

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型  
年次報告書

令和2年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名:中辻 知]

[東京大学 トランススケール量子科学国際連携研究機構・機構長]

[研究開発課題名:スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成]

実施期間 : 令和5年4月1日～令和6年3月31日

## §1. 研究開発実施体制

### (1)「スピントロニクス」グループ(東京大学)

- ① 研究開発代表者:中辻 知 (東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構、機構長)
- ② 研究項目
  - ・トポロジカル反強磁性体を中心とした材料開発と物性評価
  - ・磁性体のダイナミクス制御手法の開発

### (2)「スピントロニクス」グループ(産業技術総合研究所)

- ① 主たる共同研究者:薬師寺啓 (産業技術総合研究所新原理コンピューティング研究センター、研究チーム付)
- ② 研究項目
  - ・磁性体積層薄膜の開発

### (3)「スピントロニクス」グループ(理化学研究所)

- ① 主たる共同研究者:近藤浩太 (理化学研究所創発物性科学研究センター、上級研究員)
- ② 研究項目
  - ・トポロジカル反強磁性体のダイナミクス評価

### (4)「光電変換」グループ(東京大学)

- ① 主たる共同研究者:竹中 充 (東京大学大学院工学系研究科、教授)
- ② 研究項目
  - ・光電変換素子構造の理論検討
  - ・素子作製に向けたプロセス検討

### (5)「光電変換」グループ(産業技術総合研究所)

- ① 主たる共同研究者:岡野 誠 (産業技術総合研究所プラットフォームフォトンクス研究センター、研究チーム長)
- ② 研究項目
  - ・光電変換素子の研究

### (6)「磁気光学」グループ(東京大学)

- ① 主たる共同研究者:島野 亮 (東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構、教授)
- ② 研究項目
  - ・磁性体の高速ダイナミクス評価技術の開発

(7)「磁気光学」グループ(日本大学)

① 主たる共同研究者:塚本 新 (日本大学工学部、教授)

② 研究項目

- ・磁性体の高速ダイナミクス制御
- ・磁性体の高速ダイナミクス評価技術の開発

(8)「理論」グループ(東北大学)

① 主たる共同研究者:是常 隆 (東北大学理学研究科、教授)

② 研究項目

- ・磁性体データベースの構築と新材料探索

(9)「理論」グループ(東京大学)

① 主たる共同研究者:有田亮太郎 (東京大学先端科学技術研究センター、教授)

② 研究項目

- ・磁気ダイナミクスシミュレーションと新材料開発

## § 2. 研究開発成果の概要

スピントロニクス光電インターフェースの要素技術開発へ向け、以下を推進した。

- ・分子線エピタキシー法によるトポロジカル反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の(01-10)面配向のエピタキシャル薄膜作製を進めた。 $\text{MgO}$  基板上的  $\text{W}$  シード層と  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  層の成膜条件を最適化し、数  $10\mu\text{m}$  級の磁区成長が可能な  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  薄膜を効率的に作製した。また書込とシフトプロセスでの低電力化へ向け膜厚の低減を進め、 $30\text{ nm}$  の薄膜厚を  $20\text{ nm}$  まで低減しても磁気光学カー効果や異常ホール効果等のトポロジカル応答維持を確認した。
- ・III-V 族半導体との金属合金によるプラズモン受光器の作製プロセスを提唱し、 $\text{Au}$  や  $\text{Ni}$  等の合金特性を評価し、プラズモン導波路として応用可能であることを示した。シリコン光導波路上に III-V 族半導体薄膜を接合した構造によるプラズモン受光器を集積する素子を新たに提唱した。III-V 族半導体として  $\text{InGaAs}$  薄膜による  $\text{Au}$  を用いたプラズモン導波路構造では、テーパ構造を工夫し  $60\%$  近い光吸収が得られることを数値計算で示した。更に、 $\text{InP}$  薄膜をシリコン光導波路上に貼合わせた受光器の試作も進めた。 $\text{InP}$  薄膜中の結晶欠陥を活用し、波長  $1550\text{ nm}$  でも  $1\text{ A/W}$  を越える高受光感度の実現に成功した。試作した  $\text{Ge}$  受光器の評価も進め、光電流の飽和抑制のため入力光を分散させた受光器構造の動作帯域の評価とパルス応答特性も検証した。
- ・材料開発チームの作製した磁性体材料に対し、高速制御技術及び高速ダイナミクス評価技術を開発した。特に光によるフェリ磁性体の制御の高速シフト動作(繰返し  $100\text{MHz}$ )でのエラーレート評価を行った。高い時空間分解能を有すシングルショット磁気光学顕微イメージング装置を開発し、 $1\text{ ns}$  領域でのトポロジカル反強磁性体の電流パルス駆動磁化反転ダイナミクスの挙動を明らかにした。
- ・磁性体材料探索として準安定状態を含む磁気秩序状態の探索を進め、強磁性体と同性質を示す反強磁性体の予測を行った。反強磁性体での磁気トンネル接合では、格子整合性等の考察から有力な絶縁体候補を複数提案した。
- ・マネジメントでは、企業誘致のアウトリーチ活動を 5~11 月に研究会を開催、また自己資金導入企業との連携強化や参画企業との特許出願活動を支援した。

### 【代表的な原著論文情報】

「交換バイアスを用いた反強磁性体の磁気状態の制御」

“**Observation of Omnidirectional Exchange Bias at All-Antiferromagnetic Polycrystalline Heterointerface**”, M. Asakura, T. Higo, T. Matsuo, R. Uesugi, D. Nishio-Hamane, and S. Nakatsuji, *Advanced Materials*, 2400301 (2024).

本研究では、(i) $\text{Mn}_3\text{Sn}$  と異種の磁性体との界面に交換バイアスが現れること、(ii)  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の磁気状態が交換バイアスによって制御可能であることを明らかにした。交換バイアスは、磁気トンネル接合(MTJ)素子内の特定の強磁性層の磁気状態を安定化させる手段として、従来の MRAM においてもデータの読み書き時のエラー率の低減や熱安定性の向上のために使われている。反強磁性メモリ材料として有望視されている  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の磁気状態を交換バイアスによって安定化できることを示した本成果は、本プロジェクトにおける読み出しプロセスにおける信頼性向上のほか、超高速・超省電力なメモリ実現の上で、中心的な役割を果たす技術になることが期待される。

#### 「InP 薄膜を使ったハイブリッド受光器の実証」

**“Transparent in-line optical power monitor integrated with MOS optical phase shifter using InP/Si hybrid integration,”** T. Akazawa, K. Sumita, S. Monfray, F. Boeuf, K. Toprasertpong, S. Takagi, M. Takenaka, European Conference on Optical Communication (ECOC2023), We.D.4.5, Glasgow, UK, 1–5 October 2023.

本研究では、InP 薄膜を Si 導波路上に貼り合わせた受光器を提案し、実際に作製した素子において動作を実証した。InP 薄膜中の結晶欠陥に起因する光吸収を用いることで、本来透明である動作波長帯において感度をもつ受光器の動作を得ることに成功した。同じ InP 薄膜を用いたハイブリッド光位相変調器との一体集積にも初めて成功したことで、光インターコネク用光集積回路の発展に貢献することが期待できる。ECOC は光通信系トップ会議の一つで、この論文は Top-Scored Paper に選出され、第一著者の学生は Best Student Paper Award を受賞した。学会全体で一人だけであり、日本人の受賞もこれが初めてである。

#### 「電流パルスによって駆動されるフェリ磁性体 GdFeCo/Pt おける磁壁移動の超高速ストロボスコープ時間分解光磁気イメージング」

**“Ultrafast stroboscopic time-resolved magneto-optical imaging of domain wall motion in Pt/GdFeCo wires induced by a current pulse”**, Kazuma Ogawa, Naotaka Yoshikawa, Mio Ishibashi, Kay Yakushiji, Arata Tsukamoto, Masamitsu Hayashi, and Ryo Shimano, Phys. Rev. Research 5, 033151 – Published 1 September 2023

磁壁 (DW) の高速かつ正確な電流駆動操作は、高性能スピントロニクスデバイスの実現に不可欠である。本研究では、フェリ磁性体 GdFeCo/Pt を対象として、時間分解磁気光学イメージングにより電流誘起磁壁移動 (CIDWM) の様子を時間分解して観察することに成功した。その結果、電流パルス中に DW の速度が時間変化する様子も明らかにした。さらにその機構として、電流パルスにより生じるジュール加熱により試料の温度が角運動量補償温度に近づき、DW の速度が増加することに大きく起因していることを明らかにした。本開発手法は、多様な外力によって駆動される空間的かつ確率的な磁化ダイナミクスの観測を可能にするものであり、幅広い電流駆動現象への応用が期待される。