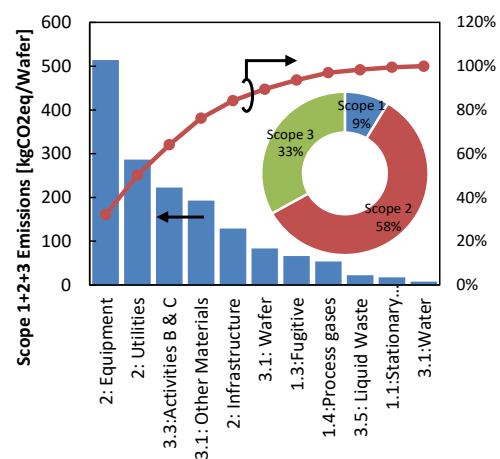


Figure 2 Pareto of emissions by scope for the logic technology node N3 (from Figure 1). The inset shows the relative impact from scopes 1-3.

1. L. Boakes et. al, *IEDM*, San Francisco, USA, 2023
2. [Online]. Available: <https://netzero.imec-int.com>.
3. Greenhouse gas protocol, [Online, Accessed 24 06 2024]. Available: <https://ghgprotocol.org/>.
4. SEMI (SCC): A White Paper on Transparency, Ambition, and Collaboration, [Online] [Accessed 24 06 2024]. <https://discover.semi.org/transparency-ambition-and-collaboration-white-paper-download-registration.html>.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：グリーン・サステナブル半導体製造に貢献する材料

[17p-C302-1~9] グリーン・サステナブル半導体製造に貢献する材料

[17p-C302-9] クロージング

○金山 敏彦¹ (1.産総研)

キーワード：カーボンフットプリント、循環型経済、ライフサイクルアセスメント

半導体製造では、Siウェーハに始まり、各種のガス・薬液や装置部材、実装材料など、多くの高純度材料が大量に消費される。ゼロエミッションを達成するには、それぞれのカーボンフットプリントへの貢献を把握し、総合的に低減させることが必要である。ここでは、シンポジウムでの発表を総括し、学术界に期待される役割と今後の方向性を議論する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): どうなるEVシフト - その現状と課題 -

[18p-A41-1~7] どうなるEVシフト - その現状と課題 -

[18p-A41-1]

オープニング・趣旨説明

○小島 淳^{1,2} (1.名古屋大学、2.応用物理学会 インダストリアルチャプター)

[18p-A41-2]

自動車業界の未来 - どうなるEVシフトと車載半導体市場の牽引

○杉山 和弘¹ (1.オムディア)

[18p-A41-3]

EVシフト狂騒はやはり間違えだった

○藤村 俊夫¹ (1.Touson自動車戦略研究所 代表)

[18p-A41-4]

電気自動車用蓄電池の現在地

○小林 弘典¹ (1.産総研)

[18p-A41-5]

EV/HEV/PHV用インバータの小型化・高性能化に貢献する次世代パワー半導体/パワーモジュール

○高橋 良和¹、鈴木 慧太¹、遠藤 哲郎¹ (1.東北大 CIES)

[18p-A41-6]

ライフサイクルでの自動車環境負荷 — Well to Wheel —

○工藤 祐揮¹ (1.産総研)

[18p-A41-7]

クロージング

○中川 聡子^{1,2} (1.グローバルウェーハズ・ジャパン株式会社、2.応用物理学会 インダストリアルチャプター)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：どうなるEVシフト - その現状と課題 -

[18p-A41-1~7] どうなるEVシフト - その現状と課題 -

[18p-A41-2] 自動車業界の未来 - どうなるEVシフトと車載半導体市場の牽引

○杉山 和弘¹ (1.オムディア)

キーワード：車載半導体、EVシフト、車両の電動化

本セミナーでは、コロナ以降、車両生産台数の成長が鈍化する中でカーボンニュートラル推進によるEVシフト、電動化が業界に与えるインパクト、特に急成長する車載半導体市場について解説をします。EV市場の成長予測、課題を取り上げ、自動運転やADASにおける車載半導体の重要性についても分析します。市場規模の拡大と各国政府の政策動向も紹介し、EV普及を支えるための支援策や規制を分析。特に、車両台数が増加しない中でも車載半導体市場がどのように進化し、付加価値を提供するかを探ります。

EV シフト狂騒はやはり間違えだった

The EV shift frenzy was a mistake after all.

Touson 自動車戦略研究所 代表 藤村俊夫

Touson Automotive Strategy Research Institute Toshio Fujimura

「EV シフトは踊り場に突入」という記事を最近よく目にするが、その表現は正しくない。EV の最大の技術課題は2次電池のエネルギー密度向上であり、改良の難しさを考慮すると、現在の「EV シフト」は単なる幻想で、これまでと同様、補助金などの優遇策に支えられた Boom に他ならない。EV シフトを Boom で終わらせたくないのであれば、LCA (Life Cycle Assessment)などでカウントした CO₂ 削減効果や、顧客ニーズへの対応に関して総合的に HEV を上回る必要があるが、それは 2035 年以降でも難しいと言える。踊り場ではなく、当面「這い上がることのできない死の谷」に突入したと認識すべきである。

2016 年以降、補助金を含む多くの優遇策により EV 販売は拡大してきたが、アーリーアダプターの購入が一巡し、補助金支給が中国で 2022 年末に、欧州では最大の販売を誇るドイツで 2023 年に廃止されると、予想通り EV 販売に急ブレーキがかかった。テスラをはじめ、欧米メーカーや中国新興メーカーの安売り競争により、各社の収益は大幅に低下し、巨額の負債を抱え破綻するメーカーも続出している。政府主導で進んできた EV シフトに対し、2022 年には主要メーカー各社から懐疑的な声があがり始め、2023 年に入ると、人員削減、長期在庫に伴う生産調整、工場拡大/ギガファクトリー新設の凍結など、EV シフトに待ったをかける具体的な動きも出てきた。それと同時に、ハイブリッド車 (HEV) 王国である日本は言うまでもなく、欧州、米国、中国市場においても、HEV やその派生車でもあるプラグインハイブリッド車 (PHEV) が見直され、販売は急拡大している。

EV の完成度は、電池性能で決まると言っても過言ではない。但し、電池のエネルギー密度や耐久性の向上には時間を要し、材料費が 70% も占めることから、量産による電池コストの大幅低減が期待できない。補助金が終了すれば EV 販売にブレーキがかかることは容易に予想できたはずだ。

少なくとも 2030 年の CO₂ 削減目標 (2019 年比 48% 削減) 達成に向け、EV は CO₂ 削減の救世主にはなり得ないことは明白であり、データを分析すれば容易に解ることだ。環境とユーザーニーズを両立する現実解は、短絡的な「EV シフト」ではなく、「新興国も含めた HEV、PHEV の販売拡大」である。EV に傾注してきた自動車メーカーは早急に軌道修正が必要だ。一方で、HEV が各国・地域で巻き返しをはかる中、「HEV は繋ぎの技術だ」との論調もあるが、これまで EV を推進してきた信奉者の負け惜しみのように聞こえる。やはり技術改良の進展と時間軸の関係が理解できていない。いつまでの繋ぎか？ 2035 年までか？ 2040 年までか？ 2050 年か？ 技術的な裏付けを示すべきである。

また、CO₂ 削減の対象は新車のみならず、エンジン車などの既販車を含めた保有車であることを認識すべきだ。世界の保有車は 15 億台 3500 万台で新車の約 20 倍に相当する。保有車の CO₂ 削減の有効な手段として、自動車用燃料を、石油系燃料から炭化水素系のカーボンニュートラル燃料 (drop in fuel) に転換していくことも、極めて重要だ。現時点でこのことをしっかり認識し、危機感をもって対応している自動車メーカーが少ないのも大問題である。エネルギー資本や関連企業とのアライアンス、導入時期、導入量のどれをとっても、具体的なロードマップを未だに示していない。

政府や産業界は、2030 年が人類にとっての岐路になるという危機感をもち、CO₂ 削減の具体的な道筋を立て、早急に行動に移すべきだ。破滅か存続かのカウントダウンは既に始まっている。

電気自動車用蓄電池の現在地

The present location of the battery for the EV

産総研¹ ○小林 弘典¹

AIST¹ ○Hironori Kobayashi¹

E-mail: hironori-kobayashi@aist.go.jp

脱炭素社会に向けた対応手段として、近年、世界的な自動車のEV化が加速しています。その中で、性能の中核を担っているのが、車載用蓄電池です。本講演では、各種移動体の電動化の最近の状況、車載用LIBの技術動向、車載用蓄電池の今後の展望、エコシステム構築に向けた取り組み動向について解説をします。

EV/HEV/PHV 用インバータの小型化・高性能化に貢献する 次世代パワー半導体/パワーモジュール

Next-generation power semiconductors and power modules that contribute to
down-sizing and higher performance of inverters for EV/HEV/PHV

東北大 °高橋 良和, 鈴木 慧太, 遠藤 哲郎

Tohoku Univ. °Yoshikazu Takahashi, Keita Suzuki, Tetsuo Endoh

E-mail: yoshikazu.takahashi.e4@tohoku.ac.jp

近年、脱炭素化に向けて EV、HEV、PHV の市場への展開が加速的に増加している。EV、HEV、PHV の基幹部品としてはインバータを動作させるためのパワーデバイス/パワーモジュールがあり、その性能、大きさが航続距離と快適な車内空間の提供を左右すると言っても過言ではない。パワーデバイスは現在、電気的性能とコスト面から Si-IGBT が主に使われており、その発展形としてフリーホイールダイオードを内蔵した RC-IGBT(逆導通型 IGBT)が HEV を中心に適用が拡大している。EV 用途では、さらなる航続距離の向上を目指し、ワイドバンドギャップデバイスである SiC-MOSFET の採用が加速されている。また、これらのパワーデバイスに加え、縦型 GaN デバイスや Ga₂O₃ デバイスの研究・開発も加速推進されている。しかしながら、これらの WBG デバイスの適用に対しては、WBG デバイスが高パワー密度、高速スイッチングになることから冷却方式とインダクタンス低減技術の革新が重要となる。一般に EV、HEV、PHEV の主モータを駆動するパワーユニットは水冷である。現在市場で展開されているパワーユニットの主な冷却方式は、図1に示すように、間接水冷+両面冷却^[1]、間接水冷+片面冷却^[2]、直接水冷+両面冷却^[3]、直接水冷+片面冷却^[4]に分類され、当面はこの4種類と、それぞれの発展形が主となるものと考えられる。

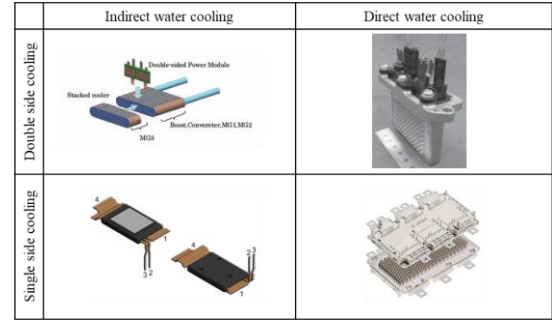


図1. パワーモジュールと冷却構造の分類

今回、筆者のグループでは、これらの4種類の分類の中で、小型化・高パワー密度化に有利な直接水冷で両面冷却構造の低背型・超小型両面冷却パワーモジュールとパワーユニットへの組み込みが容易であるため、汎用性が高い直接水冷+片面冷却構造の3D パワーモジュールを開発したので、その電気的・熱的特性および、それぞれの特徴について報告する。

加えて、これらの WBG デバイスの優れた特長を活かすために開発モジュールに採用した低インダクタンス化技術などの次世代パワーモジュール技術について説明する。

謝辞

本研究の一部は、文科省文部科学省「革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業」（助成金番号：JPJ009777）の支援を受けて実施されたものである。

参考文献

- [1] Koji Okamoto, Yusuke Setaka, Hiroshi Ishiyama, Mitsuharu Inagaki, Kuniaki Mamitsu, DENSO Technical Review, VOL16, pp.23-29, 2011.
- [2] STMicroelectronics SCTHS250N65G3 Datasheet
- [3] Takashi Kimura, Ryuichi Saitou, Kenji Kubo, Kinya Nakatsu, Hideaki Ishikawa, Kaname Sasaki, Hitachi Review Vol. 63 (2014), No. 2
- [4] Infineon Technologies AG HybridPACK™ Drive module FS05MR12A6MA1B Datasheet

ライフサイクルでの自動車環境負荷 — Well to Wheel —

Automotive Environmental Emissions from a Life Cycle Perspective – Well to Wheel –

産総研¹ ○工藤祐揮¹

AIST¹ ○Yuki Kudoh¹

E-mail: kudoh.yuki@aist.go.jp

輸送・貯蔵・取り扱いが容易で、エネルギー密度が高いガソリンや軽油などの石油製品を燃料とする内燃機関は、これまでの自動車用パワートレインの主役の座を担ってきた。そのため、自動車用エネルギーは過度に石油に依存してきており、大量の石油消費に伴う CO₂（二酸化炭素）排出は地球環境問題に多大な影響を与えてきた。自動車部門におけるエネルギー・環境問題への抜本的な対応策としては、内燃機関と石油製品との組み合わせた既存の内燃機関自動車に対して競争力を持てるような、パワートレインと石油代替燃料を組み合わせた代替技術を確立して普及させていくことが重要である。

現在、自動車部門における脱炭素実現の有力なオプションとして期待されている代替技術としては、①内燃機関と比べてエネルギー効率の高く、動力を得る際に CO₂ が発生しないモータをパワートレインとすること、②様々な一次エネルギーから製造することができ、モータ駆動用の電力を燃料電池で得る際にも、内燃機関で燃焼して動力を得る際にも CO₂ が排出されない水素を利用すること、③CO₂ を原料に水素と反応させることにより製造できる合成燃料を内燃機関で使うこと、などが挙げられる。これらいずれも、自動車テールパイプからの CO₂ 排出を大幅に削減させることが期待できる。しかしこれらの自動車用エネルギーを一次エネルギーから製造して、輸送や貯蔵を経て車載するまでのサプライチェーン全体では、エネルギー投入やロスが避けられないために一定量の CO₂ 排出がある。よって、自動車部門の脱炭素実現にはテールパイプからの直接排出だけでなく、自動車用エネルギーサプライチェーンからの間接排出を含めた、ライフサイクル全体の CO₂ 排出量も小さくしていく必要がある。

本発表では、自動車用エネルギーとパワートレインの組み合わせによる自動車環境負荷を、ライフサイクルアセスメントの観点から分析する枠組である Well to Wheel の視点に基づき、自動車部門の脱炭素化にあたる留意点について述べる。



図: Well to Wheel の概念

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 原子層プロセス (ALP: Atomic Layer Process) の基礎と最新技術動向

[18p-A23-1~17] 原子層プロセス (ALP: Atomic Layer Process) の基礎と最新技術動向

[18p-A23-1]

高反応性原料を用いたALDプロセスの検討

○清水 秀治¹ (1.大陽日酸)

[18p-A23-2]

汎用機械学習力場によるALD precursorの反応解析と分子設計

○浅野 裕介¹ (1.プリファードコンピューテーショナルケミストリー)

[18p-A23-3]

室温原子層堆積法の開発と複合酸化物堆積への展開

○廣瀬 文彦¹ (1.山形大院理工)

[18p-A23-4]

室温原子層堆積法を用いた連続吸着方式におけるDMZとTMAの競合吸着反応の観察

○鈴木 晴登¹、宮澤 諒¹、洲崎 慧¹、三浦 正範¹、廣瀬 文彦¹ (1.山形大)

[18p-A23-5]

QCMによるALD吸着・反応過程の高精度その場観察

呉 宇軒¹、山口 潤¹、佐藤 登¹、筑根 敦弘¹、○霜垣 幸浩¹ (1.東大工)

[18p-A23-6]

COSMO-SAC法によるALD用金属錯体の蒸気圧推算

○佐藤 登¹、呉 宇軒¹、山口 潤¹、筑根 敦弘¹、霜垣 幸浩¹ (1.東大院工)

[18p-A23-7]

原子層エッチングにおける反応素過程の評価

○唐橋 一浩¹、伊藤 智子¹、浜口 智志¹ (1.阪大院工)

[18p-A23-8]

ヘキサフルオロアセチルアセトンと酸素プラズマの交互サイクルを用いた銅の原子層エッチング

○中谷 侑亮¹、Andrew Kaye²、園田 靖¹、田中 基裕¹、前田 賢治¹、Sumit Agarwal² (1.日立ハイテク、2.Colorado School of Mines)

[18p-A23-9]

HFを含むプラズマによる絶縁膜の低温原子層エッチング

○関根 誠¹ (1.名大低温プラズマ)

[18p-A23-10]

リモート酸素プラズマによるSiO₂上の単層グラフェンの選択的除去

○(DC)胡 留剛¹、石川 健治²、Thi-Thuy-Nga Nguyen²、蕭 世男²、堀 勝² (1.名古屋大工、2.名大低温プラズマ)

[18p-A23-11]

成長空間におけるRFプラズマの評価と β -Ga₂O₃薄膜のALD成長

○(B)阿多 翔大¹、市川 龍斗¹、内藤 圭吾¹、吉村 武¹、藤村 紀文¹ (1.大阪公立大工)

[18p-A23-12]

GaCp*を用いた多結晶GaN薄膜の原子層堆積

○水谷 文一¹、高橋 伸尚¹ (1.高純度化学研)

[18p-A23-13]

ALDとALEを併用した高選択性Co薄膜形成プロセス

○山口 潤¹、佐藤 登¹、筑根 敦弘¹、百瀬 健¹、霜垣 幸浩¹ (1.東大院工)

[18p-A23-14]

Co-ALD 初期成長過程の反射光分光その場観察

○玉置 直樹¹、木村 俊介¹、吉田 幸希¹、山口 潤¹、佐藤 登¹、筑根 敦弘¹、百瀬 健¹、霜垣 幸浩¹ (1.東大院工)

[18p-A23-15]

HfO₂/ZrO₂界面がHfO₂/ZrO₂ナノラミネート薄膜の強誘電相出現に与える影響の考察

○女屋 崇¹、櫻川 裕大¹、高久 理名¹、喜多 浩之¹ (1.東大院新領域)

[18p-A23-16]

ALD法で作製したGa₂O₃薄膜の成長機構

○市川 龍斗¹、吉村 武¹、藤村 紀文¹ (1.大阪公立大工)

[18p-A23-17]

β -Ga₂O₃上のHfO₂系極薄膜成長の結晶方位依存性

○(M1)古川 勝裕¹、市川 龍斗¹、阿多 翔大¹、吉村 武¹、藤村 紀文¹ (1.大阪公立大院工)

高反応性原料を用いた ALD プロセスの検討

Atomic Layer Deposition using Highly Reactive Reactants and Precursors

大陽日酸¹, °清水 秀治¹

Taiyo Nippon Sanso Corp.¹, °Hideharu Shimizu¹

E-mail: shimizuh.qlc@tn-sanso.co.jp

半導体デバイスの進化によって、デバイスの3次元化や高集積化、新たな材料の利用が進んでいる。3次元構造を構築していく際に欠かせない技術の1つが原子層堆積法(ALD)を始めとする原子層プロセスである。経済的な条件も満たしながら、複雑な形状へのコンフォーマルな製膜を実現するために、様々なプリカーサの開発だけでなく、PEALDやABCサイクルなどの手法が開発されてきた。しかしながら、近年では、更なるデバイスの高集積化や新たな材料の適用を推し進めるため、プラズマを用いることなくプロセス低温化したいという要求が高まっている。これに対し、我々はプリカーサと対となる反応剤に着目し、これまで熱ALDプロセス用の酸化剤や窒化剤を検討してきた。本発表では、他グループの酸化剤や窒化剤の例も交えながら、活性種を用いたALDプロセスについて議論する。

ALDプロセスにおいて、酸化剤（または酸素源）として従来から用いられてきたものとして酸素、水蒸気、オゾンがある。我々はこれに加えて、過酸化水素蒸気の供給技術を開発し、過酸化水素蒸気を用いたALDプロセスを調査してきた。例えば、トリメチルアルミニウムと酸素源を用いたALDにおいては、過酸化水素蒸気を用いることで製膜温度を低温化できるだけでなく、水蒸気を用いるよりも絶縁性やエッチング耐性の高い Al_2O_3 膜が得られることを確認した^[1]。

窒化剤としては、アンモニアやアンモニアプラズマが従来からALDにおいて用いられてきた。過去には、モノメチルヒドラジンやターシャリーブチルヒドラジンを用いたALDの研究も実施されてきたが、薄膜中に炭素分が残るという問題があった。我々は、無水ヒドラジンの安全な供給方法を開発し、ヒドラジン蒸気を用いたALDプロセスを調査してきた。例えば、四塩化チタンと窒化源を用いたALDにおいては、ヒドラジンを用いることで製膜温度を低温化できること、低不純物で低抵抗のTiN膜が得られることを確認した^[2]。

これら活性の高い反応剤をALDに用いる際には、供給配管やチャンバーにおける分解挙動の理解も重要となる。発表では、これら分解挙動の予測・モデル化についても紹介する。また、更に活性な反応剤の供給方法として、我々は高濃度化装置や活性ガス発生装置についても開発を進めており、その進捗についても言及したい。

[1]土淵 他, 大陽日酸技報 38, 高濃度 H_2O_2 ガス供給装置(Peroxidizer[®])を用いたALD成膜プロセス

[2]村田 他, 大陽日酸技報 39, 無水ヒドラジンを用いたTiN ALD (原子層堆積法)プロセス

汎用機械学習力場による ALD precursor の反応解析と分子設計
Reaction pathway analysis and molecular design of ALD precursor using a universal
machine-learned force field
Preferred Computational Chemistry

Yusuke Asano

E-mail: yusukeasano@pfcc.co.jp

Atomic Layer Deposition (ALD) is a widely used process for forming metal thin films in semiconductor device fabrication. In this study, we analyze the surface chemical reaction mechanisms of ALD precursors using a universal machine-learned force field known as the PreFerred Potential. The insights gained from this analysis have led us to propose a method for more effective molecular design of ALD precursors.

室温原子層堆積法の開発と複合酸化物堆積への展開

Room-temperature atomic layer deposition and its application for combinative oxide deposition

山形大学院理工 〇廣瀬文彦

Yamagata University

E-mail: fhirose@yz.yamagata-u.ac.jp

原子層堆積法 (ALD) は、有機金属ガスと反応ガスの飽和反応を表面で交互に繰り返すことで、複雑形状の表面でもコンフォーマルな膜堆積が可能になる。その被覆性から、半導体製造で広く使われている。我々はこの ALD を有機 EL で活用するため、反応温度の室温化に取り組んできた。そこで、アミド系有機金属材料をプリカーサーとし、酸化剤に励起加湿アルゴンガスを用いることで堆積温度を室温化させることに成功した (図 1)。ここ 10 年で表 1 に示すように様々な金属酸化物の室温堆積に成功し、その応用を展開してきた。我々は、さらに単元素酸化物だけではなく、複合酸化物の ALD の開発にも取り組み、新物性の探索にも取り組んできた。これまで複合酸化物は、二つの酸化物膜を細かなサイクルで交互につけるバイナリー積層で作られていたが、完全固溶を目指して、我々は二つのプリカーサーを連続吸着させて競合吸着層を作り酸化する方法を見出し、室温原子層堆積を可能にしている。今回、室温原子層堆積法の開発経過を説明するとともに、ジンクチタネート複合酸化膜の事例を通して、分子吸着の制御方法について説明する。

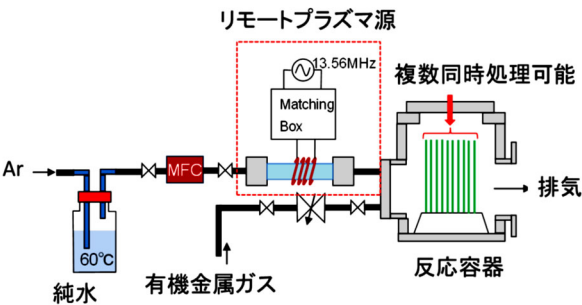


図 1 室温原子層堆積装置

表 1 室温原子層堆積が確認された膜種とその概要

膜種	原料	成長速度 (nm/cycle)	用途
SiO ₂	SiH[N(CH ₃) ₂] ₃	0.075	絶縁膜
TiO ₂	Ti[N(CH ₃) ₂] ₄	0.16	半導体膜
HfO ₂	Hf[N(CH ₃)(C ₂ H ₅)] ₄	0.26	誘電体膜
Al ₂ O ₃	Al(CH ₃) ₃	0.15	バリア膜
ZrO ₂	Zr[N(CH ₃)(C ₂ H ₅)] ₄	0.17	絶縁膜
SnO ₂	Sn(CH ₃) ₃	0.014	半導体膜
ZnO	Zn(CH ₃) ₂	0.046	半導体膜
Ga ₂ O ₃	Ga(CH ₃) ₃	0.042	誘電体膜
Nb ₂ O ₅	[(C ₂ H ₅)(CH ₃)N] ₃ Nb=NC(CH ₃) ₃	0.11	防食
Fe ₂ O ₃	(DIPPA) ₂ Fe	0.15	磁化膜

室温原子層堆積法を用いた連続吸着方式における DMZ と TMA の競合吸着反応の観察

Observation of competitive adsorption of DMZ and TMA

in sequential adsorption of room temperature atomic layer deposition

山形大¹, [○](M2)鈴木 晴登¹, (D1)宮澤 諒¹, (B4)洲崎 慧¹, 三浦 正範¹,
廣瀬 文彦¹

Yamagata Univ.¹, [○]Haruto Suzuki¹, Ryo Miyazawa¹, Satoshi Suzaki¹, Masanori Miura¹,
and Fumihiko Hirose¹

E-mail: fhirose@yz.yamagata-u.ac.jp

我々は ALD の吸着プロセスで、二種類の有機金属原料を連続吸着させることで、複合酸化膜の実現を目指している。連続吸着は各フェーズで混合層が堆積されていくため、バイレイヤー方式よりも完全固溶に近い複合膜の成膜が期待できる。Fig.1 は室温原子層堆積法(RTALD)の装置概略であり、Fig.2 に ALD 連続吸着のタイミングチャートを示す。XPS 測定より、TMA の飽和吸着表面に対して、後照射の DMZ はほとんど吸着しないことが分かった。よって本研究では最初に酸化亜鉛の原料である DMZ を飽和吸着させ、後で連続で酸化アルミニウムの原料である TMA を照射し、この TMA の照射量を変更することで Al/Zn 組成比を制御する。そのため TMA の照射量変化に対する Al/Zn 組成比の変化を XPS を用いて測定した。また具体的な反応速度定数を求めるために、多重内部反射型赤外吸収分光法(MIR-IRAS)による吸着反応の観察を行った。その結果、DMZ 飽和吸着表面に対して後照射の TMA は吸着することが分かった。XPS より、後照射 TMA の照射量の増加に対して、先照射 DMZ 由来の Zn の比率が減少していくことが分かった。これは TMA の表面エッチングを仮定している。学会ではこの表面反応について議論する。

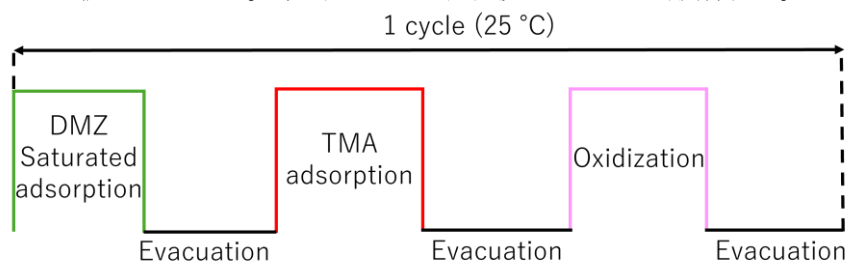


Fig.2 Timing chart of sequential adsorption.

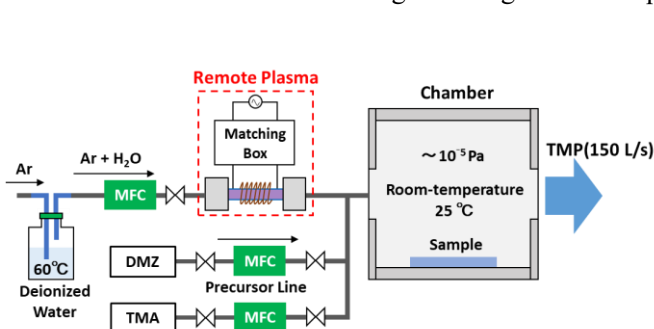


Fig.1 RTALD system for Zn-Al oxide deposition.

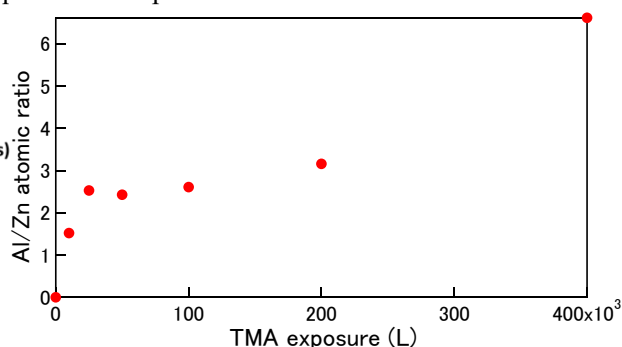


Fig. 3 Al/Zn atomic ratio of the Zn-Al oxide film as a function of the TMA exposure.

QCM による ALD 吸着・反応過程の高精度その場観察

High-precision in-situ monitoring of ALD adsorption and reaction processes using QCM

東大院工¹ 吳 宇軒¹, 山口 潤¹, 佐藤 登¹, 筑根 敦弘¹, 〇霜垣 幸浩¹

The Univ. Tokyo¹ Wu Yuxuan¹, Jun Yamaguchi¹, Noboru Sato¹, Atsuhiko Tsukune¹, 〇Yukihiro Shimogaki¹

E-mail: shimo@dpe.mm.t.u-tokyo.ac.jp

原子層堆積法 (Atomic Layer Deposition, ALD) は, 原料ガスと反応ガスを交互に供給し, 原料ガスの表面飽和吸着を利用するため, マクロ/ミクロな膜厚均一性や外乱に対する安定性に優れ, 半導体製造プロセスを中心に利用が進んでいる。上記特性を発揮する理想的な ALD プロセスの実現には, 原料ガス・反応ガスの選定と最適反応条件が必要となる。従来, 試行錯誤的に検討されてきたこれらの事項を, 吸着・脱離, 表面反応解析により得られた吸着平衡定数や各種速度定数を基に最適プロセス条件を決定することにより, 高効率的なプロセス開発を行える。そのためには, Quartz Crystal Microbalance (QCM) を活用した吸着量の in-situ 測定が非常に有用である。QCM は, クォーツクリスタル基板上に薄膜が堆積すると, その共鳴周波数がシフトすることを利用して堆積質量を実測する。周波数変化と堆積質量との関係は次に示す Sauerbrey の式により表される。

$$\Delta f = - \frac{2f_0^2}{\sqrt{\mu_q \rho_q}} \frac{\Delta m}{A}$$

ここで, f_0 は基本周波数 (我々が用いるのは 6MHz), μ_q は水晶の密度 (2.648 g/cm^3), ρ_q は水晶の剛性率 ($2.947 \times 10^{11} \text{ g/(cm} \cdot \text{s}^2)$) であり, 1 Hz の周波数変化 Δf は, 12.2 ng/cm^2 の単位面積当たりの質量変化 $\Delta m/A$ に相当する。QCM 測定における課題として, 周波数変化は堆積質量変化だけでなく温度変化にも非常に敏感であり, 特に ALD の場合はガス切り替えにより QCM の温度変化が生じ, 周波数変化に影響を与えて精密測定が困難となる。そこで, 我々は高精度測定のために, 利用するクォーツクリスタルの選定やガスの温度管理を検討した。まず, クリスタルの切断角度 (AT カット角度) を変えると, 周波数変化の温度依存性がゼロとなる温度領域が変化するため, ALD プロセス温度に適したクリスタルを使用した。温度管理のために, ガスの予熱部を設けガス切り替えによる温度変化を極力抑制させた。また, 吸着・反応速度定数の算出のためには, QCM 測定の時間分解能も重要である。従来の測定では測定点数は, 10 回/秒程度であったが, 独自のクリスタル発信器と高精度周波数カウンタを用いることにより, これを数倍高速化し, 吸着・反応過程の解析が可能となった。測定速度と精度はトレードオフの関係にあるため, 最適測定条件を検討した。これらを ALD の最も標準的なプロセスである, トリメチルアルミニウム (TMA) と水蒸気 (H_2O) を用いた Al_2O_3 -ALD の系にて検討を行ったので, 詳細を発表する。

Acknowledgements

本研究において, 水晶振動子や発信回路の設計・製作および有意義なご議論をいただいたピエゾパーツ株式会社の早川様, 楊様に深く感謝いたします。

COSMO-SAC 法による ALD 用金属錯体の蒸気圧推算

Estimation of Vapor Pressure of Metal Complex for ALD by COSMO-SAC method

東大院工 ○(P)佐藤 登, (D)呉 宇軒, (P)山口 潤, 筑根 敦弘, 霜垣 幸浩

The Univ. of Tokyo.¹, °Noboru Sato, Wu Yuxuan, Jun Yamaguchi, Atsuhiko Tsukune, and Yukihiro Shimogaki

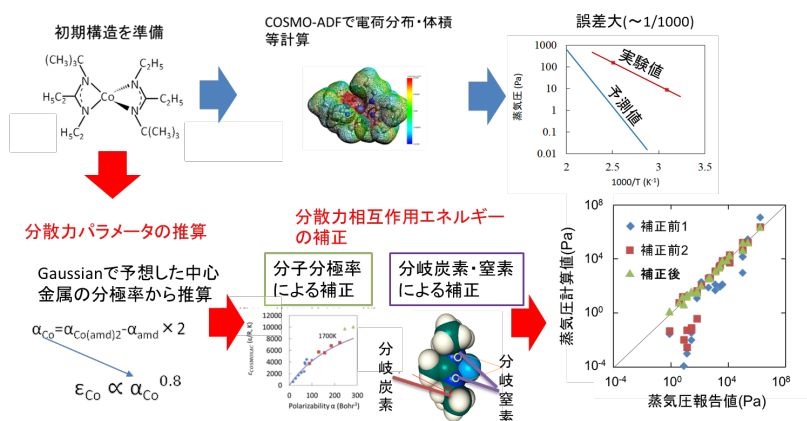
E-mail: sato@dpe.mm.t.u-tokyo.ac.jp

ALD (Atomic Layer Deposition) は複雑な 3 次元構造に対して原子層レベルで均一な膜を堆積出来るため、半導体製造プロセスにおいて注目されている。ALD では、金属原料として有機金属錯体が用いられている。ALD による製膜特性は金属錯体の種類によって大きく変わるので、様々な新規金属錯体の開発が行われている。ALD は成長表面での原料吸着飽和を利用した気相プロセスであるため、原料を高濃度供給する必要がある、そのため高い蒸気圧の金属錯体が求められる。一つの新規金属錯体の合成のためには数か月以上の開発期間を要するため、候補物質を全て合成・検討することは出来ない。蒸気圧を予測する手法の一つに、Lin らによる COSMO-SAC (Conductor-like Screening Model-Segment Activity Coefficient) 法がある。

Amsterdam Modeling Suite を用いて COSMO-SAC 法による金属錯体の蒸気圧予測を行ったところ、一部金属錯体の蒸気圧を 100~1000 倍過小に予測した。本研究では蒸気圧推定の精度を向上させるため、従来の COSMO-SAC 法に 3 つの手順を追加した。図に従来の COSMO-SAC 法 (青矢印) と改良 COSMO-SAC 法 (赤矢印) の模式図を示す。従来の COSMO-SAC 法では、金属原子の ϵ_{dsp} (分散相互作用を計算するための経験的パラメータ) がいないために分散相互作用を過少評価していた可能性があり、 ϵ_{dsp} を計算する非経験的手法を検討した。分散力は分極率と相関があることが知られているので、 ϵ_{dsp} も分極率と相関があると予測した。我々は以下の式で表される ϵ_{dsp} と分極率の相関を見出した。

$$\epsilon_{dsp} = 1035 \times \alpha^{1.34}$$

ここで α は分子内の原子の分極率である。金属錯体中の金属原子の α を計算し、この式に代入することで、それぞれの金属原子の ϵ_{dsp} を見積もった。次に、分子の分極率と分子の分岐に基づいて、分散相互作用による活性係数 (γ_{dsp}) を修正した。様々な金属錯体の実験蒸気圧と推定蒸気圧の比較を示している。本手法は蒸気圧を約 50% から 200% の精度で再現しており、金属錯体が ALD に適しているかどうかを判断するのに十分である。



原子層エッチングにおける反応素過程の評価

Surface Reactions in Atomic layer Etching Processing

阪大院工, ○唐橋 一浩, 伊藤 智子, 浜口 智志

Graduate School of Engineering, Osaka Univ. ,

○Kazuhiro Karahashi, Tomoko Ito and Satoshi Hamaguchi

E-mail: karahashi@ppl.eng.osaka-u.ac.jp

半導体デバイスの微細化にともない原子層レベルでの原子層堆積(ALD)に加えて原子層エッチング(ALE)の重要性が増している。ALE では原子層程度の厚さで自己停止する表面反応層の形成および除去過程を繰り返し行うことで原子層レベルでのエッチングを実現している。主に表面反応層として利用しているのはハロゲン化層(塩化物, フッ化物), 酸化層、および有機分子吸着層であり、これらの反応層に対して低エネルギーイオン照射や熱励起もしくは他の反応種の吸着により誘起される化学反応を利用している(図1)。このため、下地材料に対する低損傷、高選択性を実現することが可能となる。しかしながら、ALE を実現している材料は ALD に比べて著しく少なく、ALD とは異なり不純物等の影響で容易にエッチング反応が停止する。したがって、表面層における化学反応を理解することが反応種の探索およびプロセス開発には不可欠である。さらに、異方性エッチングを可能とする指向性励起種の探索も重要な課題となっている。低エネルギー電子・イオン等に誘起される表面反応は運動エネルギーに依存し基板材料に対する損傷を引き起こすため、エネルギー制御した詳細な反応の評価が必要となる。我々は、以前より反応種を独立に制御し表面に照射するビーム実験を用いて反応確率および反応生成物等を直接測定することで表面反応を評価し、その有効性を示してきた(図2)。

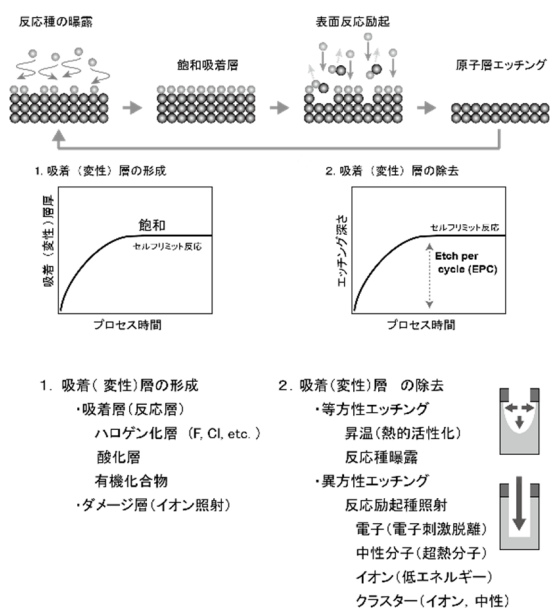


図1 原子層エッチング (ALE) プロセス

現在、量子化学計算等により反応性分子と材料表面に関するデータが蓄積されつつあるが、その精度はまだ十分とは言えない。今後、多様な材料に対するエッチングプロセス開発の容易にするためには、実験的にデータを効率的に取得するシステムを構築することで、系統的に表面反応に関するデータを蓄積することが望まれる。

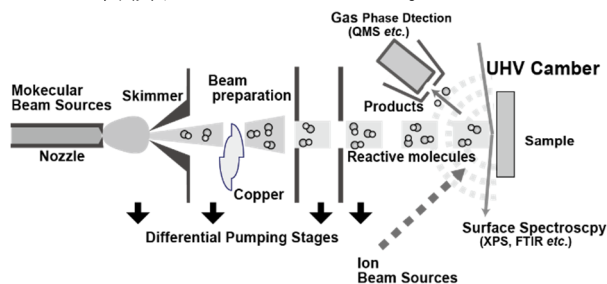


図2 ビーム実験

ヘキサフルオロアセチルアセトンと酸素プラズマの交互サイクルを用いた銅の原子層エッチング

Atomic Layer Etching of Cu Using Alternating Cycles of Hexafluoroacetylacetone and O₂ Plasma

日立ハイテク¹, Colorado School of Mines², °中谷 侑亮¹, Andrew Kaye², 園田 靖¹, 田中 基裕¹, 前田 賢治¹, Sumit Agarwal²

Hitachi High-Tech Corporation¹, Colorado School of Mines², °Yusuke Nakatani¹, Andrew Kaye², Yasushi Sonoda¹, Motohiro Tanaka¹, Kenji Maeda¹, and Sumit Agarwal²

E-mail: yusuke.nakatani.dy@hitachi-hightech.com

原子層エッチング(ALE)は、Cu や Co のような配線金属を含む半導体デバイス製造において重要な技術である。これまでに、ヘキサフルオロアセチルアセトン (hfacH) と O₂ または O₃ を 275 °C でサイクルする Cu の熱 ALE が報告されている。hfacH は Cu を自発的にエッチングすることができず、Cu 表面の過酸化が必要であることも示されている。本発表では、hfacH と O₂/Ar プラズマのサイクルを用いた、150 °Cというさらなる低温での Cu の ALE について報告する。

ALE プロセスは、*in situ* 反射吸収赤外分光法 (RAIRS) を用いてモニターした。ALE に先立ち、300 °Cに保持した Cu ウェハを H₂ プラズマを用いて還元し、表面の自然酸化膜、炭酸塩、および吸着炭化水素を除去した。最初に、還元された Cu 表面および O₂ プラズマによる再酸化後の表面のそれぞれの hfacH との反応性を 150 °Cで試験した。いずれの場合も、赤外スペクトルにおいて、CF₃ (1240cm⁻¹)、C=C、C=O (1645cm⁻¹) 振動に関連する吸収バンドが観測された。還元された Cu 表面では、C=C と C=O のバンドは非常に弱く、hfacH の分解が示唆された。hfacH は Cu を自発的にエッチングしないので、これは hfacH の吸着には酸化された Cu 表面が必要であることを示している。また赤外スペクトルからは、ALE ウィンドウが非常に狭いことも示されており、エッチングレートは 125 °Cおよび 150 °Cでのみ測定できた。125 °Cより低い温度では、hfacH は CuO_x 表面に吸着しているが、エッチング生成物である Cu(hfac)₂ および H₂O の形成には温度が不十分な可能性が高いことが赤外スペクトルより分かった。したがって、続く O₂ プラズマのハーフサイクルでは、単に hfac リガンドを除去し、表面をさらに酸化させるだけであったため、ALE が進行しなかった。150 °Cでは、表面の酸化および Cu(hfac)₂、H₂O として表面から CuO_x を除去するバランスが確立される。125 °Cと 150 °Cでの 1 サイクルあたりのエッチング量は、それぞれ 0.1 Å および 0.7 Å であった。150 °Cより高温では、激しい酸化により Cu 表面粗さが増大していることが原子間力顕微鏡で観測され、エリプソメトリーでは Cu 膜厚を測定できないことが分かった。

リモート酸素プラズマによる SiO₂ 上の単層グラフェンの選択的除去

Selective removal of single-layer graphene on SiO₂ by remote oxygen plasma



名古屋大工¹, 名大低温プラズマ², 胡 留剛¹, 石川 健治², Thi-Thuy-Nga Nguyen², 蕭世男², 堀 勝²

Nagoya Univ.¹, Nagoya Univ. Ctr. Low Temp. Plasma², Liugang Hu¹, K. Ishikawa², Thi-Thuy-Nga Nguyen², S-N. Hsiao², and M. Hori²

E-mail: hu.liugang.k5@s.mail.nagoya-u.ac.jp

はじめに グラフェンベースのトランジスタの主な利点は室温での容易な操作と、低電圧での高感度にある。単層グラフェンにはゼロバンドギャップと高いキャリア移動度があり、電場をかけてオンとオフに切り替えるのが難しい。しかし、二層グラフェン (DLG) のバンドギャップは電場をかけることで 0 から 0.25 eV まで変化する [1]。それで、SLG をチャンネルに使用でき、DLG をソース/ドレインに利用できる。したがって、グラフェン電子デバイスの製造では層の正確な制御、最小限のダメージと SLG の選択的除去が不可欠。この研究は酸素ラジカルの試料表面との反応が、ラマン分光法、原子間力顕微鏡 (AFM)、および X 線光電子分光法 (XPS) によって評価された。

実験 リモート酸素プラズマは、流れる酸素ガスを使用してマイクロ波 (2.45 GHz) キャビティで生成され、流量は 2.5 sccm、圧力は約 5 Pa。反射電力を 1.5 W 未満に抑えた。マイクロ波電力は 50 W で、プラズマを生成し、放電から試料位置までの距離は 290 mm。総照射時間は、0 から 120 分まで制御された。化学気相成長されたグラフェン (EM ジャパン、G-45R-4) が使用された。この準備では、成長直後のグラフェンシートがコーティングされたポリマーに転写され、その後 SiO₂ 膜に転写され、SiO₂/Si 基板上に DLG が形成された。試料サイズは 5×5 mm²。

結果と考察 図 1(a) の AFM 像とラインプロファイルにより、SLG 領域は 120 分の酸素ラジカルの照射によりなくなった。約 0.7 nm の段差の減少が確認された。図 1(b) の SLG 領域の 2D バンドの消失と DLG 領域の 2D バンドの存在により、SLG の選択的除去は酸素ラジカル照射時間の増加により成功した。最後に、XPS などの結果を加えて、グラフェン表面の欠陥形成とラジカルとの反応メカニズムについて議論する。

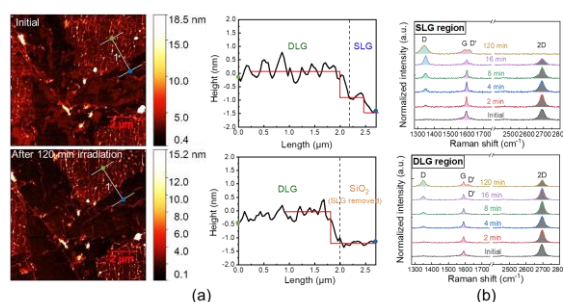


Fig.1 (a) 照射前後同じ位置での AFM 像とラインプロファイル。(b) 照射中の SLG と DLG におけるラマンスペクトル。 [1] Y. Zhang *et al.*, Nature **459**, 820-823 (2009)

成長空間における RF プラズマの評価と β -Ga₂O₃ 薄膜の ALD 成長

Evaluation of RF plasma in chamber and ALD growth of β -Ga₂O₃ thin films

大阪公大工¹ °阿多 翔大¹, 市川 龍斗¹, 内藤 圭吾¹, 吉村 武¹, 藤村 紀文¹

Osaka Metropolitan Univ.¹, °S. Ata¹, R. Ichikawa¹, N. Keigo¹, T. Yoshimura¹, N. Fujimura¹

E-mail : fujim@omu.ac.jp

【はじめに】本研究室では、ALD 成長中に酸素や窒素のプラズマを照射させることで、H₂O を用いた ALD 成長が困難とされている β -Ga₂O₃ の成長を可能にし、さらにアクセプタである窒素をドーピングすることを目的とした ALD 装置の開発を行っている。本装置は、チャンバー全域に放電領域が広がらないように、基板近傍の制限された極めて狭い空間(約 130 cm³)に ALD 原料や酸化源である H₂O の導入が可能である。そのため、研究室に現有の ALD 装置 (GEMStar XT-R™: 成長チャンバー容積約 11200 cm³) のおよそ 1/86 の空間内で ALD とプラズマ放電が可能である(Fig.1)。今回は、成長空間における窒素および酸素プラズマの発光分析を行い、そのプラズマの基板に対する照射効果に関して検討を行った。



Fig. 1 RF plasma in ALD area.

【実験方法及び結果】チャンバー内圧力を 239 Pa、RF 電力を 20 W の条件で成長空間を少しだけ露出させ、その空間内の発光分析を行った結果を Fig.2 に示す。このスペクトルは、通常の RF 放電によって生じる窒素プラズマで確認される原子状窒素ラジカルの発光とは全く異なり、大気圧窒素プラズマで報告されている分子状窒素活性種に起因するものであると考えられる。分子状窒素活性種 (N₂ 2nd positive system) は室温で Si 窒化が可能な極めて反応性の高い活性種であるため、 β -Ga₂O₃ の表面窒化や ALD 成長 (窒素ドーピング) においても有用であることが期待できる。また、RF 電力を変化させて N₂ 2^{ps} (337nm) の強度をプロットした結果を Fig.3 に示す。RF パワーの増加に従って発光強度は増加している。RF 電力を 10 W、チャンバー内圧力を 150 Pa とした RF プラズマを(100)基板に照射した。この時の Ga₂O₃ 基板表面の AFM 画像を Figure 4 に示す。AFM 画像から得られる RMS は 0.24 nm であった。これは極めて平坦な表面となっており、N₂ 2^{ps} が表面平坦性の向上に寄与していると考えられる。当日は、面方位の異なる基板上へのプラズマ照射効果とともにプラズマ ALD の結果と含めて報告する。

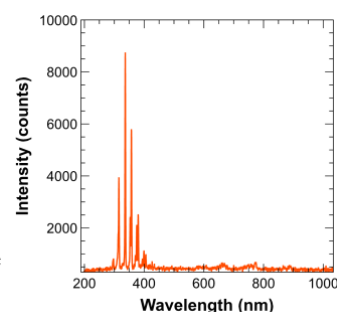


Fig.2 OES of the RF plasma

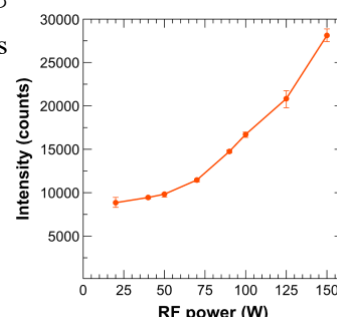


Fig. 3 RF power dependence for the OES intensity of N₂ 2nd ps.

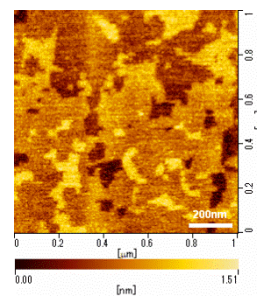


Fig. 4 AFM image of Ga₂O₃ substrates after RF plasma irradiation.

【謝辞】本研究は、総務省「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト (JPMI00316)」、JST CREST(JPMJCR20C3)および JSPS 科研費 19H05618 の助成を受けたものである。

【参考文献】

- [1] M. Higashiwaki, et al., Phys. Status Solidi A 211, 21 (2014).
- [2] L. Dong et al., J. Alloys Compd. 712, 379 (2017).
- [3] R. Hayakawa et al., Thin Solid Films, 506-507, 423 (2006).

GaCp*を用いた多結晶 GaN 薄膜の原子層堆積

Atomic layer deposition of polycrystalline GaN thin films using GaCp*

高純度化学研 °水谷 文一, 高橋 伸尚

Kojundo Chem. Lab., °Fumikazu Mizutani, Nobutaka Takahashi

E-mail: mizutani.fumi@kojundo.co.jp

窒化ガリウム (GaN) は、次世代のパワーデバイス向けの材料として注目されている。原子層堆積 (ALD) は、原子レベルの膜厚制御が可能で、無欠陥の薄膜を堆積できる技術であり、様々な GaN 薄膜の ALD が報告されている。しかしながら、広く用いられている Ga プリカーサのトリメチルガリウム (TMG) あるいはトリエチルガリウム (TEG) による ALD の場合、結晶性の GaN 薄膜を得るには、ALD を高温で行うか、ALD 後に高温アニールを行うなどの熱処理が必要であった。また、TMG や TEG を用いる場合は、強い Ga-C 結合を持つため、C 不純物の混入の懸念もある。本報告では、プリカーサとして、TMG や TEG のかわりに C 混入の低減が期待できる GaCp* (ペンタメチルシクロペンタジエニルガリウム ; $\text{GaC}_5(\text{CH}_3)_5$) を用いて、成長温度 200 °C で ALD を行った結果について報告する。

GaN 薄膜の堆積は GaCp*の配位子を脱離させるための NH_3 と H_2 の混合ガスのプラズマと窒化のための N_2 プラズマを用いた ABC 型の ALD 方法で行った。ALD は、自然酸化膜付の 150 mm シリコンウエハ上に、 $\text{GaCp}^* \rightarrow \text{NH}_3/\text{H}_2$ プラズマ $\rightarrow \text{N}_2$ プラズマを 1 サイクルとして、成長温度 200 °C で行った (pAHpN)。なお、プラズマによる自然酸化膜の増膜を抑制するため、同じ GaCp*を用いて、約 0.4 nm の Ga_2O_3 膜を堆積した上に GaN 膜を形成している。

GaCp* : 0.2 s, NH_3/H_2 プラズマ : 15 s, N_2 プラズマ : 90 s で飽和が確認され、成長速度は約 0.043 nm/cycle であった。比較のため、反応剤として N_2 プラズマのみ (pN) および NH_3/H_2 プラズマのみ (pAH) を用いた ALD を行ったところ、成長速度はそれぞれ、約 0.022 nm/cycle および約 0.009 nm/cycle とかなり小さくなっていった。ALD サイクル数と GaN 膜厚の関係を図 1 に示す。pAHpN の ALD では直線性が非常に良いが、pN や pAH の ALD でも直線性はほとんど悪くなっていない。しかしながら、SIMS によって分析したところ、C 不純物の量は、pAHpN > pN であった。

図 2 に pAHpN で 300 サイクルの ALD を行ったサンプルの断面 TEM 像を示す。試料は一旦大気さらされているので表面は酸化されてしまっているが、内部は多結晶であることがわかる。

このように、 $\text{GaCp}^* \rightarrow \text{NH}_3/\text{H}_2$ プラズマ $\rightarrow \text{N}_2$ プラズマを 1 サイクルとする ALD により、成長温度 200 °C の低温でも、アニールなどの高温熱処理をしなくても多結晶の GaN 膜が形成できることがわかった。

本研究の原子層堆積は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業 (課題番号 : JPMXP1223AT0273) の支援を受けた。

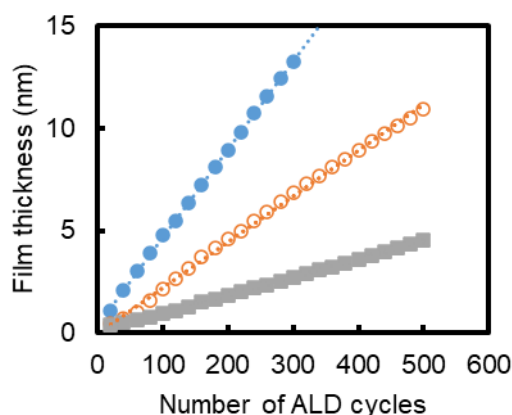


Fig. 1. GaN film thickness as a function of number of ALD cycles.
pAHpN: ●, pN: ○, pAH: ■

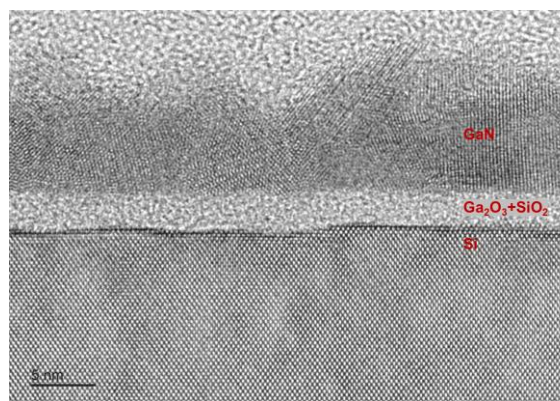


Fig. 2. Cross-sectional TEM image for GaN film grown by 300 cycles of ALD using pAHpN process.

ALD と ALE を併用した高選択性 Co 薄膜形成プロセス

Highly-Selective Co Thin Film Formation Process Utilizing Combined ALD and ALE

東大院工¹ ○山口 潤¹, 佐藤 登¹, 筑根 敦弘¹, 百瀬 健¹, 霜垣 幸浩¹

The Univ. Tokyo¹ ○Jun Yamaguchi¹, Noboru Sato¹, Atsuhiko Tsukune¹, Takeshi Momose¹, Yukihiro Shimogaki¹

E-mail: yamaguchi@dpe.mm.t.u-tokyo.ac.jp

ULSI ロジックデバイスの微細化に伴い, Cu 配線層において抵抗上昇による信号遅延や消費電力の増加, エレクトロマイグレーション(EM)や絶縁膜経時破壊(TDDDB)による信頼性劣化が問題となっている。これらの諸課題に対し, 選択成長プロセスを活用した様々な材料・構造の新規開発が進められている。例えば図 1 に示すような, (1)選択 Co キャップ形成(MoM; Metal on Metal)¹, (2)選択 TaN バリア形成(MoD; Metal on Dielectric)², (3) Fully Aligned Via 形成(DoD; Dielectric on Dielectric)³などが研究開発されている。(1)の Co キャップは Cu 配線/絶縁キャップ界面の密着性を改善し EM 耐性を向上させる。(2)の選択バリアは抵抗率の高い TaN をビア底部に堆積させないことによりビア抵抗を低減させる。(3)の FAV はエッチング選択比の高い絶縁膜を形成しビアホールのみスアライメントによる TDDDB を抑制させる。このように選択成長はデバイス性能向上をもたらす, 最先端デバイスにおける重要技術の一つである。

本発表では上記のうち, (1)の Co キャップの MoM 選択成長について報告する。Co キャップは, 配線間リーク電流が生じないように, 低誘電率層間絶縁膜(low-k)上に形成させることなく Cu 配線上のみに選択的に形成させる必要がある。14 nm ノード以降現在に至るまで, 選択 CVD を用いた Co キャップ形成が主流であるが, 今後のさらなる微細化を見据えたプロセススケーラビリティ確保のために選択性向上は重要である。そこで我々は, 図 2 に示すように, 下地による反応性差異を活用した選択 ALD と, 非成長領域における初期核除去を行う ALE を併用した高選択性 Co キャップ形成プロセスについて検討したので報告する。

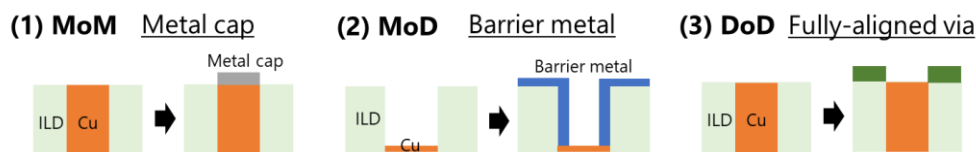


図 1. ULSI 配線層における選択成長技術の応用例

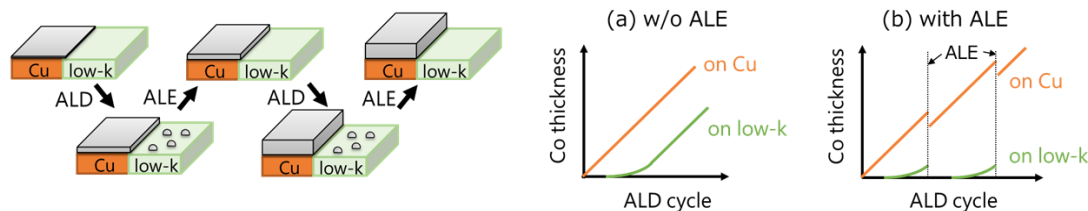


図 2. ALD と ALE を併用した Co 選択成長プロセス

[1] C.-C. Yang *et al.*, *IEEE Electron Device Lett.* **31** (2010) 728.

[2] S. You *et al.*, *2021 IEEE International Interconnect Technology Conference* (2021) S2-5.

[3] H.P. Chen *et al.*, *2021 IEEE International Electron Devices Meeting* (2021) 22-1.

Co-ALD 初期成長過程の反射光分光その場観察

In-situ observation on the initial growth of Co-ALD by optical reflectance monitoring

東大院工 木村俊介, 吉田幸希, [○]玉置直樹, 山口潤, 佐藤登, 筑根敦弘, 百瀬健, 霜垣幸浩

The University of Tokyo, S. Kimura, K. Yoshida, [○]N. Tamaoki, J. Yamaguchi, N. Sato, A. Tsukune,
and Y. Shimogaki

E-mail: tamaoki@dpe.mm.t.u-tokyo.ac.jp

微細化が進む半導体製造プロセスにおいて、原子層レベルの膜厚制御と本質的に合わせずれない自己整合パターンニングを実現する AS-ALD (Area Selective Atomic Layer Deposition) 技術が注目されている。AS-ALD は原料分子の吸着エネルギー差を利用して選択面にのみ製膜を行うが、現実的には、ある有限の遅延時間（インキュベーション時間）を経ると非選択面でも製膜が開始されてしまう。選択面と非選択面でのインキュベーション時間の差を最大化する表面処理やプロセス条件の探索が重要であり、製膜初期過程のその場観察は、この探索を飛躍的に効率化することができる。

今回、CCTBA (Cobalt Carbonyl Tertiary-Butyl Acetylene) 原料を用いて SiO₂ 上に Co 薄膜を形成する ALD の初期過程について、反射光分光その場観察手法で評価した。Co の AS-ALD は Cu 配線の拡散や EM を抑制する Cap 層の形成手法として期待されている。①APM 洗浄 ②EtOH 洗浄 ③HMDS 撥水化処理 の3種類の異なる製膜前処理を施した後に Co-ALD を行い、基板に対して垂直入射させた白色光の波長 650nm での反射率変化を測定した（図1）。ALD 条件は全て同一（基板温度 100℃、CCTBA 供給 2s /N₂ パージ 3s /H₂ 供給 10s /N₂ パージ 3s）とした。製膜開始直後から緩やかに反射率が低下し始め、極小値を経た後に再び反射率が増加する傾向が得られた。反射率低下のタイミングが初期核発生に対応し、初期核が成長して連続膜となるところで極小値をとると考えている。初期核構造を想定した波動光学シミュレーションから、光反射率実測値を製膜量に換算した結果を図2に示した。表面を-OH 終端する APM 処理で初期核発生が促進される一方、疎水化表面ではインキュベーション時間が長くなり、その後の GPC も小さくなることがわかった。反射光分光その場測定により、前処理が製膜初期過程に与える影響を定量化することができた。

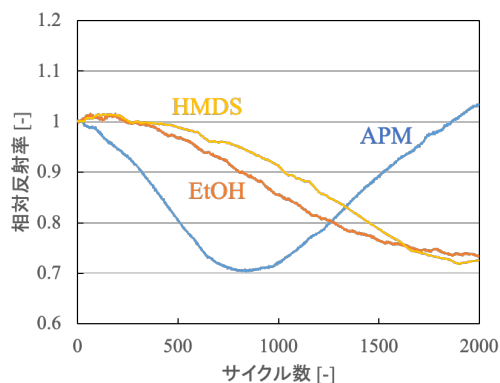


図1 製膜中の光反射率変化（波長 650nm）

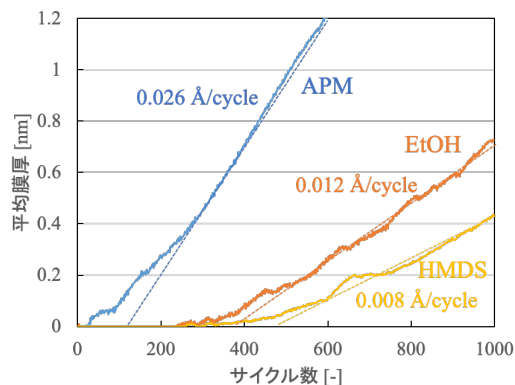


図2 製膜初期の製膜量変化

HfO₂/ZrO₂ 界面が HfO₂/ZrO₂ ナノラミネート薄膜の 強誘電相出現に与える影響の考察

Consideration of the effect of HfO₂/ZrO₂ interfaces on ferroelectric phase formation in HfO₂/ZrO₂ nanolaminate thin films

東大院新領域 物質系専攻 °女屋崇, 櫻川裕大, 高久理名, 喜多浩之

Dept. of Adv. Mater. Sci., The Univ. of Tokyo °T. Onaya, Y. Sakuragawa, R. Takahisa, and K. Kita

E-mail: onaya@edu.k.u-tokyo.ac.jp

【はじめに】強誘電体 Hf_xZr_{1-x}O₂ (HZO) 膜は薄膜化(<10 nm)及び原子層堆積(ALD)法による成膜が可能であることから、3次元集積強誘電体デバイスへの応用が期待されている。この HZO の強誘電相は準安定な直方晶(O)相であり、優れた強誘電性を得るためには HZO 膜の結晶相の制御が重要である[1]。一般に HZO 膜として、ALD 法により HfO₂ と ZrO₂ 膜を交互に成膜した HfO₂/ZrO₂ ナノラミネート膜が用いられている[2]。一方、我々はこれまでに Hf と Zr が共に含まれる Hf/Zr カクテル ALD 原料を用いることで HZO 固溶体膜を形成した[1]。本研究では、これら HZO 膜の形成手法の違いが、強誘電相である O 相の形成に及ぼす効果について議論する。

【実験条件】まず、TiN 基板上へ H₂O を酸化剤とした ALD 法により膜厚 10 nm の HfO₂/ZrO₂ ナノラミネート及び HZO 固溶体膜を形成した。その後、600°C で 1 分間、N₂ 雰囲気中で急速加熱処理した。HfO₂/ZrO₂ ナノラミネート膜は、HfO₂ 及び ZrO₂ の ALD 原料として各々 Hf[N(C₂H₅)CH₃]₄ 及び Zr[N(C₂H₅)CH₃]₄ を用いてこれらを交互に成膜することで形成した。また、HfO₂/ZrO₂ の比を一定にして ALD サイクル数を 1/1 から 60/60 に変えることで、各層の膜厚を 0.08 から 5 nm に調整した。HZO 固溶体膜の成膜には、Hf と Zr が 1:1 の割合で含まれる (Hf/Zr)[N(C₂H₅)CH₃]₄ カクテル原料を用いた。HZO 膜の結晶構造は斜方 X 線回折(GIXRD)により評価した。

【結果及び考察】Fig. 1 に、HfO₂/ZrO₂ ナノラミネート及び HZO 固溶体膜の GIXRD パターンを示す。また Fig. 2 に、HfO₂/ZrO₂ ナノラミネート膜の各層の膜厚と 30.7°付近に位置する O、正方晶(T)及び立方晶(C)相のピーク面積の関係を示す。ここで、O、T 及び C 相は格子定数が近いのでピークの分離が困難である。HfO₂/ZrO₂=1/1 試料は、HZO 固溶体膜と同等の O/T/C ピーク面積を示した。これは、HfO₂ 及び ZrO₂ の成膜レートが 0.08 nm/cycle のため、HfO₂/ZrO₂=1/1 試料は HfO₂ と ZrO₂ が固溶したためであると考えられる。各層の膜厚が各々 0.5 及び 1 nm の HfO₂/ZrO₂=6/6 及び 12/12 試料では、HZO 固溶体膜と比べて O/T/C ピーク面積が増加した。一方、各層の膜厚を更に増加させると O/T/C ピーク面積が減少した。HfO₂/ZrO₂ ナノラミネート膜は熱処理過程で層構造を維持したまま結晶化が進むことが報告されている[2]。ここで、ZrO₂ は HfO₂ よりも結晶化開始温度が低く、O/T/C 相を優先的に形成することから、熱処理過程で ZrO₂ 層内部で核生成が生じ、HfO₂/ZrO₂ ナノラミネート膜全体の結晶化が進んだと考えられる[3]。従って、ZrO₂ が層として形成された HfO₂/ZrO₂=6/6 及び 12/12 試料では、HfO₂/ZrO₂ 界面が多数形成されたことで O/T/C ピーク面積が増大したと結論した。

以上より、HfO₂/ZrO₂ 界面に着目してナノラミネート膜を設計することで、強誘電相を含む O/T/C 相の形成を促進できることが分かった。

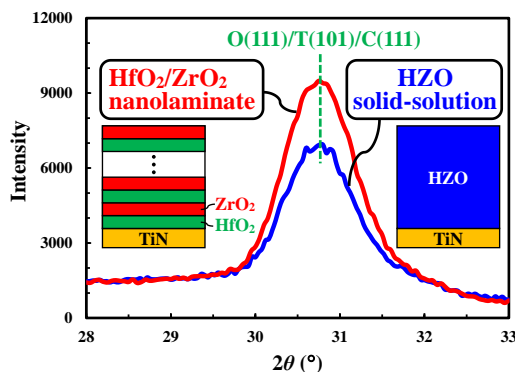


Fig. 1 GIXRD patterns of HfO₂/ZrO₂ nanolaminate and HZO solid-solution films.

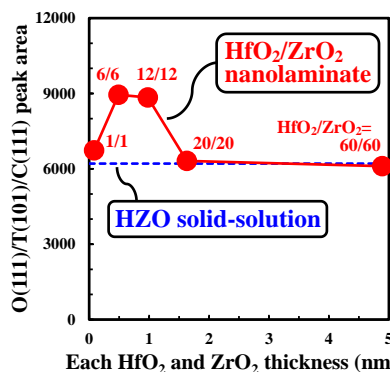


Fig. 2 O(111)/T(101)/C(111) peak areas of GIXRD patterns.

【謝辞】本研究の一部は、JSPS 科研費(JP24K17304)及び文科省卓越研究員事業(JPMXS0320220213)によって支援されている。また、本研究の一部は阪大接合研共同研究員制度の助成を受けて行った。

[1] T. Onaya et al., *APL Mater.* **9**, 031111 (2021).

[2] M. H. Park et al., *Appl. Phys. Rev.* **6**, 041403 (2019).

[3] T. Onaya et al., *APL Mater.* **7**, 061107 (2019).

ALD 法で作製した Ga_2O_3 薄膜の成長機構

Growth mechanism of ALD- Ga_2O_3 thin films

阪大院工 °市川 龍斗, 吉村 武, 藤村 紀文

Osaka Metro. Univ.

°R. Ichikawa, T. Yoshimura, N. Fujimura

E-mail: fujim@omu.ac.jp

【はじめに】酸化ガリウム ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) は、大きなバンドギャップを持つことから、パワーデバイスや紫外線素子等への応用が期待されている。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の成長には、ミスト CVD、MOCVD、PLD 等の手法があるが、原子レベルの膜厚制御が可能な原子層堆積 (ALD) 法が注目されている [1-3]。ALD 法で Ga_2O_3 薄膜を作製する際、Ga 用プリカーサとして主として TMG が利用されており、酸化源には、 H_2O ではなく酸素プラズマが多く、段差被覆性に優れた H_2O を用いた報告例は少ない。これは、 H_2O が側鎖と反応してもメチル基が除去されずに不動態化を引き起こすからと考えられている [4]。本研究室では基板近傍の極めて狭い空間内で製膜することができる ALD 装置を開発した。この装置において、酸化源に H_2O を用いて HfO_2 薄膜を作製し、 H_2O の供給量を制御することで、プリカーサのパルス時間を短くした ALD 成長が可能であることを報告した [5]。今回は、 H_2O による側鎖の不動態化を抑え酸化を促進するために、製膜温度、酸化源の供給時間や圧力そして排気時間・速度を制御して Ga_2O_3 薄膜を作製することで、 Ga_2O_3 薄膜の成長機構について検討を行った。

【実験方法および結果】(100) Si 基板上に Ga_2O_3 薄膜を熱 ALD 法で作製した。Ga 用プリカーサには TMG、酸化源には H_2O を用いた。作製した試料は酸素雰囲気、 800°C で結晶化アニールを行った。様々な成長実験を行ったがここでは H_2O 供給時間依存性に関して報告する。 H_2O 供給のパルス幅を変化させて作製した Ga_2O_3 薄膜の結晶構造について GIXRD 測定を用いて評価した結果を Fig.1 に示す。 H_2O パルス時間が 16 ms 以上の時に Ga_2O_3 薄膜が成長し、パルス時間の増加に伴い結晶性が向上している。CVD 法において、TMG と H_2O を用いて製膜する際に H_2O のモル比が高いとき Ga_2O_3 薄膜が優先的に形成することが報告されている [6]。講演では、製膜圧力や排気時のガスの供給量や排気速度を変化させて製膜した結果も併せて報告し、ALD 法における成長が困難だといわれている Ga_2O_3 薄膜の H_2O を用いた成長機構について議論する。

【謝辞】本研究は、総務省「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト (JPMI00316)」の助成を受けたものである。

【参考文献】

[1] D. Shinohara, et al., Appl. Phys. Lett., 47, 7311 (2008). [2] G. A. Battiston, et al., Thin Solid Films, 279, 115 (1996). [3] M. Orita et al., Appl. Phys. Lett., 77, 4166 (2000). [4] D. J. Comstock et al., Chem. Mater., 24, 4011-4018 (2012). [5] 市川ら, 第 70 回春季応用物理学会, 17p-PA06-11. [6] C. Zhang et al., 38, Mater. Today Commun., 108054 (2024).

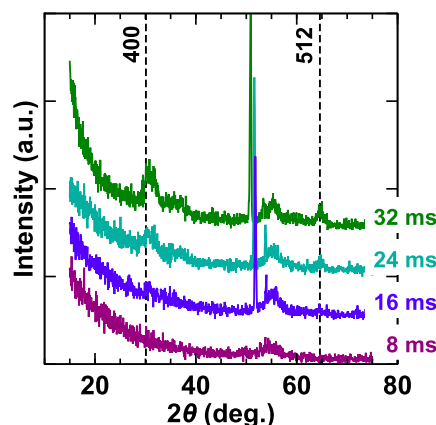


Fig.1 GIXRD patterns of Ga_2O_3 thin films deposited at various H_2O pulse time

β -Ga₂O₃ 上の HfO₂ 系強誘電体薄膜の ALD 成長

ALD growth of HfO₂-based ferroelectric thin films on β -Ga₂O₃

大阪公立大院工 °古川 勝裕, 市川 龍斗, 阿多 翔大, 吉村 武, 藤村 紀文

Osaka Metro. Univ., °K. Furukawa, R. Ichikawa, S. Ata, T. Yoshimura, N. Fujimura

E-mail: fujim@omu.ac.jp

【はじめに】Ga₂O₃ は、4.7–4.9 eV の大きなバンドギャップを有し、8 MV/cm もの高い絶縁破壊電界、優れたバリカの性能指数を示すことから、次世代パワー半導体として注目されている [1]。また、Hf 系強誘電体は、3 nm 程度の極薄膜で強誘電性を示すことから[2]、高集積強誘電体ゲートトランジスタ(FeFET)への応用が期待されている。HfO₂ は準安定相である Orthorhombic (O) 相のみが強誘電性を示すため、Y や Si などの不純物ドーピング、酸素欠陥の形成、キャップアニールといった手法によって O 相の安定化が行われている [3–5]。本研究室ではこれまで、微小空間で熱 ALD 法を行うことによって、少量の原料供給による ALD mode での製膜および Si 基板上への Non-doped HfO₂ の O 相形成に成功している[6]。今回は、同様の微小空間 ALD 装置を用いて Si 上および Ga₂O₃ 上に HfO₂ 極薄膜を作製した結果を報告する。

【実験方法および結果】HfO₂ 薄膜を、Si および、(100), (001), (-201) β -Ga₂O₃ 基板上に、基板温度 345°C の熱 ALD 法で作製した。Hf 用原料には TEMA₂Hf、酸化源には H₂O を用いた。成長後、N₂ 雰囲気中で 800 °C の結晶化アニールを行った。結晶性は GIXRD 測定によって調べた。Si 上に作製した HfO₂ の膜厚および O 相のピーク強度には面内分布が存在した。これは微小空間の基板直上で原料の導入と排気を行ったことで酸素欠損の生じやすい箇所が存在するためであると考えられる。作製した試料の同一箇所で GIXRD 測定を行った結果を Fig. 1 に示す。Si 上では明瞭な O/T 相が確認できるものの Ga₂O₃ 上では、HfO₂ の結晶相が確認できない。Ga₂O₃ 基板上の試料に 600–800 °C 窒素中でアニールを施した場合の GIXRD 測定結果を Fig. 2 に示す。(-201)基板のみわずかに O 相の形成がみられる。当日は Si 上と Ga₂O₃ 上への HfO₂ 成長プロセスの層に関して詳細に報告する。

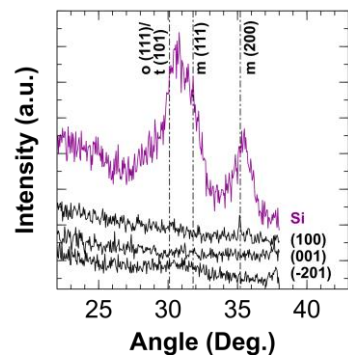


Fig. 1 GIXRD patterns of HfO₂ on (100), (001), (-201) Ga₂O₃, and Si substrate.

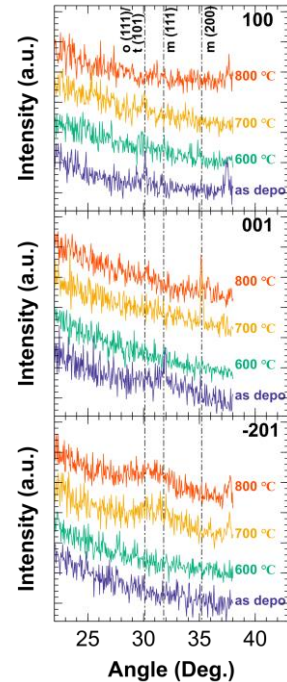


Fig. 2 GIXRD patterns of HfO₂ on (100), (001), (-201) Ga₂O₃, substrate as a function of Annealing temperatures.

【謝辞】本研究は、総務省「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト (JPMI00316)」、JST CREST(JPMJCR20C3)および JSPS 科研費 19H05618 の助成を受けたものである。

【参考文献】[1] M. Higashiwaki et al., 表面科学, **35**, 102 (2014). [2] M. E. McBriarty et al., *Phys. Status Solidi B* **257**, 1900285 (2020). [3] L. Xu, et al., *J. Appl. Phys.* **122**, 124104 (2017). [4] Y. Zhou, et al., *Comput. Mater. Sci.* **167**, 143-150 (2019). [5] K. Takada, et al., *Adv. Electron. Mater.* **7**, 2100151 (2021). [6] 市川ら, 第 71 回春季応用物理学会, 25p-1BJ-3.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 異分野に広がる界面ナノ電子化学 ～最先端半導体からバイオサイエンスまで～

[18p-C41-1~8] 異分野に広がる界面ナノ電子化学 ～最先端半導体からバイオサイエンスまで～

シンポジウムスポンサー



SCREEN

[18p-C41-1]

洗浄乾燥時の微細構造倒壊メカニズム

○小出 辰彦¹ (1.キオクシア)

[18p-C41-2]

表面極近傍に移動するナノ粒子の三次元挙動観測

○カチョーニルンルアン パナート¹ (1.九工大)

[18p-C41-3]

枚葉スピン式洗浄のリンス処理における薬液排出過程の三次元数値計算

○神保 佳典¹、真田 俊之¹ (1.静大工)

[18p-C41-4]

多彩な液体と気体のインタラクションで見るバイオ界面

○田中 信行¹ (1.理研)

[18p-C41-5]

nmサイズの狭所内SiO₂ エッチングにおけるシリコンの疎水性及び表面電位の効果

○宮川 彰平¹、上田 大²、塙 洋祐¹、北川 広明²、藤原 直澄²、尾辻 正幸¹、高橋 弘明²、深見 一弘³ (1.株式会社SCREENホールディングス、2.株式会社SCREENセミコンダクターソリューションズ、3.京大院工)

[18p-C41-6]

FM-AFMによるナノスコピックなぬれのその場観察

○荒木 優希¹、湊 丈俊²、新井 豊子¹ (1.金沢大、2.分子研)

[18p-C41-7]

純水噴霧の誘導帯電メカニズムの解析

○渡部 一哲¹、伊藤 康生¹、森 竜雄¹、一野 祐亮¹、田岡 紀之¹、清家 善之¹ (1.愛知工大)

[18p-C41-8]

二流体スプレー時の飛行液滴の電荷特性とSiO₂ウェハの表面電位の関係性

○(M1)伊藤 康生¹、渡辺 一哲¹、森 竜雄¹、一野 祐亮¹、田岡 紀之¹、清家 善之¹ (1.愛知工大)

洗浄乾燥時の微細構造倒壊メカニズム

Mechanism of Nano-structures Stiction during drying after WET cleaning

キオクシア, 小出 辰彦

KIOXIA Corporation, Tatsuhiko Koide

E-mail: tatsuhiko.koide@kioxia.com

半導体デバイスの高集積化・高性能化に伴い、非常に微細な構造を作りこむ必要がある。この微細構造を形成するために薬液による犠牲層剥離やパーティクル除去のための洗浄をする。その際、この微細構造を乾燥させるステップがあり、この時に毛細管現象による力が発生し、微細構造をたわませる。たわんだ先に隣の微細構造がある場合、お互いが接触して離れなくなることがある。これをパターン倒壊と呼び、これまでこのパターン倒壊を抑制するために乾燥技術を進歩させてきた。乾燥溶媒の表面張力を下げる IPA 乾燥、固体の表面張力を下げる表面改質乾燥、そして液体の表面張力がゼロである超臨界乾燥などである。SiO₂などで形成された微細構造がたわんだ場合、図1に示すように元に戻ろうとする復元力が発現し、一方で接触面には密着力が発生しており、密着力が復元力より大きければ倒壊を維持した状態となる。我々は、パターン倒壊を引き起こす構造的パラメータを乾燥時の表面状態で説明できることを示してきた[1][2][3]。今回、倒壊抑制能力指数(SSPI: Stiction Suppression Performance Index)を定義し、構造設計段階で必要な乾燥方式がわかるようにしたので報告する。

[1] T. Koide, S. Kimura, H. Iimori, T. Sugita, K. Sato, Y. Sato and Y. Ogawa, ECS Trans., Vol. 69, No. 8, 131 (2015)

[2] T. Koide, S. Kimura, H. Iimori, T. Sugita, K. Sato, S. Kumon, Y. Terui, Y. Okumura and Y. Ogawa ECS Trans., Vol. 80, No.2, 53 (2017)

[3] T Koide, S Kimura, T Kobayashi, H Iimori, T Sugita, K Sato, Y Ogawa, Solid State Phenomena, Vol. 282, 168 (2018)

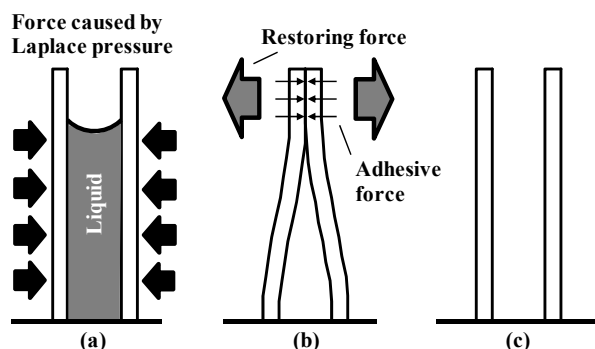


Figure 1. model for stiction process: (a) capillary force caused by Laplace pressure, (b) in stiction with restoring force and adhesive force, (c) in case of restoring force defeating against adhesive force.

表面極近傍に移動するナノ粒子の三次元挙動観測法

3D Observation of Transporting Nano-Particle near a Surface

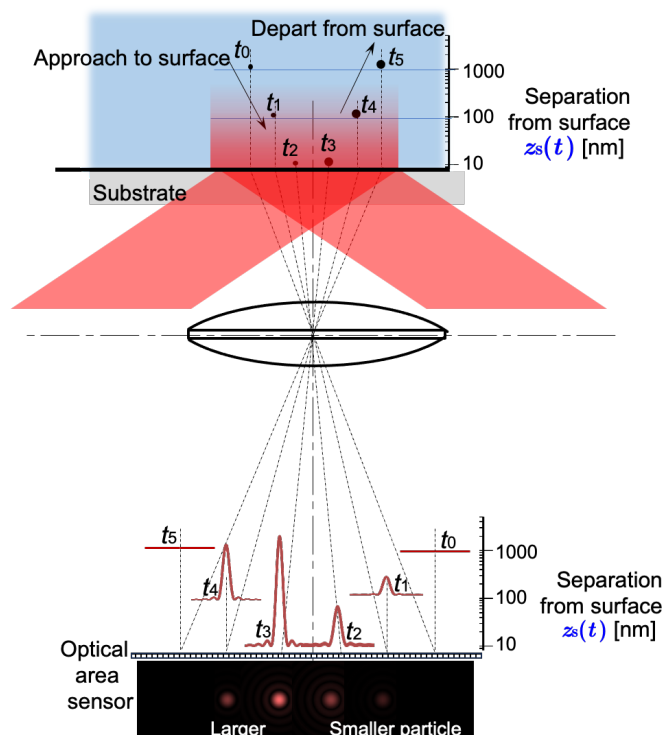
九工大 ○カチョーンルンルアン パナート

Kyushu Institute of Technology, °Panart Khajornrungruang

E-mail: panart@ics.kyutech.ac.jp

近年、ウェット工程でナノ粒子が用いられる基板表面・界面などのポリシング加工は、半導体製造分野や光学部品のガラスレンズ、さらに SiC などの難加工材の金型ポリシングにおいてもますます注目されるようになってきている。これらの工程は、被加工表面とナノ粒子やパッドとの界面で発生するナノ（サブマイクロ）スケールの動的現象に基づくものである。具体的には、ナノ粒子の被加工表面近傍での挙動や輸送現象を観測できれば、接触直前、接触中、接触直後の事象に関する理解が深まり、ポリシング工具としてのナノ粒子や化学溶液成分の選定に役立つ指針を導き出すことができる。また、ポリシング後に被加工表面に残留するナノ粒子を洗浄するウェット工程も同様に、基板表面近傍の輸送現象に関わる。しかし、ナノスケールの観測を真空中で小さなド・ブロイ波を持つ電子を用いて行えば、高精細な現象が観測できるが、液体中でのナノ現象の直接観測には、流体環境における適用性や非接触性を持つ光子（光波）や音波などを用いる制約がある。光波を用いた観測では、高い時間分解能（高速性）と空間分解能（高精細性）が得られるが、照射光線の大きさや光場の厚さ、および対物レンズや結像光学系による焦点深度の制約により、ナノスケールの表面近傍での輸送現象の観測が困難な場合がある。

そこで、本研究では、生物の細胞観察^[1]によく用いられる表面局在性（薄い光場）を持つエバネッセント光^[2]を用いて、被加工・被洗浄壁面近傍に局在するナノ粒子の輸送現象を可視化する観測手法^[3]の事例を、本講演を通して紹介する。これまでの観測事例^[4,5]では、無蛍光・ラベルなしでそのもののナノ粒子を観測することが可能である。



図：表面極近傍に限定した移動ナノ粒子の挙動観測

(t_0 および t_5 では、十分に接近していないため観測されない)

- [1] E. AMBROSE: A Surface Contact Microscope for the study of Cell Movements. *Nature*, **178** (1956), 1194. <https://doi.org/10.1038/1781194a0>
- [2] S. Takahashi, R. Nakajima, T. Miyoshi, Y. Takaya, and K. Takamasu: Development of an evanescent light measurement system for Si wafer microdefect detection, *Key Engineering Materials*, **295** (2005) 15. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.295-296.15>
- [3] P. Khajornrungruang, S. Korkmaz, P. Angshuman, K. Suzuki, K. Kimura, S. V. Babu: Light scattering model for individual sub-100-nm particle size determination in an evanescent field, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55** (2016) 06JG02. <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.06JG02>
- [4] Y. Terayama, P. Khajornrungruang, K. Suzuki, H. Fujishima, S. Hamada, Y. Wada, H. Hiyama: Direct observation of removal of SiO₂ nano-particles from silica surfaces: an evanescent field microscopy study and shear flow acting moment, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62** (2023) SH8004. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/acde87>
- [5] カチョーンルンルアン・パナート：近接場光（エバネッセント光）による壁面近傍のナノ粒子観測方法、精密工学会誌、**90** (2024) 184. <https://doi.org/10.2493/jjspe.90.184>

枚葉スピン式洗浄のリンス処理における薬液排出過程の三次元数値計算 Three-Dimensional Numerical Simulation of Rinsing Chemical Solutions during Single-Wafer Spin Cleaning

静大工¹ ○神保 佳典¹, 真田 俊之¹

Shizuoka Univ.¹, °Yoshinori Jinbo¹, Toshiyuki Sanada¹

E-mail: jimbo.yoshinori@shizuoka.ac.jp

半導体のウェット洗浄におけるリンス工程は、洗浄に用いた薬液や反応生成物、汚染物質等をウェハ表面やその上に形成された微細構造から除去する工程であり、種々の方法が用いられている。例えば、枚葉スピン式のリンス処理では、浸漬式に比べて、短時間に少ない液量ですすぐことが可能である。一方で、枚葉スピン式では、ウェハ上においてすすぎの効率に重要となる液体の速度や濃度に分布が生じるため、さらなる効率の向上には、ムラが生じないような特別な取り扱い（ノズル走査等）が必要となる。本報では、OpenFOAMによる気液二相流計算[1]に濃度の移流拡散を扱う手法[2]を組み合わせ、回転円盤上において薬液が水により置換される過程を三次元数値計算する。

図1 (a) に計算により得られた液膜と薬液

濃度の分布を (b) に回転中心軸を含む断面における円盤直上の濃度分布（円盤水平方向）の時間変化を示す。計算では 100 rpm で回転する直径 100 mm の円盤の上面において初期に 100 μm の膜厚の薬液が存在するとし、そこに (i) 回転軸上および (ii) 回転軸から -0.035 m ずれた位置から純水が供給される。図 (b-ii) の分布を抽出する断面はそのノズル位置を含む断面である。図 (b) において時間が経過するにつれて濃度が低下していく。これは薬液が水に置換されていくことを示している。回転軸上から水が供給される場合、円盤淵における薬液の置換に時間がかかり、回転軸からずれる場合、円盤中心における薬液の置換が困難となる。

[1] OpenFOAM User Guide, <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide>.

[2] Jinbo, Y. et al., J. Photopolym. Sci. Tec., 35 (2022) 359–364.

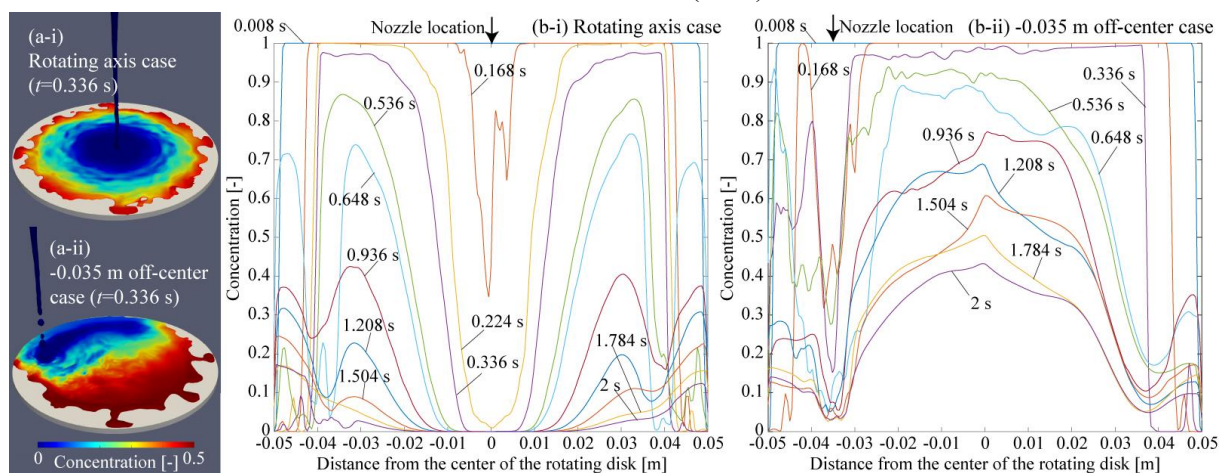


Figure 1 (a) Liquid film shape and concentration distribution on the rotating disk at 100 rpm. Pure water is injected from (i) the rotating axis and (ii) the -0.035 m off-center toward the chemical solution initially existing on the disk. (b) Time variation of horizontal concentration distribution just above the rotating disk surface when the jet is injected from (i) the rotating axis and (ii) the -0.035 m off-center.

液体と気体の多彩なインタラクションで見るバイオ界面 Biointerfaces showing a variety of interactions with liquids and gases.

理研¹ °田中 信行¹

RIKEN¹, °Nobuyuki Tanaka¹

E-mail: nobuyuki.tanaka@riken.jp

細胞や生体分子、生体材料の表面は、物理的・化学的性質に基づいて物質輸送や情報の伝達といった多様な活動の中心となる機能的界面である。生体材料でできたインプラント表面には生体分子の一種である細胞接着タンパク質を介して細胞が接着し、生体の一部として機能する。このような機能的なバイオ界面を活用するためには、その性質をよく評価・理解する必要がある。他方、バイオ界面は、多くは液中に存在し、明確な境界を定義することが難しく、一般材料の評価手法を適用できない場合が多い。接触角法は、表面の濡れを介した物理化学的評価法であるが、湿潤な表面では液滴が速やかに融合してしまうため接触角計測が困難である。これに対して、筆者らは液中にある対象表面に対して、気体を噴射し液体を除去することで表面を脱濡れ状態にし、その後液体が再濡れする過程を経て界面の性質を評価する気体噴射液体排除法を考案し、生きた培養細胞組織の濡れ性評価に世界で初めて成功している (Fig. 1)。バイオ界面に限らず基礎科学から産業分野に至るまで、界面物性は、濡れ、接着、潤滑といった機能性に関連する重要な評価指標であり、産学との連携を通じて本手法を金属やポリマー、ゲルなど様々な物質に対して応用する機会に恵まれた。講演では、界面分子レベルの液体と気体の多彩なインタラクションについて、これまでの研究によって得られた知見をもとに紹介したい。

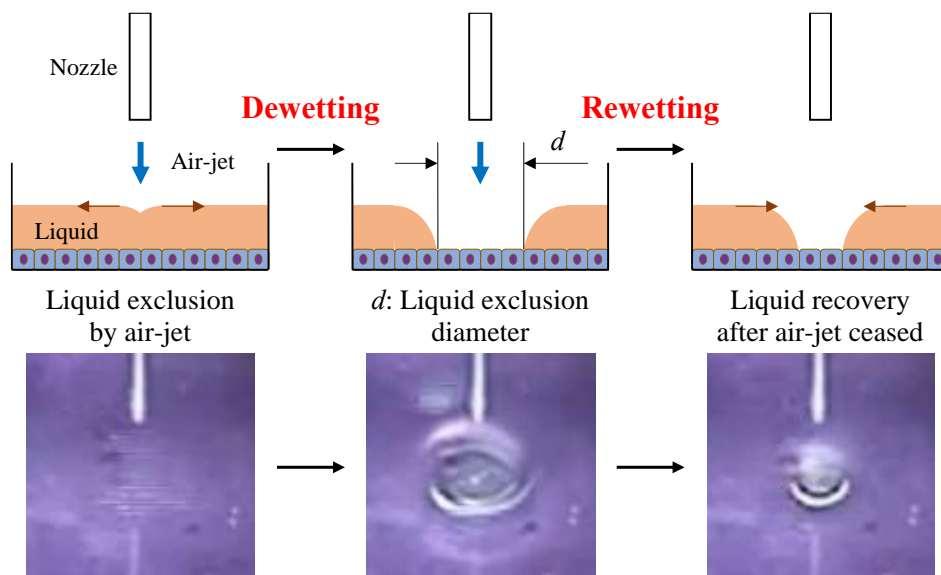


Fig. 1 Schematic diagram of air-jet induced liquid exclusion followed by liquid recovery (above) and an example on a cultivated cell tissue (below).

nm サイズの狭所内 SiO₂エッチングにおける シリコンの疎水性及び表面電位の効果

Effect of Hydrophobicity and Surface Potential of Silicon on SiO₂ Etching in Nanometer-Sized Narrow Spaces

株式会社 SCREEN ホールディングス¹, 株式会社 SCREEN セミコンダクターソリューションズ²,
京大院工³,

○宮川 彰平¹, 上田 大², 塙 洋祐¹, 北川 広明², 藤原 直澄²,
尾辻 正幸¹, 高橋 弘明², 深見 一弘³

SCREEN Holdings Co., Ltd.¹, SCREEN Semiconductor Solutions Co., Ltd.², Kyoto Univ.³

°Shohei Miyagawa¹, Dai Ueda², Yosuke Hanawa¹, Hiroaki Kitagawa², Naozumi Fujiwara²,
Masayuki Otsuji¹, Hiroaki Takahashi², Kazuhiro Fukami³,

E-mail: s.miyagawa@screen.co.jp

近年、二次元的な半導体トランジスタの微細化が限界を迎えたことで、GAA や CFET 構造等の複雑な三次元構造の素子による集積度向上が試みられている。このような三次元構造のウェットプロセスでは数 nm~数十 nm 幅の材料を同時にエッチングする必要があるが、このサイズの間隙領域(狭所)では狭所幅の大きさにエッチングレート(ER)が異なり[1,2,3]、狭所幅に依らない様な ER を達成する手法が求められている。本研究では、シリコンに挟まれた SiO₂ 膜について、シリコン表面の疎水性と表面電位の観点から、狭所内のエッチャント量の増加が期待される界面活性剤をエッチング液に添加し、狭所幅に依らないエッチング手法を検討した(Fig.1)。従来の dHF に比べ、pH を調整し界面活性剤を添加した dHF を用いると、3nm 幅でブランケットに対する ER 比が約 2.5 倍改善した(Fig.2)。壁面の疎水性の利用と表面電位の制御によるイオン輸送により、狭所 ER が改善可能であることを支持する結果を得た。発表では、データ等の詳細について説明する。本内容は、「D. Ueda et.al., Effect of Hydrophobicity and Surface Potential of Silicon on SiO₂ Etching in Nanometer-Sized Narrow Spaces, Solid State Phenom, 314(2021), 155-160. 」を改訂した内容で、一部著作権は Trans Tech Publications Ltd. に帰属する。

Reference

- [1] A. Okuyama et al., Solid State Phenomena, **219** (2015) 115-118.
- [2] D. Ueda et al., Solid State Phenomena, **314** (2021) 155-160.
- [3] S. Kumari et al., Solid State Phenomena, **346** (2023) 149-154.

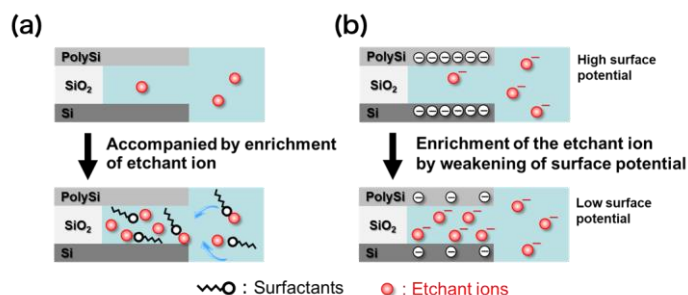


Fig.1: Two models for concentration control of etchant ions in narrow spaces. (a) hydrophobicity and polarity of specific surfactants. (b) surface potential of wall materials.[2]

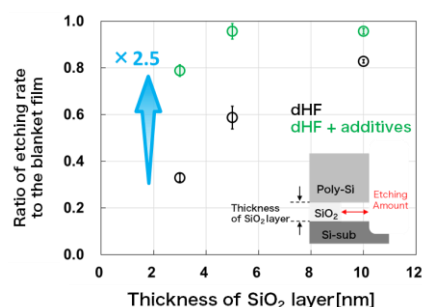


Fig.2: The results of etching rates in narrow spaces.[2]

FM-AFM によるナノスコピックなぬれのその場観察

In situ Observation of Nanoscopic Wetting by FM-AFM

金沢大¹, 分子研² °荒木 優希¹, 湊 丈俊², 新井 豊子¹

Kanazawa Univ.¹, Inst. Molecular Science², °Yuki Araki¹, Taketoshi Minato², Toyoko Arai¹

E-mail: y-araki@staff.kanazawa-u.ac.jp

計算科学や界面計測手法を駆使して、疎水性の炭素材料表面での水和構造の発達や、親水性のガラス表面での不均質なぬれ現象などが観測され、新たなぬれの理解が進展しつつある。しかしながら、これらの微視的なぬれ現象を理解するには、固体表面に吸着した水の挙動を実空間的に明らかにする計測も必要不可欠である。本研究では、高い力分解能を持つ周波数変調原子間力顕微鏡 (prototype of SPM-8000FM, Shimadzu) およびピークフォースタッピングモード (PFT) 原子間力顕微鏡 (Bruker Dimension XR Icon NanoElectrical) を用いて、湿潤環境下でガラス表面の形状と凝着力をその場計測し、吸着水の挙動や物性を明らかにした^[1]。石英ガラス基板周囲の湿度を 30~90% で変化させながら、大気中でガラス表面を観察したところ、FM-AFM により直径数 100 nm、厚み 10 nm 以下のナノ水滴を捉えた (図 1)。これらのナノ水滴は湿度とともに厚み方向に成長し、ガラス表面を拡散するなど特異な挙動を示した。湿度を 30% に下げると水滴は完全に消失し、その形成と消失が可逆的であることが確認された。さらに、PFT モードによる計測では、ナノ水滴とその他の領域の凝着力を計測した結果、ナノ水滴形成前から均質な液膜がガラス表面に存在することがわかり、液膜の粘性がナノ水滴よりも高いことが明らかとなった。非線形分光法を用いた先行研究^[2]で報告された、ガラス表面の不均質なぬれを支持する結果である一方、本研究ではナノ水滴の表面拡散や、水滴同士の反発、液膜との共存など、マクロな水滴とは異なる物性を示唆する現象が多数観察された。その原因については未だ不明な点も多いが、ナノ水滴は固体表面での触媒反応の促進など、輸送体としての機能を持つことが期待される。

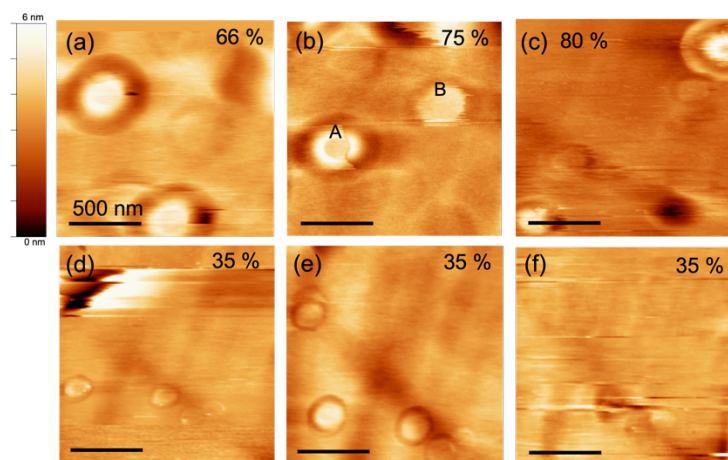


Fig.1 Topographic images of nano water droplets observed by FM-AFM. (a)~(c) and (d)~(f) were obtained while increasing and decreasing humidity, respectively. Color bar indicates the Z scale of the images. All scale bars represent 500 nm.

参考文献

- [1] Y. Araki, T. Minato, T. Arai (2024) *Sci. Rep.* **14**, 10693.
- [2] S. Urashima, T. Uchida, H. Yui (2020) *Phys. Chem. Chem. Phys.* **22**, 27031.

純水噴霧の誘導帯電メカニズムの解析

Analysis of Induction Charging Mechanism of Deionized Water Spray

愛知工大 ○(M1)渡部 一哲, 伊藤 康生, 森 竜雄, 一野 祐亮, 田岡 紀之, 清家 善之

Aichi Inst. Tech., ○(M1)Ittetsu Watanabe, Kousei Ito, Tatsuo Mori, Yusuke Ichino,

Noriyuki Taoka, Yoshiyuki Seike

E-mail: y_seike@aitech.ac.jp

半導体製造工程では半導体表面のパーティクルやレジスト残渣を除去するために二流体スプレー洗浄が用いられている。二流体スプレー洗浄は、圧縮エアと純水を混合し、霧状にしてウエハに噴射する洗浄方法である。しかし、純水の比抵抗値が高いため静電気障害 (ESD) が発生し、歩留まりが低下する問題がある[1]。以前、我々は純水の二流体スプレー直後に円筒状の電極(誘導帯電素子)を設置し、強電界中にスプレーすることによって、純水液滴の帯電量を制御できることを確認した[2]。しかし、誘導帯電による帯電の制御のメカニズムに関しては明らかにしていない。本研究では誘導帯電素子を用いて、二流体ノズル先端に強電界を印加した状態で純水に流れる電荷量を測定する。図1に測定系統図を示す。二流体ノズルに接続された PFA チューブに金属継手 (SUS316) を接続し、金属継手に流れる電流を測定する。噴射条件として、純水流量 50 mL/min、エア流量 80 L/min とし、PFA チューブ (外径 3.18 mm、内径 2.18 mm) の長さを 0.1 m から 50 m を変えることによって、ノズル先端から金属継手までの位置を変える。その時、チューブ内に流れる純水の比抵抗値は $17 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ とチューブ内の体積から換算すると長さ 0.1m 時で $4.56 \text{ G}\Omega$ と 50 m 時で $2.28 \text{ T}\Omega$ となる。また、誘導帯電素子への印加電圧を 10 kV とした。長さ 0.1 m と 50 m の PFA チューブ接続時に発生する電流値の差は 135 nA となった。

[謝辞]

本研究は JSPS 科研費の助成 23K03627 に記載および愛知工業大学プロジェクト共同研究の支援を受けたものです。またソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株式会社、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社には研究を支援して頂き感謝をする。

[参考文献]

[1] Y. Hagimoto et al. : Solid State Phenomena, 145-146, pp.185-188, 2009.

[2] 鈴木洋陽ら : 静電気学会誌、47,3 (2023) 108-113

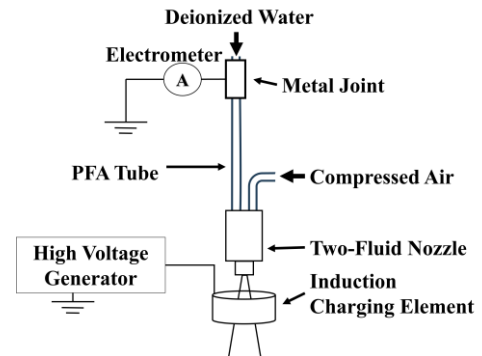


Fig. 1 Measurement system

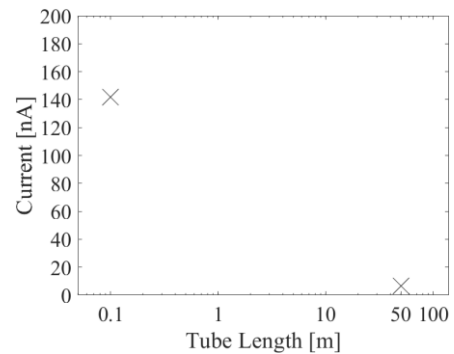


Fig. 2 Current to ground position

二流体スプレー時の飛行液滴の電荷特性と SiO₂ ウェハの表面電位の関係性

Relationship between Charge Characteristics of Flying Droplets and Surface Potential

Characteristics of SiO₂ Wafers during Two-Fluid Spraying

愛知工大 [○](M1)伊藤 康生, 渡辺 一哲, 森 竜雄, 一野 祐亮, 田岡 紀之, 清家 善之

Aichi Inst. Tech., [○]Kousei Ito, Ittetsu Watanabe, Tatsuo Mori, Yusuke Ichino,

Noriyuki Taoka, Yoshiyuki Seike

E-mail: y_seike@aitech.ac.jp

半導体デバイスの製造において、パーティクル除去など二流体スプレーを用いた洗浄が行われている。二流体スプレーは、圧縮ガスと純水をスプレーノズル内で混合し噴射する方法で、噴射した飛行液滴は正極性を示すことが分かっている [1]。一方、二流体スプレーで純水をウェハに噴射した場合、ウェハ表面の電位は負極性に帯電が報告されている[2,3]。このウェハ帯電により発生する ESD が問題となっている。原因は噴霧される液滴の帯電、液滴とウェハの摩擦帯電などが考えられている。そこで我々は二流体スプレー時の飛行液滴の電荷特性と SiO₂ ウェハの表面電位の関係を明らかにするための実験を行った。

ウェハの回転数 500 rpm、洗浄時間 60 秒、二流体スプレーの純水流量 100 mL/min、空気流量 80 NL/min の噴射条件で、ウェハへ純水を噴射したときのウェハの表面電位を図 1 に示す。純水の比抵抗値は 17.5MΩ・cm 以上である。ウェハの表面電位は中心とその付近で負極性を示し、最大 -110V であった。一方、同条件で二流体スプレーから噴射される純水の飛行液滴は正極性を示し 50nA 流れることが分かっている[1]。この現象を確認するため、同様の SiO₂ ウェハ上部で -10 kV から 10 kV の電圧を印加し、表面電位を測定した。その結果、ウェハは印加した電圧の極性と同じ極性を示し帯電した。純水を噴霧した場合と高電圧を印加した場合でウェハの極性が異なるため、SiO₂ ウェハの表面の電位は、飛行液滴の極性ではなく、飛行液滴が SiO₂ ウェハ表面に衝突した際の摩擦帯電ではないかと考えている。

[謝辞] 本研究は JSPS 科研費の助成 23K03627 および愛知工業大学プロジェクト共同研究の支援を受けたものである。またソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株式会社、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社には研究の支援をいただき深く感謝する。

[参考文献]

[1] 鈴木洋陽ら, 静電気学会誌, **468**(1), (2022) 39-42.

[2] 鈴木洋陽ら, RCJ 信頼性シンポジウム, **32**, (2022) 13.

[3] K. Ito et al. : The International Council of Electrical Engineering Conference ICEE, (2024) P-030.

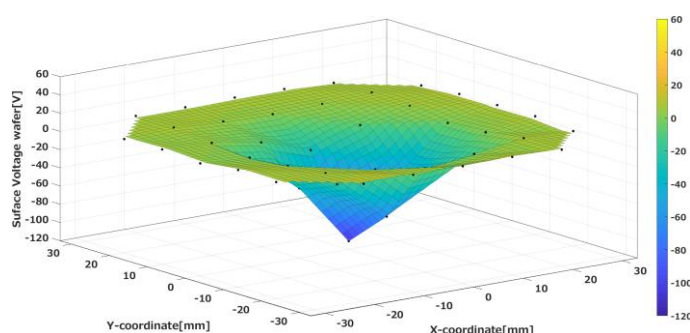


Figure 1 Wafer surface potential after two-fluid spraying

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：接合技術と先端シリコン集積回路の展開：過去、現在、未来

[19a-A23-1~5] 接合技術と先端シリコン集積回路の展開：過去、現在、未来

[19a-A23-1]

オープニング

○柴田 聡¹ (1.パナソニック)

[19a-A23-2]

接合技術と半導体デバイスの発展

○岩井 洋¹ (1.陽明交大)

[19a-A23-3]

最先端 Logic LSI における接合技術

○若林 整¹ (1.東工大研究院)

[19a-A23-4]

シリコン中に導入された高濃度ドーパントの活性化と不活性化

○水島 一郎¹ (1.ニューフレアテクノロジー)

[19a-A23-5]

イオン注入・プラズマドーピング技術の歴史とその現状・問題点

○丹上 正安¹ (1.元日新イオン)

接合技術と半導体デバイスの発展

Progress of junction technology and semiconductor device

國立陽明交通大學 岩井 洋

National Yang Ming Chiao Tung University

E-mail: h.iwai@ieee.org

半導体は 1820~30 年代に特性が金属や絶縁体とは異なる別個の材料として認識されるようになったが、最初のデバイスは 1990 年代始めの無線通信受信機用の半導体・金属点接触接合(Schottky 接合)整流器である。しかし増幅能力が無いため、1910 代には 3 極真空管にとって代わられるようになった。その真空管は電極間の電子の走行距離が大きくマイクロ波などの高周波通信は不可能でまた消費電力も大きいので、3 極真空管を模した半導体増幅器のアイデアが 1920~30 年代に提案されるようになった。1925 年に特許出願された半導体薄膜を横方向に流れる電流を Schottky 接合の金属ゲートから加えた垂直電界で制御しようというものが、世界最初のトランジスタの提案、しかも電界効果トランジスタ(FET)であった。当時は半導体の純度は極めて低く表面は欠陥や不純物汚染もあり、そのトランジスタ動作の実験的確認はされていない。それから 20 年後の 1947 年になって、金属コレクタと Ge ベースの Schottky 接合を流れる逆方向電流を Ge の電位を変化することによって制御する点接触トランジスタの増幅動作が初めて実験的に確認された。Ge の電位は金属エミッタから Ge ベースに正孔を注入することにより行われた。これは接合を垂直に通過して半導体内部に向けて流れる電流を制御するもので Schottky 接合トランジスタであった。pn 接合が発見されたのは 1940 年のことであるが 1948 年には Schottky 接合の代わりに pn 接合を用いたいいわゆるバイポーラ接合トランジスタが発明された。pn 接合は半導体内部にあって表面の影響を受けずに安定なので、これは実用的なデバイスとして様々な用途に用いられるようになった。一方 FET は半導体表面制御が困難でその実現は立ち遅れたが、1945 年に反転層を伝導に用いるアイデア(反転層は 1938 年に発見)が出され、1953 年に pn 接合をソース・ドレインとして使い反転層をチャネルとした FET の動作が実験的に確認され、1958 年には Si 表面を高温酸化して作成した SiO₂膜がゲート絶縁膜として良好な Si 表面を形成することが確認されるようになった。これらの技術を組み合わせた MOSFET の動作が 1960 年に初めて確認された。MOSFET は端子のコンタクトを表面からとることができるので高集積化に向いており、1970 年から始まった微細化と組み合わせて高集積化が進み、現在のナノ CMOS VLSI まで至っている。MOSFET の超微細化と超高集積化が人類社会に与えた恩恵はいうまでもないが、AI の実用化はその一端である。現在微細化はその限界に到達しているが、今後は垂直への 3 次元集積化により更なる高集積化が進む見込みであり、半導体技術の進化は新たな領域に突入している。このように半導体デバイスの発展には接合技術の進化が関わってきた。現在 AI には高消費電力という問題が指摘されており、脳などのバイオ系の機能との比較が為されているが、神経回路のシナプスも接合であり、更なるデバイス性能の向上の為にシナプス接合の活用や、それを使用している実際の生物の効率的な活用が今後の新たな技術の可能性として注目されている。参考文献：H. Iwai, "History of junction technology", IWJT 2023, pp.1~77.

最先端 Logic LSI における接合技術

Junction Technologies in Advanced Logic LSIs

東京工業大学 ○ 若林 整 ; ○ Hitoshi Wakabayashi, Tokyo Institute of Technology

E-mail: wakabayashi.h.ab[at]m.titech.ac.jp

半導体集積回路技術は、Moore's law [1] のための Scaling concept [2] による微細化に従い [3]、近年では、FinFET や Gate-All-Around Nano-Sheet FET (GAA-NS-FET) により、ノンドーピングチャンネル膜厚のばらつきを低減することで特性ばらつきを抑制し、低消費電力化や低コスト化、高集積化が進んでいる [4–6]。さらに、Complementary FET (CFET) 或いは 3D-Stacked FET (3DSFET) が開発されている [7–11]。

そこで、イオン注入や epitaxial 成長、貼り合わせ等の技術について、概ね工程順に議論する。まず、裏面配線向けに、Etching stopper epitaxial 埋め込み層を形成する必要がある [12]。次に、FinFET と GAA-NS-FET とともに、SoC を実現するには、Well を用いた Diode や Bipolar, Thyristor 等を形成する必要がある [13]。その場合、Si 基板を通じた短チャンネル効果抑制のため、Punch through stopper が必要となる [13, 14]。次に、NS FET では epitaxial 成長により、Si/SiGe/Si-sub. 或いは Si/SiGe/GeSi/Si-sub. 構造を形成する。特に (110) 面基板を用いることにより pFET と nFET の移動度の調平均を大きくする必要がある [15]。次に、超縮退 {Si:P, SiGe:B} epitaxial 成長+レーザーアニール技術により、S/D シート抵抗とコンタクト抵抗を低減する必要がある [16–18]。またその S/D 膜は GAA-NS FET では多結晶化により困難となってしまうため、応力印加量が減る事が問題である。さらに epi-S/D 構造には、裏面配線では裏面からのコンタクト抵抗低減も必要となる。また 3D 積層構造においては放熱経路確保が必要であり、z 方向に熱伝導率が高い絶縁膜の接合が期待され [19]、xy 方向には Graphene 等により異方熱伝導が期待される [19, 20]。次に、Through Silicon Via (TSV) の並列容量の低減のための Si 基板空乏化のための不純物濃度制御が必要である [21]。

次に、次世代チャネル材料として期待される遷移金属ダイカルコゲナイド (Transition metal Di-Chalcogenide: TMDC) 膜について、ハロゲンドーピングやカルコゲン欠損により低抵抗化し、[22–24]、nFET には仕事関数が小さいコンタクト材料 [25, 26]、pFET には大きい材料 [27] により抵抗を低減できることが分かっている。

以上、接合技術は日進月歩であり、接合技術の必要性は高まるばかりである。

謝辞：本研究の一部は文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 (JPS011438) 及び JSPS 科研費 (20H05880) の助成を受けた。

参考文献

- [1] Gordon E. Moore, *Electronics*, **38**, No. 8, p. 114, 1965.
- [2] Robert H. Dennard, *et al.*, *IEEE J. Solid-State Circuits*, **SC-9**, p. 256, 1974.
- [3] Hitoshi Wakabayashi, *et al.*, *IEEE T-ED*, v53, i9, p. 1961, 2006.
- [4] Shien-Yang Wu, *et al.*, *IEEE/IEDM*, 27.5, 2022.
- [5] E.-J. Yoon, *et al.*, *IEDM*, 27.1, 2004.
- [6] Jaehun Jeong, *et al.*, *Symp. on VLSI Tech. and Circuits*, T1-2, 2023.
- [7] Eisuke Anju, *et al.*, *IEEE/J-EDS*, p. 1239, **6**, 2018.
- [8] Marko Radosavljević, *et al.*, *IEDM*, 29-2, 2023.
- [9] Jaehyun Park, *et al.*, *IEDM*, 29-4, 2023.
- [10] S. Liao, *et al.*, in *IEEE/IEDM*, 29-6, 2023.
- [11] H. Wakabayashi, *et al.*, *EDTM*, 4D-1, 2024.
- [12] R. Loo, *et al.*, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2021 10 014001.
- [13] Alvin Leng Sun Loke, *et al.*, SC1, isscc 2020.
- [14] Nicolas Loubet, *et al.*, SC1-1, Symposia on VLSI Technology and Circuits 2020.
- [15] Shogo Mochizuki, *et al.*, 2-5, iedm 2023.
- [16] Guilei Wang, *et al.*, Springer, 2019.
- [17] Erik Rosseel, *et al.*, *ECS Trans.*, v75, n8, 2016.
- [18] Kaizhen Han, *et al.*, 30.3, iedm 2023.
- [19] W. Y. Woon, *et al.*, 19.3, iedm 2023.
- [20] S.W. Li, *et al.*, 13.1, iedm 2023.
- [21] W. T. Chen, *et al.*, 2020 IEEE 70th ECTC.
- [22] Takuya Hamada, *et al.*, *IEEE/J-EDS*, 2021.
- [23] Taiga Horiguchi, *et al.*, *JJAP*, 61, 075506, 2022.
- [24] Keita Kurohara, *et al.*, *J-EDS*, p. 390, **12**, 2024.
- [25] Satoshi Igarashi, *et al.*, *JJAP*, 60, SBBH04, 2021.
- [26] Shinya Imai, *et al.*, *IEEE/EDTM*, 4D-4, 2024.
- [27] Ryosuke Kajikawa, *et al.*, *SSDM*, A-2-03, 2023.

シリコン中に導入された高濃度ドーパントの活性化と不活性化 Activation and Deactivation of High-Concentration Dopant in Silicon Crystals

株式会社ニューフレアテクノロジー¹ ○水島一郎¹

NuFlare Technology, Inc.¹, Ichiro Mizushima¹

E-mail: mizushima.ichiro@nuflare.co.jp

シリコン単結晶中にドーパントとなる元素を高濃度に導入した時の活性化・不活性化の挙動は、ドーパント種による違いに加えて、その元素がドーピングされる方法に大きく依存する。ドーピング手法として最も代表的なイオン注入法は、シリコン結晶に損傷を与えると同時に、注入中の結晶回復が同時に起きる。また結晶回復の程度が元素や注入条件に依存することが、さまざまに異なる活性化・不活性化挙動の要因となっている。

ヒ素をシリコン基板中に高濃度にイオン注入すると、その注入された領域はアモルファス化される。その後の熱処理で、アモルファス化された領域は固相エピタキシャル成長により単結晶化されるが、同時に注入されたヒ素原子もシリコン原子の置換位置を取るようになる。この結果、固溶限を大きく超えた高濃度ドーピングが可能となる^[1]。しかしながらこのような高活性状態は安定ではなく、後の熱工程により不活性化が進む。高濃度のヒ素のイオン注入では、生成された空孔や格子間シリコンなどの点欠陥も生成される。ヒ素が不活性化した際の構造としては、ヒ素原子と空孔とからなる複合欠陥が提案されている^[2]。ヒ素の不活性化においては、イオン注入を行った結果として導入された空孔が、重要な役割を果たしていることが考えられる^[3]。

ボロンをシリコン基板中にイオン注入した場合には、ドーズ量が極めて高くなると、熱処理を行わなくとも、固溶限を大きく超えるキャリア濃度を有する領域が形成される^[4,5]。この現象は、12個のボロン原子からなる20面体構造のB₁₂クラスタが形成され、5個のシリコン原子と置換して2価のアクセプタとして働くというモデルでよく説明できる。この構造が安定に存在することは、第一原理計算から示されている^[6]。イオン注入はシリコン基板に損傷を与えるが、同時に注入中に結晶回復も起きることが、このような高活性状態が形成される要因と考えている。この高キャリア濃度層が形成された状態が熱的に安定でないことはヒ素と同様であるが、ボロンの場合には、ボロンとシリコンとから形成される析出物が形成されることで不活性化が進む^[7]。

シリコン単結晶中における高濃度ドーパントの、さまざまに異なる活性化・不活性化挙動は、元素やドーピング手法によって異なったクラスタが形成されることが要因となっている。このような現象を通して、シリコンへの高濃度ドーピングに興味を持って頂ければ幸いである。

[1] 水島他、第38回応用物理学会連合講演会 30a-X-7 (1991年3月)。

[2] J. Yamauchi et al., AIP Advances, **10**, 115301 (2020)。

[3] 水島、柏木、第42回応用物理学会連合講演会 28a-Q-7 (1995年3月)。

[4] I. Mizushima et al., Appl. Phys. Lett. **63**, 373 (1993)。

[5] I. Mizushima et al., Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 404 (1994)。

[6] J. Yamauchi et al., Phys. Rev. B, **55**, R10245 (1997)。

[7] I. Mizushima et al., Jpn. J. Appl. Phys. **37**, 1171 (1998)。

イオン注入・プラズマドーピング技術の歴史とその現状・問題点・将来

History of Ion Implantation and Plasma Doping Technology, Its Present Status,

Problems and Future

元日新イオン¹ 丹上 正安

Former Nissin Ion¹

E-mail: kyototanjo@yahoo.co.jp

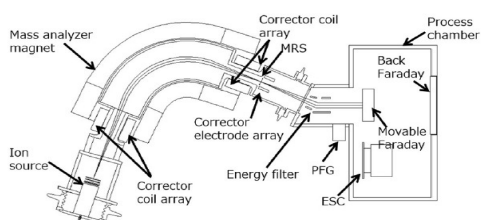
[はじめに] 半導体 IC 技術を生産面で支えるイオン注入技術、プラズマドーピング技術は IC 実用化に寄与してきた。しかし、線幅 2nm にまで微細化されてきた現状では、これまでの路線は限界を迎えたとも言われている。そこで、これまでの歴史を総括し、問題点と将来方針について議論したい。

[イオン注入技術] 図 1 は、イオン注入装置の概念図である。1950 年代のトランジスタ開発当初は、シリコン表面にドーパントを蒸着、熱拡散でドーピングし、プラズマを作成し気相拡散でドーピングをしていた。イオン注入によるドーピングの特許は、1950 年にベル研のラッセル・オール等、東北大の西沢潤一等、1954 年にショックレーも特許を出願しているが、イオン注入によるトランジスタ製造の実績は 1965 年以降で、特筆されるのは HVEC にいたピーター・ローズが、イオン種分析マグネットを高電位に保持し、所望のイオンを所望の注入量注入できるイオン注入装置を開発してからと言われている。これにより飛躍的な歩留まり改善が図られ、レジスト塗布、露光現像とイオン注入を組み合わせ、微細化 IC のスキームが確立され、1965 年のムーアの法則は、イオン注入を含む IC 製造プロセスに依拠しているとも言える。

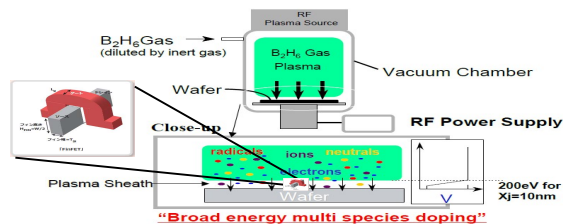
[プラズマドーピング技術] 図 2 にプラズマドーピング装置の概念図を示す。シリコンウェーハが、イオン注入装置のイオン源の中に設置されたようにも見える。IC の微細化が進むことにより問題となった低エネルギー注入のビーム量低下を解決する手段となっている。プラズマによるイオン注入・成膜プロセスは、ウイスコンシン大学のコンラッドが 1986 年に JAP に PSII(Plasma Source Ion Implantation) として発表している。1987 年には、水野文二氏が、SSDM にトレンチドーピングを発表され、2009 年に SRPD(Self Regulation Plasma Doping) として、FinFET へのドーピングを発表されている。SRPD では、プラズマ注入で課題とされた再現性・コンタミを解決した結果を報告している。

[まとめ] 2nm-IC に適用の選択エピソード (SEG : Selective Epi Doping) を Borland 氏が講演される。SDE ドーピングを固相拡散で行って低抵抗化を図ったと考えられる。

1 Ion Implantation System, Wada: JJAP2020 59



2. Plasma Doping System, Mizuno: 9th IWJT 2009 S6-2



シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：接合技術と先端シリコン集積回路の展開：過去、現在、未来

[19p-A23-1~5] 接合技術と先端シリコン集積回路の展開：過去、現在、未来

[19p-A23-1]

Evolution of CMOS S/D Stressor Technology from Planar to 3-D Stacked Devices

○John Ogawa Borland¹ (1.J.O.B. Technologies)

[19p-A23-2]

最先端集積回路における金属/IV族半導体界面物性制御の課題と展開

○中塚 理^{1,2}、柴山 茂久¹、坂下 満男¹、黒澤 昌志¹ (1.名大院工、2.名大未来研)

[19p-A23-3]

パネルディスカッション：接合技術と先端シリコン集積回路：未来

○水野 文二¹、岩井 洋²、若林 整³、水島 一郎⁴、丹上 正安⁵、ジョン ボーランド⁶、中塚 理^{7,8}、高山 和良⁹ (1.UJTラボ、2.陽明交大、3.東工大研究院、4.ニューフレアテクノロジー、5.元日新イオン、6.J.O.B. Technologies、7.名大院工、8.名大未来研、9.kind of happy)

[19p-A23-4]

半導体技術エコシステム涵養のために、学会ができることは何か？～『異分野間ミスコミュニケーション削減』の取り組みを提言

○高山 和良¹ (1.kind of happy)

[19p-A23-5]

クロージング

○筒井 一生¹ (1.東工大 IIR)

Evolution of CMOS S/D Stressor Technology from Planar to 3-D Stacked Devices

John Ogawa Borland
J.O.B. Technologies, Aiea, Hawaii, USA
E-mail: JohnOBorland@aol.com

Today, use of Selective Epitaxial Growth (SEG) for CMOS Source Drain (S/D) stressor and Wrap Around Contacts (WAC) is standard FEOL processing for 3nm node FinFET and 2nm node Nanosheet devices. With improved contact resistance engineering, the SEG S/D structure is expected to continue to be used for 3-D stacked C-FET through at least the A3 technology node in 2034 as illustrated in Fig.1 [1]. This all started back in the 1980s when US and Japanese researchers investigated the use of SEG for elevated S/D and S/D contact filling. This talk will review the evolution of SEG S/D technology including the key recess etch p+ SiGe S/D structure for ultra shallow junction reported in the 1990s. This led to the production introduction of recess etched embedded-SiGe (eSiGe) PMOS S/D stressor to boost p-channel mobility by Intel at the 90nm node. However, the NMOS S/D stressor evolved from amorphous implantation at the 65nm node to eSiC SEG S/D stressor at 14/16nm 3-D FinFET. For one generation, the 32nm node, IBM/AMD/Samsung used PMOS channel-SiGe and NMOS eSiC S/D was used for IBM 22nm PD-SOI.

(19) United States

(12) Patent Application Publication

HUANG et al.

(10) Pub. No.: US 2021/0407999 A1

(43) Pub. Date: Dec. 30, 2021

(54) STACKED FORKSHEET TRANSISTORS

(22) Filed: Jun. 26, 2020

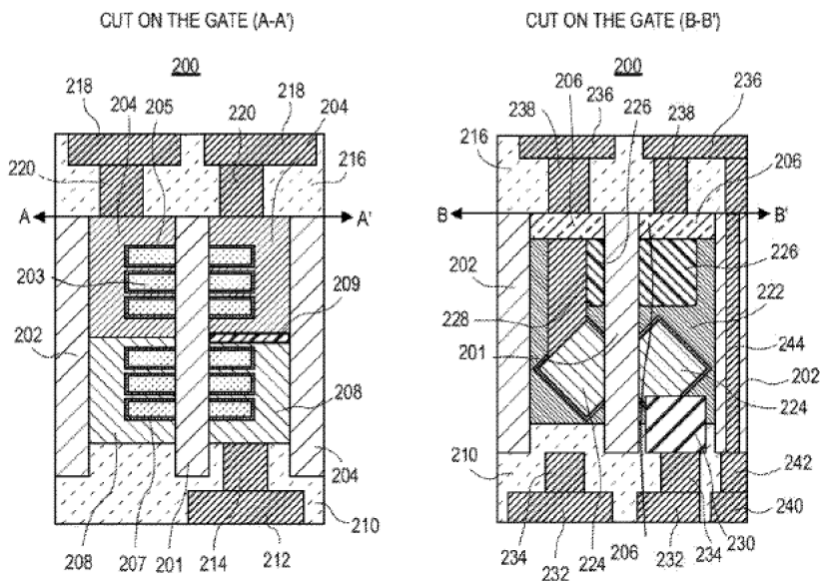


Fig.1: Intel CMOS stacked forksheet patent showing SEG-S/D warp-around contacts.

[1] C Huang et al., Intel US Patent on Stacked Forksheet Transistors, US 2021/0407999 A1, Dec 30, 2021.

最先端集積回路における金属/IV 族半導体界面物性制御の課題と展開

Challenges and Development in Interface Engineering of

Metal/Group-IV Semiconductor Contacts for Advanced ULSI Electronics

名大院工¹, 名大未来研² °中塚 理^{1,2}, 柴山 茂久¹, 坂下 満男¹, 黒澤 昌志¹

Grad. Sch. Eng., Nagoya Univ.¹, IMaSS, Nagoya Univ.²

°Osamu Nakatsuka^{1,2}, Shigehisa Shibayama¹, Mitsuo Sakashita¹, and Masashi Kurosawa¹

E-mail: nakatsuka@nagoya-u.jp

半導体デバイス内部で処理された電気信号を外部回路に取り出す金属/半導体コンタクトは必須の構造要素であり、その特性がデバイス性能に深刻な影響を与える場合も多い。最先端半導体集積回路においては、金属/半導体コンタクトの大きさはナノメートルのスケールに達しており、原子尺度での均一、平坦な表面・界面、極微小面積における低コンタクト抵抗率、優れた熱的安定性など、半導体工学、固体物理学上でも究極的で多様な性能特性を要求される。現代の高度情報ネットワーク社会を支えるシリコン (Si) 系 MOS トランジスタを基盤素子とする大規模集積ロジック回路、あるいは高移動度ゲルマニウム (Ge) の活用が期待される次世代ナノスケール CMOS トランジスタなどにおいては、究極の低コンタクト抵抗率 ($\sim 10^{-9} \Omega\text{cm}^2$) が必須であり、その実現には、半導体中の平衡固溶限界を超える超高濃度のドーピング ($\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) や適切なショットキー障壁高さ (SBH) 低減に関わる工学技術が必要不可欠となる[1]。我々の研究グループでは、Si、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 、Ge から $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ まで IV 族半導体の究極的な低抵抗コンタクト形成に向けて、様々な第三元素添加や界面構造制御、超高濃度ドーピングなどを駆使した材料・構造・プロセス技術を開発してきた。

低抵抗コンタクトに向けて界面 SBH の制御は重要な要素である。特に、フェルミレベルピンニング (FLP) が強く生じる金属/Ge 系においては、その緩和と適切な仕事関数を有する金属電極による低 SBH 界面形成が有効な手段となりえる。我々は、金属/半導体界面の原子構造に着目し、エピタキシャル金属ジャーマニド/Ge コンタクト構造の形成によって、FLP 現象を緩和して、SBH 制御が可能であることを見出した[2]。この指針に則り、低仕事関数エピタキシャル $\text{HfGe}_2/\text{n-Ge}$ コンタクトの形成技術を開発し、n 型 Ge に対して 0.24 eV まで効果的に SBH を低減できることを実証した[3]。

低コンタクト抵抗に向けた高濃度ドーピングにおいては、熱平衡状態を超える結晶成長技術や第三元素添加による不純物再分布の制御などを活用し、ナノスケール界面における不純物の挙動制御が有効となる。我々は、Si 中への C 添加によって NiSi/Si 界面における P 原子の拡散、再分布を制御し、界面 P 高濃度層の形成による低抵抗コンタクト形成の可能性を見出した[4]。また、低温分子線エピタキシー法を用いて、Ge 結晶成長における Sb のサーファクタント効果も活用した、高濃度 Sb ドーピング Ge ホモエピタキシャル層の形成技術を構築した。その結果、平衡固溶限界を超える $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の高電子濃度 Ge 層を形成し、 $\text{NiGe}/\text{n}^+\text{-Ge}$ コンタクトにおいて $10^{-9} \Omega\text{cm}^2$ 台の極低コンタクト抵抗率を実証できた[5]。

講演当日は、金属/IV 族半導体界面物性制御における課題を総括し、最先端集積回路の高性能化、省電力化に向けた低抵抗コンタクト形成の指針について議論したい。

参考文献：[1] The International Roadmap for Devices and Systems (IRDS), <https://irds.ieee.org/> [2] T. Nishimura *et al.*, Microelectron. Eng. **88**, 605 (2011). [3] K. Kasahara *et al.*, IEEE J. Electron Dev. Soc. **10**, 744 (2022). [4] O. Nakatsuka *et al.*, Microelectron. Eng. **82**, 479 (2005). [5] J. Jeon *et al.*, Semicond. Sci. Technol. **33**, 124001 (2018).

「半導体技術エコシステム涵養のために、学会ができることは何か？」
～『異分野間ミスコミュニケーション削減』の取り組みを提言

What can the Society do to cultivate the semiconductor technology ecosystem?
Recommendations for initiatives to 'reduce inter-disciplinary miscommunication'

技術ジャーナリスト 高山 和良
technology journalist Kazuyoshi Takayama
E-mail: takayama@kindofhappy.net

●背景：国内半導体産業・技術を再活性化する取り組みが相次いでいる。TSMC誘致、Rapidus、LSTC設立などの手が次々に打たれ、産業蘇生の道を歩み始めた。これを確実なものにするには、学会・大学・企業組織を含む技術エコシステムの涵養が並行して進む必要がある。本講演では、アウトサイダーの視点から、半導体技術エコシステム涵養に資する方策として、学会を中心とした「異なる技術分野間のミスコミュニケーション削減」の取り組みを提言する。

●異分野間ミスコミュニケーションとは：半導体産業のサプライチェーン／技術チェーンは極めて広範である。技術分野は、トランジスタ構造や各種プロセス技術（前工程）、チップレット・3D実装（後工程）など、デジタル半導体の各分野に加え、材料、製造装置、光電融合、アナログ、パワー、EDAや統合設計、新概念デバイスの開発・産業化等、多岐に渡る。しかも、分野ごとにますます深い知見が求められる状況になっている。個々の技術者・研究者の負担はどんどん重くなり、自分野だけでも十分な時間と手間を取りにくくなっている。まして、隣の分野の動向追跡や連携にまではなかなか手が回らない。必要なのにそれがしにくい状況を打開するためには、学会が中心となって、技術者・研究者を支援する取り組みやツールが必要である。本公演ではこの問題提起と方策提案を行う。

●提案する取り組み：具体的には右の表に示すような取り組みが考えられる。これらを、応用物理学会を始めとして、エレクトロニクス実装学会、電子情報通信学会など、関係学会が横断的協力関係を結び、最新情報の共有と浸透の取り組みを進める。取り分け重要なのは、有力国際会議で発表された先端技術動向やカギとなる技術をフローではなくストックとしてサイトに積み上げ、定期更新していく取り組みと、暗黙知となった重要知見や各分野ごとに方言化している専門用語をせめて隣のプロに対して開く努力である。これらの情報は単一学会内だけでなく、協力する複数の学会で共有し、同時に隣接分野のプロ技術者・研究者同士の連携・コンタクトの機会も増やす。「車輪の再開発」をすることなく、効率的に自分野の深掘りと他分野との連携を強化する。上記取り組みによって個人の力量と連携力を同時に上げ、結果としてエコシステムの力を大きくする。

表1：異分野間の敷居を下げる取り組み（案）

・主要国際会議のポストビューを各学会でストック情報として積み上げ、他学会と共有
・各技術分野における応用範囲・市場規模・ロードマップ・課題にを各学会でアップ、共有
・新しいチュートリアル仕掛け（学生向けだけでなく、く隣の分野のプロ技術者・研究者に向けたもの）、相互理解の研究会開催やレファレンスサイトの充実
・隣分野のプロに向けた、重要テクノロジー解説／用語などについてのストック化（分野内だけで通じる言葉から隣のプロにわかるように）とオープンソース化＝論文への利用許可するためのコピーレフト的措置
・各技術分野から、異なる分野の課題解決に寄与できそうな技術のリスト化と共有
・上記情報・知見のデータベースとAI実装（複数学会で共通プラットフォーム化）
・各学会のアルムナイ設置とアルムナイネットワークによるオンライン連携（シニア技術者・研究者たちによるボランティアベースでの寄与の仕組み）

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 薄膜半導体の結晶化とデバイス応用

[19p-A35-1~10] 薄膜半導体の結晶化とデバイス応用

[19p-A35-1]

オープニング

○岡田 竜弥¹、曲 勇作² (1.琉大工、2.北大電子研)

[19p-A35-2]

絶縁膜上におけるIV族、III-V族半導体多結晶薄膜の高品位形成

橋本 隆¹、梶原 隆司¹、茂藤 健太²、山本 圭介²、○佐道 泰造¹ (1.九大システム情報、2.九大総理工)

[19p-A35-3]

高機能半導体薄膜の固相成長とデバイス応用

○都甲 薫¹ (1.筑波大)

[19p-A35-4]

超急速熱処理におけるIV族半導体薄膜の結晶成長とデバイス応用

○東 清一郎¹ (1.広大院先進理工)

[19p-A35-5]

エキシマレーザー結晶化におけるSi膜中の水素の効果

○部家 彰¹、住友 弘二¹、松尾 直人¹ (1.兵庫県立大工)

[19p-A35-6]

光結晶化技術によるフレキシブル高移動度透明導電膜の実現とそのデバイス応用

○野本 淳一¹ (1.産総研)

[19p-A35-7]

OLED Displayの最先端バックプレーン技術 ~LTPS、LTPOからHMO(高移動度酸化物半導体)へ~

○津吹 将志¹、渡壁 創¹、佐々木 俊成¹、田丸 尊也¹、望月 真里奈¹ (1.JDI)

[19p-A35-8]

高信頼性ボトムゲート型水素添加多結晶酸化インジウム薄膜トランジスタ

○岡本 直樹¹、Wang Xiaoqian¹、古田 守¹ (1.高知工大)

[19p-A35-9]

Highly Reliable Self-Aligned Top-Gate Thin-Film Transistors with Hydrogen-Doped Poly-InO_x (InO_x:H) channel○(DC)Mir Mutakabbir Alom¹, Motoki Ando¹, Mamoru Furuta¹ (1.Kochi Univ. of Tech.)

[19p-A35-10]

クロージング

○野口 隆¹、古田 守² (1.琉球大学、2.高知工科大)

絶縁膜上における IV 族、III-V 族半導体多結晶薄膜の高品位形成

Growth of High-Quality Group IV and III-V Poly-Crystal Films on Insulator

九大システム情報¹, 九大総理工² 橋本隆¹, 梶原隆司¹, 茂藤健太², 山本圭介², [○]佐道泰造¹

Kyushu Univ. R. Hashimoto, T. Kajiwara, K. Moto, K. Yamamoto, [○]T. Sadoh

E-mail: sadoh@ed.ed.kyushu-u.ac.jp

Ge は Si より高いキャリア移動度を有するため、次世代の高速トランジスタのチャネル材料として期待されている[1]。Ge で構成される高速トランジスタを集積回路やディスプレイパネル上に集積化するには、高品質な Ge 薄膜を絶縁膜上に低温形成($\leq 500^\circ\text{C}$)するプロセス技術の創出が鍵となる。さらに、高速かつ低消費電力なトランジスタ動作には、Ge チャネル層を極薄化($\leq 20\text{nm}$)し、完全空乏型デバイスとする必要がある。しかし、Ge 薄膜の膜厚を減少すると、キャリア移動度が劣化する課題がある。

非晶質 Ge 膜に微量 Sn(約 2%)を添加して固相成長すると、結晶粒径が拡大し、キャリア移動度が格段に向上する[2]。しかしそれでも、薄膜化するとキャリア移動度は低下してしまう。薄膜化に伴うキャリア移動度の劣化は、薄化により顕在化する界面核からの結晶粒の成長に起因する[3]。Ge と基板との界面に薄い a-Si 層を挿入することで、界面核発生が抑制され、バルク核からの成長が支配的となる[3]。さらに、Ge 膜の表面にキャップ層を付加することで、Ge 膜を大気に暴露した際の不純物の混入が抑制でき、結晶粒の成長が促進される。その結果、極薄 Ge 膜(膜厚 $\leq 20\text{nm}$)でも高いキャリア移動度($\sim 100\text{cm}^2/\text{Vs}$)が実現する(Fig.1) [4]。

絶縁膜上に非晶質薄膜を堆積後、熱処理して結晶化する手法は、III-V 族半導体においても有用である。絶縁膜上に非晶質半導体薄膜を堆積後、融点以下の温度で熱処理することで、大粒径を有する多結晶薄膜が得られる。例えば、安価なガラス基板上に非晶質 InSb 薄膜を堆積後、 490°C で熱処理することで、極めて高いキャリア移動度($\sim 10,000\text{cm}^2/\text{Vs}$)を有する大粒径 InSb 薄膜(粒径 $\geq 100\mu\text{m}$)が実現する(Fig.2)[5]。低コストな高性能薄膜デバイスの基盤技術として期待される。

本研究の一部は、東北大通研共同プロジェクト研究の支援を受けて行われた。

[1] Miyao, JJAP **56**, 05DA06 (2017), [2] Sadoh, APL **109**, 232106 (2016), [3] Xu, APL **115**, 042101 (2019), [4] Nagano, MSSP **165**, 107692 (2023), [5] Kajiwara, JAP **132**, 145302 (2022).

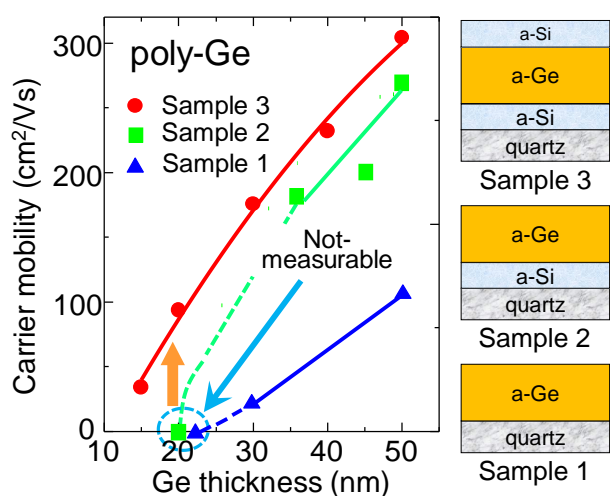


Fig.1 Schematic sample structures and Ge layer thickness dependence of carrier mobility.

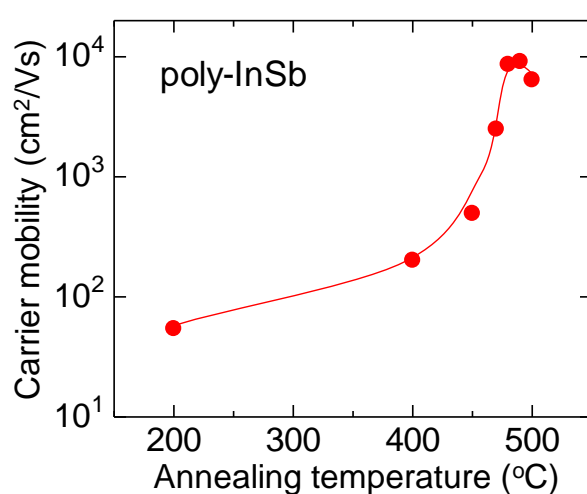


Fig.2 Annealing temperature dependence of carrier mobility of InSb films.

高性能半導体薄膜の固相成長とデバイス応用

Solid-phase crystallization of high-performance semiconductor thin films and their device applications

○都甲薫（筑波大院 数理物質）

Kaoru Toko (Institute of Applied Physics, University of Tsukuba)

E-mail: toko@bk.tsukuba.ac.jp

「固相成長」は、非晶質薄膜を融点以下で熱処理して結晶化を誘起する手法であり、任意の基板上に多結晶半導体薄膜を得る方法として古くから知られてきた。プロセスは簡便であり、均一で平坦な半導体薄膜が得られる一方、その電気的特性は高密度に存在する結晶粒界によって制限されてきた。Ge はその高いキャリア移動度や光吸収性能から次世代デバイス材料として期待されてきたが、従来の固相成長で形成された Ge 薄膜の結晶粒径は小さく、キャリア移動度は低い値に留まってきた[1]。

我々は Ge の固相成長において、前駆体となる非晶質 Ge 膜の密度を堆積時の基板加熱により制御することで、多結晶 Ge 薄膜の劇的な大粒径化が可能となることを見出した[2]。本知見をベースとし、多結晶 Ge 薄膜として最高の正孔移動度[3–5]および電子移動度[6–9]を継続的に更新している。この過程で結晶粒界と電気的特性の相関データが蓄積され[10–13]、機械学習を用いた固相成長プロセスの自動解析や電気的特性予測にも成功した[14,15]。また、本手法を IV 族混晶半導体[16–19]および III-V 族化合物半導体[20]に応用した場合や、金属触媒を起点とした横方向成長[21,22]においても、大粒径化やキャリア移動度向上が確認された。これらの多結晶薄膜について、トランジスタ[23,24]、太陽電池[25,26]、熱電素変換子[27–30]などへ展開し、従来多結晶薄膜と比して高いデバイス性能を実証している。

講演では、IV 族／III-V 族半導体薄膜の固相成長に焦点をあて、非晶質前駆体の密度制御による結晶粒径と電気的特性の向上、および各種デバイス性能について包括的に紹介する。

- | | |
|---|--|
| [1] K. Toko <i>et al.</i> , Solid State Electronics 53, 1159 (2009) | [2] K. Toko <i>et al.</i> , Sci. Rep. 7, 16981 (2017) |
| [3] T. Imajo <i>et al.</i> , APEX 12, 015508 (2019) | [4] T. Imajo <i>et al.</i> , ACS Appl. Ele. Mater. 4, 269 (2022) |
| [5] S. Maeda <i>et al.</i> , Cryst. Growth Des. 23, 5535 (2023) | [6] D. Takahara <i>et al.</i> , APL 114, 082105 (2019) |
| [7] M. Saito <i>et al.</i> , Sci. Rep. 9, 16558 (2019) | [8] K. Nozawa <i>et al.</i> , APL 122, 201901 (2023) |
| [9] K. Nozawa <i>et al.</i> , ACS Appl. Ele. Mater. 5, 1444 (2023) | [10] T. Imajo <i>et al.</i> , JAP 128, 075301 (2020) |
| [11] T. Imajo <i>et al.</i> , Sci. Rep. 11, 8333 (2021) | [12] T. Imajo <i>et al.</i> , Sci. Rep. 12, 14941 (2022) |
| [13] K. Igura <i>et al.</i> , Sci. Rep. 14, 7812 (2024) | [14] T. Ishiyama <i>et al.</i> , STAM: Methods 2, 213 (2022) |
| [15] K. Nozawa <i>et al.</i> , Adv. Ele. Mater. 10, 2300875 (2024) | [16] D. Takahara <i>et al.</i> , JALCOM 766, 417 (2018) |
| [17] K. Moto <i>et al.</i> , Sci. Rep. 8, 14832 (2018) | [18] K. Moto <i>et al.</i> , APL 114, 112110 (2019) |
| [19] T. Mizoguchi <i>et al.</i> , JALCOM 887, 161306 (2021) | [20] M. Saito <i>et al.</i> , MSSP 124, 105623 (2021) |
| [21] T. Ishiyama <i>et al.</i> , Cryst. Growth Des. 22, 1123 (2022) | [22] T. Ishiyama <i>et al.</i> , Mater. Des. 232, 112116 (2023) |
| [23] K. Moto <i>et al.</i> , APL 114, 212107 (2019) | [24] K. Moto <i>et al.</i> , IEEE EDL 42, 12 (2021) |
| [25] T. Nishida <i>et al.</i> , APL 114, 142103 (2019) | [26] T. Nishida <i>et al.</i> , Sci. Rep. 11, 10159 (2021) |
| [27] T. Ozawa <i>et al.</i> , APL 119, 132101 (2021) | [28] S. Maeda <i>et al.</i> , ACS Appl. Mat. Int. 14, 54848 (2022) |
| [29] T. Nishida <i>et al.</i> , APL 124, 012107 (2024) | [30] T. Ishiyama <i>et al.</i> , NPG Asia Materials, 16, 17 (2024) |

超急速熱処理における IV 族半導体薄膜の結晶成長とデバイス応用

Crystal growth of group IV semiconductor thin-films during ultra-rapid annealing and their application to device fabrication

広大院先進理工 °東 清一郎

Hiroshima Univ.¹, Graduate School of Advanced Science and Engineering, °Seiichiro Higashi

E-mail: sehiga@hiroshima-u.ac.jp

超急速熱処理による IV 族半導体薄膜の結晶成長は、様々な熱源を用いナノ秒からミリ秒の幅広い時間領域でおこなわれてきた。初期のアモルファス相から固相で結晶化する場合や、液相からの固化過程で結晶成長する場合など、結晶成長過程の違いによって得られる結晶の大きさや電気特性は大きく異なる。アモルファスシリコン薄膜に紫外パルスレーザー光を照射することによってナノ秒時間で熔融結晶化を誘起するエキシマレーザー結晶化において、液体シリコンは $10^9 \sim 10^{10}$ K/s の速度で急冷され、液相中に形成される結晶核から発生する潜熱が結晶成長過程に大きく関与する。過冷却液体中において潜熱を駆動力とした爆発的結晶成長 (Explosive Crystallization : EC) と呼ばれる高速成長が観測される。EC は熔融領域を横方向に掃引する結晶成長でも観測され、条件によっては数 $10 \mu\text{m}$ に及ぶ間欠的横方向成長を誘起する (Figs. 1 and 2)。この現象はシリコンおよびゲルマニウムいずれでも観測される。アモルファスシリコンの膜厚が 10nm 程度に薄くなると核形成を冷却速度が上回り、アモルファス相で固化するレーザーアモルファス化と呼ばれる現象が観測される。これら結晶成長様式の研究には様々なその場観察技術が用いられてきた。薄膜の反射率や電気伝導率の変化から相変化を観測する手法はナノ秒結晶成長過程に有用な情報を与える [1-3]。CMOS テクノロジーの進歩により、ミリ秒の相変化過程についてはハイスピードカメラが利用できるようになった [4]。

シリコンおよびゲルマニウムは概ね同様の結晶成長挙動を示すが、それらの電気特性は著しく異なる。結晶化後のシリコン薄膜はほぼ真性に近く、概ね 10^{17}cm^{-3} 以上の p 型および n 型ドーピングにより価電子制御が可能である。細線状アモルファスシリコン薄膜を熔融結晶化することで高性能 CMOS トランジスタ作製が可能であり、nMOS で $300 \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 以上の電界効果移動度を $\pm 5\%$ 以下のバラツキで得ることができる [5]。一方、ゲルマニウムは明確な p 型伝導を示し、結晶化直後に $\sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の比較的高い正孔密度を示す [6]。細線状ノンドープアモルファスゲルマニウム膜を熔融結晶化するとフィルタリングにより結晶粒界を低減でき、正孔密度は $5.2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ に低下するとともに移動度 $1080 \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ を示す。同様の手法で作製したリンドープアモルファスゲルマニウムでは電子密度 $3.7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、移動度 $2720 \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ を示した。

[1] G. J. Galvin, Phys. Rev. Lett. 48 (1982) 33. [2] M. O. Thompson, Phys. Rev. Lett. 52 (1984) 2360. [3] S. Higashi, Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 480. [4] S. Hayashi, Appl. Phys. Lett., 101 (2012) 172111-1. [5] S. Morisaki, J. Display Technol. 10 (2014) 950. [6] T. Sato, Jpn. J. Appl. Phys. 61 (2021) SC1011.

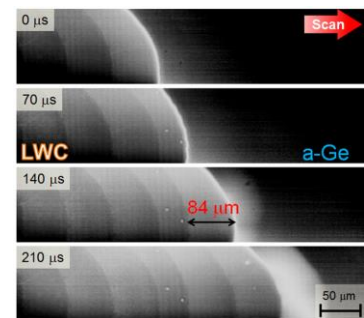


Fig. 1. Explosive lateral crystallization (Leading Wave Crystallization : LWC) observed in melting and crystalline growth of amorphous Ge films.

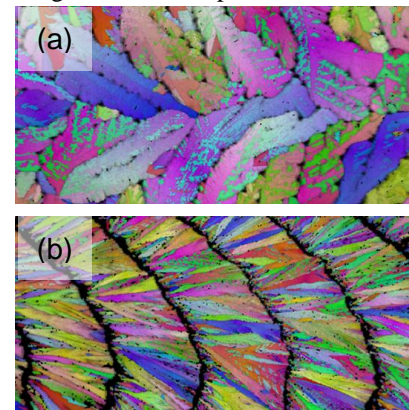


Fig. 2. EBSD maps of Si films crystallized by melting and solidification with (a) lateral growth (grain size as large as $100 \mu\text{m}$) and (b) intermittent EC with grain size of $\sim 50 \mu\text{m}$.

エキシマレーザー結晶化における Si 膜中の水素の効果

Effect of hydrogen in a-Si:H film on excimer laser crystallization

兵庫県立大工¹ °部家 彰¹, 住友 弘二¹, 松尾 直人¹

Univ. of Hyogo¹ °Akira Heya¹, Koji Sumitomo¹, and Naoto Matsuo¹

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

【背景】非晶質材料のレーザー結晶化技術は半導体産業において重要な技術であるとともに、材料の溶融・固化時の原子の挙動など学術的にも興味深い現象を含んでいる。現在、水素社会の実現が求められる中、固体中の水素がレーザー結晶化過程においてどのように振る舞うかは、様々な材料中の水素の挙動を理解するきっかけになると期待できる。ここでは、水素を含む非晶質 Si (a-Si:H) 膜のレーザー結晶化における水素の効果を検討した結果[1, 2]について報告する。

【実験方法】SiO₂ 膜を堆積したガラス基板上に a-Si:H 膜をスパッタ法で堆積した。Si をターゲット材料とし、スパッタ時の H₂/Ar 流量比を 0~30% と変化させることで、a-Si 膜中の水素濃度を制御した。a-Si:H 膜中に水素濃度分布を持たない試料と持たせた試料も作製した (図 1 下部参照)。エキシマレーザーアニール (ELA) は KrF (248 nm)、エネルギー密度 100~200 mJ/cm²、ショット数 1, 50 回、基板ホルダ温度 RT、真空度 10⁻³ Pa 以下の条件で行った。ELA poly-Si 膜の膜質評価はラマン分光、原子間力顕微鏡 (AFM) などにより行った。

【結果と考察】ELA poly-Si のラマンシフト、半値幅、結晶化率を図 1 に示す。水素濃度が膜内で均一な試料 A, B の比較から、水素濃度が増加すると結晶化率と結晶粒径は増加した。これは Si-H₂ 結合から水素が放出される際に生じるエネルギーにより結晶核形成・成長が促進されたためであると考えられる。この効果はレーザーエネルギー密度が小さい場合に顕著となった。

AFM 像を図 2 に示す。ショット数が増加すると ELA poly-Si 膜の表面突起物の直径は増加する傾向を示し、a-Si:H 膜の水素濃度・分布に影響されることが示された。また、水素濃度が 8% と高い試料 B では膜の剥離が確認された。これはレーザー照射時の水素の突沸によるものと考えられる。ショット数が増加しても剥離が進行しなかったことから、一回目のレーザー照射で水素がある程度脱離していることが示唆された。一方、水素濃度はほぼ同じだが、水素濃度に膜厚方向の分布を持つ試料 D では剥離は見られず、高濃度水素層の膜中での位置を変えることで、水素突沸による膜剥離を抑制できた。一般にガラス基板上の a-Si:H 膜のレーザー結晶化では基板界面から結晶化が起こるが、本研究のように膜内部に高水素濃度層を形成することで結晶化の開始位置が膜内部に変化したためであると考えられる。

このように膜中水素は ELA 結晶化に影響を与えることが明らかとなった。当日は水素のその他の効果についても報告する。

[1] A. Heya et al., Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 6908 (2006).

[2] A. Heya et al., Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 7858 (2007).

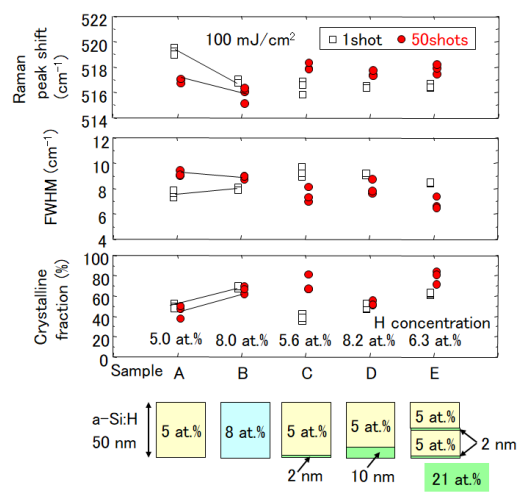


図 1 ELA poly-Si のラマンシフト、半値幅、結晶化率の a-Si:H 膜中の水素濃度分布依存性

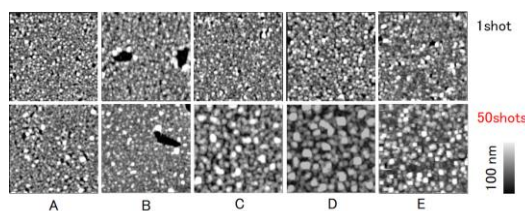


図 2 ELA poly-Si の AFM 像 (5×5 μm²)
上段: 1 shot、下段: 50 shots

光結晶化技術を用いたフレキシブル高移動度透明導電膜の実現とそのデバイス応用

Realization of flexible high-mobility transparent conductive films using photo crystallization techniques and their device applications

国立研究開発法人 産業技術総合研究所¹ °野本 淳一¹

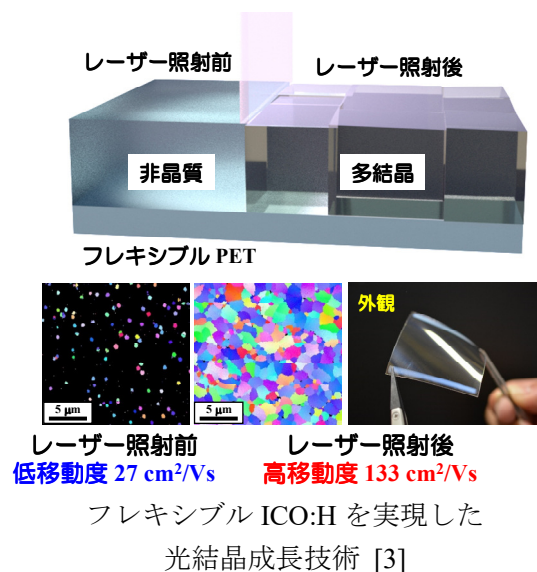
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)¹, °Junichi Nomoto¹

E-mail: nomoto.junichi@aist.go.jp

波長やパルス幅によって熱・化学的効果が制御可能な光照射技術は、高温が適用できないために従来は限定されていた性能や形成を脱却し、更なる発展・普及が見込まれるフレキシブル電子デバイスの高度化を支える有望技術である。我々はこれまでに、前駆体形成における気相・液相成膜技術と光照射技術の双方の最適化を図り、各種機能性酸化物薄膜をガラスや樹脂基板上に形成できること報告している [1]。本発表では、光照射による固相結晶化の採用が特に好適であったフレキシブル高移動度透明導電膜の開発について紹介する。

水素 (H) とセリウム (Ce) などの遷移金属を共添加した酸化インジウム In_2O_3 (ICO:H) が $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超えるキャリア移動度 (μ) を実現でき (ITO の場合 $\mu < 40 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)、電気伝導を劣化させることなく低いキャリア密度に因り透明領域を近赤外線波長域まで拡張することができることから、広い分光感度を有する太陽電池用の窓電極として検討されている [2]。ICO:H の高移動度の特徴は、非晶質の前駆体を約 $150\text{-}200^\circ\text{C}$ の加熱による固相結晶化することで発現する。しかしながら、ポリエチレンテレフタレート (PET) 等の樹脂基材を用いる場合は、耐熱性に係る問題が生じるため加熱は難しい。それゆえ、フレキシブル高移動度 In_2O_3 透明導電膜を実現することは困難であった。解決策として我々は、KrF エキシマレーザーを用いたに注目した。前駆体薄膜の形成条件、レーザー照射条件、そして、結晶化時に発生する微細なクラックを減らすために透明導電膜層から基材層への熱伝達や熱膨張差を制御、最適化することで、前人未踏であったフレキシブル高移動度透明導電膜の実現に成功した。特に、反応性プラズマ蒸着法で作製した ICO:H 前駆体においては、低耐熱性フレキシブル基板上では世界最高移動度の $\mu = 133 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を実現することに成功した [3]。この特性を活用した調光窓や透明ヒーター等へのデバイス応用事例についても当日紹介する。

【参考文献】 [1] T. Tsuchiya *et al.*, Chem. Eur. J. 26 (2020) 9261. [2] T. Koida, and J. Nomoto, Phys. Rev. Materials 6 (2022) 055401. [3] J. Nomoto, and T. Koida *et al.*, NPG Asia Mater. 14 (2022) 76.



OLED Display の最先端バックプレーン技術 ～LTPS、LTPO から HMO (高移動度酸化物半導体) へ～

Cutting-edge backplane technologies for OLED display

JDI¹ ○津吹将志¹, 渡壁創¹, 佐々木俊成¹, 田丸尊也¹, 望月真里菜¹, 木村 裕之¹

Japan Display Inc.¹ ○Masashi Tsubuku¹, Hajime Watakabe¹, Toshinari Sasaki¹,

Takaya Tamaru¹, Marina Mochizuki¹, Hiroyuki Kimura¹

E-mail: masashi.tsubuku.mn@j-display.com

近年の中小型ディスプレイ産業において、スマートフォンやタブレットといったモバイル機器が大きく普及し、さらにはスマートウォッチや VR ディスプレイなどのウェアラブル機器も市場を拡大している。これらの機器に用いられる OLED ディスプレイには高精細、高フレームレートといった性能だけでなく、低消費電力の要求がより強く求められるようになってきている。この要求に対し、我々は OLED ディスプレイの周辺回路に LTPS TFT を適用し、画素回路に酸化物 TFT を適用させた LTPO 技術を用いることで高精細かつ低周波駆動が可能なデバイスを実現している。

一方、酸化物 TFT の移動度を LTPS 同等に向上させる試みも報告されている。従来の酸化物半導体に対し、多結晶化した酸化物半導体(poly-crystalline Oxide Semiconductor: Poly-OS)を用いることで TFT 特性を不安定化させる酸素欠損の発生を抑えつつ、移動度を大幅に向上させることが可能になることが分かってきた。この技術を我々は HMO(High Mobility Oxide)技術と呼んでいる。

この HMO 技術は、Fig.1 に示すように従来の酸化物 TFT と同様の特徴を有したまま電界効果移動度を向上させることができるため、酸化物 TFT と同様にオフリーク電流が非常に低く、a-Si TFT のような基板サイズの大面積化が可能で、かつ LTPS TFT 同等の駆動能力を実現させることができる。また量産で用いられている現在の設備を展開することができることから工場投資の負担も軽減され、かつ LTPO 技術と比較して、フォトリソ数や工程数も大幅に削減することができる。

すなわち HMO 技術を用いることで、最新の OLED ディスプレイに求められている高機能性と低消費電力を LTPO 技術のように両立させながら、さらに製品のコストダウンや生産効率向上を実現できるため、今後の OLED ディスプレイの Backplane 技術を置き換えていく可能性が高い。

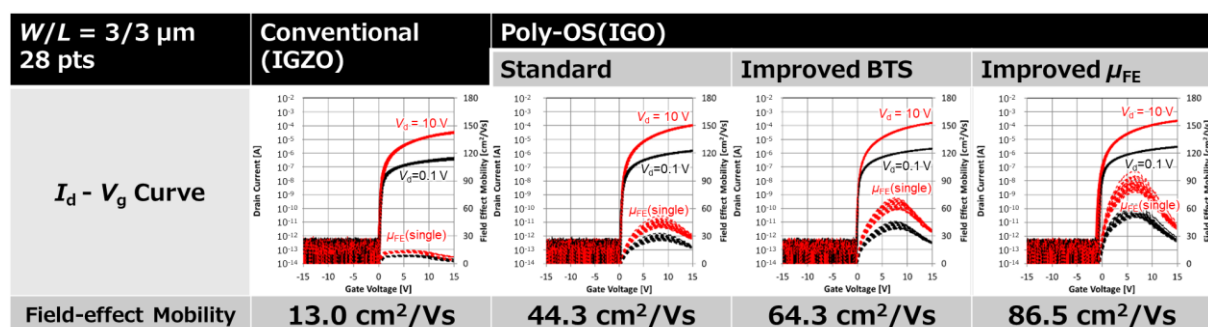


Fig.1 Gen.6 ガラス基板(1500*1800 mm)上に形成した酸化物 TFT の電気特性

高信頼性ボトムゲート型水素添加多結晶酸化インジウム薄膜トランジスタ

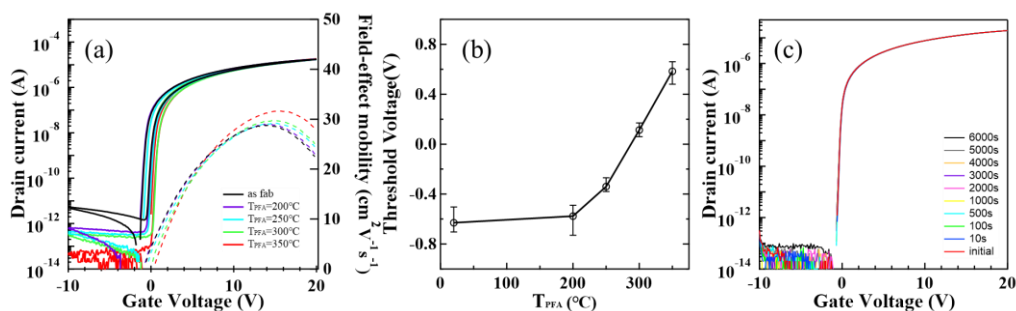
Highly Reliable Bottom Gate Poly-InO_x:H Thin-Film Transistor高知工大 マテリアル工学コース¹, 基盤工学専攻², 総研 ナノセンター³°(M2)岡本 直樹¹, (D3) Wang Xiaoqian¹, 古田 守¹⁻³Material Science and Engineering Course¹, Engineering Course², Center for Nanotechnology, Kochi Univ. Tech.°Naoki Okamoto¹, Xiaoqian Wang², and Mamoru Furuta¹⁻³

E-mail: furuta.mamoru@kochi-tech.ac.jp

非晶質酸化物半導体の代表である In-Ga-Zn-O(IGZO)は電界効果移動度(μ_{FE})=10~15 cm²/Vs の薄膜トランジスタ(TFT)が報告されている。次世代ディスプレイへの応用に向けさらなる μ_{FE} の改善が必要であるため、単結晶で 160 cm²/Vs が報告されている多結晶酸化物半導体である酸化インジウム薄膜に着目した。[1] 本研究ではフォトリソグラ

フィー法を用い、4 インチガラス基板上に水素添加多結晶酸化インジウム(poly-InO_x:H) TFT を作製した。TFT はボトムゲート型であり、ゲート絶縁膜(GI)には室温形成した膜厚 68 nm の陽極酸化アルミニウム(Al₂O₃)を、チャネル層には 300°Cにて固相結晶化した膜厚 30 nm の poly-InO_x:H を、チャネル保護膜には誘導結合型プラズマ気相成長法 (ICP-CVD) にて成膜した SiN_x/SiO₂積層膜を用いた。固相結晶化後の poly-InO_x:H 薄膜の結晶粒径は約 1μmであった[2]。作製した TFT のチャネル長およびチャネル幅はそれぞれ 20 μm と 60 μm である。

Fig.1 はそれぞれ(a)TFT の伝達特性、(b)しきい値電圧(V_{th})のポストアニール温度(T_{PFA})依存性を示している。As-fab から 350°Cへと T_{PFA} 温度の上昇につれ V_{th} は正へとシフトし、 T_{PFA} =350°Cでは V_{th} =0.58 V とエンハンスメント型 TFT を示した。懸念点であった特性均一性に関してもそれぞれ μ_{FE} =32.0±0.22 cm²/Vs、 V_{th} =0.58±0.1 V と良好な結果が得られた。信頼性に関して負ゲートバイアス熱ストレス(NBTS)試験を 60°Cで 6,000 秒行った結果、全く V_{th} シフト量が見られず極めて優れた NBTS 信頼性を示した。

Fig.1 Annealing temperature dependence of (a)TFT transfer characteristics and (b) V_{th} ; (c)NBTS reliability

参考文献 [1] Y. Magari, et al., Nature communications, 13, 1078 (2022).

[2] X.Wang,et al., Japanese Journal of Applied Physics, 63, 03SP38A (2024).

謝辞 本研究は JSPS 科研費 22K04200 の助成を、ICPCVD 成膜に関して東京エレクトロンテクノロジーソリューションズ(株)の支援を受けた。

Highly Reliable Self-Aligned Top-Gate Thin-Film Transistors with Hydrogen-Doped Poly-InO_x (InO_x:H) channel

° (D3) Mir Mutakabbir Alam¹, (B4) Motoki Ando², and Mamoru Furuta^{1,3}

¹Engineering Course, ²School of Engineering Science, ²Center for Nanotech. Research Institute, Kochi Univ. of Technology, Kami, Kochi, 782-8502, Japan

E-mail: 256002u@gs.kochi-tech.ac.jp

Oxide semiconductors based thin film transistors (TFTs) have received immense interest due to their high mobility (μ_{FE}), large area uniformity, and low leakage current [1]. Bottom-gate oxide TFTs exhibit large parasitic capacitances in the gate and source/drain (S/D) regions [2]. The top gate self-aligned (TG-SA) TFT structure is prominent to reduce the parasitic capacitance. This presentation focuses on the reliability of TG-SA poly-InO_x:H TFT.

The 30-nm InO_x:H films were deposited by RF magnetron sputtering and annealed at 300°C for crystallization, as show in Fig.1 of fabrication steps. Next, a 140-nm SiO₂ layer was deposited at 300°C as gate insulator (GI) by inductively coupled plasma chemical vapor deposition (ICP-CVD). Then, a 150 nm thick Al–Nd–Ti alloy was deposited as a gate electrode. B⁺ ions were implanted through the GI to form S/D regions. Subsequently, a SiN_x/SiO₂ stacked film was deposited for an inter-layer dielectric by ICP-CVD. The S/D electrodes were formed by Mo/Al/Mo. Figure 2 shows the transfer characteristics of the TG-SA poly-InO_x:H TFT. The as-fabricated TFT shows the depletion-mode characteristics. After applying the post fabrication annealing at 300°C, the TFT operated in an enhancement-mode with values of V_{th} and μ_{FE} are 0.23 V and 29.18 cm²/Vs, respectively. Figure 3 shows the changes in transfer characteristics under NBTS with a gate voltage of -15 V and grounded source and drain electrodes at a stress temperature of 60°C for 6,000 s. Poly-InO_x:H TFT exhibited excellent stability under NBTS with no change of the V_{th} . The reliability of TG-SA Poly-InO_x:H TFTs will also be discussed.

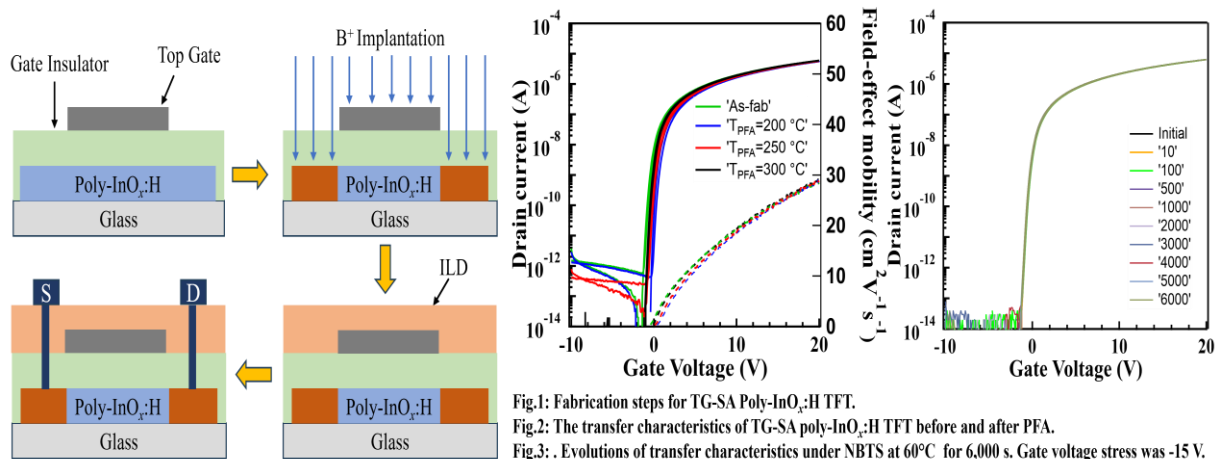


Fig.1: Fabrication steps for TG-SA Poly-InO_x:H TFT.

Fig.2: The transfer characteristics of TG-SA poly-InO_x:H TFT before and after PFA.

Fig.3: . Evolutions of transfer characteristics under NBTS at 60°C for 6,000 s. Gate voltage stress was -15 V.

Acknowledgements

This work is supported in part by JSPS KAKENHI Grant No. 22K04200. The authors are grateful to Tokyo Electron Technology Solutions Ltd. and Nissin Ion Equipment. Co., Ltd. for their support of ICP-CVD deposition and ion implantation, respectively.

References:

1. K. Nomura et al., Nature 432 448 (2004), 2. T. Ui et al., ECS Transactions 109 (6) 67 (2022).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 窒化物・III/V族ナノ構造における新規機能発現

[17p-C42-1~11] 窒化物・III/V族ナノ構造における新規機能発現

[17p-C42-1]

[Fellow International 2024 Special Lecture] Insights on GaN bulk crystal growth and GaN-on-GaN technology.

○Michal Stanislaw Bockowski¹ (1.Institute of High Pressure Physics (IHPP) of the Polish Academy of Sciences (PAS))

[17p-C42-2]

ワイドギャップ半導体多層構造のマルチスケール評価

○谷川 智之¹、石井 由也¹、山崎 順²、田中 敦之³、本田 善央³、上向井 正裕¹、片山 竜二¹ (1.阪大院工、2.阪大電顕センター、3.名大IMaSS)

[17p-C42-3]

GaN基板上に成長したGa_{1-x}In_xN/GaN五重量子殻とその単一化した量子殻に対するX線ナノビームによる局所構造解析○宮嶋 孝夫¹、太田 翔也¹、小林 稜汰¹、安田 伸広²、中尾 知代³、荒井 重勇³、西村 一輝¹、青山 晃己¹、隅谷 和嗣²、今井 康彦²、木村 滋²、上山 智¹、今井 大地¹ (1.名城大理工、2.高輝度光科学研究センター、3.名大未来材料システム研)

[17p-C42-4]

マルチスケールなIII/V族ナノ構造の創成

○石川 史太郎¹ (1.北大量集センター)

[17p-C42-5]

III-V/Si集積に向けたSOI (001)基板上InP横方向MOVPE選択成長(3)

○本間 寛弥¹、杉山 弘樹¹、開 達郎¹、佐藤 具就¹、松尾 慎治¹ (1.NTT 先デ研)

[17p-C42-6]

MOVPE選択成長法によるAlInPフィン成長と評価

○東 佑樹¹、鄭 子ヨウ¹、本久 順一¹、富岡 克広¹ (1.北海道大学)

[17p-C42-7]

新規機能発現に向けた低温成長Bi系III-V族半導体混晶

○富永 依里子¹、石川 史太郎²、池永 訓昭³、上田 修⁴ (1.広大先進理工、2.北大量集セ、3.金沢工大、4.明治大)

[17p-C42-8]

GaN系ナノ結晶の成長と発光デバイスへの応用

○上山 智¹、竹内 哲也¹、岩谷 素顕¹ (1.名城大学)

[17p-C42-9]

2層極性反転AlN導波路を用いたCW半導体レーザー励起による230 nm帯遠紫外第二高調波発生

○本田 啓人¹、浅井 昭典²、當銘 賢人²、森下 桂嗣²、加藤 伸藤²、藤原 弘康²、正直 花奈子^{3,4}、三宅 秀人³、上向井 正裕¹、谷川 智之¹、片山 竜二¹ (1.阪大院工、2.浜松ホトニクス、3.三重大院工、4.京大院工)

[17p-C42-10]

AlGaN系UV-B LDの注入効率向上に向けた高Al組成差のヘテロ界面形成技術

○齋藤 巧夢¹、三宅 倫太郎¹、山田 凌矢¹、井本 圭紀¹、丸山 峻大¹、佐々木 祐輔¹、狩野 祥吾¹、岩山 章¹、三宅 秀人²、竹内 哲也¹、岩谷 素顕¹ (1.名城大理工、2.三重大院工)

[17p-C42-11]

分布型分極ドーピングを用いたAlGa_N系縦型p-nダイオードの特性評価

○本田 善央^{1,2,3}、隈部 岳瑠⁴、久志本 真希⁴、天野 浩^{1,2,3} (1.名大未来研、2.名大 D センター、3.名大 IAR、4.名大院工)

ワイドギャップ半導体多層構造のマルチスケール評価

Multiscale Characterization of Widegap Semiconductors Multilayers

阪大院工¹, 阪大電顕センター², 名大 IMaSS² ○谷川 智之¹, 石井 由也¹, 山崎 順²,

田中 敦之³, 本田 善央³, 上向井 正裕¹, 片山 竜二¹

Grad. of Eng., Osaka Univ.¹, Research Center for UHVEM, Osaka Univ.², IMaSS, Nagoya Univ.³,

○T. Tanikawa¹, Yuya Ishii¹, J. Yamasaki², A. Tanaka³, Y. Honda³, M. Uemukai¹, R. Katayama¹

E-mail: tanikawa@eei.eng.osaka-u.ac.jp

多光子励起過程を利用した発光イメージングはワイドギャップ半導体材料の内部に分布する転位をはじめとした結晶欠陥の多様な分布を非破壊で可視化することができ、GaN や SiC などの貫通転位評価を中心として利用されている。この評価手法は面内方向にサブミクロン程度の空間分解能を有しつつ、レーザを走査することでウェハスケールのマクロな評価が可能である。しかし、半導体材料の大きな屈折率と屈折率差に由来して励起光は試料深さ方向に広がり、空間分解能はマイクロメートルオーダーに留まってしまう。そのため、多層構造の観察評価には課題がある。ワイドギャップ半導体多層構造の評価のために、Fig. 1 に示すような分光・多波長イメージングを行い、特定の欠陥や不純物、ヘテロ層などの発光を選択的に検出することで空間分解能の問題を一部改善できる (Fig. 2)。本講演では、GaN、SiC、InGaP、Ga₂O₃などを事例に挙げ、ワイドギャップ半導体の多層構造の評価解析について著者が実施してきた結果を概説する[1-5]。

- [1] T. Tanikawa *et al.*, APEX **11**, 031004 (2018).
- [2] M. Tsukakoshi, T. Tanikawa *et al.*, APEX **14**, 055504 (2021).
- [3] A. Ogura, T. Tanikawa *et al.*, APEX **14**, 111002 (2021).
- [4] T. Nishikawa, T. Tanikawa *et al.*, JJAP **62**, SF1015 (2023).
- [5] T. Tanikawa *et al.*, 32nd ICDCM (2022.9.4, Lisbon, Portugal).

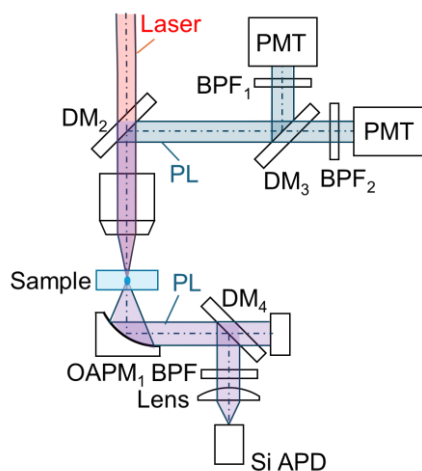


Fig. 1. Schematic of the optical system for multiphoton excitation PL imaging.

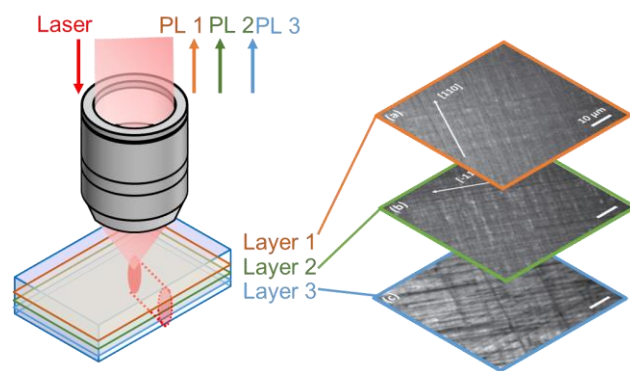


Fig. 2. Schematic diagram of characterization of multilayer structures using multiphoton excitation PL imaging.

GaN 基板上に成長した $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/\text{GaN}$ 五重量子殻と その単一化した量子殻に対する X 線ナノビームによる局所構造解析

Local Structure Analysis by using an X-ray Nanobeam for $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/\text{GaN}$

5-quantum Shells Grown on a GaN Substrate and a Single Sample Extracted from it

名城大理工¹, 高輝度光科学研究センター², 名大未来材料・システム研³

宮嶋 孝夫¹, 太田 翔也¹, 小林 稜汰¹, 安田 伸広², 中尾 知代³, 荒井 重勇³, 西村 一輝¹,
青山 晃己¹, 隅谷 和嗣², 今井 康彦², 木村 滋², 上山 智¹, 今井 大地¹

Meijo Univ.¹, JASRI², Nagoya Univ.³

°T. Miyajima¹, S. Ota¹, R. Kobayash¹, N. Yasuda², T. Nakao³, S. Arai³, K. Nishimura¹,
K. Aoyama¹, K. Sumitani², Y. Imai², S. Kimura², S. Kamiyama¹, and D. Imai¹

E-mail: mtakao@meijo-u.ac.jp

【背景】最近になり、GaN 系多重量子殻(Multi-quantum Shells, MQS)を活性層に採用した半導体レーザの室温パルス発振が報告された[1]。GaN 系 MQS は、直径数百 nm・高さ数 μm の六角柱状の GaN ナノワイヤの側面である m 面上に成長した $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/\text{GaN}$ 多重量子井戸であり、半導体レーザの活性層として用いることで、その高出力化が期待されている。なぜならば、活性層体積の増大と量子閉じ込めシュタルク効果の抑制が可能だからである。更なるデバイス特性の向上には、これらの利点を生かしながら、活性層内の In 組成分布を制御することが重要である。我々は、大型放射光施設 SPring-8 の X 線ナノビーム回折により、nm サイズの MQS の構造評価が可能であることを示した[2]。ここでは、室温パルス発振[1]に採用された GaN 基板上の GaN 系五重量子殻(5QS)と、その 1 本を抽出した試料に対する X 線ナノビーム回折により、In 組成の分布を求めた。

【実験方法】測定試料として、MOCVD 法により、c 面 GaN 基板上に六角柱状の GaN ナノワイヤを 1600nm 間隔で形成後、その側壁である m 面を覆うように $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/\text{GaN}$ 五重量子井戸(5QWs)が成長された。この試料を SPring-8 の 2 つのビームライン BL13XU と BL40XU にて測定した。前者の場合は、基板を劈開後、林立した 5QS の 1 つの m 面に X 線ナノビームを照射して回折測定[3]を、後者の場合は、単一の 5QS を FIB マイクロサンプリング法により抽出し、その m 面に X 線ナノビームを照射して回折測定[4]を行った。

【結果】Fig.2 に、単一の 5QS の下部、中部、上部 ($z = 0, 300, 600\text{nm}$) と 300nm 間隔で X 線ナノビームを照射した場合の 1-100 逆格子マップより抽出した $q_z // [1-100]$ に対する X 線強度プロファイルを示した。GaN および 5QWs からのサテライトピーク 0th、-1st、+1st より、下部、中部、上部の量子井戸幅は 10.8、11.4、10.8nm、井戸中の In 組成は 23.2、22.3、23.2%と求められた。

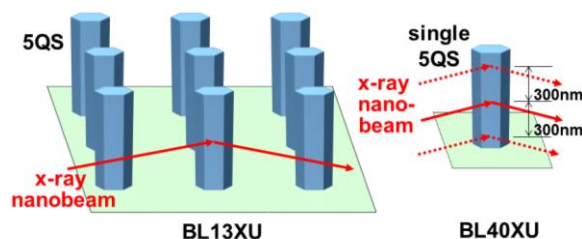


Fig.1: 各ビームラインで測定した試料の概略図

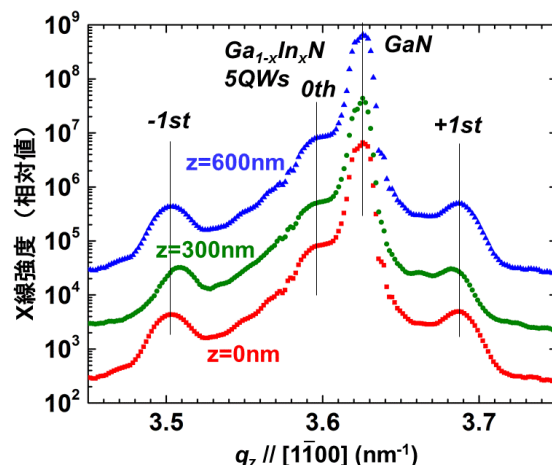


Fig.2: 下部,中部,上部の X 線強度プロファイル

謝辞 名城大の岩谷素顕教授、竹内哲也教授、赤崎勇教授に深く感謝致します。また本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業、文部科学省委託事業ナノテクノロジープラットフォーム課題として名古屋大学微細構造解析プラットフォームの支援 (課題番号: JPMXP1221NU0052) により実施した。放射光実験は、高輝度光科学研究センター (JASRI) の承認を得て、SPring-8 の BL40XU 及び BL13XU で実施された (課題番号: 2021B1563, 2021A1507)。

[1] K. Okuno et al., APEX., **14**, 074004 (2021)., [2] T.Kondo et al., IWN2018., J7-3, Kanazawa (2018).

[3] 小林他, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 10p-N101-20 (2021, 名城大学)

[4] 太田他, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 23a-C200-11 (2022, 東北大学)

マルチスケールな III-V 族ナノ構造の創成

Multiscale III-V semiconductor nanostructures

北大量集セ ○石川 史太郎

Hokkaido Univ. RCIQE, °Fumitaro Ishikawa

E-mail: ishikawa.fumitaro@rciqe.hokudai.ac.jp

「ナノ構造機能をマクロスケールで有効利用できるか？」III-V 属ナノワイヤは、各種結晶成長手法で成長・応用例が報告される直径数 100nm 以下、長さ数 μm 以上程度の 1 次元細線構造で、キャリア輸送を行う極限の一次元体構造と薄膜よりも大きな実効表面積を活用した研究が進展している。III-V 属半導体は既存材料中で最高峰の電子移動度や直接遷移型のバンド構造に起因した光電変換効率を有し、トランジスタや LED、レーザー材料として現在の社会に浸透している。シリコンなどの格子定数の大きく異なる材料ともナノワイヤであれば微小接触領域から高品質エピタキシャル成長が可能で、材料間の融合性を大きく拡大できる。著者らは近年ナノワイヤを核生成させる Ga 自己触媒を適切に供給することで、シリコンウエハ全面で高品質の GaAs ナノワイヤを大容量エピタキシャル成長することに成功した (Fig. 1) [1]。同試料はワイヤ群が示す特異な光散乱で太陽光の 98%の光を吸収、既報最高水準の約 1 ns の室温キャリア寿命を有し、基板全面で GaAs 基板よりも強い発光強度が得られた。

ナノ構造結晶では、マクロなサイズの試料では得られない量子効果や、極微細な高品質結晶で発現する特長的機能を示す。本研究では、シリコンウエハ上のナノスケール III-V 族ナノ構造結晶成長とその大容量化から、ナノスケール構造機能の大出力化など、マルチスケール展開ならではの機能化と可能性について検討する。

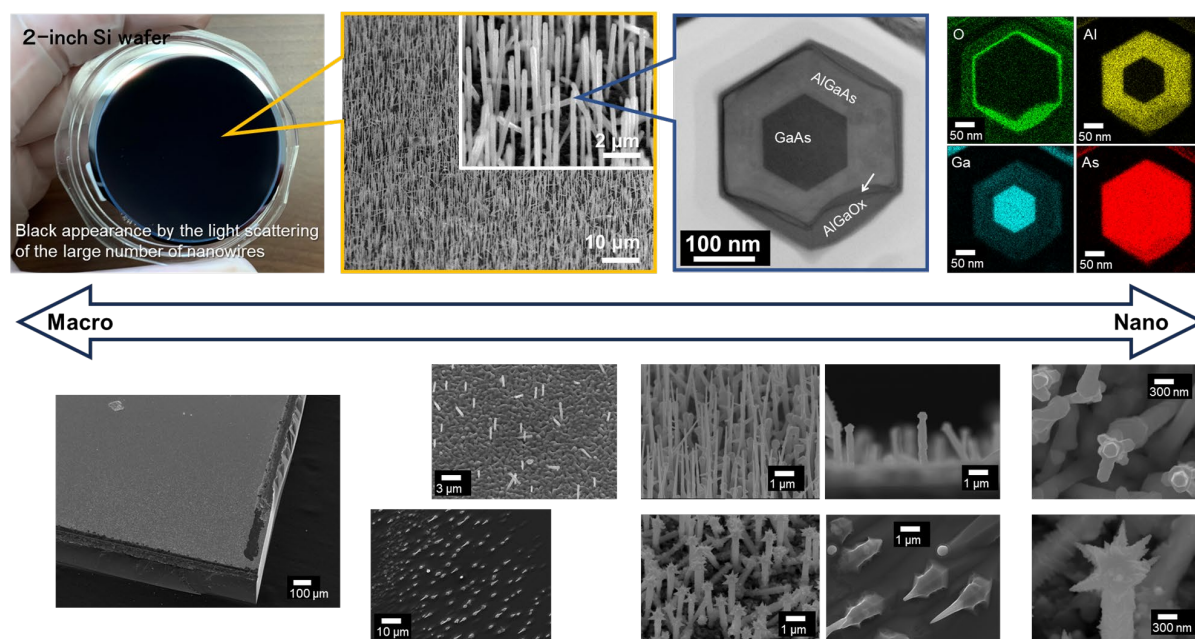


Figure 1. Multiscale III-V nanostructures

[1] Minehisa et al., Nanoscale Adv. 5, 1651, 2023.

III-V/Si 集積に向けた SOI (001)基板上 InP 横方向 MOVPE 選択成長(3) Selective lateral MOVPE growth of InP on SOI (001) substrates for III-V/Si integration

日本電信電話株式会社 NTT 先端集積デバイス研究所

○本間 寛弥, 杉山 弘樹, 開 達郎, 佐藤 具就, 松尾 慎治

NTT Device Technology Labs., NTT Corporation,

°H. Homma, H. Sugiyama, T. Hiraki, T. Sato, and S. Matsuo

E-mail: hirova.homma@ntt.com

【はじめに】Si 上 III-V 族半導体結晶直接成長技術による Si 導波路結合型レーザのモノリシック集積は、ヘテロジニアス集積と比較し、コストやスループットの優位性からその実現が期待されているが、Si/III-V 界面で生じる欠陥により、一般にレーザ発振に必要な高品質結晶を得ることは難しい。この問題の解決に向けて、我々は SOI (001) 基板上に Si {111}面と選択成長マスクに囲まれた中空構造を有する基板を用いて Si から III-V 族半導体を横方向に選択成長する手法により、デバイスへ適用可能な面積を有する低転位密度の InP 薄膜の形成に成功したことを報告した。しかし、選択成長時の Si 及び III-V 族半導体の{111}フロントファセットを起点として生じる回転双晶が品質劣化の要因であった¹⁾。今回我々は、成長の起点となる Si の面方位を適切に制御した新しい基板を用いることで、横方向選択成長時に生じる回転双晶を抑制できることを実証したので報告する。

【実験】成長には縦型 MOVPE 装置、III 族原料として TMI_n, TEGa, V 族原料として TBAs, TBP, PH₃を用いた。新構造の基板は、SOI(001)基板上に成膜した酸化膜に対して、[110]方向に対して傾斜を持つ開口を形成した後に、Si をサイドエッチングすることで形成する。リファレンス用の従来構造の基板作製手法と成長条件はこれまでと同様である¹⁾。構造評価には光学顕微鏡と SEM を用いた。

【結果と考察】図 1 に加工基板の構造を示す。従来構造の(a)は Si{111}表面から[110]方向に選択成長が進む。(b)は長手方向が[1-13]方向の開口を形成した場合で、Si{311}表面から[310]方向に成長する。それぞれの基板を用いて InP 薄膜を成長し、薄膜上部の酸化膜除去、表面の硫酸エッチングを施した試料の光学顕微鏡像を図 2 に示す。従来構造に成長した InP の表面(a)には、[110]方向から約 33° の方向に伝搬する積層欠陥起因のエッチピットが大量に観測された。これは、双晶領域における積層欠陥の伝搬方向である¹⁾。一方、新規構造にて成長した InP の表面(b)には、同様のエッチピットは観測されず、双晶の排除に成功した事を示す。これは、Si{311}面を起点とした[310]方向への成長であることにより InP のフロントファセットに占める{111}面の割合が減ったためだと考えられる。

【Ref.】[1]本間他, 秋季応物,20a-A311-7 (2023).

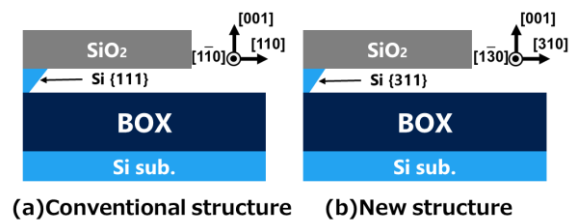


Fig. 1. Cross-sectional structure of each substrate.
(a) Conventional structure., (b) New structure.

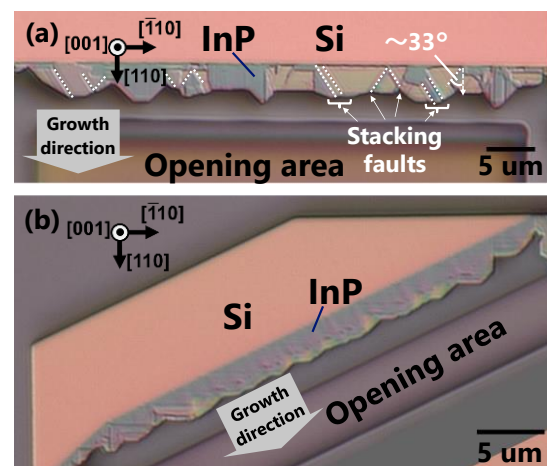


Fig. 2. Optical images of laterally grown InP.
(a) InP film grown on the conventional structure.,
(b) InP film grown on the new structure.

MOVPE 選択成長法による AlInP フィン成長と評価

Selective-area MOVPE of AlInP fins on InP(111)A

°(D)東 佑樹, (D)鄭 子ヨウ, 本久 順一, 富岡 克広

Graduate School of IST and RCIQE, Hokkaido Univ.

°Yuki Azuma, Ziye Zheng, Junichi Motohisa, Katsuhiko Tomioka

E-mail: azuma@rciqe.hokudai.ac.jp

【背景/目的】発光ダイオード(LED)材料では、緑色～黄色波長帯で高輝度、高効率で発光する材料候補が少ない課題がある。我々はこの課題を解決するため、構造相転移によるウルツ鉱型(WZ)AlInP 単結晶薄膜の高輝度 LED 応用を目指している^[1]。WZ-AlInP は直接遷移型のバンドギャップを持つため^[2]、混晶比を制御することで緑色～黄色で高輝度・高効率発光する可能性がある。今回は、WZ-AlInP 単結晶の大面积成長に向けて、AlInP フィンの選択成長とその評価を行ったので報告する。

【実験方法】InP(111)A 基板上に Si₃N₄ を 20 nm スパッタリングし、電子ビームリソグラフィとイオン反応性エッチングおよびウェットエッチングで図 1 内挿図のように開口パターンを形成した。次いで、有機金属気相選択成長(MOVPE 選択成長)法で AlInP フィンを成長した。成長条件は、原料としてターシャリーブチルホスフィン(TBP)、トリメチルアルミニウム(TMAI)、トリメチルインジウム(TMIn)、成長温度 660°C、成長時間 20 分、V/III 比 24 で、気相中での III 族原料の Al 比率は 30%とした。フォトルミネッセンス(PL)測定は室温、励起光波長 462 nm で行なった。

【結果と考察】図 1 に AlInP フィン選択成長結果を示す。AlInP フィンは開口部に従って

基板垂直方向に成長するとともに、横方向にも成長することで、図 1 に示すように隣接するフィン同士でコアレセンスした。また、フィンのファセット側面は平坦ではなく、{-110}微小面で構成された波状のファセットが形成された。これは Al 吸着原子の表面拡散長が短く、{-211}面上で AlInP が多核成長したためと考えられる。さらに、Al 原子がフィン側面に吸着することで横方向成長が促進されコアレセンスしたと考えられる。

図 2 に AlInP フィンアレイの PL スペクトルを示す。作製したフィンは、室温で 1.340 eV、1.430 eV、1.575 eV、1.771 eV にピークを持つ発光スペクトルを示すことがわかる。発光起源について、1.340 eV は ZB-InP、1.430 eV は WZ-InP、1.575 eV は ZB-InP 基板と AlInP フィンの界面、1.771 eV は AlInP フィンのバンド端発光に由来すると考えられる。今、WZ-AlP のバンドギャップを 2.97 eV とすると^[2]、1.771 eV の発光ピークから固相中の Al 組成は 33%と計算される。

PL スペクトルから作製した AlInP フィンには、WZ 相と ZB 相が混在している可能性がある。

当日は AlInP フィン選択成長と Al 組成制御や結晶構造について考察する。

【参考文献】

- [1] F. Ishizaka *et al*, Nano Lett. **17**, 1350 (2017).
[2] A. De *et al*, Phys. Rev. B **81**, 155210 (2010).

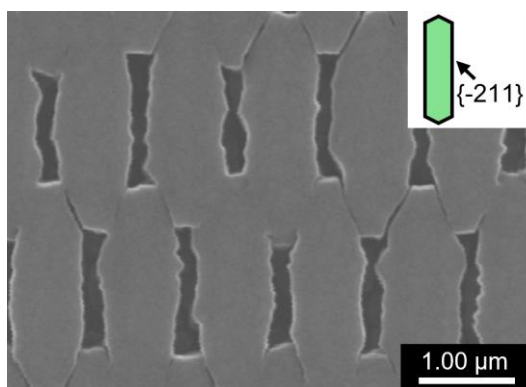


Fig. 1 SEM image of the AlInP fins. Inset is schematics of the mask openings.

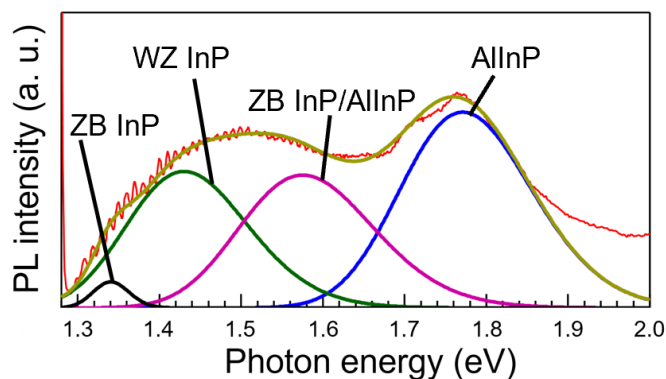


Fig. 2 PL spectra of the AlInP fin array.

新規機能発現に向けた低温成長 Bi 系 III-V 族半導体混晶

Low-temperature-grown dilute bismide III-V compound semiconductors for novel functions

広大先進理工¹, 北大量集セ², 金沢工大³, 明治大⁴

○富永 依里子¹, 石川 史太郎², 池永 訓昭³, 上田 修⁴

AdSE, Hiroshima Univ.¹, RCIQE, Hokkaido Univ.², Kanazawa Inst. Tech.³, Meiji Univ.⁴

○Yoriko Tominaga¹, Fumitaro Ishikawa², Noriaki Ikenaga³, Osamu Ueda⁴

E-mail: ytominag@hiroshima-u.ac.jp

GaAsBi に代表されるビスマス (Bi) 系 III-V 族半導体混晶は、Bi をわずかに数パーセント GaAs 結晶の中に取り込むだけで、禁制帯幅が急激に小さくなる、価電子帯上端が高エネルギーシフトする、禁制帯幅の温度依存性が低減するといった特異な物性を発現することが知られている[1-3]。結晶成長の観点からは、Bi の原子半径が Ga、As 両原子のものよりも大きいことから、Bi 系 III-V 族半導体混晶を成長するには 400℃以下の低温成長が元来必要であることも当該混晶の特徴の一つである[4]。本研究グループでは、最終的な研究対象を四元混晶の InGaAsBi に定め、分子線エピタキシー (MBE) 法を用いた低温領域の中でも更に低温の 300℃以下の成長に取り組んでいる[5-7]。この低温成長により、InGaAsBi 結晶内に意図的に点欠陥を取り込み、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) における代表的な THz 波発生検出素子である光伝導アンテナ (PCA) 用半導体に求められる短キャリア寿命、高抵抗、高移動度の 3 つの物性を同時に得ようとしている[8]。

近年、2030 年に実用開始が目標とされている第 6 世代移動通信システム (6G) 時代の到来に向け、利用が想定されている 300 GHz 付近までのサブテラヘルツ帯の周波数帯域に関する研究開発が盛んになっている。6G の発展に伴い、THz 技術分野において長く使用され発展してきた THz-TDS を、こうしたサブテラヘルツ帯におけるトランジスタ等の素子用の電子材料の物性評価システムに応用するという要望がある。本研究で取り組んでいる低温成長 InGaAsBi は、GaAs 結晶に In、Bi 両原子を取り込むことで禁制帯幅を近赤外域に位置させることが可能であることから、前述の 3 つの物性を同時に得ることで、光通信帯光源を駆動源とした THz-TDS 用 PCA を実現できる可能性を秘めている。これにより THz-TDS システム全体を省スペース化、低コスト化したいと考えている[8]。

本講演では、低温成長 GaAsBi の MBE 成長条件からその結晶内に存在していると考えられる点欠陥、更には低温成長 InGaAsBi の MBE 成長条件に至るまでを総括する。当該 PCA の実現には In、Bi 両原子の組成制御に加えて点欠陥制御が要となるが、その制御を試みる過程で、従来から提唱されている Bi 原子の結晶成長時のサーファクタント効果が発揮されている傾向があるようにみえたため、そのことについても触れる予定である。

謝辞：本研究は、科研費 19H04548、21H01829、21H05566、21K04910 ならびに池谷科学技術振興財団の助成によって遂行された。

[1] K. Oe, Jpn. J. Appl. Phys., **41**, 2801 (2002). [2] A. Janotti et al., Phys. Rev. B, **65**, 115203 (2002). [3] Y. Zhang et al., Phys. Rev. B, **71**, 155201 (2005). [4] M. Yoshimoto et al., Jpn. J. Appl. Phys. **42**, L1235 (2003). [5] Y. Tominaga et al., J. Cryst. Growth, **544**, 125703 (2020). [6] Y. Tominaga et al., Appl. Phys. Express, **15**, 045504 (2022). [7] O. Ueda et al., J. Cryst. Growth, **601**, 126945 (2023). [8] 富永依里子、応用物理、**92**、617 (2023).

GaN 系ナノ結晶の成長と発光デバイスへの応用

Growth of GaN-based nanocrystals and its application to light-emitting devices

名城大理工 ○上山 智、竹内 哲也、岩谷 素顕

Meijo Univ., Satoshi Kamiyama, Tetsuya Takeuchi, Motoaki Iwaya

E-mail: skami@meijo-u.ac.jp

基板上に絶縁膜マスクを堆積し、その開口を形成することで、選択成長により周期的に配置された GaN 系のナノワイヤ、ナノピラミッドなどのナノ結晶が成長できる[1]。これは 3 次元光波モードの位相が制御された単一モードの半導体レーザー[2]や、非極性面、または半極性面を利用した多重量子井戸（多重量子殻:MQS）を有する長波長の LED が実現できる可能性がある[3]。結晶成長に関しても、薄膜成長、あるいはミクロンスケールの選択成長とは大きく異なる成長機構を有し、低温で AlGaIn や GaInN などの混晶の選択成長が可能であることや、比較的高温で非常に InN モル分率の高い GaInN 混晶が得ることができるなど、興味深い特長を持つ。これらの性質を利用できれば、超高出力単一モード半導体レーザーや、高性能の長波長域（黄色～赤色）の LED などの実現が期待される。

本講演では、GaN ナノワイヤ (Fig.1) と $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{N}$ ナノピラミッド (Fig.2) の結晶成長や、これらをベースとした多重量子殻を含むコアシェル構造 (Fig.3) の形成、さらにナノ結晶の発光デバイスへの応用について、議論を行う。

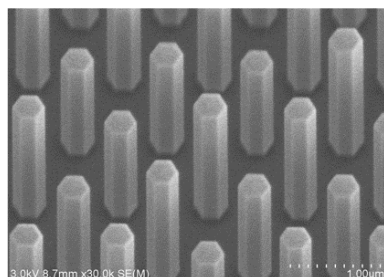


Fig.1. GaN nanowires
(350nm(D) × 1.5μm(H))

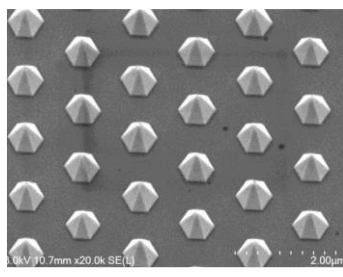


Fig.2. $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{N}$ -nanopyramid
(500nm(D))

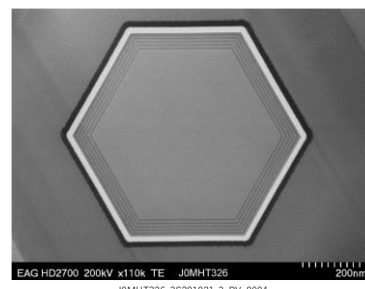


Fig.3. Horizontal cross-section of
GaN nanowire/GaInN-MQS

参考文献

- [1] S Kamiyama, et al., ECS Journal of Solid State Science and Technology 9, 015007 (2020).
- [2] K. Okuno, et al., Appl. Phys. Express, 14, 074004 (2021).
- [3] W. Lu, et al., Appl. Surf. Sci., 539, 148279 (2021).

謝辞

本研究の一部は JST-CREST(No. 16815710)、JST-A-STEP (JPMJTR201D)、NEDO 先導研究、および科学研究費補助金基盤研究 A (22H00304) の援助により実施した。

2 層極性反転 AlN 導波路を用いた CW 半導体レーザ励起による 230 nm 帯遠紫外第二高調波発生 230-nm Band Far-UV Second Harmonic Generation in Polarity Inverted AlN Bilayer Waveguide Pumped by CW Semiconductor Laser 阪大院工¹, 浜松ホトニクス², 三重大院工³, 京大院工⁴

○本田 啓人¹, 浅井 昭典², 當銘 賢人², 森下 桂嗣², 加藤 伸藤², 藤原 弘康²,
正直 花奈子^{3,4}, 三宅 秀人³, 上向井 正裕¹, 谷川 智之¹, 片山 竜二¹

Osaka Univ.¹, Hamamatsu Photonics K. K.², Mie Univ.³, Kyoto Univ.⁴,

○H. Honda, A. Asai, K. Tome, K. Morishita, S. Kato, H. Fujiwara,

K. Shojiki, H. Miyake, M. Uemukai, T. Tanikawa and R. Katayama

E-mail: honda.h@qoe.eei.eng.osaka-u.ac.jp

AlN は遠紫外光に対する透明性と強い光学非線形性を有しているため遠紫外第二高調波発生 (SHG) に使用することができ、AlN の極性反転構造とモード分散位相整合 (MDPM) を組み合わせた横型擬似位相整合 (QPM) によって高効率な SHG が可能である。我々はこれまでに、2 層極性反転 AlN チャンネル導波路を高い尖頭値と広いスペクトル幅のフェムト秒パルスレーザで励起することで遠紫外 SHG を実証した[1]。しかし、フェムト秒パルスレーザの筐体は大きいと、光源としての小型化には半導体レーザとの集積が不可欠である。そこで本研究では、波長 460 nm 帯 CW 波長可変半導体レーザを励起光源に 2 層極性反転 AlN チャンネル導波路による遠紫外 SHG の実証を行った。

2 層極性反転 AlN 構造はスパッタリング法と Face-to-Face アニールによって形成され[2]、励起レーザの波長可変域を補うために異なる幅を持つ導波路を作製した。長さ 3.3 mm の導波路入射端面に CW 波長可変半導体レーザを励起光として対物レンズで結合させ、反対側の端面から出射された導波光を紫外対物レンズと軸外し放物面ミラーで光電子増倍管 (PMT) に集光した。PMT は可視光に比べ紫外光への感度が高いものを使用し、さらに遠紫外バンドパスフィルタを 3 枚マウントしたため、励起光の信号は検出限界以下である。厚さ 360 nm、上面の幅が 500 nm、下面の幅が 800 nm の導波路において励起波長を変えると、波長 461.5 nm のとき PMT の出力が増加した (図 1)。このとき PMT の出力がレーザパワーの 2 乗に比例したことから、CW レーザ励起による AlN 導波路を用いた遠紫外 SHG が確認された (図 2)。

参考文献: [1] H. Honda *et al.*, APEX **16**, 062006 (2023). [2] K. Shojiki *et al.*, Mater. Sci. Semicond. Process. **166**, 107736 (2023).
謝辞: 本研究は科研費 JP23KJ1512, JP23K26572, JP22K14612, JP22H01970、及び JST-SICORP JPMJSC22C1, JST-FOREST JPMJFR203I, NEDO Intensive Support for Young Promising Researchers 21502153-0, NEDO Leading Research の支援を受けたものです。デバイス作製に関して立命館大学 藤原康文教授および大阪大学フotonicsセンターの協力を得ました。

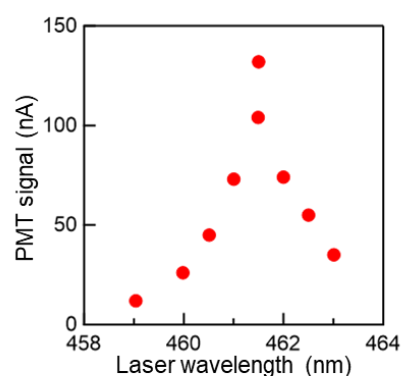


図 1 PMT 信号の波長依存性

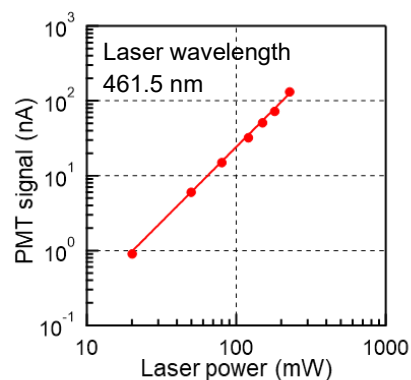


図 2 PMT 信号のレーザパワー依存性

AlGa_N 系 UV-B LD の注入効率向上に向けた高 Al 組成差のヘテロ界面形成技術 Hetero-interface formation technology with high Al content difference for improving injection efficiency of AlGa_N-based UV-B LDs

(M1) 齋藤巧夢¹、三宅倫太郎¹、山田凌矢¹、井本圭紀¹、丸山竣大¹、佐々木祐輔¹、狩野祥吾¹、
岩山章¹、三宅秀人²、上山智¹、竹内哲也¹、岩谷素顕¹

¹名城大・理工、²三重大・院・工

Takumu Saito^{1,*}, Rintaro Miyake¹, Ryoya Yamada¹, Yoshinori Imoto¹, Shundai Maruyama¹,
Yusuke Sasaki¹, Shogo Karino¹, Sho Iwayama¹, Hideto Miyake²,

Satoshi Kamiyama¹, Tetsuya Takeuchi¹, Motoaki Iwaya¹

¹Meijo University, ²Mie University,

E-mail: 200443034@ccalumni.meijo-u.ac.jp

我々は、AlGa_N 系 UV-B レーザーダイオード (LD) の室温パルス発振に成功し、ピーク光出力 150mW を達成した。しかし、この LD のキャリア注入効率(η_i)はわずか 10% であり、GaInN、AlGaInP、AlGaInAs などの他の半導体材料を用いた LD に比べて著しく低い。さらなる光出力向上に向けて η_i 改善が重要な課題である。本研究では、デバイスシミュレータ SiLENSe を用いた LD 層構造の設計と MOVPE 成長条件の最適化について検討を行った。

まずシミュレーションを行った。本シミュレーションでは、電子ブロッキング層 (EBL) とガイド層の Al 組成差および急峻性を検討した。その結果、EBL/ガイド層のヘテロ接合において大きな Al 組成差を持ち、急峻な界面を形成することが、 η_i の向上に不可欠であることが示された。また、Al 組成差を 55% に設定した急峻な界面を作製することで、 η_i が 80% を超えることが示唆された。

次に、上記のようなヘテロ界面を作製する条件について調査した。この実験では、ガイド層、EBL、p-AlGa_N クラッド層の温度を図 2 に示すように系統的に変化させた。これらの試料を断面 TEM 観察すると、図 4 のような傾向を示すことが確認された。結果として、ガイド層、EBL、p-AlGa_N クラッド層の成長温度を 1000°C とした場合、EBL とガイド層の界面に、約 25nm の意図しない組成傾斜構造が形成された。一方、これらの層を全て 850°C で成長させると、意図しない組成傾斜構造は形成されず、急峻なヘテロ界面を実現した。また AlGa_N 層を積層後に組成傾斜層が形成されていることからこの傾斜層は固相拡散によるものであることが示唆された。

謝辞：本研究の一部は、科研費・基盤研究 A (22H00304)、JST REST(JPMJCR16N2)、NEDO 先導研究、および JST A-STEP 事業(JPMJTR201D) の援助によって実施された。

Reference: [1] R. Kondo et al. Appl. Phys. Lett. 121, 253501 (2022).

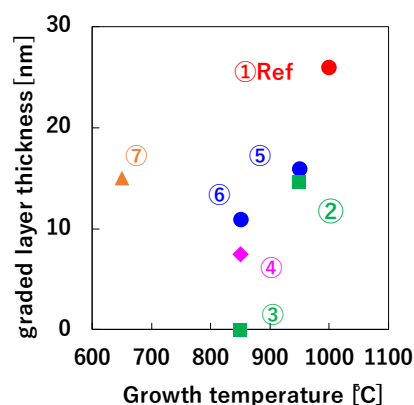
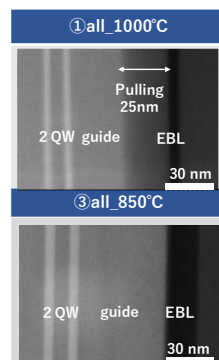
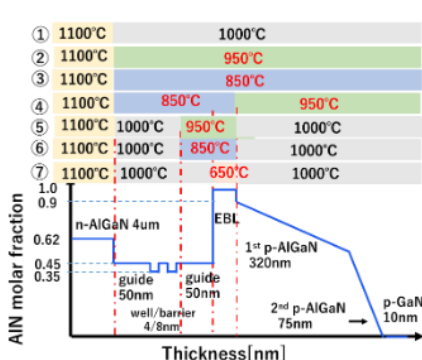
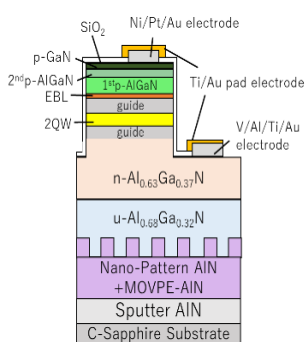


Fig.1 Device Structure

Fig.2 Growth sequence

Fig.3 Cross-sectional STEM image

Fig.4 Dependence of pulling

layer thickness on growth

分布型分極ドーピングを用いた AlGaN 系縦型 p-n ダイオードの特性評価

Characterization of AlGaN-based vertical p-n diodes

with distributed polarization doping

名大未来研¹, 名大 D センター², 名大 IAR³, 名大院工⁴,

○本田 善央^{1,2,3}, 隈部 岳瑠⁴, 久志本 真希⁴, 天野 浩^{1,2,3}

IMaSS¹, D Center², IAR³, Grad. Sch. Eng.⁴, Nagoya Univ.,

○Yoshio Honda¹, Takeru Kumabe¹, Maki Kushimoto¹, and Hiroshi Amano¹

E-mail: honda.yoshio.h4@f.mail.nagoya-u.ac.jp

【背景】多くのワイドギャップ半導体は p 型、n 型いずれかの作製が困難である単極性を有することが多い。また超ワイドギャップ半導体においては、絶縁体との境界が曖昧であり、伝導性制御自体が困難となってくる。窒化物半導体に当てはめると、GaN では p 型伝導性制御が困難であり、Al 組成の増加につれて p 型制御はより困難さを増すとともに n 型制御にも問題を生じる。ワイドギャップ半導体は絶縁破壊電界が高く、低消費電力パワーデバイスへの利用において大きな利点があり、このような伝導性制御の問題を打破することが急務となっている。本報告では、分布型分極ドーピング(DPD)[1,2]を利用し、p-n 接合ダイオードを作製してきた結果を紹介する。

【実験方法】(0001)GaN 基板上へ UID-GaN 層を介して、n-DPD 層の成長を行った。n-DPD 層として、GaN から Al 組成を徐々に増加する傾斜組成層を利用した。続いて p-DPD 層の成長を行った。p-DPD 層は一方で、AlGaIn から Al 組成を徐々に減少させ最後に p⁺⁺-GaIn:Mg を成長し、p-n ダイオードを作製した。得られたサンプルに対して、SIMS による Al の分布に対して、キャリア密度の理論的[3,4]な考察を行うとともに、C-V 測定により整合性の評価を行った。I-V 測定の温度特性、キャリアトランスポート特性、絶縁破壊メカニズム、p-DPD 中の電子のライフタイム及び拡散係数、またホール測定よりキャリア散乱のメカニズム等の評価を行った。

【結果と考察】DPD の一例として、図 1 に DPD 型 p-n ダイオードの SIMS 測定結果を示している。Si、Mg を用いず、Al 組成を単調に増減させたノンドーパ型の構造となっている。C-V 測定より p-n 接合界面からのチャージを計測すると、図 2 に示すように分極から計算される値を極めて一致しており、DPD 層が設計通り機能していることわかる。ここで、PN1 が図 1 で示したダイオードであり、PN2、PN3 においては、傾斜組成層の膜厚を薄くしたものである。図 3 では I-V 測定結果を示している。明確な整流性がみられ、理想因子が 473 K において、n=1.6 程度の p-n ダイオードが得られていた。他の特性から評価しても、ドーピングを上回る特性が得られており、DPD によるデバイス応用が現実的であることを示す結果となった。

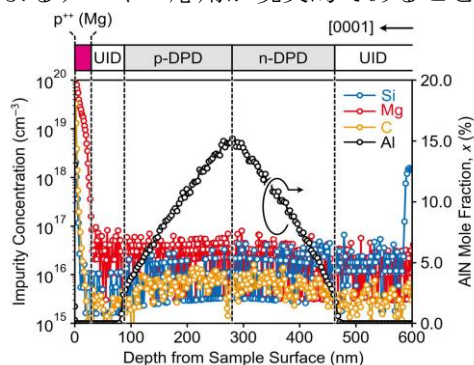


Fig. 1 SIMS measurements of DPD p-n diode structure.

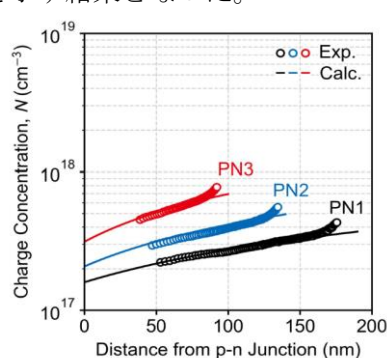


Fig. 2 Charge density in DPD p-n diode.

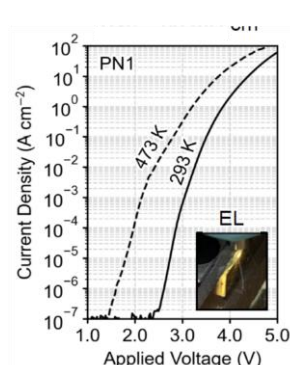


Fig. 3 I-V characteristics of DPD-p-n diode

【参考文献】 [1] D. Jena *et al.*, APL **81**, 4395 (2002). [2] D. Jena *et al.*, Phys. Stat. Solidi A **208**(7), 1511 (2011). [3] J. Pal *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 085211 (2011). [4] M. Yamaguchi *et al.*, J. Appl. Phys. **85**, 8502 (1999).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：カーボンナノチューブの物性・応用研究の最新動向

[17p-A23-1~11] カーボンナノチューブの物性・応用研究の最新動向

[17p-A23-1]

はじめに

○丸山 隆浩¹ (1.名城大学)

[17p-A23-2]

カーボンナノチューブの熱光物性

○宮内 雄平¹ (1.京大エネ研)

[17p-A23-3]

単層カーボンナノチューブのデバイス応用と1次元ヘテロ構造

○丸山 茂夫¹ (1.東大工)

[17p-A23-4]

ナノチューブのらせん度に依存した光物性

○齋藤 理一郎^{1,2,3} (1.台湾師範大学、2.東北大学、3.都立大学)

[17p-A23-5]

in-situ 電子顕微鏡法によるカーボンナノチューブ単一界面の熱動態計測

○平原 佳織¹ (1.千葉大工)

[17p-A23-6]

Tip-enhanced Raman spectroscopy and nanoimaging of carbon nanotube

○Prabhat Verma¹ (1.Osaka Univ.)

[17p-A23-7]

マテリアルリザバー演算素子：ナノカーボンを用いたAI演算素子とインセンサ演算応用

○田中 啓文^{1,2} (1.九工大生命体工、2.九工大Neumorphセンター)

[17p-A23-8]

CNTを用いた次世代電池の開発と展開

○周 英¹ (1.産総研)

[17p-A23-9]

カーボンナノチューブを利用した赤外線イメージセンサ

○弓削 亮太^{1,2}、田中 朋^{1,2}、佐野 雅彦¹、殿内 規之^{1,2}、渋谷 明信^{1,2}、澁谷 泰蔵^{1,2}、小坂 眞由美^{1,2}、野口 将高^{1,2}、宮崎 孝^{1,2}、宮本 俊江^{2,1}、小田 直樹¹ (1.NEC、2.AIST)

[17p-A23-10]

住友電工におけるカーボンナノチューブ線材の研究開発
ー変遷と展望についてー○大久保 総一郎¹、藤森 利彦¹、谷岡 大輔¹、井上 寛隆¹、高倉 章¹、日方 威¹、小野木 伯薫¹ (1.住友電工(株))

[17p-A23-11]

おわりに

○井ノ上 泰輝¹ (1.大阪大学)

カーボンナノチューブの熱光物性

Thermal-optical properties of carbon nanotubes

京大エネ研¹, °宮内 雄平¹

Kyoto Univ.¹, °Yuhei Miyauchi¹

E-mail: miyauchi@iae.kyoto-u.ac.jp

孤立単層カーボンナノチューブ (SWCNT) を高温に加熱すると、狭帯域な近赤外熱放射が観測される [1,2]。この熱放射の狭帯域性は、熱励起子生成[1,2]、すなわち、クーロン相互作用により結合した電子と正孔からなる準粒子の熱生成と、その輻射再結合に由来する。半導体型の SWCNT では特に、電子と正孔の結合エネルギーは数千 K の熱エネルギーに匹敵する数百 meV 程度となるため、SWCNT の励起子は高温でも熱的に安定である。一方、励起子自体のエネルギーは、高温では熱励起も可能な 1 eV 程度であるため、半導体型 SWCNT では励起子が熱生成されうる。このような SWCNT の熱励起子特性は、優れた波長選択性を持つ近赤外熱放射体を必要とする熱光発電技術や、高効率太陽熱吸収体などの熱光エネルギー関連技術において、従来考えにくかった励起子効果の応用という新たな機会を提供する。しかし、マクロスケールの工学応用には、孤立 SWCNT ではなく、多数の SWCNT からなるマクロな集積材料において熱励起子効果を利用する必要がある。この目標に向けた第一歩として、我々は最近、同じカイラル構造 (カイラリティ) を持つ SWCNT のみで構成され、近赤外領域に鋭い励起子共鳴ピークを持つ単一構造 SWCNT 薄膜の広帯域複素屈折率スペクトルを決定し[3]、SWCNT 薄膜の複屈折光学特性についても報告した[4]。本講演ではさらに、単一カイラリティ SWCNT 薄膜の高温での励起子光吸収および熱放射スペクトルの観測[5]、集積状態における励起子結合エネルギーの変化[6]、特定条件下で生じる興味深い SWCNT 融合反応[7]、高温環境に耐えうる SWCNT 集積材料創成[8]等に関する最新の結果を紹介する。また、熱放射が観測されるような高温条件下での発光を熱力学的観点から取り扱う量子熱光物性の研究スキーム[9]について議論する。

[1] T. Nishihara, A. Takakura, Y. Miyauchi, and K. Itami, *Nat. Commun.* **9**, 3144 (2018).

[2] S. Konabe, T. Nishihara, and Y. Miyauchi, *Opt. Lett.* **46**, 3021 (2021).

[3] T. Nishihara, A. Takakura, M. Shimasaki, K. Matsuda, T. Tanaka, H. Kataura, and Y. Miyauchi, *Nanophotonics* **11**, 1011 (2022).

[4] H. Wu, T. Nishihara, A. Takakura, K. Matsuda, T. Tanaka, H. Kataura, and Y. Miyauchi, *Carbon*, **218**, 118720 (2024).

[5] K. Teranishi, T. Nishihara, and Y. Miyauchi, The 65th FNTG General Symposium, Sep. 6, 2023.

[6] Z. Liu, T. Nishihara, and Y. Miyauchi, The 65th FNTG General Symposium, Mar. 7, 2024.

[7] A. Takakura, T. Nishihara, T. Tanaka, H. Kataura, and Y. Miyauchi, *submitted*.

[8] H. Nakamura, Y. Miyauchi *et al.*, The 65th FNTG General Symposium, Sep. 6, 2023.

[9] T. Nishihara, A. Takakura, S. Konabe, and Y. Miyauchi, *submitted*.

単層カーボンナノチューブのデバイス応用と1次元ヘテロ構造

Device Applications of Single-Walled Carbon Nanotubes and 1-D Heterostructures

東大工 丸山 茂夫

Univ. Tokyo, Shigeo Maruyama

E-mail: maruyama@photon.t.u-tokyo.ac.jp

単層カーボンナノチューブ (CNT) のデバイス応用に関しては近年の著しい展開がみられる。金属の単層 CNT と半導体の単層 CNT を区別しないようなデバイス応用についてはすでに実用化のレベルであり、フレキシブル透明導電膜、Li イオン電池の電極の添加物、ペロブスカイト太陽電池の電極[1], EUV 露光機用のペリクル、薄膜センサなどの応用分野では着実に実用技術に組み込まれつつある。一方、半導体の単層 CNT あるいはカイラリティ一定の特性が必要となる電界効果型トランジスタ(FET)などに関しては未だ研究段階である。水晶基板への水平配向技術と分散 CNT の分離・再配向薄膜化の技術展開は著しく、本格的なデバイス応用の進展が期待される[2]。

単層 CNT のデバイス応用可能性を大きく広げる技術として1次元ヘテロ構造がある。単層 CNT の内部に各種の構造を挿入・配列する方法は Peapod の開発当時から知られているが、最近では様々な原子の配列や色素の配列も実現している[3]。特に単層 CNT の内部に実現した1次元の炭素鎖、Confined Carbyne の話題について議論したい[4]。また、単層 CNT の外層に窒化ホウ素ナノチューブ(BNNT)を合成して、さらにこの外層に遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)のナノチューブを合成した1次元ファンデルワールスヘテロ構造[5,6]の展開について議論したい。単層 CNT-BNNT については、単層 CNT 薄膜、垂直配向単層 CNT、孤立単層 CNT に適用可能であり、単層 CNT を取り除くことも実現している[7]。また、単層 CNT をセンサとして、BNNT の積層状況をラマン分光で明らかにすることが実現している[8]。孤立単層 CNT の周りに数層の BNNT を合成したのちにシリコン基板に転写したものでは優れた FET 特性も実証されている[9]。TMD ナノチューブの種類としては最初の MoS_2 から、 WS_2 , MoSe_2 , WSe_2 などが実現しており、これらの軸方向のヘテロ接合や合金 TMD も実現している[10]。さらに、 MoS_2 ナノチューブをヤナス(Janus) MoSSe ナノチューブに変換することも実現している[11]。このヤナス MoSSe ナノチューブは2次元のヤナス MoSSe よりも安定であることが理論予言されていたものである。

[1] J.-M. Choi, et al., *Adv. Funct. Mater.* **2022**, 42, e2107295118.

2204594.

[7] M. Liu, et al., *ACS Nano* **2021**, 15, 8418.

[2] L. Peng, *ACS Nano* **2023**, 17, 22156.

[8] S. Wang, et al., *ACS Nano* **2024**, 18, 9917.

[3] S. Cambre, et al., *Small* **2021**, 17, 2102585.

[9] K. Otsuka, et al., *Nano Res.* **2023**, 16, 12840.

[4] B. Zhang, et al., in preparation.

[10] Y. Zheng, et al., in preparation.

[5] R. Xiang, et al., *Science* **2020**, 367, 537.

[11] C. Yang, et al., in preparation.

[6] Y. Zheng, et al., *P. Natl. Acad. Sci.* **2021**, 118,

ナノチューブのらせん度に依存した光物性

Helicity-dependent optical properties of carbon nanotube

台湾師範大学¹, 東北大学², 東京都立大学³ ○齋藤 理一郎^{1,2,3}

Taiwan Normal Univ.¹, Tohoku Univ.², Tokyo Metropolitan Univ.³ ○Riichiro Saito^{1,2,3}

E-mail: r.saito.sendai@gmail.com

カーボンナノチューブは、グラフェンシートの巻き方に依存して、アームチェア方、ジグザグ型、カイラル型の3種類がある。カイラル型カーボンナノチューブには、右巻きと左巻きのらせん度があり、2つの整数 (n,m) を用いて、 (n,m) , $(n+m, -m)$ の対としてあらわすことができる。例えば、 $(6,5)$, $(11,-5)$ のカイラルカーボンナノチューブの分離精製が実験で可能になっている。電子線回折の実験によって一本のナノチューブを測定すると、右巻き、左巻きのらせん度（カイラリティ）の観測が可能である。また、分離した試料の水溶液を用いた円偏光二色性の実験で光学活性の観測と理論的計算が行われている。

しかし、共鳴ラマン分光で右巻きと左巻きのらせん度を測定することは難しいと考えられていた。著者らは円偏光ラマン分光を用いて複素ラマンテンソルの位相の部分にらせん度の情報が得られることを、実験と理論で明らかにした [1]。いろいろな一本のナノチューブのラマン分光を測定することで、右巻きと左巻きのラマンテンソルにおける位相の差は、カイラル角が15度の時最大で、0度（ジグザグ型）、30度（アームチェア型）の時0になることを確認した。

また、右巻きのみ左巻きをみの配向ナノチューブ試料が、ライス大学の河野グループによって作成された。作成された試料を用いて、第二次高調波発生が観測されたことや、配向試料の立体構造による円偏光二色性の観測に成功したこと[2]も併せて報告する。

本研究の成果は、科学研究費基盤研究（A）（No. JP22H00283）である。また、台湾教育部の玉山（Yushan）Fellow から援助を受けた。

文献：

1. “Observing Axial Chirality of Chiral Single-Wall Carbon Nanotube by Helicity-Dependent Raman Spectra”, S. Han, N. T. Hung, Y. Xie, R. Saito, J. Zhang, L. Tong, Nano Lett. 23, 8454-8459 (2023).
2. “Engineering chirality at wafer scale with ordered carbon nanotube architectures”, J. Doumani, M. Lou, O. Dewey, N. Hong, J. Fan, A. Baydin, K. Zahn, Y. Yomogida, K. Yanagi, M. Pasquali, R. Saito, J. Kono, W. Gao, Nat. Comm. 14, 7380 (2023).

in-situ 電子顕微鏡法によるカーボンナノチューブ単一界面の熱動態計測

Measurement of thermodynamics behavior at various nano-interfaces of carbon nanotubes by in-situ transmission electron microscopy

千葉大工¹ °平原 佳織

Chiba Univ.¹, °Kaori Hirahara

E-mail: hirahara@chiba-u.jp

カーボンナノチューブ(CNT) はフレキシブル熱電変換デバイス材料として有望視されている。フィルム状 CNT 凝集体において実用材料の Bi_2Te_3 系に匹敵するゼーベック効果の発現が報告されている[1]。CNTを凝集体として活用する応用用途では、単一 CNT レベルの特性のみならず、凝集体中に存在する多様な形態の CNT-CNT 界面ならびに異種物質との接点に由来する特性の寄与を理解し、制御していくことが重要である。電子顕微鏡観察下でマニピュレータを用いて CNT を1本レベルで操作することによって、あらかじめ構造を決定した CNT を用いて人為的に界面を形成することができる。本講演では、単一 CNT および CNT のなす単一ナノ界面の構造を系統的に変化させながら、電気伝導、熱伝導およびゼーベック係数の計測・評価を行い、それらの構造と特性の相関解明を試みてきたこれまでの研究について、いくつか紹介する。

CNT1本レベルの熱電特性は、CNT を2つの電極間に架橋し、一方を 100°C 以上に加熱したときの熱起電力を計測することで評価できる。熱起電力計測を行った個々の CNT のカイラル指数を電子回折から決定した結果、半導体 CNT1 本レベルのゼーベック係数は直径が小さくなるにつれ増大することを明らかにした。直径 1.5nm 以下の CNT では $200\mu\text{V/K}$ を超えることも示唆された。2層 CNT や多層 CNT では、半導体 CNT が1層でも含まれると同様の傾向を示した。また、多数の欠陥が含まれる CNT はゼーベック係数が顕著に低減する一方、曲げや不純物堆積はそれほど影響しないことも確かめられた。

CNT のなす界面については、界面の形態が熱輸送特性、熱電特性におよぼす影響が実測により明らかにできつつある。CNT-電極間の電気的接触抵抗を低減するにはスズナノ粒子を介した溶接が有効だが [2]、接点を形成する粒子の粒径が小さくなると、電気的には安定な接点であっても熱的接触抵抗が不安定であることが、CNT 通電加熱時の温度勾配評価により示された。CNT-CNT 界面においては、CNT 先端と CNT 側壁が接触した接点より、CNT 同士を交差するように接触させる方が熱の逃げが大きく、計測された熱流の差は $1\mu\text{W}$ オーダーであることを、MEMS ヒータを活用した熱流計測により明らかにした。さらに、CNT 同士を平行接触させ、CNT 同士の接触長さを変えながら熱起電力を計測することで、界面サイズ依存性を明らかにした [3]。ただし、接触長が 50nm 以下の場合や交差接触させた場合、CNT の先端をグラフェン状に展開させて接触させた場合の熱起電力の値は単に界面サイズだけでは説明できず、界面近傍に存在する欠陥やダングリングボンドなどの局所構造に敏感に影響を受けていると考えられる。

[1] Y. Nakai, K. Honda, K. Yanagi, H. Kataura, *et al.* App. Phys. Express **7**, 025103 (2014).

[2] H. Hamasaki, S. Nagahama, K. Hirahara, *Nanoscale* **14**, 11529-11534 (2022).

[3] H. Hamasaki, T. Kawase, K. Hirahara, *Phys. Rev. Mater.* **6**, L23002 (2022).

Tip-enhanced Raman spectroscopy and nanoimaging of carbon nanotube

Osaka University, °Prabhat Verma

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

Tip-enhanced Raman scattering (TERS) combines Raman spectroscopy with plasmonics by utilizing a sharp metallic nanotip, where a strongly confined light is generated near the apex of the nanotip, which provides high spatial resolution at the nanoscale far beyond the diffraction limit of the probing light [1,2]. TERS can thus facilitate both spectroscopy and microscopy at nanoscale spatial resolution [3]. Since light can interact with the intrinsic properties of a sample, TERS images provide information not only about the topographical distribution of a sample but also the distribution of the sample's intrinsic physical, chemical, biological, and electronic properties at nanoscale resolution [2].

Carbon nanotube (CNT) is a widely studied TERS sample because it possesses extremely interesting physical, mechanical, electronic, and optical properties and is well suited for optoelectronic and other applications [4]. CNTs can have different diameters and chirality depending on their configurations and show either a semiconducting or metallic character. In certain situations, they can also develop strains along their lengths, affecting the nanotubes' optical and electronic properties [5]. Interestingly, Raman spectroscopy can identify all these intrinsic properties of CNTs that show up through various vibrational modes. However, traditional Raman spectroscopy cannot reveal the localization of these properties beyond the diffraction limit, which means at a resolution better than several hundred nanometers. Here in this presentation, we will discuss how TERS can be utilized to investigate CNTs at a spatial resolution far beyond the diffraction limit and map the distribution of these properties at a spatial resolution better than 10 nm, for example, the distribution of diameter and localized semiconductor-to-metal transition. This result could be very interesting for CNT-based device fabrication, where the local modification of electronic properties could play an important role. Also, we will discuss mapping intentionally developed strain along the length of an isolated CNT at a high spatial resolution [6]. Visualizing and investigating various intrinsic properties of both single-walled and multi-walled CNTs at the nanoscale are of great interest and importance, which will be discussed in more detail.

Reference:

- [1] S. Kawata, Y. Inouye and P. Verma, *Nature. Photonics* **3**, 388 (2009).
- [2] P. Verma, *Chem. Rev.* **117**, 6447 (2017).
- [3] T. Yano, P. Verma, Y. Saito, T. Ichimura, and S. Kawata, *Nature Photonics* **3**, 473 (2009).
- [4] R. Kato, S. Igarashi, T. Umakoshi, and P. Verma, *ACS Appl. Nano Mater.* **3**, 6001 (2020).
- [5] Y. Okuno, Y. saito, S. Kawata and P. Verma, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 216101 (2013).
- [6] T. Yano, P. Verma, et al., *Nature Commun.* **4**, 2592 (2013).

**マテリアルリザーバー演算素子：
ナノカーボンを用いた AI 演算素子とインセンサ演算応用**
**Material Reservoir Computing Devices: AI Computing Devices Utilizing
Nanocarbon-Materials and Its Application to In-Sensor Computing**

九工大生命体工¹, 九工大 Neumorph センター² °田中 啓文^{1,2}

Kyushu Institute of Technology¹, °Hirofumi Tanaka¹

E-mail: tanaka@brain.kyutech.ac.jp

緒言 近年、ソフトウェアを使用した深層学習 (DL) の計算能力の向上が注目されている。それに伴い、人工知能 (AI) の実用化は急速に広がり、社会全体に発展的影響を与えている。しかし、これら計算能力の向上を支えるハードウェアもまた近い将来シリコン CMOS 技術の物理的限界に直面すると予想され、新しいハードウェア技術の開発、特に人工ニューラルネットワーク、ニューロモルフィック情報処理システム、及びその一部分を物理的に形成する技術や、新材料・新型素子に対する関心が集まり、特に物理現象の利用に期待が高まっている。例えば、ナノ材料の非線形性やネットワーク構造を賢く利用し、物理現象発生素子が人工知能ハードウェアとして利用されることが期待される。

マテリアルリザーバー演算素子とナノカーボンの優位性 AI のハードウェアとして期待される素子の一つとして、リザーバー演算 (RC) 素子が挙げられる。RC とは、リカレントニューラルネットワーク理論から派生した計算フレームワークである[1]。入力信号を高次元の計算空間にマッピングするために、固定された非線形システムのダイナミクスを利用する。ここで RC 素子にはエコステート性を考慮してマテリアルのランダムネットワークを用いる。我々はすでに単層カーボンナノチューブ (SWNT)/傾斜ポルフィリンサンドイッチポリ酸 (Pro-POM) ランダムネットワークをリザーバー演算素子として用い、ロボットハンドのセンサー信号から把持物体の分類に成功した[2]。一方、ロボット技術の進歩に伴い、人間の五感を模倣した感覚の獲得が求められている。具体的には、演算能力を持った触覚センサが注目されており、それは自動収穫ロボットなどでも実際の利用例が見られている。これらのセンサは、センサが直接物体に触れて測定を行うため、果物などを傷をつけないような柔らかい材質を用いることが求められる。また、その熟度識別には、高感度センサが必要で、一例として、角砂糖を鋳型にしたカーボンナノチューブ (CNT)/ポリジメチルシロキサン (PDMS) 複合材料を使用し、柔軟で高感度な 3 次元 (3D) ネットワークセンサを作製した事例もある[3],[4]。最近ではその 3D センサをリザーバー演算素子として用いるインセンサ演算素子として用いた[5],[6],[7]ので、講演で紹介する。

結論 例えば、触覚センサを RC 素子と組み合わせ開発した、ロボットハンドによる把持物体認識機能が例として挙げられる。これらの試みと結果から、物理現象を生かしたデバイスや感覚を活用したロボット技術の未来に繋がる次世代 AI 技術の開発が期待できる。同時にオールカーボン素子を AI デバイスとして用いることの可否や将来性についても当日議論したい。

Refs. [1] H. Jaeger, H. Haas, Science 304, 78 (2004). [2] D. Banerjee, H. Tanaka et al., Adv. Intell. Syst. 4, 2100145 (2022). [3] A. TermehYousefi, H. Tanaka et al., Mater. Sci. Eng. C 77, 1098 (2017). [4] S. Azhari, H. Tanaka et al., IEEE sensors J. 21, 27810, (2021). [5] S. Azhari, H. Tanaka et al., Nanoscale 15, 8169 (2023). [6] K. Kimizuka, H. Tanaka et al., arXiv:2406.03958v1. [7] 君塚、2024年3月応用物理学会講演奨励賞受賞

CNTを用いた次世代電池の開発と展開

Development of CNTs for Next-generation Batteries

産総研 周 英

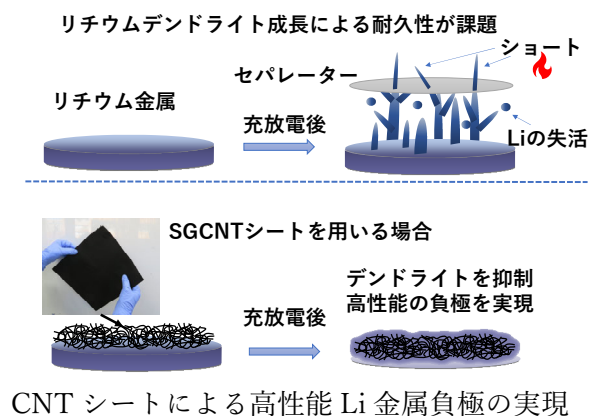
AIST, Ying Zhou

E-mail: y-shuu@aist.go.jp

CNTは優れた導電性、機械強度、大きな比表面積を持ち、多様な電池においても重要な役割を果たしている。たとえば、リチウムイオン電池の導電性添加剤（導電助剤）として使用されることで、エネルギー密度、寿命、充放電効率の向上や高速充放電が実現されており、現在、年間1000トン以上のCNTが使用されている。我々は、長年にわたりCNTの実用化研究を進めてきた経験を活かし、CNTを用いて多様な電池技術の高性能化に向けた研究開発を行っている。本講演では次世代電池の負極材料として注目されているLi金属負極とSi負極の研究結果を紹介する。⁽¹⁾

その中、Li金属は高いエネルギー密度を持ち、次世代の蓄電池の実現に向けた鍵となる負極材料と期待されているが、充放電時にデンドライトが成長され、電池の材料構造が破壊されることで、電池容量が短時間で減少することが問題とされている。我々は、Li金属のデンドライト成長を抑制するために、単層CNTのSGCNT膜を使用した。下図のように、Li金属とセパレーターの間にSGCNT膜を挿入した電極構造を作成し、性能を評価した。SGCNT膜を使用したLi金属電極は、充放電の電流密度が 10 mA/cm^2 と循環容量が 10 mAh/cm^2 で、充放電が1000時間経過しても、安定した過電圧を維持し良好な充放電特性を示しており、十分なデンドライト抑制効果を発揮していることを示唆している。本研究で開発したCNT膜は、高い比表面積と高い空孔率を持つ三次元的な構造を有しており、Liとの親和性も高いため、充放電時にLi金属を均一に反応させ、Liデンドライトの結晶成長を抑制していると考えられる。Liデンドライトの成長抑制や安定な充放電特性の実現により、電池の寿命や安全性を飛躍的に改善することが期待される。

(1) https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220125/pr20220125.html



カーボンナノチューブを利用した赤外線イメージセンサ

Infrared Image Sensor using Carbon Nanotubes

NEC¹, AIST² ○弓削 亮太^{1,2}, 田中 朋^{1,2}, 佐野 雅彦¹, 殿内 規之^{1,2}, 渋谷 明信^{1,2},
 渋谷 泰蔵^{1,2}, 小坂 真由美^{1,2}, 野口 将高^{1,2}, 宮崎 孝^{1,2}, 宮本 俊江^{1,2}, 小田 直樹¹
 NEC¹, AIST², Ryota Yuge^{1,2}, Tomo Tanaka^{1,2}, Masahiko Sano¹, Noriyuki Tonouchi^{1,2}, Akinobu
 Shibuya^{1,2}, Taizo Shibuya^{1,2}, Mayumi Kosaka^{1,2}, Masataka Noguchi^{1,2}, Takashi Miyazaki^{1,2},
 Toshie Miyamoto^{1,2}, Naoki Oda¹
 E-mail: r-yuge@nec.com

ボロメータ型赤外線イメージセンサは、赤外線を電気信号に変換して温度情報を取得する技術で、人や物体から放射される熱画像を検知することができる。そのため、サーモグラフィー、構造物や食品等の検査機器、夜間の自動車運転をサポートするナイトビジョン、防犯カメラ等、近年産業分野での利活用が活性化している。現在の課題の一つが高感度化であり、ボロメータ材料の抵抗温度係数(TCR)の向上や低抵抗化が有効な手段となる。

単層カーボンナノチューブ(CNT)は、炭素の六角形の並び方の違いで半導体・金属的性質を示す。我々は、電界誘起層形成法[1]により、単層 CNT から高純度に半導体成分を分離する独自技術の開発に成功した。その技術と我々が CNT フレキシブル薄膜トランジスタ研究で培った印刷製造技術[2]により、半導体型 CNT のネットワークを制御したボロメータ膜を作製し、-6%/K という従来材料の VO_x の 3 倍高い TCR を実現した[3]。今回、我々は CNT の印刷製造技術及び独自の MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)素子化技術[4]を融合することで、新たなデバイス構造を実現し、それらをアレイ化した 640×480 画素の高精細な赤外線イメージセンサの作製に成功した[5]。図 1a と 1b が、素子構造の概略図とアレイ素子の SEM 像である[5]。赤外線吸収層と基板の間を空隙とし、梁配線のみで赤外線吸収層とコンタクト電極を繋げることで熱分離構造を実現している。作製したセンサ単素子の基礎特性評価から、0.2 V のバイアス電圧にて 10⁵ V/W 以上のセンサ感度(R_v)が得られた。また雑音測定では、明瞭な 1/f 特性が観測され、想定されるセンサの動作速度において、1/f 雑音が支配的になることが分かった。センサ感度と雑音から算出した比検出能 D*は、比較用の VO_x の素子以上の値が得られた。詳細は当日報告する。

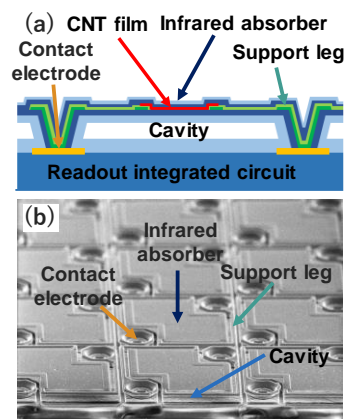


Fig. 1. (a) Device structure and (b) SEM image of array elements for CNT infrared image sensor [5].

参考文献: [1] K. Ihara, *et al.*, J. Phys. Chem. C, **115**, 22827 (2011), [2] H. Numata, *et al.*, Proc. 16th. Inter. Cof. IEEE-NANO, 849 (2016), [3] T. Tanaka *et al.*, Proc. SPIE **12534**, 125341U (2023), [4] S. Tohyama, *et al.* Opt. Eng. **45**, 014001 (2006). [5] https://www.nec.com/en/press/202304/global_20230410_01.html.

【謝辞】本研究の一部は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度（JPJ004596）の支援を受けたものである。

住友電工におけるカーボンナノチューブ線材の研究開発 ー変遷と展望についてー

Research and development of the carbon nanotube wire in Sumitomo Electric Industries

住友電気工業株式会社 新領域技術研究所, °大久保 総一郎, 藤森 利彦, 谷岡 大輔,
井上 寛隆, 高倉 章, 日方 威, 小野木 伯薫

Sumitomo Electric Industries, Ltd. °Soichiro Okubo, Toshihiko Fujimori, Daisuke Tanioka,

Hiroataka Inoue, Akira Takakura, Takeshi Hikata, Takamasa Onoki

E-mail: s-okubo@sei.co.jp

住友電気工業株式会社においては、次世代電線の実現を目指して各種材料の探索を進めてきた。当初より高温超電導材料と並び炭素材料、特にカーボンナノチューブ(CNT)にも注目しており、2011年には専属チームを立ち上げてCNT電線の開発を開始した。CNT材料の線材化における課題としては、①単繊維(単結晶)の長尺化、②線材化時の単繊維の配向性向上、③線材化時の集合体密度の向上、④撚り線化技術の開発を想定した。単繊維を伸張するアイデアとして、CNT成長における触媒の不活化を防止する考えのもと、「炭素透過法」の開発を進め[1]、Feの浸炭現象の基礎検討中には、酸化→浸炭時におけるFe箔表面のクラック中に多数の炭素繊維の成長を発見し、引張力により炭素が引き出される現象を見いだした。「ブリッジ法」と命名し[2]、加熱した鉄箔に炭化水素ガスで浸炭しつつ引きちぎることで、断面間に高純度な炭素繊維を成長させることに成功した。また、共同研究先の筑波大学・藤田研究室においてこの鉄箔への浸炭現象の基礎検討中、高流量のガス流時、炉壁にセンチレベルでの長尺CNTの成長を認め「フローティングブリッジ法(FB法)」と命名した[3]。この手法による高強度CNT線材化をテーマとして、NEDOプロジェクトを受託し開発を進めた結果、ラボレベルの引張強度では、炭素繊維を超える10GPaを記録した。更に国プロによりスケールアップ設備の開発を進めており[4]、1kmの撚り線製造が可能となった。高強度線材の開発課題は導電線の課題とも重なっており、最終目標である電線開発の基礎技術となる。今回は当社におけるCNT線材開発の経緯を報告する。

本研究は、筑波大学 数理物質系 藤田淳一教授との共同研究による成果であり、高度科学技術情報研究機構(RIST)殿にもご支援をいただいております。また、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクト平成30年度エネルギー・環境新技術先導プログラム「革新的次世代軽量高強度構造材の研究開発」(P14004)、および防衛装備庁・安全保障技術推進制度(JPJ004596)により支援を受けて研究を行った結果です。

[1] T. Hikata, SEI Technical Review, No.66, 81-84 (2008)

[2] T.Hikata, et al. SEI Technical Review, No.79, 102-106 (2014)

[3] 第79回応用物理学会秋季学術講演会 19a-224B-3 Sep. (2018) 藤森利彦 他

[4] S.Okubo, et al. SEI Technical Review, No,93, 58-64 (2021)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演) : Vibronics: Energy transport science of vibrations in solid

[20a-A23-1~5] Vibronics: Energy transport science of vibrations in solid

[20a-A23-1]

Opening

○Masahiro Nomura¹ (1.Univ. of Tokyo)

[20a-A23-2]

Easy Measurement of Phonon Dispersion at SPring-8

○Alfred Q. R. BARON^{1,2}, Daisuke ISHIKAWA^{1,2}, Hiroshi FUKUI^{2,1}, Taishun MANJO^{2,1} (1.Materials Dynamics Laboratory, RIKEN SPring-8 Center, 2.Precision Spectroscopy Division, SPring-8/JASRI)

[20a-A23-3]

Phonon transport of group IV semiconductor alloys

○Ryo Yokogawa^{1,2}, Atsushi Ogura^{1,2} (1.Meiji Univ., 2.MREL)

[20a-A23-4]

Elucidating the Correlation between Thermal Conductivity and Nanoscale Structures through Topological Data Analysis

○Emi Minamitani¹ (1.SANKEN, Osaka Univ.)

[20a-A23-5]

Vibration transport at topological edges of mechanical metamaterials

○Motonobu Tomoda¹ (1.Hokkaido Univ.)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演) : Vibronics: Energy transport science of vibrations in solid

[20a-A23-1~5] Vibronics: Energy transport science of vibrations in solid

[20a-A23-1] Opening

○Masahiro Nomura¹ (1.Univ. of Tokyo)

キーワード : Phonon、Heat transfer、Energy transfer

An overview of the energy transport science of solid-state vibrations, named vibronics, is given, as well as the purpose of this symposium.

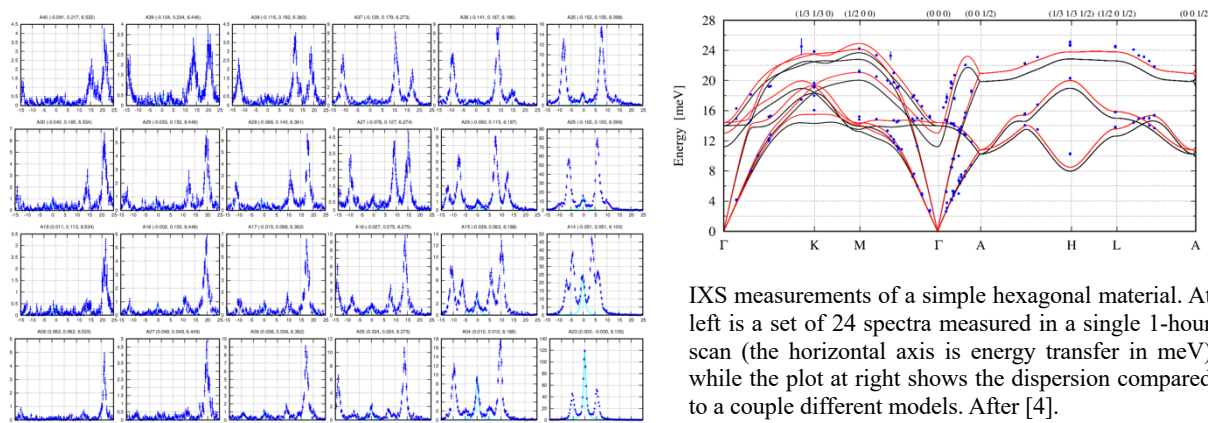
Easy Measurement of Phonon Dispersion at SPring-8

Materials Dynamics Laboratory, RIKEN SPring-8 Center, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148 JAPAN
Precision Spectroscopy Division, CSRR, SPring-8/JASRI, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5198 JAPAN

Alfred Q.R. BARON, Daisuke ISHIKAWA, Hiroshi FUKUI, Taishun MANJO

SPring-8, in Hyogo prefecture, has the world's most advanced facilities for measuring phonons using x-rays. The spectrometers at the SPring-8 beamlines, BL35XU [1] and BL43LXU [2], provide world-leading flux in small beam sizes (from 0.005 to 0.1 mm) that can be used to investigate atomic dynamics on meV energy scales over \sim nm to Å correlation lengths via inelastic x-ray scattering (IXS) (see [3] for a general introduction). These measurements are used to investigate many classes of materials, focusing on issues relevant to thermal transport, ferroelectricity, superconductivity, formation of charge density waves, phase transformations, localized phonon modes, interactions of phonons with magnons, *etc.* The instruments are also effective for investigating liquids, phonons in thin films, and elastic properties of materials in extreme (high-pressure and high temperature) conditions, even those approaching those of the Earth's inner core – measurements that can be difficult or impossible by other methods.

Perhaps most notably the samples for IXS can be small: a comfortable size sample is \sim 0.5 mm scale, but the method also has been used on \sim 0.005 mm samples, or even 0.0001 mm films. This makes it easy to investigate samples that are not available in the large (cubic-centimeter scale) needed by inelastic neutron scattering, the main competing technique. The figure below gives an example of measured dispersion from a relatively simple hexagonal sample [4]. The plot at left shows a set of 24 spectra that were measured in a single 1-hour scan, while that at right show the dispersion measured in about half a day of data collection.



IXS measurements of a simple hexagonal material. At left is a set of 24 spectra measured in a single 1-hour scan (the horizontal axis is energy transfer in meV) while the plot at right shows the dispersion compared to a couple different models. After [4].

The present talk will describe the main principle of operation of the meV-IXS spectrometers at SPring-8, discuss the variety of samples that may be investigated, and the range of available sample environments.

SPring-8 is a user facility. We are happy to consider collaboration with new groups, and/or on new materials, or in new setups or geometries. Please do contact us if you may be interested. We can be reached most easily by e-mail at baron@spring8.or.jp, disikawa@spring8.or.jp, fukuih@spring8.or.jp, manjo.taishun@spring8.or.jp.

Additional information can also be found on the web pages:

https://beamline.harima.riken.jp/bl_info/bl43lxu_info.html

<https://beamline.harima.riken.jp/bl43lxu/>

http://www.spring8.or.jp/wkg/BL35XU/instrument/lang-en/INS-0000001397/instrument_summary_view

References

- [1] Baron, *et. al.*, (2001) *J. Phys. Chem. Solids*. **61**, 461–465. DOI: 10.1016/S0022-3697(99)00337-6.
- [2] Baron (2010). *SPring-8 Inf. Newsl.* **15**, 14–19. <http://user.spring8.or.jp/sp8info/?p=3138>.
- [3] *ArXiv: Cond-Mat*. 1504.01098. DOI: 10.1007/978-3-319-14394-1_52.
- [4] Baron, Heid & Ishikawa, work in progress.

Phonon transport of group IV semiconductor alloys

°R. Yokogawa^{1,2} and A. Ogura^{1,2}

(1. Meiji Univ. 2. MREL)

E-mail: r_yokogawa@meiji.ac.jp

【Introduction】 Group IV semiconductor alloys have attractive characteristics such as high carrier mobility and low thermal conductivity. As example of device application, silicon-germanium (SiGe) is one of the promising candidates for 3D transistors and thermoelectric devices. For thermoelectric devices, it is gradually becoming more important to reveal the phonon scattering mechanism of the alloy material and control the thermal transport as miniaturization proceeds to the nanometer scale. However, the phonon properties of the group IV semiconductor alloys have not been investigated in a sufficiently rigorous manner yet. In this paper, we introduce the information on the phonon properties of group IV semiconductors alloys such as bulk SiGe and germanium-tin (GeSn) thin films by using inelastic x-ray scattering (IXS) with synchrotron radiation and Raman spectroscopy.

【Phonon energy measurement techniques】 IXS with synchrotron radiation is a powerful technique to evaluate phonon energy and dispersion relation nondestructively. The IXS measurements were performed on the BL35XU and BL43LXU beamlines at the SPring-8 synchrotron facility. The incident x-ray energies were set to 17.795 and 21.750 keV, which corresponds to Si (9 9 9) and (11 11 11) reflections, respectively [1]. Although it can only give information on optical phonon modes at the Brillouin zone center (Γ point), Raman spectroscopy is also useful with high energy and spatial resolution compared to IXS. We also used Raman spectrometer with a focal length of 2,000 mm [2] (high-wavenumber resolution) to discuss optical phonon transport through Raman spectra of group IV semiconductor alloys.

【Main results】 We obtained clear phonon dispersion curves of bulk SiGe by IXS measurements [3]. Moreover, we also observed phonon spectra of GeSn thin film by utilizing grazing incidence IXS technique [4]. Interestingly, anomalous modes distinct from both optical and acoustic modes of bulk SiGe [5] and GeSn thin films [4] in phonon dispersion curves were observed at low-energy side. We found that the anomalous mode of bulk SiGe had no momentum and Ge fraction dependences. These behaviors were consistent with the molecular dynamics (MD) calculations. We consider that the origin of the anomalous mode is local vibrational mode (LVM) originated from the Ge (Sn) clusters surrounded by Si (Ge) atoms through a combination of IXS measurements and MD simulations [6,7]. From the above, it can be confirmed that group IV semiconductor alloy crystals exhibit unique phonon transport properties compared to pure Si and Ge from IXS results. On the other hand, Raman spectra of SiGe [8] and GeSn alloys are often used to characterize fine structures, LVMs, and strain states. We will introduce the Raman spectroscopy analysis of SiGe [9] and GeSn incorporating IXS measurements.

【Acknowledgements】 The IXS measurements were performed at SPring-8 with the approval of the JASRI (Proposal Nos. 2016A1496, 2017B1630, 2019A1678, 2019B1750, 2020A0662, 2020A1463, 2021A1363, 2021B1203, 2022A1470, and 2023B2088). Part of this work was supported by the CREST under Project. No. JPMJCR19Q5 of the Japan Science and Technology Corporation (JST). This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Nos. 21K14201 and 24K17313, Japan.

References

[1] A. Q. R. Baron *et al.*, J. Phys. Chem. Solids **61**, 461 (2000). [2] A. Ogura *et al.*, S. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 3007 (2006). [3] R. Yokogawa *et al.*, ECS Trans. **98**, 465 (2020). [4] M. Chino *et al.*, J. Electron Mater. **52**, 5128 (2023). [5] R. Yokogawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116**, 242104 (2020). [6] S. Y. Y. Chung *et al.*, AIP Advances **11**, 075017 (2021). [7] S. Y. Y. Chung *et al.*, AIP Advances **11**, 115225 (2021). [8] R. Yokogawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 035503 (2024). [9] R. Yokogawa *et al.*, The 71th JSAP Spring Meeting, 23p-22A-8 (2024).

トポロジカルデータ解析による熱伝導とナノスケール構造の相関解明

Elucidating the Correlation between Thermal Conductivity and Nanoscale Structures
through Topological Data Analysis

阪大産研 南谷英美

SANKEN, Osaka Univ. Emi Minamitani

E-mail: eminamitani@sanken.osaka-u.ac.jp

Amorphous structures, which are neither completely ordered nor entirely random, exhibit physical properties significantly different from those of crystals. Understanding the correlation between structure and physical properties is crucial for their application. However, due to the complexity of amorphous structures, theoretical analysis has been extremely challenging. A typical example is thermal conductivity.

In crystals, thermal conduction is described by the relaxation of phonons through anharmonic effects. In contrast, in amorphous structures, heat is believed to be transferred through interactions between vibrational modes called diffusons, which are spatially extended and somewhat collective but lack periodicity. Considering the delocalized nature of diffusons, it is expected that the medium-range order in amorphous structures would affect thermal conduction by diffusons. However, there has been no theoretical method to quantitatively discuss which atomic connections give rise to medium-range order and how this structure determines the thermal conductivity.

Recently, we have attempted to apply persistent homology, a representative technique of topological data analysis, to this problem. We have shown that the thermal conductivity can be predicted by quantifying the atomic connections, ring structures, and voids in amorphous Si using persistent homology. Furthermore, inverse analysis allows discussion of the relationship between local structures, medium-range order, and thermal conductivity. In this presentation, we will introduce this research and discuss the potential for elucidating the correlation between nanoscale structures and thermal conductivity by combining topological data analysis with physical property simulations.

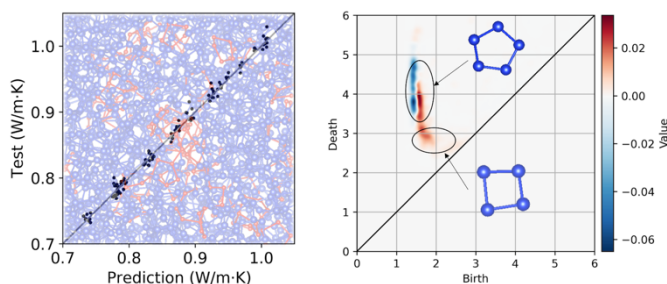


Fig 1 Prediction and inverse analysis results of thermal conductivity based on persistent homology.

References

- [1] H. Edelsbrunner, J. Harer, *Computational Topology: An Introduction* (AMS, 2010).
- [2] E. Minamitani et al., *J. Chem. Phys.* **156**, 244502 (2022).

Vibration transport at topological edges of mechanical metamaterials

Hokkaido Univ., °Motonobu Tomoda

E-mail: mtomoda@jng.hokudai.ac.jp

The topological phases that originated from the discovery of the quantum Hall effect have recently garnered attention for their applications in classical wave phenomena. In the quantum Hall effect, it is well-known that electrons are transported along the boundaries of a sample due to the bulk's topological properties. However, it has been found that topologically protected transmission can be realized not only with electrons but also with photons [1] and phonons [2]. In the case of phonons, topological waveguides exhibit inherent robustness against bends and defects, preventing backscattering. This promises the realization of more efficient waveguides and non-reciprocal acoustic devices. To realize a phononic analog of quantum Hall (QH) systems, it is necessary to break time-reversal symmetry. Since most phononic systems do not interact with magnetic fields, theories have been proposed to introduce Coriolis forces through rotational motion [3]. On the other hand, quntam valley Hall (QVH) systems, can be realized by breaking the spatial inversion symmetry of the unit cell.

We are developing mechanical metamaterials that extend a wave machine into two dimensions to achieve vibration propagation through topological edge modes and to experiment with further control methods. To realize a QH system, we created a honeycomb lattice wave machine that maintains its equilibrium position despite rotation due to centrifugal force. To realize a QVH system, we created a suspended honeycomb lattice wave machine [4]. The vibrations of these wave machines were quantitatively measured using a motion capture system and compared with a theoretical and simulation results.

These achievements can not only provide insights into highly advanced wave propagation based on topological phononics but also contribute to a new science called "vibronics," which comprehensively considers vibrational phenomena within solids.

[1] L. Lu, J.D. Joannopoulos, and M. Soljačić, Nat. Photon. **8**, 821 (2014).

[2] G. Ma, M. Xiao and C.T. Chan, Nat. Rev. Phys. **1**, 281 (2019).

[3] T. kariyado and Y. Hatsugai, Sci. Rep. **5**, 18107 (2015).

[4] H. Takeda, R. Minami, O. Matsuda, O. B. Wright, and M. Tomoda, Appl. Phys. Express **17**, 017004 (2024)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演) : Vibronics: Energy transport science of vibrations in solid

[20p-A23-1~6] Vibronics: Energy transport science of vibrations in solid

[20p-A23-1]

Material design for thermal conductivity modulation using nonequilibrium phase boundary

○Takayoshi Katase¹ (1.MDX ES, Tokyo Tech.)

[20p-A23-2]

Understanding heat transport in organic materials in terms of structural elements including intermolecular interactions

○Takanori Fukushima¹ (1.Tokyo Tech)

[20p-A23-3]

Nonlinear thermoelectric effects in low-symmetry systems

○Hiroki Arisawa^{1,2}, Eiji Saitoh^{1,2,3,4} (1.Univ. Tokyo, 2.RIKEN CEMS, 3.BAI Univ. Tokyo, 4.AIMR Tohoku Univ.)

[20p-A23-4]

Surface acoustic wave-spin wave interactions in magnetic thin films

○Ryusuke Hisatomi^{1,2} (1.ICR, Kyoto Univ., 2.CSRN, Kyoto Univ.)

[20p-A23-5]

Electron-phonon interactions and nonequilibrium transport at the semiconductor-insulator interface in cryo-CMOS

○Ken Uchida¹ (1.Univ. Tokyo)

[20p-A23-6]

Closing

○Koji Takahashi¹ (1.Kyushu Univ.)

Material design for thermal conductivity modulation using nonequilibrium phase boundary

MDX ES, Tokyo Tech., [○]Takayoshi Katase

E-mail: katase@mces.titech.ac.jp

Semiconductor alloys of isostructural compounds have widely been utilized to control their electronic structures and electronic properties, which has led to various device applications including light emitting devices and solar cells. On the other hand, alloys between largely-different crystal structures would be more interesting because the different structures in the end-members must induce strong frustration around a critical composition and temperature, which induces the giant physical property modulations assisted by an abrupt change of electronic structures and crystal structures. This strategy is expected to add a new freedom for controlling electronic and thermal functions in semiconductors.

Here we introduce a new concept to induce giant electronic and thermal property switching driven by direct phase transition from three-dimensional (3D) to 2D structures in $(\text{Sn}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Se}$, a solid solution of 3D PbSe and 2D SnSe semiconductors. The direct phase boundary between the 2D and 3D structures does not exist in $(\text{Sn}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Se}$ under the thermal equilibrium condition. On the other hand, applying a rapid thermal quenching process induced the direct 2D–3D phase boundary in the $(\text{Sn}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{Se}$ due to the large increase of the Sn and Pb solubility limits. The $(\text{Sn}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{Se}$ showed the reversible 2D–3D structural phase transition by temperature [1], and more than 5-orders of magnitude change of electronic conductivity was observed, originating from the abrupt band structure switch from a gapless Dirac-like state (3D phase) to a semiconducting state (2D phase). We also demonstrated the large thermal conductivity (κ) modulation by the dynamic phonon state change owing to the 2D–3D structural transition in $(\text{Sn}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Se}$ [2]. Through the 2D–3D structural transition, the 1/2.9-times decrease of lattice κ (κ_{lat}) was achieved by strong phonon scattering in the 2D layered structure, and the electronic κ (κ_{ele}) was also decreased by 5 orders of magnitude due to the electronic phase transition from a 3D high conductivity state to a 2D semiconducting state. The total κ ($= \kappa_{\text{lat}} + \kappa_{\text{ele}}$) modulation ratio $\kappa_{3\text{D phase}}/\kappa_{2\text{D phase}} = 3.6$ was attained at 373 K (Figure). The present idea using crystal structure dimensionality modulation at nonequilibrium phase boundary would lead to further functional property switching in semiconductors.

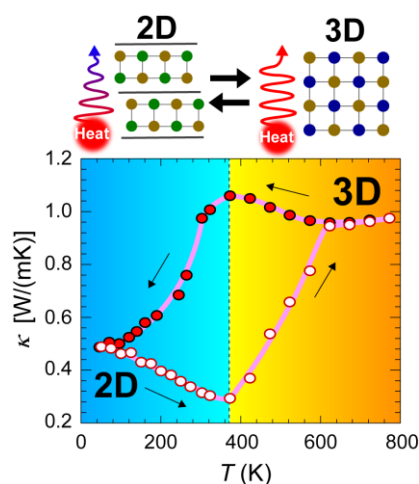


Figure: Temperature dependence of thermal conductivity of $(\text{Sn}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{Se}$ solid solution.

[1] T. Katase et al., Science Adv. 7, eabf2725 (2021)., [2] Y. Nishimura et al., Adv. Electron. Mater. 8, 2200024 (2022).

Understanding heat transport in organic materials in terms of structural elements including intermolecular interactions

Tokyo Tech [○]Takanori Fukushima

E-mail: fukushima@res.titech.ac.jp

Organic materials are lightweight and soft, and also have a high degree of design freedom and processability. Taking advantage of these characteristic properties, the new field of organic electronics has been established over the past few decades. This field has been constructed on a foundation of fundamental research on the electronic and optical properties of organic materials that has been cultivated over many years. In contrast to the remarkable progress and deepening theory of the electronic and optical properties of organic materials, understanding of the heat transport properties of organic materials still remains unexplored. However, organic materials have a tremendous diversity of elements, chemical bonds, molecular structures, intermolecular interactions, and assembly morphologies, making it difficult to comprehensively understand their heat transport properties. As the key to understand the nature of heat transport through organic materials, we have focused on molecular dynamics that reflect the thermal state as well as intermolecular interactions that connect the constituent molecules in the solid state. To this end, we have conducted research using structurally well-defined molecular assemblies such as single crystals, crystalline thin films, and self-assembled monolayers as motifs, rather than polymer systems in which it is difficult to obtain accurate microscopic structural information (Figure 1). Here the findings obtained through our studies will be presented, with discussion about the prospects for the development of organic materials toward thermal management.

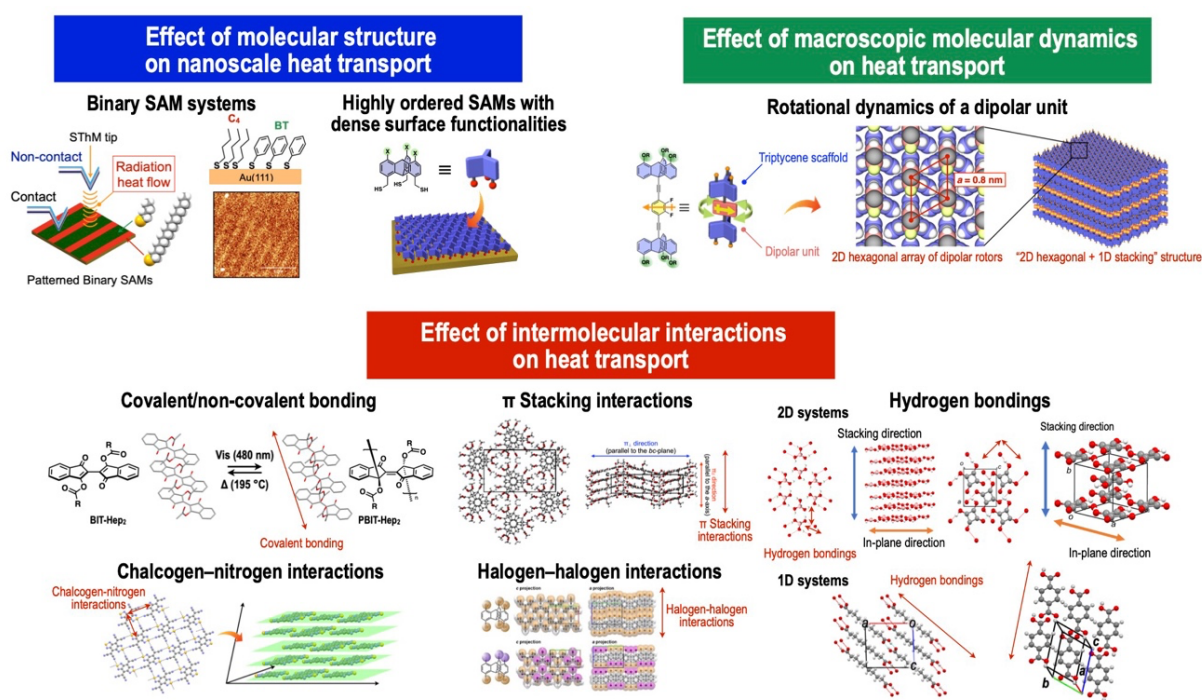


Figure 1. Overview of the material systems described in this presentation.

Nonlinear thermoelectric effects in low-symmetry systems**低対称系における非線形熱電効果**Univ. Tokyo¹, RIKEN CEMS², BAI Univ. Tokyo³, AIMR Tohoku Univ.⁴,○Hiroki Arisawa^{1,2}, Eiji Saitoh¹⁻⁴東大工¹, 理研 CEMS², 東大 BAI³, 東北大 AIMR⁴○有沢 洋希^{1,2}, 齊藤英治¹⁻⁴

Thermoelectric effects refer to the voltage generation from a temperature gradient in a solid. While the linear thermoelectric effects have been applied to heat-power generation, the thermoelectric voltage disappears when temperature fluctuates temporarily or spatially without a macroscopic temperature gradient. In contrast, nonlinear thermoelectric effects, which have been theoretically predicted [1], have the potential to generate electricity from non-equilibrium temperature fluctuations.

In this study, we have investigated second-order nonlinear thermoelectric effects in low-symmetry materials systems. We developed a method to measure the nonlinear thermoelectric effect and found that a superconducting MoGe film on a ferrimagnetic insulator $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ exhibits a voltage proportional to the square of the applied temperature gradient. In the MoGe film, mobile superconducting vortices that generate a thermoelectric voltage sense the magnetic asymmetry between the top and bottom surfaces of the MoGe film. The comparison between experiments and theoretical calculation revealed that the magnetic asymmetry between the film surfaces is attributable to the nonlinear thermoelectric effect. We also explored the nonlinear thermoelectric effect in a Pt/Permalloy bilayer system at room temperature. In this talk, we report the details of the experimental results and explain the mechanism of the nonlinear thermoelectric effects, which should be universal in a wide range of materials with lowered symmetry.

Reference

[1] R. Nakai and N. Nagaosa, *Phys. Rev. B* **99**, 115201 (2019).

Surface acoustic wave-spin wave interactions in magnetic thin films

ICR, Kyoto Univ., CSRN, Kyoto Univ., °Ryusuke Hisatomi

E-mail: hisatomi.ryusuke.2a@kyoto-u.ac.jp

Rayleigh-type surface acoustic wave (SAW) is a propagating wave on a surface of elastic material[1,2]. Due to their surface localization, high electrical controllability, and low propagation loss, SAW is used in many classical electrical devices, such as communication equipment and sensors for gases and liquids[3,4]. The coupling of SAW and spin wave in magnetic thin films on the surface of elastic materials has recently garnered significant attention[5-9]. The potential for long-distance transmission of spin waves and the intriguing possibility of phonon control by magnetism drive this attention.

It is known that there are several types of coupling between SAW and spin waves. However, their quantitative understanding still needs to be improved. Therefore, we have been working on the following to promote their quantitative understanding:

1. Development of optical imaging techniques to obtain spatial information on SAW[10,11],
2. Separation of multiple SAW-spin wave couplings[12],
3. Evaluation of magnetoelastic coupling constants[13].

In this talk, we will present this progress and future developments.

[1] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Theory of Elasticity*, 3rd ed. (Butterworth-Heinemann, Oxford, England, 1986).

[2] K. S. Thorne and R. D. Blandford, *Modern Classical Physics* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2017).

[3] C. Campbell, *Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications* (Academic, New York, 1998).

[4] K. Kange, B. E. Rapp, and M. Rapp, Surface acoustic wave biosensors: a review, *Anal. Bioanal. Chem.* **391**, 1509 (2008).

[5] R. F. Wiegert, Magnetoelastic surface acoustic wave attenuation and anisotropic magnetoresistance in Ni₃Fe thin films, *J. Appl. Phys.* **91**, 8231 (2002).

[6] M. Weiler *et al.*, Elastically Driven Ferromagnetic Resonance in Nickel Thin Films, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 117601 (2011).

[7] M. Weiler *et al.*, Spin Pumping with Coherent Elastic Waves, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 176601 (2012).

[8] P. G. Gowtham *et al.*, Traveling surface spin-wave resonance spectroscopy using surface acoustic waves, *J. Appl. Phys.* **118**, 233910 (2015).

[9] D. A. Bozhko *et al.*, Magnon-Phonon interactions in magnon spintronics, *Low Temp. Phys.* **46**, 383 (2020).

[10] K. Taga *et al.*, Optical polarimetric measurement of surface acoustic waves, *Appl. Phys. Lett.* **119**, 18 (2021).

[11] R. Hisatomi *et al.*, Quantitative optical imaging method for surface acoustic waves using optical path modulation, *Phys. Rev. B* **107**, 165416 (2023).

[12] K. Taga *et al.*, in preparation.

[13] H. Komiyama *et al.*, in preparation.

クライオ CMOS の絶縁体-半導体界面における電子-格子相互作用と非平衡輸送

Electron-phonon interactions and nonequilibrium transport at the semiconductor-insulator interface in cryo-CMOS

東大工, O内田建

Faculty of Engineering, The Univ. of Tokyo, OKen Uchida

E-mail: uchidak@material.t.u-tokyo.ac.jp

量子コンピュータを実現するために、量子ビットの状態を高速に読み出し、また制御するためのエレクトロニクスとして、4K 近傍で動作するクライオ CMOS が注目されている。量子ビットを高速に読み出すために、ゲート長が 40nm 程度以下という極めて短い CMOS トランジスタの利用が見込まれている。一方で、トランジスタの移動度は低温で高くなるため、電子の平均自由行程も長くなり、準バリスティック伝導がトランジスタにおいて発現することとなる。6K で動作するゲート長 30nm のトランジスタでは、90%以上のキャリアはバリスティックに伝導されるとの報告もある[1]。このような準バリスティック伝導のときに、トランジスタのノイズは何で決まるのだろうか？室温では、熱雑音がトランジスタの主要なノイズ源の一つであるため、低温になるに従い熱雑音の低減による低ノイズ化が期待される。しかし、クライオ CMOS では、4K で熱ノイズモデルから想定されるほどにはノイズが低減せず、短チャネル素子では、そもそも室温でもショットノイズがノイズの主たる起原であるとの報告もなされている[2]。実際には、ノイズ測定と同時にチャネル内の電子温度や格子温度をはじめとした他のパラメータの計測などが行われている訳では無く、クライオ CMOS におけるノイズの物理起原を明らかにする試みはまだ必要であると考えられる。

本報告は、このようなノイズに関する問題意識に基づき、クライオ CMOS における非平衡輸送について改めて考えてみたい。低温においても、電界からエネルギーを得た電子はフォノンを励起することでそのエネルギーの一部を格子系に引き渡し、定常状態に落ち着く。この時、電子系の温度 T_e と格子系の温度 T_l は解離する。電子-格子相互作用が強ければ温度の解離は小さく、電子-フォノン相互作用が弱ければ温度の解離は小さい。このことを利用して、電子-フォノン相互作用の強さを表すパラメータである変形ポテンシャルを評価したところ、絶縁体-半導体界面にキャリアが誘起される MOS トランジスタでは、バルクの場合よりも有意に高いことが確認された[3]。このことは、絶縁体-半導体界面で電子-格子相互作用が強いことを示唆する。シリコン酸化膜で覆われた Si ナノワイヤーの原子振動を分子動力学法で調べたところ、Si-SiO₂ 界面での Si 原子の振動振幅が、Si 中での振動振幅よりも大きいことが確認され、定性的には変形ポテンシャルが大きくなることと矛盾しない。

今後、ナノシートトランジスタが量産化され、さらなる微細化が追求される時代では、絶縁体-半導体界面における電子-格子相互作用の理解が益々重要になると考えられる。これは、室温で動作する通常の LSI 向けの素子だけでなく、低温で動作するクライオ CMOS においては、ノイズ起原の理解のためにも、やはりナノスケール構造における電子-格子相互作用の理解は不可欠なものであると考えられる。

謝辞: 本研究は科研費 18H0543, 19H00756 及び JST-CREST JPMJ19I2 の助成を受けた。

[1] W. Chakraborty *et al.*, *IEDM*, 39.4.1, 2019.

[2] 例えば, X. Chen *et al.*, *ISCAS*, 2021.

[3] T. Ohashi *et al.*, *IEEE J. Elec. Dev. Soc.*, **4**, 278 (2016).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): AI・ロボットによる自律駆動型研究がもたらす研究パラダイムシフト

[19a-A21-1~3] AI・ロボットによる自律駆動型研究がもたらす研究パラダイムシフト

シンポジウムスポンサー



[19a-A21-1]

AI・ロボットによる研究開発プロセス革新の現状と課題

○竹内 一郎^{1,2} (1.名大、2.理研)

[19a-A21-2]

サイバーとリアルが融合した研究開発環境の世界的潮流と将来展望

○一杉 太郎^{1,2} (1.東大理、2.東工大)

[19a-A21-3]

ハイスループットフラックス法スクリーニングシステムによる結晶材料開発 ～アースポジティブな社会に資する信大クリスタル～

○手嶋 勝弥^{1,2,3,4}、山田 哲也^{1,2,3}、林 文隆^{2,3}、井須 紀文^{1,2}、田中 厚志^{2,4} (1.信大ARG、2.信大RISM、3.信大工、4.ヴェルヌクリスタル)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：AI・ロボットによる自律駆動型研究がもたらす研究パラダイムシフト

[19a-A21-1~3] AI・ロボットによる自律駆動型研究がもたらす研究パラダイムシフト

[19a-A21-1] AI・ロボットによる研究開発プロセス革新の現状と課題

○竹内 一郎^{1,2} (1.名大、2.理研)

キーワード：人工知能、ロボット、科学技術のためのAI&ロボット

AIとロボット技術の進展に伴い、研究開発プロセスの自動化が進展し、研究者や技術者を単純作業から解放し、認知・身体機能を超える複雑な課題に取り組むことが可能になっている。本講演では、今年度から始まったさきがけ領域「研究開発プロセス革新」に焦点を当て、AI・ロボットを活用した科学技術研究の現状と課題について議論する。

サイバーとリアルが融合した研究開発環境の世界的潮流と将来展望

Global Trends and Future Prospects for R&D Environments

東大理¹, 東工大² ○一杉 太郎^{1,2}

UTokyo.¹, Tokyo Tech², °Taro Hitosugi^{1,2}

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

ハイスループットフラックス法スクリーニングシステムによる結晶材料 開発 ～アースポジティブな社会に資する信大クリスタル～

Development of crystalline materials using a high throughput flux screening system

- Shindai Crystal contributing to an earth-positive society -

信大 ARG¹, 信大 RISM², 信大工³, ヴェルヌクリスタル(株)⁴ ○手嶋 勝弥^{1,2,3,4}, 山田 哲也^{1,2,3},

林 文隆^{2,3}, 井須 紀文^{1,2}, 田中 厚志^{2,4}

Shinshu Univ. ARG¹, Shinshu Univ. RISM², Shinshu Univ. Dept. Mater. Chem.³, Verne Crystal Inc.⁴,

○Katsuya Teshima^{1,2,3,4}, Tetsuya Yamada^{1,2,3}, Fumitaka Hayashi^{2,3}, Norifumi Isu^{1,2},

Atsushi Tanaka^{2,4}

E-mail: teshima@shinshu-u.ac.jp, teshima@vernecrystal.com

環境世紀といわれる現代、低 CO₂ 排出や低環境負荷に貢献する環境調和型の材料創製プロセスに注目が集まっている。加えて、環境浄化やグリーンエネルギー製造／貯蔵に関する次世代環境・エネルギー関連材料も活発に研究開発され、さまざまなデバイスが提案・上市されている。当研究室では、このような社会情勢のもと、環境調和型結晶育成プロセスとして知られる「フラックス法」による機能性無機結晶材料・デバイスの創製に取り組んでいる。

フラックス法とは、フラックス(溶媒の意)の中で溶質成分を晶出させる結晶育成技術の一種である。フラックス法では、目的物質の融点よりもはるかに低い温度で結晶として晶出できることを特長とする。また、多形転移のある物質の目的結晶相を育成できる、欠陥や熱歪みの少ない結晶を育成できる、あるいは自形の発達した(晶相・晶癖を制御した)結晶を育成できるなどの特長をもつ。信州大学ではこのフラックス法およびその関連技術で育成した結晶材料を信大クリスタル®と名付け、大々的にブランディングし、アースポジティブな社会への貢献を推進している。

フラックス法による結晶育成は、研究者や技術者の経験や知見に頼ることが大きい。なぜなら、フラックス結晶育成の実験条件(我々はレシピと呼ぶ)には、溶質・フラックス種、混合比あるいは温度条件をはじめ、きわめて多様な変数がある。最適レシピを目指した組み合わせを考えると、1つの材料種であったとしても優に1万点を超える。その結果、フラックス法結晶育成では、性能などを最適化した結晶材料開発に長期間(年単位)を要することが多い。そこで、我々はフラックス法にデータ駆動的アプローチを導入したフラックス法プロセス・インフォマティクスの開発に注力している。また、アーム型ロボットなどを導入したフラックス法ラボオートメーションも実践している。現在、原料の混合、フラックス育成結晶の分離・回収、ならびに XRD 分析用プレートの作製を自動化できており、ハイスループットフラックス法スクリーニング(HTFS)システムを提案している。当日は、この HTFS システムによる結晶材料創製について報告する。

謝辞 本発表の成果は、手嶋・林・山田研究室に在籍した(する)教職員・学生の貢献による。また、本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期「マテリアル事業化イノベーション・育成エコシステムの構築」(研究推進法人:NIMS), NEDO-ARPCChem, 科研費基盤研究 A の援助を受けて実施した。ここに謝意を表す。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：AI・ロボットによる自律駆動型研究がもたらす研究パラダイムシフト

[19p-A21-1~5] AI・ロボットによる自律駆動型研究がもたらす研究パラダイムシフト

シンポジウムスポンサー



[19p-A21-1]

万物のあらゆる物性を予測するマルチモーダルAI技術と産総研内33テーマへの水平展開

○畠 賢治¹ (1.産業技術総合研究所)

[19p-A21-2]

反応経路ネットワークの構築と情報学的解析：有機合成反応開発への展開

○原 潤^{1,2} (1.北大WPI-ICReDD、2.JST-ERATO)

[19p-A21-3]

教示デバイスと模倣学習によるフレキシブル・ラボオートメーション

○松原 崇充¹ (1.奈良先端大)

[19p-A21-4]

自律駆動型材料開発のための汎用ソフトウェアNIMO

○田村 亮¹ (1.NIMS)

[19p-A21-5]

日本語で思考可能な大規模言語モデルの開発と実験研究への展開可能性

○畠山 歓¹ (1.東工大)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：AI・ロボットによる自律駆動型研究がもたらす研究パラダイムシフト

[19p-A21-1~5] AI・ロボットによる自律駆動型研究がもたらす研究パラダイムシフト

[19p-A21-2] 反応経路ネットワークの構築と情報学的解析：有機合成反応開発への展開

○原 祐^{1,2} (1.北大WPI-ICReDD、2.JST-ERATO)

キーワード：量子化学計算、反応経路探索、反応経路ネットワーク

近年、量子化学計算に基づく反応経路探索法の発展に伴い、分子の安定構造が多数の反応経路によって網目状につながれた反応経路ネットワークの構築と、それを用いた反応機構解析が可能になってきた。本講演では、大規模な反応経路ネットワークデータに対する情報学的手法を利用した化学反応解析、および反応経路ネットワークに基づく有機合成反応開発への展開について、最近の取り組みを紹介する。

教示デバイスと模倣学習によるフレキシブル・ラボオートメーション

Flexible Laboratory Automation through Teaching Device and Imitation Learning

奈良先端科学技術大学院大学 松原 崇充

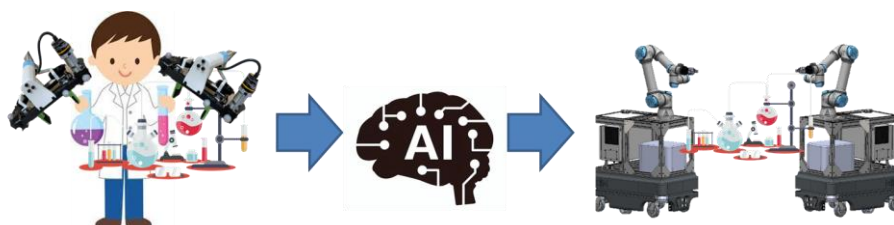
Nara Institute of Science and Technology, Takamitsu Matsubara

E-mail: takam-m@is.naist.jp

本講演では、教示デバイスと模倣学習を活用し、化学実験現場における頻繁な段取り替えに柔軟に対応できるロボットオートメーションシステムの開発について紹介する。本システムは、実験者がロボットグリッパー型の教示デバイスを使用して実験を遂行することで、ロボットによる同一作業の代行を可能にするものである。これにより、実験者は複雑な操作を簡単にロボットに教示でき、実験のロボット自動化が促進される。

さらに、開発したシステムは、動作データと同期した視覚・触覚センサデータを活用し、模倣学習を適用することで、感覚に基づく動作の自動調整を実現する。この技術により、ロボットは単に教示軌道を再現するだけでなく、環境の変化や不確実性に対しても適応的に動作を調整できるようになる。

本講演では、開発したシステムの概要を紹介するとともに、視覚・触覚データに基づく模倣学習の適用事例についても紹介する。具体的には、視覚に基づいて小瓶の位置に適応的に対応するピペット挿入作業や、触覚に基づいて位置誤差に頑健な小瓶の蓋挿入作業がある。これらの作業についての予備的な実験結果を紹介し、システムの有効性と今後の展望について議論する。



教示デバイス

視覚・触覚センサー

模倣学習

汎用ロボによる自動化

自律駆動型材料開発のための汎用ソフトウェア NIMO

NIMO: An automation software to implement a closed loop between artificial intelligence and robotic experiments in materials science

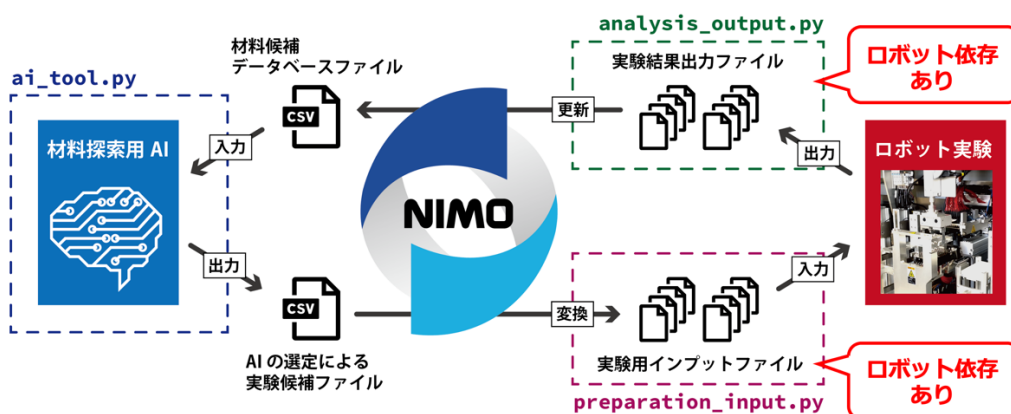
NIMS, 田村亮

NIMS, Ryo Tamura

E-mail: tamura.ryo@nims.go.jp

近年、情報科学を利用した材料研究であるマテリアルズ・インフォマティクスが注目されている。情報科学手法を材料データに適用し、新材料開発を加速することを目的としており、「次に実験すべき材料は？」という問いかけに対して、適切な実験条件を提案する材料探索 AI の開発が活発に行われている。加えて近年、ロボット実験を利用した材料合成・評価技術の発展が目覚ましい。研究者が実験条件を入力すると、自動でロボットが材料を合成し、評価結果が得られるロボット実験装置の開発が行われている。これらロボット実験装置と材料探索 AI が連携することで、実験条件提案と材料合成・評価を交互に繰り返すクロズドループが形成され、材料開発における自律自動実験を行うことができる。しかしながら、ロボット実験装置と材料探索 AI は、それぞれ独立に開発が進められてきたため、双方が連携を見据えた仕様になっておらず、間に人が入ることでこれらの技術を繋いだクロズドループを形成し、実験が行われることが多い。このままでは、完全な自律自動実験とはなっておらず、人的な律速を材料開発から取り除くことができていない。

そこで、人の介入を一切なしに自律自動材料探索のクロズドループを容易に形成することを目的とした汎用的ソフトウェア NIMO を開発し（下図）、オープンソースソフトウェアとして公開した[1, 2, 3]。NIMS-OS では、ロボット実験装置および材料探索 AI をそれぞれモジュールとして扱い、ロボット実験装置と AI アルゴリズムの組み合わせを選定することで、様々な自律自動材料探索が行えるように設計されている。特に、材料探索 AI に対する入出力を共通化し、ロボット実験装置の操作を明確化することで、少ないプログラム修正で様々なロボット実験装置を用いた自律自動実験を行うことができる。



参考文献

- 1) R. Tamura, K. Tsuda, and S. Matsuda, Science and Technology of Advanced Materials: Methods 3, 2232297 (2023).
- 2) <https://github.com/nimsos-dev/nimsos>
- 3) <https://nimsos-dev.github.io/nimsos/docs/jp/index.html>

日本語で思考可能な大規模言語モデルの開発と実験研究への展開可能性

Development of a large-scale language model capable of processing in Japanese

and potential for experimental research.

東工大物質 〇畠山 歆

Sch. of Mater. and Chem. Tech., Tokyo Tech., 〇Kan Hatakeyama

E-mail: hatakeyama.k.ac@m.titech.ac.jp

GPT-4 に代表される大規模言語モデル (LLM) の出現により、テキストに代表される様々な非構造化データをマテリアルズ・インフォマティクス(MI)の領域に組み込む余地が増えてきた。画像のようなマルチモーダル機能も備えた LLM は、人間の思考や五感に対応する情報処理が可能で、様々な研究情報をデータ科学の枠組みで解析できるようになる期待がある¹⁻³。本発表では、自律駆動型研究の推論基盤となりうる LLM の開発状況と、マルチモーダル LLM を化学実験に展開した際のユースケースについて紹介する。

[日本語で思考する大規模言語モデルの開発]

GPT-4 などの商用 LLM は高い性能を誇る一方で、科学研究や自動実験ロボットへの展開に向けたカスタマイズ性や推論コストに課題がある。加えて、本国では専門用語を含めた日本語を自在に行える LLM の開発も求められる。発表者は最近、数百億パラメータを持つ日本語 LLM の開発プロジェクトに参画したので、そこで得た知見や、専門ドメイン系を含む国内外の LLM の研究動向等について紹介する。

[マルチモーダル LLM の化学実験への展開]

高分子材料の物性は、その製法や階層構造に応じて多彩に変化する性質があるため、実験プロセスを正確に記述した MI 基盤を構築する必要がある。発表者らは日常的な実験作業の記録と解析作業を自動化することを目的として、マルチモーダル LLM の導入した³。当該モデルを活用することで、反応溶液の濁り具合の経時変化やサンプル瓶を置くべき場所などについて、テキストや半定量的なデータを自動出力し、考察できることが分かってきた。従来はデータベース化が難しかった仔細な実験情報やノウハウを、マルチモーダルモデルを介して解析するための素地が整ってきたと言える。当日は詳細な実験結果や今後の自立駆動型実験への展望についても考察する。

References

1. G. Tom, S. P. Schmid, *et al.*, 2024, *chemrxiv-2024-rj946*.
2. K. Hatakeyama-Sato, N. Yamane, *et al.*, *Sci. Technol. Adv. Mater.: Methods*, 2023, **3**, 2260300.
3. K. Hatakeyama-Sato, H. Ishikawa, *et al.*, 2024, *chemrxiv-2024-zfwxg*.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】生産技術の醍醐味 ～モノづくりシステムの現場で応用物理は何ができるか？～

[18p-A21-1~10] 【一般公開】生産技術の醍醐味 ～モノづくりシステムの現場で応用物理は何ができるか？～

[18p-A21-1]

オープニングアドレス／生産技術の醍醐味

○秋永 広幸¹ (1.産総研デバイス技術)

[18p-A21-2]

コーポレート・トランスフォーメーションを支える生産技術

○倉田 英之¹ (1.AGC株式会社)

[18p-A21-3]

生産現場の知識体系を技術者が構築するためのIT活用法

○藤岡 聡太^{1,2} (1.シングス合同会社、2.実際の設計研究会)

[18p-A21-4]

半導体工場における水利用のグリーン移行技術

○飯野 秀章¹ (1.栗田工業株式会社)

[18p-A21-5]

反応性プラズマを用いた金属表面改質プロセスのその場インピーダンス分光計測

○両角 潤樹^{1,2}、江利口 浩二¹、占部 継一郎¹ (1.京大院工、2.学振特別研究員DC)

[18p-A21-6]

物理リザバー一体化MEMS加速度センサを用いた振動判別

○土屋 智由¹ (1.京大院工)

[18p-A21-7]

機械学習アルゴリズム・AIチップ統合開発システム

○竹内 健¹ (1.東大工)

[18p-A21-8]

AIチップ設計拠点と設計プラットフォーム

○内山 邦男¹ (1.産総研)

[18p-A21-9]

半導体モノづくりを加速する NVIDIA Computing Platform

○丹 愛彦¹ (1.エヌビディア)

[18p-A21-10]

クロージングリマーク／モノづくりシステムの現場で応用物理は何ができるか？

○三河 巧¹ (1.SCREENセミコンダクターソリューションズ)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】生産技術の醍醐味 ～ モノづくりシステムの現場で応用物理は何ができるか？ ～

[18p-A21-1~10] 【一般公開】生産技術の醍醐味 ～ モノづくりシステムの現場で応用物理は何ができるか？ ～

[18p-A21-1] オープニングアドレス／生産技術の醍醐味

○秋永 広幸¹ (1.産総研デバイス技術)

キーワード：半導体、生産技術、AI and ML

生産技術は、応用物理学会で議論される広範な理学・物理学と工学・産業を橋渡しするものです。本シンポジウムでは、技術者の矜持をもたらす生産技術の醍醐味、生産現場で得られる情報の構造化、水に注目したグリーン移行の話題、そして、最先端AIチップが生まれ、様々な場で活用されていく過程をご講演いただき、その橋渡しの現状と展望を俯瞰します。

(v3) コーポレート・トランスフォーメーションを支える生産技術

Production Technology Supporting Corporate Transformation

AGC株式会社 倉田 英之

AGC Inc., Hhideyuki Kurata

現代社会は多様な価値観を背景とする社会問題、地球環境のサステナビリティなどの課題があり、企業に求められる責任も一段と高まっている。企業は様々なステークホルダーに対して、経済的な成長と共に、自らの存在意義を再認識し社会的な貢献を果たしていくことが重要である。

AGC は旭硝子として 1907 年に板ガラスの国内製造供給を使命として創業した。1910 年代の第一次世界大戦時に、主要原料のソーダ灰と、溶解窯の材料の耐火レンガが輸入できなくなり、操業の危機を迎えた。この危機を乗り越え国内ガラス供給の使命を果たすため、それらの自社生産に踏み切ったのが、現在の化学品事業、セラミックス事業の始まりである。こうして扱う素材の幅が広がり、板ガラスの会社旭硝子から素材の会社 AGC に転身して来た。しかしながら、ガラス産業は化石燃料を燃焼し原料を溶解するエネルギー大量消費型のため、地球温暖化の課題に直面している。地球環境を維持しながら、社会に必要とされる素材の提供という使命を果たし続けることは、AGC にとって大きな挑戦であり、更なるコーポレート・トランスフォーメーション (CX) を成し遂げる新たなチャンスともいえる。その CX を進めるためのカギとなるのが生産技術の革新である。本講演では、AGC のサステナビリティに対する取り組みを軸に、生産技術の全体感を紹介したい。

まず、板ガラス製造における GHG 排出削減技術に向けたロードマップを紹介する。キーとなるのが二酸化炭素を排出しないクリーン燃料への転換技術と電気溶融技術である。AGC は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクトで、世界で初めて実生産炉でのアンモニアを燃料に利用したガラス製造の実証試験に成功した。排ガスに含まれる NO_x 濃度が環境基準値を下回る結果を得ている。また、電気溶融炉に関しては、欧州ガラス大手と共同で開発を進めている。さらに、最新の DX によるガラス溶解プロセスのデジタルツイン技術の開発、実用化も進めている。

一方、差別化された素材 (材料) の開発には分析・評価やマテリアルインフォマティクス (MI) 等のシミュレーションなど、基盤的技術が必須である。また素材を知的財産化し、標準化戦略により差別化していくことも重要である。さらに、その材料を製造するためのプロセス技術、設備技術も差別化にとって欠かせない。従来の開発は材料開発、プロセス開発、設備開発が逐次的に実施され、最終の製品段階で問題が発生して開発が手戻りするケースも見られた。現在では初期段階から、材料技術者、プロセス技術者、設備技術者が連携し、早期にすり合わせながら進めることにより効率的な開発が行われている。これらが統合されたのが生産技術であり、これからの生産技術者の醍醐味と言えよう。

生産現場の知識体系を技術者が構築するための IT 活用法

How to use IT to help engineers build knowledge systems for manufacturing

シングス合同会社, 実際の設計研究会 藤岡 聡太

Things, LLC , Study group of Practical Design for Mechanical Systems Sota Fujioka

E-mail: fujioka@things.co.jp

筆者は、20 年間に渡り数十社の製造業のお客様への技術コンサルティングサービスに携わらせて頂いている。しかし、ビックデータの活用や DX 化が志向されている現代であるにも関わらず、生産現場に蓄積された工学的な知見や不具合情報などが十分に活用されている企業に出会う事は稀である。さらに昨今では、あまり意図せずに蓄積された図面や設計図書等の膨大なデータを AI システムで検索するだけで、技術者にとって有用な知識を抽出できることを期待する風潮があるように感じているが、やはり実際に期待通りの成果を得られている企業は多くないと感じる。

本講演では、弊社の技術コンサルティングサービスの一環として、顧客企業の技術者の皆様が主体となり、技術に根差した本質的なキーワード体系を設計し、地道に正確に記述された知識を紐づけるデータベース構築方法を解説する[1]。手法の解説だけでなく、Fig.1 に示す、弊社で実際に開発した知識データベースシステムのデモンストレーションも行う。なお、筆者は、数十年に渡り「実際の設計選書シリーズ」という書籍を上梓してきた「実際の設計研究会」という企業を超えたコミュニティの一員でもある。同研究会の「失敗学」や「創造設計法」のエッセンス[2]も取り入れた知識データベースの有り方を提示することが、ご聴講頂く皆さまが所属する組織の技術力向上の一助になれば幸いである。

参考文献 [1]実際の設計研究会 (2019) 実際の設計選書 差別化戦略のための生産プロセス, 日刊工業新聞社[2]実際の設計研究会 (2014) 実際の設計選書 改訂新版 機械設計の考え方と方法, 日刊工業新聞社

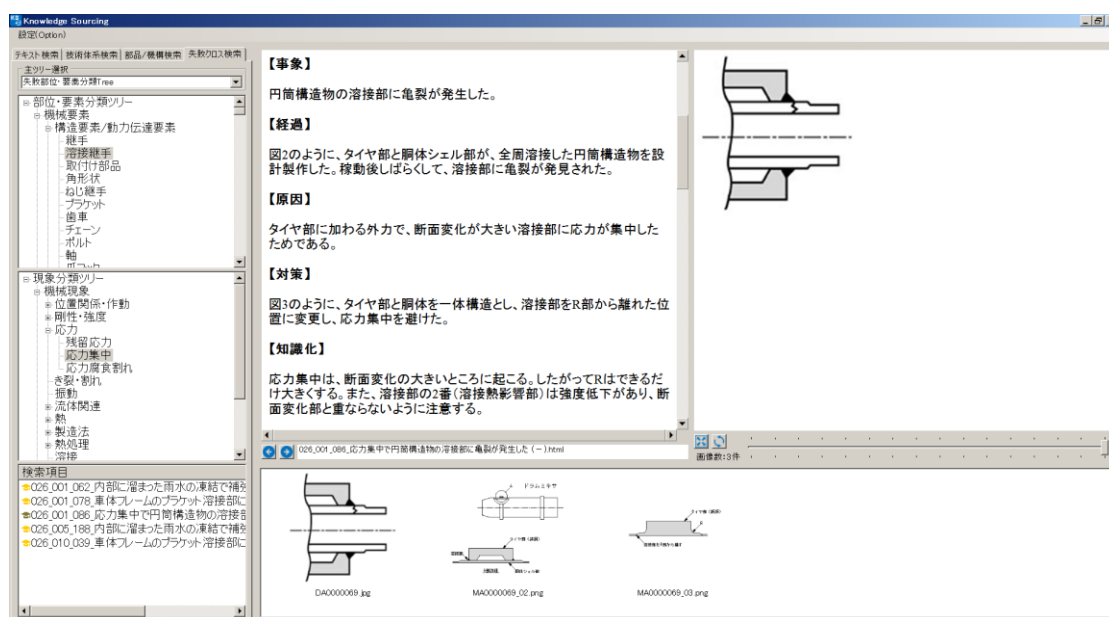


Fig1. User Interface of Database System of Structured Knowledge.

半導体工場における水利用のグリーン移行技術

Green Transition Technologies for Water Use in Semiconductor Manufacturing FAB

栗田工業株式会社電子産業事業部 DE 部門開発部第一チーム 飯野 秀章

Team1, R&D Dept., DE Group, Electronics Industry Div., KURITA WATER INDUSTRIES LTD.

E-mail: h.iino24@kurita-water.com

スマートフォンやエッジコンピューティング、生成 AI など半導体需要の増加に伴い、半導体製造量は年々増大している。半導体デバイスの製造には大量のエネルギーと水が不可欠であるが、微細化や積層化技術の発展に伴って、ウェハ 1 枚당りに消費される水量は増加傾向にあり、持続可能な半導体製造の実現にむけた対策が必要である。本講演では、半導体製造工場に導入される超純水製造システムの現状および最新のグリーン化技術について紹介するとともに、ウェハ洗浄における水および薬品使用の見直しや、CO₂ 排出量の削減に向けた改善案を紹介する。また持続可能な半導体製造に向け、半導体工場全体で連携してグリーン化に取り組む必要性を述べる。

反応性プラズマを用いた金属表面改質プロセスの その場インピーダンス分光計測

Diagnostics of metal-surface modification by reactive plasma using in-situ impedance spectroscopy

京大院工¹, 学振特別研究員 DC² ◯(D2)両角 潤樹^{1,2}, 江利口 浩二¹, 占部 継一郎¹

Kyoto Univ.¹, JSPS Research Fellow² ◯J. Morozumi^{1,2}, K. Eriguchi¹, and K. Urabe¹

E-mail: morozumi.junki.74m@st.kyoto-u.ac.jp

【はじめに】反応性プラズマを用いた材料プロセスは半導体デバイス製造で重要な役割を果たしており、プラズマとプロセス対象である固体表面の相互作用を理解することはプロセス技術の発展に不可欠である。我々は、プラズマ中にある固体材料表面状態のその場計測法として、プラズマと固体材料からなる系を電気回路モデルで表現し表面状態を解析する、その場インピーダンス分光 (In-situ impedance spectroscopy; in-situ IS) 法を用いた研究を行っている。これまでに、プラズマ診断に用いる金属探針の表面改質や、プラズマからの真空紫外光照射による絶縁体薄膜の特性変化を捉えることに成功してきた[1,2]。今回は、反応性プラズマプロセスの一種である金属の表面酸化に対して in-situ IS 法を適用し、プロセス前後や反応層形成中の計測を行った結果を報告する。プラズマを用いた金属酸化プロセスでは金属に印加する直流バイアス電圧が改質層形成に大きな影響を及ぼすことが知られている[3]ため、直流バイアス印加と in-situ IS 計測を切り替え可能な反応性プラズマ実験システムを構築し、実験を行った。

【実験】Fig. 1 に本研究で用いた実験装置を示す。真空チャンバー内のステージ上に銅板を置き、円板型 (開口 ϕ 20 mm) のテフロン製治具により固定した。この銅板をアルゴン (Ar) /酸素 (O_2) 混合ガスプラズマ (Ar: O_2 = 10: 1, 圧力 10 Pa, 投入電力 300 W) に曝露し、in-situ IS 計測により表面酸化層のインピーダンスを計測した。次に、ステージに直流電圧源を接続し、直流バイアス電圧 (V_{dc} = +20, +30, +40 V) を 10 分間印加しながらプラズマ曝露を行った。その後、in-situ IS 計測系を再接続し、直流バイアス印加時に形成された表面酸化層のインピーダンスを計測した。

【結果・考察】Fig. 2(a)に V_{dc} 印加前後のインピーダンススペクトルを示す。 V_{dc} 印加後に見られる半円形のスペクトルは表面酸化層の抵抗増大を表している。表面酸化層を RC 並列回路でモデル化し、フィッティングにより酸化層インピーダンスの V_{dc} 依存性を解析した (Fig. 2(b))。実験結果から V_{dc} の増大による酸化層形成促進が確認され、in-situ IS 法がプラズマプロセスにより形成される薄膜や表面処理層のその場計測に活用可能であることが示された。

【おわりに】in-situ IS 法により、反応性プラズマを用いた金属表面処理の結果をチャンバー内で評価可能であることを明らかにした。発表では、以上の結果に加えて、直流電圧印加による酸化プロセス中に実施した in-situ IS 計測結果について報告しながら、詳細な表面酸化層形成過程や酸化層形成による表面近傍のプラズマ状態変化について議論する。

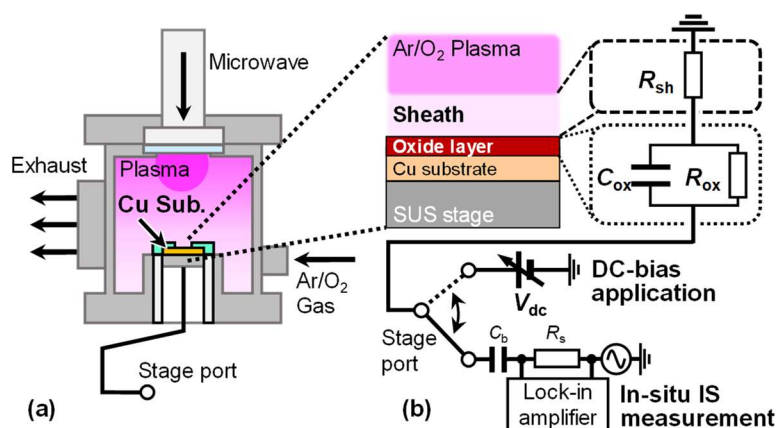


Fig. 1 Schematics of (a) plasma chamber with sample stage and (b) circuit model of plasma/sheath/oxide-layer/Cu-substrate structure connected to in-situ IS measurement and DC-bias application systems.

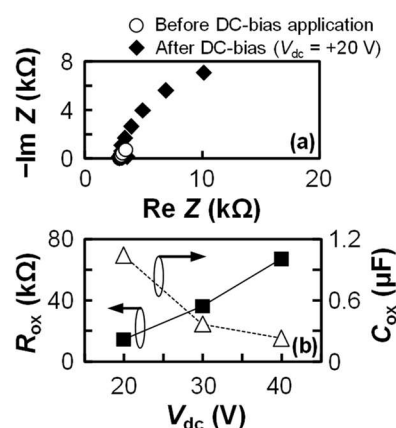


Fig. 2 (a) Impedance spectra before and after DC-bias application and (b) dependence of R_{ox} and C_{ox} on V_{dc} .

謝辞 本研究の一部は JST SPRING (JPMJSP2110), 科研費 (JP24KJ1413, 24K00620) の助成を受けたものです。

参考文献 [1] 両角潤樹 他, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 10a-S301-5a (2021). [2] J. Morozumi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SI1010 (2023). [3] M. Kitajima *et al.*, Phys. Rev. B **53**, 3993 (1996).

物理リザーバー一体化 MEMS 加速度センサを用いた振動判別

Vibration Discrimination Using a Physical Reservoir Integrated MEMS Accelerometer

京大院工 ○土屋智由

Kyoto Univ., ○Toshiyuki Tsuchiya

E-mail: tutti@me.kyoto-u.ac.jp

近年, IoT センサが収集したデータを端末側で処理するエッジコンピューティングが通信やクラウド計算のコスト低減のために注目され, AI チップを集積した各種 MEMS センサが開発されている。本研究では低消費電力化を目指し, AI チップに代わり非線形振動子構造を加速度センサに一体化しその振動子応答で信号処理を行う物理リザーバーコンピューティング(PRC)と呼ばれる機械学習アルゴリズムの実装によるセンサ構造のみによる振動判別を検討している。

Fig. 1 は silicon-on-insulator ウェハのデバイス層(15 μm 厚)に製作した周波数変調型加速度センサの概念図である。加速度による慣性力は支持梁で増幅され, 両端支持梁に張力を与えることでその非線形共振振動の応答特性を変調する。この振動子の共振振動応答とその非線形性により物理リザーバーに必要な短期記憶と非線形演算能力を実装している。この振動子の過渡応答の振幅を一定周期でサンプリングし、これをリザーバーの状態量として, 時間展開型 PRC として動作させる。この

デバイスは各種振動入力 of 判別, 例えば生産装置における回転運動体(モータ、ポンプ)などの健全性評価, 故障検知, 人体や移動体の運動状態判別などが MEMS の機械構造のみで実現される。具体例として人間活動状態の判別に用いた結果を Fig. 2 に示す[1]。ズボンのポケットに入れたスマートフォンから得られた運動方向と直交する水平方向の振動加速度の波形を時間圧縮して加振器でセンサに入力(Fig. 2a)とし, 歩行とジョギングの判別を行った。振動子の駆動条件とサンプリング間隔を最適化すると最高 98.8% の正解率を得た。Fig. 2b はその条件におけるリザーバー振動子の振幅変化である。振幅や周波数では判別しにくい波形の違いを非線形振動子のヒステリシスを用いて強調できていることが高い正解率の要因と考えている。

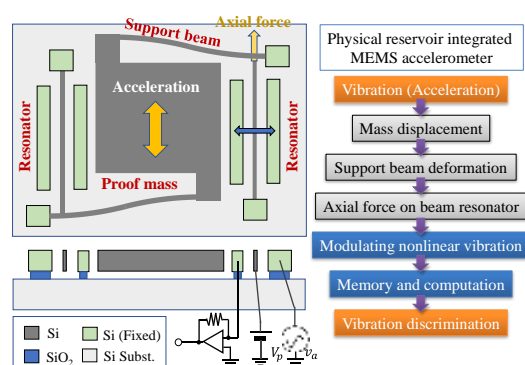


Figure 1 Reservoir integrated MEMS accelerometer

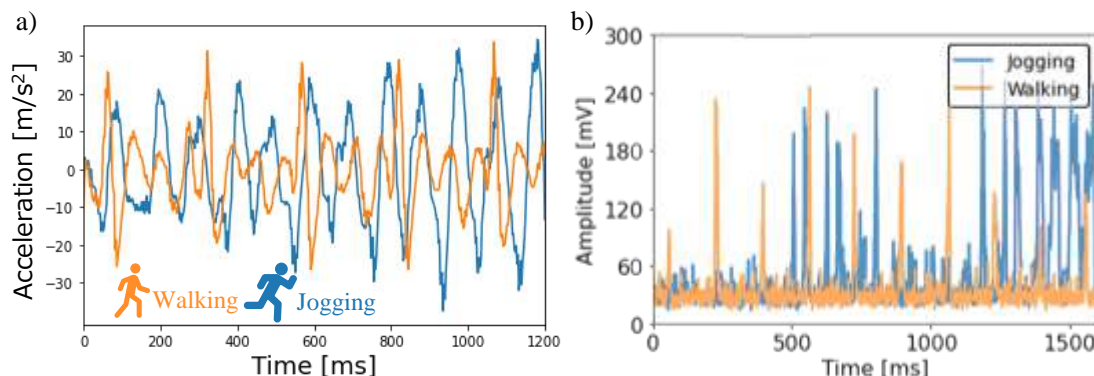


Figure 2 a) Input acceleration, b) reservoir resonator vibration amplitude.

- [1] T. Mizumoto, et al. The 22nd International Conference on Solid-State Sensors Actuators and Microsystems (Transducers'23), Kyoto, Japan, (June 25-29, 2023), pp. 1664-7.

機械学習アルゴリズム・AI チップ統合開発システム Integrated Development System of Machine Learning Algorithm and AI Chip

東大工 ○竹内 健

Univ. Tokyo, ○Ken Takeuchi¹

E-mail: takeuchi@co-design.t.u-tokyo.ac.jp

Computation-in-Memory (CiM)のチップ開発を目指した、機械学習アルゴリズムと AI チップの統合開発システムを提案する [1-5]。メモリデバイスのばらつきや信頼性のエラー、回路ノイズなどの非理想性を本システムに取り込む。CiM と機械学習アルゴリズムを統合して最適化することで、認識精度が高くかつ高いエネルギー効率を有する AI チップを実現する。提案するシステムでは、AI 計算の推論のみならず、学習時にもばらつき、ノイズ、エラーなどを挿入することができる。その結果、学習時に量子化やばらつき・ノイズを入れることで、推論の精度を向上することも可能になる。

謝辞 この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究所 (NEDO) の委託業務 (JPNP16007) の結果得られたものです。

参考文献

- [1] Kazuhide Higuchi, Chihiro Matsui, Naoko Misawa and Ken Takeuchi, “Comprehensive Computation-in-Memory Simulation Platform with Non-volatile Memory Non-Ideality Consideration for Deep Learning Applications”, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), September 8, 2021.
- [2] Kazuhide Higuchi, Chihiro Matsui and Ken Takeuchi, “Investigation of Memory Non-Ideality Impacts on Non-Volatile Memory Based Computation-in-Memory AI Inference by Comprehensive Simulation Platform,” IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW) Poster, pp. 57-58, June 11-12, 2022.
- [3] Kazuhide Higuchi, Yinghao Sun, Chihiro Matsui and Ken Takeuchi, “Noise Event Injection Training to Mitigate Inference Accuracy Degradation due to Non-Idealities of Event-based Vision Sensor and Computation-in-Memory,” International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), September 8, 2023.
- [4] Adil Padiyal, Ayumu Yamada, Naoko Misawa, Chihiro Matsui and Ken Takeuchi, “Analysis of Inference Accuracy of Convolutional Neural Networks due to Quantization of Weights, Gradients, Input and Output Signals Stemming from Computation-in-Memory,” International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM) Poster, September 7, 2023.
- [5] 佐藤龍吾, 山内堅心, 松井千尋, 竹内健, “不揮発性メモリの量子化・書き込みばらつきを考慮した学習による Computation-in-Memory における深層強化学習の性能向上”, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 24p-31A-4, 2024 年 3 月 24 日.

AI チップ設計拠点と設計プラットフォーム

AI chip design center and its design platform

産総研¹, [○]内山 邦男¹

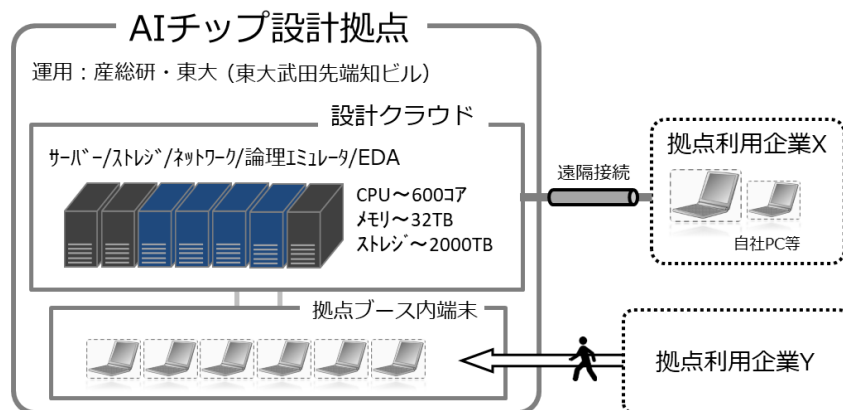
AIST¹, [○]Kunio Uchiyama¹

E-mail: kunio.uchiyama@aist.go.jp

2010年代初頭から第3次AIブームが始まり、世界中で様々なAIチップの開発が行われている。一方で、AIチップの設計には高額なEDAツールやIP、検証装置が必要であり、実際にチップを開発し、アイデアを実証し、ビジネスに繋げるまでの大きな障壁となる。AIチップ設計拠点は、これらの障壁を取り払うために、チップ開発に必要な環境を整備し、設計技術や検証手法をプラットフォーム化して広く企業に提供することを目指している。以下、その概要について記す。

1. AIチップ設計拠点の設計クラウド

拠点の構築は、NEDO 事業 (2018 年 10 月から 2023 年 3 月) で行い、2023 年 4 月から産総研、東大で共同運営している。拠点は東大武田先端知ビルに設置し、右図に示すチップ設計専用の設計クラウドをビル内に構築している。こ

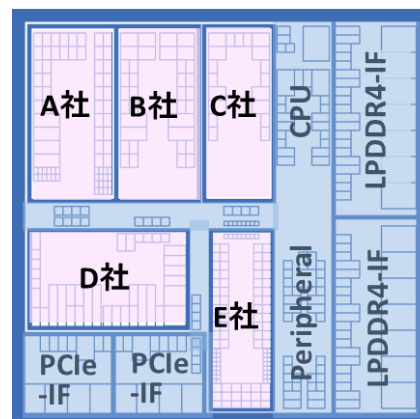


のクラウド上に、高位合成、論理設計・検証、回路設計、物理設計・検証ツールと、それらを用いたチップ設計フローが整備されており、拠点ユーザ企業の利用が可能となっている。

2. AIチップ設計拠点が提供する SoC プラットフォーム

AIチップを開発して実現場で評価する場合、AIチップにはニューラルネットの処理を実行するAIアクセラレータ以外に、OSを実行するCPU、DRAMやフラッシュ接続のためのメモリ制御回路、PCIe・I2C・GPIOなど業界標準のインタフェースを接続する回路など、システム評価に必要な回路をチップ上に実装する必要がある。このようなSoC (System-On-Chip) 型AIチップの開発を容易にするために、拠点では28nmおよび12nmプロセスノード向けのSoCプラットフォーム(AI-OneおよびAI-Two)を整備した。拠点を利用するユーザ企業はこのSoCプラットフォームを利用することにより独自のAIアクセラレータを内蔵したカスタムSoCを短期間で開発することが可能となっている。

AI-Oneチップ



AIアクセラレータ(ピンク部分)
SoCプラットフォーム(ブルー部分)

半導体モノづくりを加速する NVIDIA Computing Platform

Accelerated Chip Design and Manufacturing by NVIDIA Computing Platform

エヌビディア ○ 丹 愛彦

NVIDIA ○Naruhiko Tan

E-mail: naruhikot@nvidia.com

急速に進化する AI によって様々な産業に変革が起こりつつある中、AI の研究、開発、そして運用に欠かせない半導体への需要が急増している。AI の研究、開発、運用には多大なコンピュータリソースが必要とされており、今後も増加し続けるコンピュータデマンドに対応していくためには、半導体設計プロセスの加速が必要不可欠である。そもそも GPU はその名前からも分かるように、グラフィックス用途のプロセッサとして登場し、グラフィックスで必要とされる大量の演算を並列処理することを得意としている。2006 年に発表された統合開発環境である CUDA によって、GPU をグラフィックス以外の用途に適用する取り組みが加速し、まず最初に科学技術計算における GPU の有用性が示された。その後、GPU は AI で必要とされる処理にも適しているということが分かり、AI そのものの技術的進歩、学習に使えるデータの増大などの要因と合わせて AI の爆発的な発展のきっかけとなり、今日の AI ブームに至っている。このような特徴を持つ GPU が、半導体設計をどのように加速させるのかという点について、本講演では様々なユースケースを紹介するとともに、それらを可能としている革新的なハードウェアと、ハードウェアの性能を十分に引き出すためのソフトウェアスタックについて紹介する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】生産技術の醍醐味 ～モノづくりシステムの現場で応用物理は何ができるか？～

[18p-A21-1~10] 【一般公開】生産技術の醍醐味 ～モノづくりシステムの現場で応用物理は何ができるか？～

[18p-A21-10] クロージングリマーク／モノづくりシステムの現場で応用物理は何ができるか？

○三河 巧¹ (1.SCREENセミコンダクターソリューションズ)

キーワード：ものづくり、サステナビリティ、スマート

本シンポジウムで講演いただいた内容を軸に、「応用物理」の分野が、モノづくりのスマート化、グリーン技術の推進、生産技術の進化に貢献できるポテンシャルについて総括する。