

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4年4月1日～令和5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)「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、准教授)
- 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

§ 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、以下の研究開発を推進した：

・重金属/フェリ磁性体からなる2層膜構造において、スピンシフトレジスタのデモ素子を作製した。デモ素子では、情報の書き込みとシフトに電流パルスを用い、読み出しには磁気光学効果を利用した磁区観察を用いた。その結果、重金属/フェリ磁性体2層膜構造において、スピンシフトレジスタが機能することを確認した。さらに、デモ素子を用いて書き込み・シフト操作のエラー解析を行った。また読み出し用の磁気センサー(MTJ)をフェリ磁性体の上に積層し、トンネル磁気抵抗効果(TMR)を確認した。

・分子線エピタキシー法を用いて、トポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn の(01-10)面配向のエピタキシャル薄膜を作製した。MgO 基板上へのWとの積層構造によりカゴメ面内に引っ張り歪みを導入することで、カイラル反強磁性秩序を垂直 2 値状態にすることに成功した。また、カゴメ面に対して垂直にスピン偏極したスピン流を印加出来る構成で、この垂直 2 値状態を電氣的に制御できることを実証した。

・トポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn の薄膜合成の最適化を推進し、磁壁の電流駆動実証に必要な数 10 μ m 級の磁区成長の観測に成功した。さらに、磁壁の高速電流駆動に重要と考えられる結晶方位依存性を調査し、カゴメ面に沿った方向に優先的に磁区成長が起こることを確認した。

・シリコン光導波路上に III-V 族半導体薄膜を接合した受光器において、高い受光感度と低い寄生容量を両立可能な動作を実証することに成功した。また合金化プロセスを用いた自己整合プロセスでプラズモン受光器を作製する素子構造を新たに提唱し、InGaAs と Au などの合金特性を評価し、プラズモン導波路への応用可能性を明らかにした。単一走行キャリア受光器を用いて光電流によるスピンシフトレジスタの書き換え動作についてもスピントロニクスグループと共同で進めた。また、大電流動作が可能な集積用光電変換素子の設計・試作を進めた。

・材料開発チームの作成した磁性体材料に対して、磁性体の高速制御技術、及び高速ダイナミクス評価技術の開発を行った。特に光による磁性体の制御の高速化・低パワー化、素子動作評価系の構築を行った。高い時空間分解能を有する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た。

・磁性体材料の開発に向けて、計算の高速化などを通してデータベースの拡充を行い、物質探索を進めた。また、反強磁性体におけるトンネル磁気抵抗についてモデル計算を用いた解析を進め、その機構や簡易評価手法を議論した。この結果をもとに、実際の系での評価も進めている。

・設置したクリーンルームにおいて、プロセスフローの活用を通じて必要な情報をメンバー間で共有し効率的なデバイス開発を行った。なかでも、トポロジカル反強磁性体を用いたミクロンサイズの磁気トンネル接合の開発に成功し、反強磁性体のみ素子としては世界で初めて磁気抵抗効果の観測に成功した。実験値は1~2%と小さいが理論的には強磁性体と同程度の大きさになりえることを確認した。

・プロジェクトのマネジメントに関しては、企業開拓のための事業推進と特出願活動の支援を実施した。

【代表的な原著論文情報】

「反強磁性体における垂直 2 値状態の電流制御」

“Perpendicular full switching of chiral antiferromagnetic order by current”, T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, M. Shiga, S. Sakamoto, X. Chen, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, S. Miwa, S. Nakatsuji, *Nature* 607, 474 (2022).

本研究ではカイラル反強磁性体 Mn_3Sn からなる素子の膜の積層構造を設計し、 Mn_3Sn のカゴメ面に平行にエピタキシャル引っ張り歪みを導入することで、電流での情報の書き込み時に書き込み不良部位なく、高集積化・高速化に適した垂直 2 値状態を電氣的に記録・制御できることを実証した。本成果は、フォトニクスピンレジスタにおける高効率な情報の書き込み技術の構築に繋がった。また、すでに強磁性体からなる磁気抵抗メモリで利用されている垂直磁気記録が、反強磁性体において実現可能であることを示した初めての例であり、ピコ秒での情報記録が可能な磁気抵抗メモリ (MRAM) をはじめ、反強磁性体を用いた超高速電子デバイス開発に飛躍的な進展をもたらすことが期待できる。

「室温で駆動する新しい量子トンネル磁気抵抗効果の発見」

“Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction”, X. Chen, T. Higo, K. Tanaka, T. Nomoto, H. Tsai, H. Idzuchi, M. Shiga, S. Sakamoto, R. Ando, H. Kosaki, T. Matsuo, D. Nishio-Hamane, R. Arita, S. Miwa, and S. Nakatsuji, *Nature* 613, 490 (2023).

反強磁性体はスピンの応答速度が強磁性体の場合に比べて約 1000 倍速いピコ秒であり、不揮発性メモリの有力候補である磁気抵抗メモリ (MRAM) に応用することでメモリの超高速化・超低消費電力化・高集積化を可能にする。本研究では、反強磁性体デバイスにおける実践的な情報の読み出し手法の開発を目指し、トポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn を用いて Mn_3Sn 層/トンネルバリア層/ Mn_3Sn 層の磁気トンネル接合 (MTJ) 素子を作製し、世界で初めて反強磁性体においてトンネル磁気抵抗効果の観測に成功した。今回確認できた磁気抵抗効果の変化は 1~2%程度だが、理論計算から、この抵抗変化比は強磁性体の素子と同程度 (100%程度) まで増強可能であることも明らかになっており、本プロジェクトで目標とする超高速な光電変換を実現する上で有益な技術である。また、MRAM の基盤技術である MTJ 素子の開発は、従来のシリコン半導体に比してより高速で低消費電力な情報技術に繋がる可能性を秘めている。

「ピエゾ磁気効果を用いた反強磁性体への情報の書き込み技術の開発」

“Piezomagnetic switching of anomalous Hall effect in an antiferromagnet at room temperature”, M. Ikhlas, S. Dasgupta, F. Theuss, T. Higo, Shunichiro, Kittaka, B. J. Ramshaw, O. Tchernyshyov, C. W. Hicks, S. Nakatsuji, *Nature Physics* 18, 1086 (2022)

磁化をほとんど持たないにもかかわらず、室温で巨大な異常ホール効果を示す反強磁性体 Mn_3Sn における巨大なピエゾ磁気効果を室温で実現し、通常は磁場で制御される異常ホール効果の符号を結晶の歪みで制御することに初めて成功した。1880 年に異常ホール効果が発見されて以来の常識を破り、異

常ホール効果が磁化でなく、拡張磁気八極子に由来することを明らかにした。この知見により上記のエピタキシャル薄膜での垂直 2 値状態の発現とその制御が可能となった。