

先端国際共同研究推進事業
2023 年度採択
「Top チームのための ASPIRE」
マテリアル分野

2024 年度
年次報告書（公開版）

研究課題名	強誘電体ルネッサンス：ペロブスカイトを凌駕する 「第四世代材料」で実現するカーボンニュートラル
日本側研究代表者	舟窪 浩 東京科学大学 教授
相手側研究代表者	・ Susan Trolier-McKinstry, Professor, The Pennsylvania State University ・ Uwe Schroeder, Senior Scientist/Deputy Scientific Director, Namlab gGmbH
研究期間	2024 年 2 月 1 日～2029 年 3 月 31 日

1. 研究成果の概要

① 研究構想にかかる成果

<実施したこと>

ウルツ鉱構造および蛍石構造の第四世代強誘電体について、新規材料・組成探索を行った。米国研究グループと連携し、理論計算も活用した材料設計、薄膜作製条件探索や最適化にも取り組み、材料探索を開始した。分極反転電圧低減のための ZnO 基組成の探索や、積層構造の提案、成膜条件の最適化を行った。また、デバイス作製に不可欠な水素ガス処理化での特性の安定性の検討を行った。

蛍石構造強誘電体に関して、基板を除去した歪が残留していない本来の特性の評価を行ったことに加え、これまで試みられていない、極薄膜領域での膜厚依存性の解明を行った。この評価には、電界変調型分光エリプソメトリを用いた評価を採用した。またこの研究をウルツ鉱構造強誘電体にも拡張した。

ドイツや米国の研究グループとの国際連携を通して、材料開発や物性評価によって得られた第四世代材料特性に関する最新情報を随時取り込みながら、脳型コンピューティングの動作モデルの構築およびデバイスの設計を進めた。

<得られた成果>

- ・ ウルツ鉱構造を有する(Al,Sc)N は、デバイス作成に不可欠な水素ガス含有条件で、従来の材料より高い安定性を有することを解明した（プレスリリース）。
- ・ ウルツ鉱構造を有する強誘電体に関しては、(Ga,Sc)N は、製膜のプロセスの最適化によって、ZnO はドーパントの最適化によって、低い抗電界が達成できることを明らかにした。また、抗電界はドーパントの固溶量を増加させることで低減できることを解明した（プレスリリース）。
- ・ 基板から剥離させた蛍石構造強誘電体で、1nm の膜厚でも強誘電性が発現することを解明した（プレスリリース）。また、特性の膜厚依存性を電気特性のみならず、電気光学効果でも解明した。
- ・ 強誘電体の電界効果トランジスタを用いた脳型コンピュータデバイスでは、強誘電体の薄膜に抗電圧程度の電圧の印加で、高い学習能力がえられることを明らかにした。加えて、センサに脳型コンピューティングの機能を付与する検討を行った結果、既存の手法では評価できないシグナルがセンシングできることを明らかにした。

② 国際ネットワーク構築・拡大に関する成果

<実施したこと>

研究代表者や主たる共同研究者およびコーディネータが、ペンシルベニア州立大学、ペンシルベニア大学、カーネギメロン大学（米国）および Namlab（ドイツ）の主たる研究者らとミーティングを行い、共同研究や連携プランを具体化した。またペンシルベニア州立大学および Namlab へ学生や若手研究者を派遣し、研究および生活基盤を確立し、共同研究を推進した。

本課題における ASPIRE の内容を相手国の若手研究者（米国およびドイツ）に理解してもらうセミナーを現地で開催した。さらに、日本においても国内外の第一線研究者を招へいたワークショップ、および学生・若手研究者に向けたスクール（6/11：京都大学化学研究所、11/14：東京科学大学）を開催した。今後の海外渡航予定者に対して、博士課程への進学や海外での研究意義などについて理解の共有を図った。

<得られた成果>

- ・ 年間を通じて国際ネットワーク構築のためのセミナーを積極的に実施したことにより、新たに ASPIRE プロジェクトへの参加を希望する学生や若手研究者が出てきており、海外での活躍へ意識を向上させることに成功した。

- ・ 東京科学大学で開催したセミナーへの、ペンシルベニア州立大学の学生の参加が実現したことに加え、参加したペンシルベニア州立大学の学生が日本への渡航を希望するなど、国際頭脳循環の促進にも大きく貢献出来た。

③ 国際頭脳循環の促進に資する若手研究者の人材育成に関する成果

<実施したこと>

- ・ ドイツ側 (Namlab) から Ruben Alcala 氏を招き日本チームとドイツチーム双方の研究内容を報告するセミナーを実施した。
- ・ 米国側 (ペンシルベニア州立大学、ペンシルベニア大学) から学生を招き、日本側学生とのグループディスカッションを含む 1 日のセミナー (全て英語) を実施した。
- ・ ペンシルベニア州立大学から 2025 年度に東京科学大学へ長期招へい予定の学生 (Kae Nakamura) を 1 月に短期招へいし、今後研究で活用する予定の SPring8 (大型放射光施設) で予備実験を実施した。
- ・ 渡航を目指す学生を対象に海外留学経験者による英語 Tips セミナーを開催した。
- ・ 相手国側代表研究者と共同編集者となる出版物 (2025) 下記 2 冊の発行準備を行った。

① Special Section in MRS Bulletin (2025)

Editor: S. Trolier-McKinstry (US side PI) & T. Yamada (主たる共同研究者)

② Ferroelectricity in Doped Hafnium Oxide, Book (2nd Edition)

Editor: Uwe Schroeder (DE side PI) & H. Funakubo (日本側研究代表者)

<得られた成果>

- ・ 渡航先となるペンシルベニア州立大学および Namlab の研究者と対面で会って話を聞くことで、日本の若手研究者および学生の国際意識を高めることが出来た。博士進学する学生もでており、今後海外派遣を行う予定である。ペンシルベニア州立大学から学生を招へいすることで、日本の研究機関の魅力を知ってもらい、今後の新たな招へいに繋げることが期待できる。
- ・ ASPIRE プロジェクトの研究代表者および主たる共同研究者による最新の強誘電体材料の知識をまとめた出版物は、若手研究者へ有益な情報を提供することができ、研究者としての人材育成に効果があると考えられる。

2. 研究実施体制

研究テーマ	中心となる研究者氏名	所属機関・部署・役職名
研究テーマ1 第四世代強誘電体薄膜材料の開発	舟窪 浩 神野 伊策	東京科学大学・物質理工学院材料系・教授 神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究テーマ2 第四世代強誘電体のメカニズム解明	山田 智明 菅 大介	名古屋大学・大学院工学研究科・教授 京都大学・化学研究所・准教授
研究テーマ3 第四世代強誘電体を活用した不揮発性メモリ開発および脳型コンピューティング実証	吉村 武	大阪公立大学・工学研究科・准教授

3. 代表的な業績（原著論文、プレスリリース、表彰など）

<原著論文>

- [1] Sotaro Kageyama, Kazuki Okamoto, Shinnosuke Yasuoka, Keisuke Ide, Kota Hanzawa, Yoshiomi Hiranaga, Pochun Hsieh, Sankalpa Harza, Albert Suceava, Akash Saha, Hiroko Yokota, Kei Shigematsu, Masaki Azuma, Venkatraman Gopalan, Hiroshi Uchida, Hidenori Hiramatsu, and Hiroshi Funakubo, "Realization of Non-Equilibrium Wurtzite Structure in Heterovalent Ternary MgSiN₂ Film Grown by ReactiveSputtering", Adv. Electron. Mater., 2400880-1-8 (2025). (プレスリリース)
- [2] Yufan Shen, Kousuke Ooe, Xueyou Yuan, Tomoaki Yamada, Shunsuke Kobayashi, Mitsutaka Haruta, Daisuke Kan and Yuichi Shimakawa "Ferroelectric freestanding hafnia membranes with metastable rhombohedral structure down to 1-nm-thick" Nature Commun., **15**, 4789/1-9 (2024). (プレスリリース : <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2024-06-26-0>)
- [3] Nana Sun, Kazuki Okamoto, Shinnosuke Yasuoka, Soshun Doko, Naoko Matsui, Toshikazu Irisawa, Koji Tsunekawa, Takayoshi Katase, Tomoyuki Koganezawa, Tomotaka Nakatani, Rosantha Kumara, Osami Sakata, and Hiroshi Funakubo, "High stability of the ferroelectricity against hydrogen gas in (Al,Sc)N thin films", Appl. Phys. Lett., **125**, 032904(2024). (表紙に採用、注目論文に選ばれる、プレスリリース : <https://www.titech.ac.jp/news/2024/069655>)
- [4] Masato Uehara, Kenji Hirata, Yoshiko Nakamura, Sri Ayu Anggraini, Kazuki Okamoto, Hiroshi Yamada, Hiroshi Funakubo, Morito Akiyama, "Excellent piezoelectric and ferroelectric properties of Sc_xGa_{1-x}N alloy with high Sc concentration", APL Mater., **12**, 121102(2024). (プレスリリース : <https://www.isct.ac.jp/ja/news/j872vdajv468>)
- [5] Shinya Kondo, Kazuki Okamoto, sami Sakata, Takashi Teranishi, Akira Kishimoto, Takanori Nagasaki and Tomoaki. Yamada, "Dynamic Domain Motion Enhancing Electro-optic Performance in Ferroelectric Films" Appl. Phys. Lett., **126**, 012901-1-7 (2025) (AIP のショーケース Kudos に選出)

<表彰>

- [1] 第 56 回（2024 年春季）応用物理学会講演奨励賞 受賞日：2024/9/8 受賞者：Yufan Shen
- [2] 第 43 回電子材料シンポジウム(EMS43)EMS 賞 受賞日：2024/10/4 受賞者：請関 優
- [3] 応用物理学会関西支部 2024 年度第 2 回講演会 ポスター賞（最優秀賞）受賞日：2024/11/6 受賞者：西村 恵
- [4] 第 41 回強誘電体会議（FMA41）学生優秀発表賞 受賞日：2024/11/11 受賞者：西村恵
- [5] Electroceramic Bridge Building Award 受賞日：2024/11/12 受賞者：舟窪 浩、Jon-Paul Maria (The Pennsylvania State Univ.)、Elizabeth Dickey (Carnegie Mellon Univ.)