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6年4月1日～令和7年3月31日

§1. 研究開発実施体制

※2024年4月1日時点

(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センター、研究チーム長)
- 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 (日本大学理工学部、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)「回路」グループ(東京大学)

① 主たる共同研究者:飯塚 哲也 (東京大学大学院工学系研究科、准教授)

② 研究項目

- ・素子モデル作成
- ・要素回路の仕様策定と設計

(9)「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

(10)「理論」グループ(東京大学)

① 主たる共同研究者:有田 亮太郎 (東京大学大学院工学系研究科、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

(11)「理論」グループ(埼玉大学)

① 主たる共同研究者:藤本 純治 (埼玉大学大学院理工学研究科、助教)

② 研究項目

- ・反強磁性磁気構造制御のシミュレーション

§2. 研究開発成果の概要

・トポロジカル反強磁性体は強磁性体に比べて数桁早い高速駆動が期待されているがデバイスにおける実証はこれまで報告がなかった。今年度、我々は Mn_3Sn を 10 nm 以下まで薄くした超薄膜 Mn_3Sn に基づくデバイスを作製し、磁気応答が極めて高速であることを確かめた。具体的には $\text{W}/\text{Mn}_3\text{Sn}$ 二層膜に 30 GHz 超のマイクロ波電流を印加し、スピントルクダイオード効果を確認することで Mn_3Sn がピコ秒級のパルスに応答し得ることを示し、反強磁性体におけるスピントルクダイオード効果を世界で初めて実現した。さらには、トポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn および Mn_3Ge 単結晶細線中の磁壁をナノ秒級のパルス電流によって室温で高速駆動できることを世界に先駆けて実証した。強磁性体で同様の機構で駆動した場合と比較すると、約 2 桁高い移動度を有することを確認した。次に、スピンスフトレジスタの実証実験として、フェリ磁性体 $\text{Gd}\cdot\text{Fe}\cdot\text{Co}$ からなる細線を用いたレーストラックメモリを作製し、ナノ秒程度の電流パルスを使ってビット位置を制御する操作を繰り返し、ビット位置のばらつきからビットエラー率を求めた。特に、ビット位置操作に用いる電流パルスが十分に大きい時に、連続する操作のビットエラー率に相関がないことを明らかにした。これらにより、スピンスフトレジスタによるメモリ動作の重要な性能指標であるデジタル情報のビット操作のエラー率を決定する手法を確立した。

・2023 年度に提唱した Au や Ni と InGaAs との合金を使ったプラズモン導波路構造を用いることで、0.1–0.4 A/W 程度の感度が期待されることを数値計算により明らかにした。計算した素子構造を参考に、実際に InGaAs 薄膜を Si 導波路上に貼り合わせた受光器の作製をすすめた。 InGaAs 薄膜をパターンニング後、Ni 電極を堆積し、加熱処理により合金層を形成することで導波路型プラズモン受光器の作製に成功した。波長 1550 nm 近辺において、0.13 A/W の感度が得られ、 InGaAs 薄膜を使った導波路型プラズモン受光器の動作に世界で初めて成功した。動作帯域も 35 GHz 以上あることがわかり、32 Gbps の変調信号に対しても良好なアイパターンを得ることに成功した。試作した Ge 受光器においては、提案した側面入射構造において、受光部の幅を 50 μm まで広げることで、20 mA 以上の出力電流を得ることに成功した。10 GHz 以上の動作帯域も得られることがわかり、本研究プロジェクトで提案した構造の有用性を確認した。

・時間分解磁気光学イメージング技術を改善し、電流パルス駆動による Mn_3Sn 薄膜の多極子反転ダイナミクスを可視化することに成功した。

・回路 G とスピン G の連携により試作された MTJ デバイスの高周波特性の実測評価環境を構築し、その実測特性と整合するデバイスモデルと等価回路を構築した。また、PSR デバイスによる読み出し回路の動作シミュレーション環境を構築し、16 ビット PSR の Ping-Pong 動作による読み出しシステムの動作検証を行った。構築したデバイスモデルを使用することで、1.6 Gbps までの動作が実現できることを本検証環境により実証した。さらに、PSR デバイス構造に起因するシフト電流パスにおける寄生抵抗成分を考慮し、各読み出し端子における電圧変動を数値計算およびシミュレーションにより確認した。想定される電圧変動を考慮し、その読み出しに適した、入力同相電圧変動に対する性能変動の小さい新規な比較器回路を提案し、当初計画を前倒して設計評価を行った。提案回路方式により読み出し速度の同相電圧依存性を低減しながら、従来手法よりも高い電力効率で比較動作が可能であることを示し、特許出願を完了した。

・理論 G においては、実際の系を念頭においた Mn_3Sn の磁化反転や磁壁駆動のシミュレーション手法を検証した。さらに、その手法に基づいて定量的なシミュレーションを進めた。また、反強磁性体における磁気トンネル接合に関しては、実際の接合を念頭において第一原理計算を行うことにより、反強磁性体でも強磁性体と同等の有限の TMR 比が得られることを明らかにした。

・マネジメントに関しては、参画企業への広報活動として 5 月と 12 月に説明会を開催、また参画企業との連携強化を実施した。

【代表的な原著論文情報】

「薄膜トポロジカル反強磁性体における高速応答の実証」

“**Antiferromagnetic spin-torque diode effect in a kagome Weyl semimetal**”, S. Sakamoto, T. Nomoto, T. Higo, Y. Hibino, T. Yamamoto, S. Tamaru, Y. Kotani, H. Kosaki, M. Shiga, D. Nishio-Hamane, T. Nakamura, T. Nozaki, K. Yakushiji, R. Arita, S. Nakatsuji, S. Miwa, *Nature Nanotechnology* **20**, 216-221 (2025).

本研究ではトポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn を 10 nm 以下の極限まで薄くすることで、電流に対する Mn_3Sn の磁気応答が熱ではなくスピントルクと直接相互作用し、高速に応答し得ることを示した。 Mn_3Sn 二層膜に 30 GHz 超のマイクロ波電流を印加し、スピントルクダイオード効果を確認することで Mn_3Sn がピコ秒級のパルスに応答し得ることを示した。反強磁性体において、スピントルクダイオード効果を初めて実現し、今後の高速駆動デバイスの開発に道を拓いた。

「反強磁性磁壁の室温での高速電流駆動の実証」

“**Current-driven fast magnetic octupole domain-wall motion in noncollinear antiferromagnets**”, M. Wu, T. Chen, T. Nomoto, Y. Tserkovnyak, H. Isshiki, Y. Nakatani, T. Higo, T. Tomita, K. Kondou, R. Arita, S. Nakatsuji, Y. Otani, *Nature Communications* **15**, 4305 (2024).

本研究では、トポロジカル反強磁性体である Mn_3Sn および Mn_3Ge 単結晶中の磁壁をナノ秒級のパルス電流によって室温で高速駆動できることを実証した。具体的には Mn_3Sn および Mn_3Ge 単結晶で細線を作製し、磁壁が、電流と磁化の相互作用によるスピントルクによって駆動することを確認した。さらに、強磁性体と同様の機構で駆動した場合と比較すると、約 2 桁高い移動度(単位電流密度当たりの移動速度)を有することを確認した。さらに、反強磁性体の結晶方位依存性を調べ、磁壁の高速駆動に適した磁壁構造を明らかにした。

「フェリ磁性レーストラックメモリにおける信頼性評価」

“**Decoding the magnetic bit positioning error in a ferrimagnetic racetrack**”, M. Ishibashi, M. Kawaguchi, Y. Hibino, K. Yakushiji, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi, *Science Advances* **10**, eadq0898 (2024).

本研究では、スピントレジスタによるメモリ動作の重要な性能指標であるデジタル情報のビット操作のエラー率を決定する手法を確立した。フェリ磁性体 Gd-Fe-Co からなる細線を用いたレーストラックメモリを作製し、ナノ秒程度の電流パルスを使ってビット位置を制御する操作を繰り返し、ビット位置のばらつきからビットエラー率を求めた。その結果、ビット位置操作に用いる電流パルスが十分に大きい時に、連続する操作のビットエラー

率に相関がないことが分かった。ストレージクラスの次世代磁気メモリとして実用化が期待されている「レーストラックメモリ」の研究開発において、デジタル情報の書き込み、読み取り操作を実証する報告は多数あるものの、メモリ動作の信頼性を調べるアプローチはこれまでに確立されておらず、これを初めて実証した。