

【助成 38 -04】

ワイル半金属ヘテロ界面における非従来型磁気メモリ効果の実証

研究者 東北大学金属材料研究所 准教授 藤原 宏平

〔研究の概要〕

ワイル半金属のヘテロ界面において、二層の磁化状態を制御することで、界面でのワイル点のスピンのヘリシティマッチングに起因する新奇磁気抵抗効果が発現することが理論予測されている。本研究では、その実験的検証を目標に、ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の薄膜に基づくヘテロ界面の形成に向けた要素技術の開発と物性評価に取り組んだ。スパッタリング法により $\text{Co}_3(\text{In},\text{Sn})_2\text{S}_2$ 薄膜を作製し、In 置換に伴う物性変化をフェルミ準位シフトの観点から議論した。さらに、デバイス構造化に向けて、微細加工プロセスを検討した。これらの成果は、フェルミ準位制御に基づく磁気伝導物性へのワイル点の寄与の増強や積層構造およびナノ構造を舞台とする素子化研究への足掛かりになるものと期待される。

〔研究経過および成果〕

固体の性質をバンド構造のトポロジーに基づいて分類しようとする分野はトポロジカル物質科学と呼ばれ、トポロジカル絶縁体の発見以降、新たな物質群の提案が相次いでいる。特に、試料全体に三次元的に広がった線形分散バンドと磁気秩序を有する物質は(磁性)ワイル半金属と呼ばれ、注目を集めている。線形分散バンドの交差するワイル点は、波数空間で磁気単極子に相当する振る舞いを示し、巨大な内因的異常ホール効果や異常ネルンスト効果などの機能物性を示す。現状、バルク試料を用いる研究が先行しているが、薄膜化することで、極薄膜やヘテロ界面、ナノ構造を舞台とする新奇ワイル物性の検証やスピントロニクス素子への展開が期待できる。興味深い理論提案として、小林らは、ワイル半金属のヘテロ界面では、ワイル点のスピンのヘリシティ(磁極の符合とスピン自由度が結合した状態)のマッチング/ミスマッチングにより、従来メカニズムとは異なる磁気抵抗効果が発現することを理論提案している[K. Kobayashi *et*

al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 073707 (2018)]. これを実験的に検証するには、ヘテロ界面を構成する二層の物質の磁化状態(平行/反平行)を制御することが必要である。これは、異なる保持力をもつ二つの層に磁場を印加することで実現することができる。しかしながら、ヘテロ界面の形成に適したワイル半金属薄膜はこれまでに報告されていなかった。

本研究で着目する $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ はシャンダイト型化合物の一種であり、キュリー温度約 175 K で強磁性転移を示す。最大で、異常ホール角が 0.2 に達する巨大異常ホール効果がバルク単結晶で報告されて以降、その物理的起源が盛んに議論され、角度分解光電子分光などの詳細な物性測定を通してワイル半金属であることが裏付けられた。代表者らは、この物質の薄膜化研究に早くから取り組み、スパッタリング法による薄膜成長を 2019 年に初めて報告し[K. Fujiwara *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 050912 (2019)], 極薄膜における磁気秩序の安定性など、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜を用いた独自の研究成果を報告してきた。

本研究では、異種元素置換した $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜を合成することで、磁化制御可能なワイル半金属ヘテロ界面の作製と磁気抵抗効果の実証を目指した。さらに、デバイス構造化に向けて、微細加工プロセスの確立にも取り組んだ。

RF マグネトロンスパッタリング装置を用い、 $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板上に薄膜を形成した。スパッタリングターゲットには、硫化スズ焼結体ディスク ($\phi 60 \text{ mm}$) を用い、その表面に Co 金属および硫化インジウム焼結体片を配置することで、各元素の同時供給を行った。エネルギー分散型 X 線分析により薄膜組成を評価し、Co 金属および硫化インジウム片のサイズと位置を調整することで、組成制御を行った。基板温度 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ で薄膜を堆積し、同温度で SiO_x キャップ層を堆積した後、 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ で真空中ポストアニールを行った。X 線回折により構造評価を行い、汎用物理特性評価装置を用いて電気輸送特性を評価した。

図 1 に、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 0006 に指数付けられる薄膜回折ピークから求めた c 軸長の In 置換量 y (Sn サイトへの置換を仮定した)を示す。比較のため、バルク試料の報告値も示している。In 置換量の増加に伴い、 c 軸長がおおよそ線形に増加していることから、固溶していることが示唆された。これらの $\text{Co}_3(\text{In},\text{Sn})_2\text{S}_2$ 薄膜に対して、電気抵抗率およびホール効果を測定し、電子状態の観点から物性変化を考察した。

$\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜を汎用リソグラフィー手法により微細加工したホールバー構造チャンネルを作製した。電気特性評価の結果、未加工の薄膜試料 (数 mm サイズ) と同等の特性を示すことが分かった。これにより、ワイル半金属の特性を維持したまま $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜をデバイス構造化可能であることが示唆された。

積層構造の形成にも取り組んだが、現状急峻なヘ

テロ界面の形成には至っておらず、積層条件の調整が必要であることが分かった。今後、積層用混晶物質 (置換元素) およびプロセスを工夫するとともに、本研究で確立した微細加工を用いて素子構造化することで、スピンヘリシティ由来の磁気抵抗効果を検証し、磁気抵抗デバイスの実現へと結び付けたい。

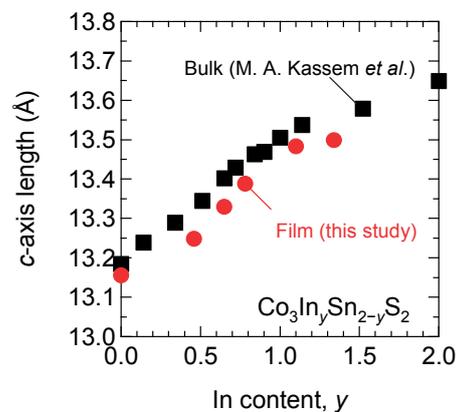


図 1. $\text{Co}_3\text{In}_y\text{Sn}_{2-y}\text{S}_2$ の c 軸長の In 組成 y 依存性。バルクデータ (M. A. Kassem *et al.*, *J. Cryst. Growth* **426**, 208 (2015))。

[成果発表]

1. K. Fujiwara *et al.*, Electrical detection of surface conduction in magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ thin films. 2021 年第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-S302-6, オンライン.