

## 【助成 40-04】

### 磁性ワイル半金属のトポロジーに由来する駆動力を用いた磁気秩序の 高効率制御法の確立とプロトタイプ実証

研究者 物質・材料研究機構 ICYS 研究員 竹内 祐太郎

#### 〔研究の概要〕

磁性ワイル半金属はそのトポロジカルなバンド構造によって様々な新奇量子物性を示すことから新しい磁性材料として注目されている。スピントロニクス分野でも磁性ワイル半金属を利用することで更なる低消費電力化や新しい機能性の付与など革新的デバイスへの展開に向けた研究が活発になっている。本研究では反強磁性ワイル半金属を有する薄膜構造を作製し、これまで研究されてきた電流誘起スピン軌道トルクに加えて、ワイル半金属のトポロジーに由来したスピントルクについて探求するとともに、それらを利用したデバイスのプロトタイプ実証を行った。反強磁性ワイル半金属に作用するスピントルクの定量的な評価手法の確立に成功し、さらにスピン軌道トルク、トポロジー由来のトルクを用いて、磁気秩序の高速・高効率な電氣的制御を実現した。

#### 〔研究経過および成果〕

スピントロニクスでは様々な磁性材料の電氣的制御が最重要課題であり、当該技術を利用した不揮発性メモリ・ロジックや新規コンピューティングデバイスの実現が期待されている。一方、近年では物質のトポロジーに由来した様々な新奇量子効果が報告されるようになり、とりわけスピントロニクスでは磁性ワイル半金属を用いたデバイスにおける高速・高効率制御や新しい機能性の付与を目指して研究活動が活発化している。本研究では磁化がゼロの反強磁性スピン構造を有したトポロジカル物質である反強磁性ワイル半金属薄膜を用いる。磁性材料の制御のための従来手法であるスピン軌道トルクに加えて、ワイル半金属のトポロジーに由来したトルクを利用した新規デバイスの実証を目的とする。

本研究で用いたすべての薄膜は DC/RF マグネトロンスパッタリングによって成膜した。反強磁性ワイル半金属として  $D0_{19}\text{-Mn}_3\text{Sn}$  を使用している。デバイスへの微細加工にあたりフォトリソグラフィおよび電子線リソグ

ラフィを用いた。

図 1(a), (b)は反強磁性ワイル半金属  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  に作用する電流誘起スピントルクの評価実験の模式図である。 $\text{MgO}(110)$ 基板上に  $\text{W}(2\text{ nm})/\text{Ta}(3\text{ nm})/\text{Mn}_3\text{Sn}(8.8\text{ nm})/\text{Pt}(5\text{ nm})$ のヘテロ構造を作製し、高調波ホール測定法によってスピントルクの評価を検討した。図 1(c), (d)はそれぞれホール抵抗の基本波、2倍波の磁場印加角度依存性である。従来の磁性材料とは異なる、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ のトポロジカルな磁気構造と特異なダイナミクスを考慮し、ホール抵抗の計算モデルを構築することで、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ 内部のスピントルクの定量的評価に成功した。さらに  $\text{Mn}_3\text{Sn}$ の電流誘起スイッチングを実証し、その反転ダイナミクスも明らかにした。本成果は米国・マサチューセッツ工科大学との共同研究によるものである<sup>1</sup>。

続いて  $\text{MgO}(110)$ 基板上に  $\text{W}(5\text{ nm})/\text{MgO}(t_{\text{MgO}})/\text{Mn}_3\text{Sn}(30\text{ nm})/\text{MgO}(1.3\text{ nm})/\text{Ru}(1\text{ nm})$  [ $t_{\text{MgO}}$ は  $\text{MgO}$ 膜厚]の薄膜を作製し、反強磁性ワイル半金属の電流誘起反転の実証を行った。図 2(a), (b)に各  $\text{MgO}$ 膜厚

および外部磁場における  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の電流誘起スイッチングの結果を示す。 $t_{\text{MgO}} = 0 \text{ nm}$  のときは  $\text{W}/\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{MgO}$  の非対称な構造になるとめスピン軌道トルクによるスイッチングと考えられる<sup>1</sup>。より対称的な構造である  $t_{\text{MgO}}$  が  $1 \text{ nm}$  以上のとき、スイッチングの極性が反転していることから、スピン軌道トルクとは異なるメカニズムであり、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$  内部の特異なバンド構造や磁気構造に由来したトルクが作用している可能性がある[論文執筆中]。

この他にも、反強磁性ワイル半金属の非線形ホール効果の発現など当初の予定以外の成果も得られた。また、反強磁性ワイル半金属のナノスケール微細ドット素子を世界で初めて作製し、その情報保持時間を決定する因子である熱安定性も明らかにするとともに<sup>3</sup>、電流による高速・高効率制御の実証も行った<sup>4</sup>。以上の研究は反強磁性ワイル半金属を用いたデバイスの新しい機能性を示すものであり、革新的な半導体ロジック・メモリ素子および AI デバイスの実現に向けた重要な知見が得られた。

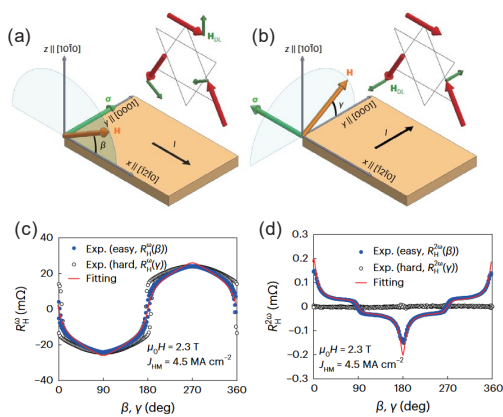


図 1(a), (b) 反強磁性ワイル半金属  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  に作用するスピントルク評価測定の模式図。それぞれ電流  $I$  を六方晶  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の  $[1\bar{1}210]$ 、 $[0001]$  方向に印加している。ホール抵抗の(c)基本波および(d)2 倍波の磁場印加角度  $\beta, \gamma$  依存性。赤線は本研究で考案したモデルによるフィット曲線<sup>1</sup>。

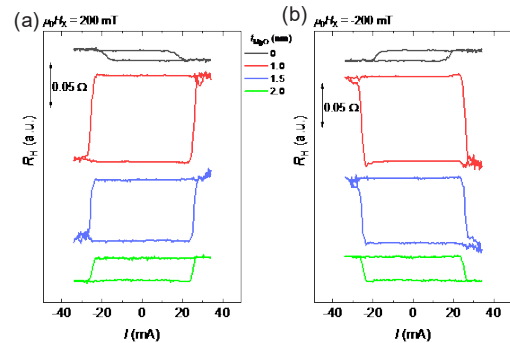


図 2 外部磁場  $\mu_0 H_x$  (a) 200 mT および (b) -200 mT のときのホール抵抗の電流依存性を各 MgO 膜厚で測定した実験結果。電流方向と  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の結晶方位の関係は図 2(a) と同じである。外部磁場  $H_x$  は電流方向と平行に印加している。

[発表論文]

1. J.-Y. Yoon, P. Zhang, C.-T. Chou, Y. Takeuchi *et al.*, “Handedness anomaly in a non-collinear antiferromagnet under spin-orbit torque”, *Nat. Mater.* **22**, 1106 (2023).
2. J. Han, T. Uchimura, Y. Araki, J.-Y. Yoon, Y. Takeuchi *et al.*, “Room-temperature flexible manipulation of the quantum-metric structure in a topological chiral antiferromagnet”, *Nat. Phys.* Accepted (2024).
3. Y. Sato, Y. Takeuchi, “Thermal stability of non-collinear antiferromagnetic  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  nanodot”, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 122404 (2023).
4. Y. Takeuchi *et al.*, Submitted (2024).