

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度
課題番号：20H05665
研究課題名：フェリ磁性スピントロニクス of 学理構築とデバイス展開

研究代表者氏名（ローマ字）：小野 輝男（ONO Teruo）
所属研究機関・部局・職：京都大学・化学研究所・教授
研究者番号：90296749

研究の概要：

フェリ磁性体は、2種類の磁気モーメントが反平行に結合しながらも正味の磁化を有する物質である。本研究では、研究代表者らが見出したフェリ磁性体の「磁化を持つ反強磁性体」としての振る舞いの普遍性と多様性を明らかにすることで、「フェリ磁性スピントロニクス」という新しい学理を構築し、デバイス応用へ展開することを目的とする。

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

スピンと電荷の2つの自由度を利用するスピントロニクスは、巨大磁気抵抗効果がハードディスクの読み取りヘッドに利用され、トンネル磁気抵抗効果を利用した不揮発性磁気メモリが開発されるなど、基礎現象の発見がイノベーションに直結する魅力的な研究分野である。

これまでスピントロニクスは強磁性体の磁化を制御することで発展してきたが、強磁性体の2つの特徴である漏れ磁場とギガヘルツ程度の共鳴周波数がスピントロニクスのさらなる発展の障害となっている。漏れ磁場による相互作用は磁気メモリ等の高密度化の障害となり、ギガヘルツの共鳴周波数のためにデバイス動作速度はナノ秒程度に限定されてしまう。このボトルネックを解決するために、漏れ磁場がなく共鳴周波数がテラヘルツ領域にある反強磁性体が注目されている。しかし、反強磁性体は磁場への応答が極めて小さく、研究手段と応用が限定されてしまう。

2. 研究の目的

フェリ磁性体は、2種類の磁気モーメントが反強磁性的に結合しながらも正味の磁化を有する物質である。磁化の大きさは組成や温度で調整可能で、2種類の磁気モーメントが完全に打ち消し合い反強磁性体のように磁化がゼロとなる状況も実現可能である。

研究代表者らは、フェリ磁性 GdFeCo 合金が「磁化を持つ反強磁性体として振る舞う」ことを最近見いだした。本研究では、フェリ磁性体の「磁化を持つ反強磁性体」としての振る舞いの普遍性と多様性を明らかにすることで、「フェリ磁性スピントロニクス」という新しい学理を構築し、デバイス応用へ展開することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題の核心をなす学術的「問い」は、フェリ磁性体の新しい側面「磁化を持つ反強磁性体としての振る舞い」は「普遍的なものか？」、そして「革新的デバイス応用へつながるか？」である。

この学術的「問い」に答えるために、本研究では、(1)フェリ磁性体の磁化を持つ反強磁性体としての振る舞いの普遍性と多様性を明らかにするとともに、(2)その特徴を活かしたデバイス応用への展開を図ることで、フェリ磁性スピントロニクスの基盤を構築する。具体的には、以下の研究実施項目を設定し遂行する。

(1)フェリ磁性体の磁化を持つ反強磁性体として振る舞いの普遍性と多様性の解明

(1-1) 角運動量補償温度での磁壁移動速度増大の確認

(1-2) 角運動量補償温度、磁化補償温度、キュリー温度の関係の普遍性

(1-3) フェリ磁性体のスピندانピング

(1-4) 組成変調によるジャロシンスキー守谷相互作用誘起

(2) 磁化を持つ反強磁性体の特徴を活かしたデバイス応用への展開

(2-1) スキルミオンデバイスへの展開

(2-2) テラヘルツスピントロニクスへの展開

(2-3) 反強磁性スピン波の偏光制御とスピン波磁壁移動

4. これまでの成果

(1)フェリ磁性体の磁化を持つ反強磁性体として振る舞いの普遍性と多様性の解明

(1-1) 角運動量補償温度での磁壁移動速度増大の確認

研究代表者らは、フェリ磁性体 GdFeCo 合金中の磁壁移動速度が特定の温度で急激に増大することを見だし、この温度が角運動量補償温度であることを明らかにした (Nature Materials 16, 1187 (2017))。この角運動量補償温度での磁壁移動速度増大を、CoFeB 層と Tb 層が界面で反強磁性的に結合した CoFeB/Tb 人工フェリ磁性体を用いて調べた。今回調べた CoFeB/Tb 人工フェリ磁性体では、磁壁ピンニングが強いと磁壁移動が熱活性型を示すことが分かった (Jpn. J. Appl. Phys. 60, 020902 (2021), J. Magn. Magn. Matter., accepted)。

(1-2) 角運動量補償温度、磁化補償温度、キュリー温度の関係の普遍性

上述した CoFeB/Tb 人工フェリ磁性体に加えて、フェリ磁性ガーネット Gd₃Fe₅O₁₂ 単結晶薄膜を用いて研究を進めている。

(1-3) フェリ磁性体のスピンドamping

従来、角運動量補償温度ではスピンドampingが急増するとされてきた。研究代表者らは、フェリ磁性体の共鳴理論を導出して実験結果を解析し、スピンドampingが温度に依存しないことを示した

(Phys. Rev. Lett. 122, 127203(2019))。低damping物質の候補としてフェリ磁性ガーネット Gd₃Fe₅O₁₂ 単結晶薄膜を作製し、フェリ磁性共鳴測定によってスピンドamping求めた結果、Gd₃Fe₅O₁₂ においてもスピンドampingが温度にほぼ依存しないこと、さらに Gd₃Fe₅O₁₂ 単結晶薄膜のスピンドampingは GdFeCo 合金の 1/10 以下であることが明らかとなった。

(1-4) 組成変調によるジャロシンスキー守谷相互作用誘起

本研究課題は次年度 (2022 年度) から開始する予定であったが、類似研究が海外グループから報告され始めているため (Nat Commun 12, 4555 (2021))、新規性の観点から本研究課題の再検討が必要である。

(2) 磁化を持つ反強磁性体の特徴を活かしたデバイス応用への展開

(2-1) スキルミオンデバイスへの展開

本研究課題は 2022 年度から開始予定であったが、前倒ししてデバイス作製の検討を始めている。

(2-2) テラヘルツスピントロニクスへの展開

本研究課題は 2023 年度から開始予定であったが、既にサブテラヘルツのフェリ磁性共鳴をホモダイナミック検波する手法を確立しつつある。

(2-3) 反強磁性スピン波の偏光制御とスピン波磁壁移動

本研究課題は 2023 年度から開始予定であったが、既に円偏光マイクロ波による選択励起に成功している (Review of Scientific Instruments 93, 013901 (2022))。さらに、この手法を用いて人工反強磁性体の反強磁性共鳴モードの選択励起と検出に成功した。

5. 今後の計画

本研究においては当初予定を超えた進捗と成果が得られている。しかし、世界の当該分野の研究は急速に進展しており、研究項目「(1) 普遍性と多様性の解明」から「(2) デバイス展開」に早期にシフトすることで、当該研究分野を国際的に牽引する研究成果をあげていきたい。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- (1) Temperature dependence of domain wall creep motion in ferrimagnetic Tb/CoFeB/MgO microwires, Yoichi Shiota, Kaoru Noda, Yuushou Hirata, Kyosuke Kuwano, Shinsaku Funada, Ryusuke Hisatomi, Takahiro Moriyama, Maksim Stebliy, Alexey V. Ognev, Alexander S. Samardak, Teruo Ono, J. Magn. Magn. Matter., accepted.
- (2) Ferrimagnetic spintronics, Se Kwon Kim, Geoffrey S. D. Beach, Kyung-Jin Lee, Teruo Ono, Theo Rasing, Hyunsoo Yang, Nature Materials 21, 24–34 (2022); 10.1038/s41563-021-01139-4.
- (3) Magnetic polarization selective spectroscopy of magnetic thin films probed by wideband crossed microstrip circuit in GHz regime, Tomonori Arakawa, Yoichi Shiota, Keisuke Yamada, Teruo Ono, Seitaro Kon, Review of Scientific Instruments 93, 013901 (2022); 10.1063/5.0074654.
- (4) Inhomogeneous magnetic properties characterized by simultaneous electrical and optical detection of spin-torque ferromagnetic resonance, Yoichi Shiota, Ryusuke Hisatomi, Takahiro Moriyama, Alexander S. Samardak Teruo Ono, Appl. Phys. Lett. 119, 192409 (2021); 10.1063/5.0070012.
- (5) Field-driven domain wall creep motion in ferrimagnetic Tb/CoFeB/MgO microwires, Yuushou Hirata, Kaoru Noda, Yoichi Shiota, Takahiro Moriyama, Teruo Ono, Jpn. J. Appl. Phys. 60, 020902 (2021); 10.35848/1347-4065/abd67d.

7. ホームページ等

<https://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~onoweb/>

<https://www.kuicr.kyoto-u.ac.jp/sites/>

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news>