

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能
を有する材料・デバイスの創出」
研究課題「トポロジカル集積光デバイスの創成」

研究終了報告書

研究期間 2019年10月～2025年03月

研究代表者: 岩本 敏
(東京大学 先端科学技術研究センター 教授)

§1 研究実施の概要

(1)実施概要

本 CREST 課題では、集積フォトニクス技術とトポロジ概念を融合し、光のトポロジカルな性質を活かした新奇集積光デバイスの実現、集積フォトニクス技術によるトポロジカル光状態の実現とその応用可能性の探究を目指し、岩本、小林、高橋の3グループで研究活動に取り組んだ。岩本 G および高橋 G には専門の異なる別機関研究者も複数名参加し、グループ間連携だけでなくグループ内連携も活かし研究を推進した。さらに領域内外との連携も積極的に進めてきた。その結果、当初想定していなかった成果も含めて、多くの研究成果を得ることができた。

以下では、本 CREST で得られた主要な成果を挙げる。

a) 半導体トポロジカルスローライト導波路および関連素子の実現

バレーフォトニック結晶を用いて半導体のみで実現できるトポロジカルスローライト導波路を提案し、非トポロジカル状態によるスローライトと比べて曲げ損失が大きく抑制されることを実証した。また同構造を活用したレーザや単一光子源などの関連素子も実現した。

b) 誘電率制御効果による磁気光学効果の増強(グループ間連携)

通信波長帯に ENZ (epsilon-near-zero) 波長を有する高品質 ITO(酸化インジウム錫)膜を実現し、連続媒質における ENZ (epsilon-near-zero) 効果による磁気光学効果の増強を初めて実現した。これは小林 G による成膜・評価、岩本 G による解析・光学設計の密な連携により得られたものである。

c) 低損失 Co フェライトナノグラニュー膜の開発(想定外の成果)

低損失で大きなファラデー回転角($\sim 1 \text{deg./}\mu\text{m}@1550\text{nm}$)を示す NG 膜を得ることに成功した。この NG 膜は、保磁力を有し残留磁化によるファラデー回転角(約 $0.8 \text{deg./}\mu\text{m}$ 、Bi:YIG の 8 倍程度)を示す。成膜も容易であり、今後様々な応用の可能性があると期待される。

d) オンチップ人工次元フォトニクスでトポロジカル模型を実装(グループ内連携)(最終目標達成)

集積フォトニクス技術を用いたオンチップ人工次元系において、トポロジカル格子模型の一つである量子ホールラダー模型を実装することに初めて成功した。高速光変調技術を有する横浜国大・馬場、トポロジカル物性理論を専門とする東北大・小澤との連携により得られた成果である。

e) マイクロ波及び光領域でのヒンジ状態の観測(グループ内連携)(最終目標達成)

高次トポロジカル状態の一つであるヒンジ状態を電磁波(マイクロ波および光)領域で初めて観測することに成功した。さらに、ウッドパイル型3次元フォトニック結晶構造で実現できるヒンジ状態がもつコーナー選択性を発見した。これらの成果は、高橋と岩本の密な議論に加えて、グループ内の理論研究者との強力な理論的サポートによるものである。また、マイクロ波帯の実験では、工繊大・上田の持つマイクロ波計測技術が活かされている。

f) 集積フォトニクスによる光スキルミオンビームの実現(最終目標達成)

集積フォトニクス技術の一つであるリング共振器を用いた同ビームの生成手法を提案・実証した。また、スキルミオンレーザ構造を提案、実証し、スキルミオン状態偏光分布の観測に成功した。

g) スキルミオン結晶ビーム生成法の提案・実証に成功(想定外の成果、チーム間連携)

シリコンフォトニクス技術を活用したスキルミオン結晶ビームの生成手法を提案した。さらに、実際にデバイスを試作し、世界で初めてスキルミオン結晶ビームの実現、スキルミオン数の動的制御に成功した。実証部分は一期生・胡チーム雨宮先生との連携による成果である。

h) 時空間光ホブフィオン結晶の提案(想定外の成果、国際連携)

異なる波長の2つのスキルミオン状態ビームを用いることで、ビーム断面と伝搬方向からなる3次元空間に偏光ホブフィオン構造を形成できることを見出した。さらに、光ホブフィオン結晶も実現できることを数値的に示した。ホブフィオン数の解析は南洋理工大学グループとの連携による。

具体的な研究活動のほか、トポロジ領域の CREST 研究の代表者、さがけ研究者や領域外の関連研究者を招いてのセミナー(第3期・山本チームと合同主催、全 13 回)の開催、webinar 講師、レビュー論文や書籍(2025 年出版予定)の出版、関連国際会議の主催など、国内外研究者ネットワークやコミュニティ形成に向けた活動にも積極的に取り組んだ。

(2)顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 集積フォトニクスによる光スキルミオンビームの実現

概要: 偏光状態がスキルミオン状分布を示す光スキルミオンビームは、トポロジカルな光ビームの一つとして注目を集めつつある。本研究では、集積フォトニクス技術の一つであるリング共振器を用いた同ビームの生成手法を提案・実証するとともに、スキルミオンレーザの実現にも成功した。さらに、スキルミオン結晶ビームの実現やホプフィオンビーム生成法の提案など、当初想定していなかった進展も得られた。関連文献: Phys. Rev. Research 3, 023055 (2021), Optica 11, 1588 (2024), arXiv:2406.06096 (2024).

2. 3次元フォトニック結晶における高次トポロジカル状態の観測

概要: 完全フォトニックバンドギャップを有する3次元フォトニック結晶を設計・作製し、マイクロ波のヒンジ状態の観測に初めて成功した。さらに、独自の光学顕微鏡下マイクロマニピュレーションを用いて作製した試料において、光領域でもその存在を示唆する結果が得られた。これらの成果は3次元トポロジカル集積フォトニクスへの展開の基礎となると期待できる。関連文献: Phys. Rev. B 109, 125304 (2024).

3. シリコンフォトニクスにおける人工次元量子ホールラダー模型の実装に成功

概要: 2つのシリコンリング共振器が結合した系において、各共振器を共振器モード間隔に対応する周波数で異なる位相で変調することで、量子ホールラダー模型を実装した。共振器間の結合強度、変調信号の位相差を変えながら測定したバンド構造は量子ホールラダー模型から予測される結果と良い一致を示した。量子ホールラダー模型は量子ホール模型の基本単位となるものであり、本成果はオンチップ人工次元フォトニクスにおけるトポロジカル現象の探索の端緒となるものである。関連文献: CLEO-PR, Fr2F-2 (2024)

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 半導体トポロジカルスローライト導波路の実現

概要: スローライト導波路は光遅延線や光バッファなど将来の光集積回路素子として期待されているが、曲げ損失が極めて大きく集積化に向けた課題であった。本研究ではバレーフォトニック結晶を用いて半導体のみで実現できるトポロジカルスローライト導波路を提案し、非トポロジカル状態によるスローライトと比べて曲げ損失が大きく抑制されることを実証した。提案構造は他の研究者にも既に利用されているほか、分散補償素子や非線形光学素子への展開を目指した研究へも発展している。また、広いモード断面積を有するスローライト導波路という当初想定していなかった新たな展開にもつながった。関連文献: Opt. Lett. 45, 2648 (2020), Opt. Express 29, 13441 (2021), Opt. Matter. Express 14, 1756 (2024)

2. 低損失 Co フェライトナノグラニュー膜の開発

概要: 低損失で大きな磁気光学効果を示す薄膜材料は、トポロジカルフォトニクスに限らず多方面での応用が期待される。本研究では、低損失で大きなファラデー回転角 ($\sim 1 \text{deg./}\mu\text{m}@1550\text{nm}$)を示す NG 膜を得ることに成功した。この NG 膜は、保磁力を有し残留磁化によるファラデー回転角 (約 $0.8 \text{deg./}\mu\text{m}$ 、Bi:YIG の 8 倍程度)を示す。これは、産業応用上有益な性質である。成膜も容易であり、今後様々な応用の可能性があると期待される。関連文献: 特許第 7411596 号(2023)

3. 光学顕微鏡観察下でのマイクロマニピュレーション法の開発

概要: サブミクロンの周期構造を有する半導体薄膜を 50 nm 以下の高い精度で積層し3次元フォトニック結晶を作製する手法として、電子線顕微鏡観察下でのマイクロマニピュレーション法が実施されてきた。本研究では、新たに光学顕微鏡観察下でのマイクロマニピュレーション法を開発し、高精度技術の汎用化・低コスト化に成功した。関連文献: Appl. Phys. Express 15 015001 (2021).

<代表的な論文>

1. "Synthetic dimension band structures on a Si CMOS photonic platform", Sci. Adv. 8, eabk0468 (2022). (IF = 11.7)

概要: 周波数次元などの非空間的次元(人工次元)を活用することで、磁気光学効果を用いない光アイソレータの実現や高次元で発現する新奇物理現象の探索が可能となる。しかし、これまでの研究は光ファイバを用いた原理実証実験がほとんどであった。本研究では、集積光回路の標準プラットフォームであるシリコンフォトニクスを用いて、人工次元空間における光のバンド構造とその変調効果の観測に初めて成功した。本成果は人工次元フォトニクスの集積フォトニクスへの応用可能性の第一歩となるものである(プレスリリースも実施)。

2. "Enhanced magneto-optical effects in epsilon-near-zero indium tin oxide at telecommunication wavelengths", Adv. Opt. Mater., 12, 2301320 (2024). (IF = 8.0)

概要: 光通信波長帯で利用可能な既存の磁気光学材料ではその効果が小さく、カイラルエッジ状態を利用した光導波路の実現は困難であることから、より大きい磁気光学効果を示す材料が求められている。本研究では、赤外通信波長帯において誘電率の実部がゼロに近づくENZ(epsilon-near-zero)特性を示す導電性酸化物のITO(Indium Tin Oxide)において、ENZ/EN-One 波長近傍におけるFaraday/Kerr回転角の増強を実験および理論的に検証した。本成果は磁気光学材料におけるENZ効果の有用性を示すものである(プレスリリースも実施)。

3. "On-chip optical skyrmionic beam generators," Optica 11, 1588 (2024). (IF = 8.8)

概要: 光スキルミオンビームはバルク光学系を用いて生成されてきた。本課題では、集積フォトニクス技術の一つであるリング共振器を用いて同ビームを生成する手法を提案した。本研究は、実際に素子を作製し、世界で初めて光スキルミオンビームのオンチップ発生に成功したものである。さらに、構造によるスキルミオン数の制御にも成功している。これらの成果は、本課題で提案した方式の有効性を実証した成果である(プレスリリースも実施)。

§2 研究実施体制

(1)研究チームの体制について

① 岩本グループ

研究代表者: 岩本 敏 (東京大学 先端科学技術研究センター 教授)

研究項目

- ・トポロジカルスローライトデバイスの作製と評価(研究計画書項目 1-1)
- ・ENZ 材料を用いた磁気光学効果増強の検討(研究計画書項目 2-2)
- ・一方向性トポロジカル導波路デバイスの作製と評価(研究計画書項目 2-3)
- ・人工次元エッジ状態の実現とその活用(研究計画書項目 3-1)
- ・スキルミオン光源の作製プロセス開発と原理実証(研究計画書項目 4-1)
- ・スキルミオンレーザの開発(研究計画書項目 4-2)

② 小林グループ

主たる共同研究者: 小林 伸聖

((公財) 電磁材料研究所 研究開発事業部新機能材料創生部門 部門長)

研究項目

- ・新規磁性コンポジット材料の開発(研究計画書項目 2-1)
- ・一方向性トポロジカル導波路デバイスの作製と評価(研究計画書項目 2-3)

③ 高橋グループ

主たる共同研究者: 高橋 駿 (京都工芸繊維大学 電気電子工学系 准教授)

研究項目

- ・3次元トポロジカルフォトニック結晶技術基盤の構築と高次トポロジカル状態の実現(研究計画書項目 3-2)

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

○領域内連携

- ・ 合同セミナーの開催： 三期生山本チームと合同で、CREST 研究の代表者、さがけ研究者や領域外の研究者を招き定期的に開催。
開催実績 計13 回（オンライン7回、ハイブリッド形式 6 回）
＊ハイブリッド形式では、学生・若手研究者のポスター発表も実施(一回を除き)
- ・ 領域内共同研究の実施
 - a) 一期生胡チーム雨宮グループとの共同研究から、スキルミオン結晶ビームの生成、バレーフォトリック結晶で現れる偏光のハーフスキルミオン構造の観測という、当初想定していなかった成果が生まれた。
 - b) 三期生江澤先生のセミナーを企画したことをきっかけに共同研究を開始し、共著論文3編につながった。
 - c) 三期生山本先生との共同研究では理論的部分で貢献。
 - d) その他、進行中の共同研究もある

○領域外研究者との連携

- ・ 国内連携
東京大学、京都大学の研究者と連携を進めた。特にその一部は、本提案の核の一つであるスキルミオンレーザの実現に大いに貢献した。
- ・ 海外連携
シンガポール・南洋理工大学やオーストラリア・ロイヤルメルボルン工科大学との共同研究を開始し進展した。その成果は学術論文2編(1編は査読中)につながった。
- ・ 企業など
本 CREST の成果活用の視点での意見交換を複数社と実施し、一部とは議論を継続している。

○国内外のコミュニティ形成への貢献

- ・ トポロジカルフォトリックスに関する4編のレビュー論文を発表(うち2編は in press)。
- ・ Topological nanophotonics に関する webinar や国際会議での Tutorial を担当した他、トポロジカルフォトリックスの書籍(2025 年8月出版予定)の執筆にも貢献するなど、海外研究者への情報発信、当該分野における日本のプレゼンス向上に貢献した。
- ・ 国内学会からの依頼による総合解説、解説記事を執筆するなど、国内コミュニティへの発信も行ってきた。
- ・ フォトリック結晶の国際会議である PECS を委員長として東京で開催した。トポロジカルフォトリックスの関係研究者も多く参加者し、貴重な意見交換・交流の場を提供した。