



Tokyo Tech

Press Release

2024年1月4日

東京工業大学

スピントール効果を高温で増大させる新原理を発見

－磁気抵抗メモリの高性能化を加速－

【要点】

- 通常は一定であるスピントール伝導率を高温で増大させる新原理を発見。
- 非磁性体 TaSi₂ においてフェルミレベル近傍にベリ一位相のモノポールを配置。
- 次世代磁気抵抗メモリの物質設計の加速に期待。

【概要】

東京工業大学 工学院 電気電子系のファム・ナムハイ准教授、白倉孝典特任助教、石田乾さん（学士課程3年）は、TaSi₂ という物質のバンド構造における縮退点の寄与を工夫し、高温においてスピントール効果（用語1）を増大させる新原理を発見した。

近年の磁気抵抗メモリでは、従来のスピントールトルク（STT）方式よりも高効率にスピントール流を生成可能であるスピントール軌道トルク（SOT）方式が注目を集めている。SOT方式では、スピントール効果を利用してスピントール流を生成する。スピントール効果の強さはスピントール伝導率 σ_{SH} で表され、その大きさはバンド構造の幾何学的位相である「ベリ一位相」の効果により決まる。また、従来の研究より、多くの金属材料のスピントール伝導率は不純物や温度によらず一定であることが知られている。

今回の研究では、TaSi₂ という物質において、ベリ一位相の強い発生源であることが知られているバンドの縮退点（ベリ一位相のモノポール）をフェルミレベル（用語2）近傍に配置することで、高温においてスピントール伝導率を増大させる新原理の実証に成功した。本研究成果により、SOT方式を利用した超低消費電力な磁気抵抗メモリの高温での性能の改善が期待できる。

本研究成果は、2023年12月26日付（米国時間）の米国の学術誌「*Applied Physics Letters*」に掲載された。

●背景

IoTの普及により、取り扱う情報量は爆発的に増大している。これに伴って、大容量かつ高速な新規不揮発性メモリの需要が高まっており、特に磁性体を使用した不揮発性メモリが注目されている。この磁気抵抗メモリは、磁性体の磁化の向きを電子のスピン角運動量の流れであるスピン流によって制御することで動作する。現在、スピン流の生成には、磁性体に電流を注入してスピン偏極電流を生成するスピン移行トルク (STT) 方式が用いられている。一方で最近では、制御対象の磁性体に接合した非磁性体に電流を注入し、スピンホール効果を介して純スピン流を生成するスピン軌道トルク (SOT) 方式が近年注目を集めている。SOT方式では、スピン流の生成効率 σ_{SH} およびスピンホール伝導率 σ_{SH} で表される。しかし従来の研究より、多くの金属材料のスピンホール伝導率は不純物や温度によらず一定であることが知られている。

●研究の経緯

スピンホール伝導率は物質の運動量空間において、ベリー位相の曲率をバンド構造にわたって積分することによって得られる。スピンホール伝導率の値は多くの金属材料において、不純物や温度によらず一定であることが知られている。一方、バンド構造のディラックポイントのような縮退点は、その点において強いベリー位相の曲率が発生できるため、ベリー位相の曲率の「モノポール」ともいえる。しかし、これらのモノポールがフェルミレベルから離れすぎると、その寄与には温度依存性がほとんどないため、結果的にスピンホール伝導率の温度変化は生じないことが課題だった。

こうした課題を克服するため、研究チームは新たな非磁性体 $TaSi_2$ に注目した。この $TaSi_2$ という物質はカイラル構造を持つ (図 1(a))。また第一原理計算をおこなったところ、フェルミレベルの直上に複数のディラックポイントが存在することが判明した (図 1(b))。このことから、 $TaSi_2$ が高温になるとフェルミディラック分布に従い、モノポールの寄与が増大してスピンホール効果が増大すると期待できる。

●研究成果

今回の研究では、 $TaSi_2$ のスピン伝導特性の評価を行うため、研究チームはスパッタリング法 (用語 3) を用いて、 $TaSi_2$ と強磁性体 $CoFeB$ 膜のヘテロ接合膜を作製した (図 1(c))。これらのヘテロ接合膜を用いて、温度を変えながら、スピンホール伝導率を評価したところ、高温になるにつれて上昇していくことが確認された (図 1(d))。またこの結果は、フェルミディラック分布に従う式でフィッティングした結果とよく一致し、ディラックポイントが寄与していることが分かった。

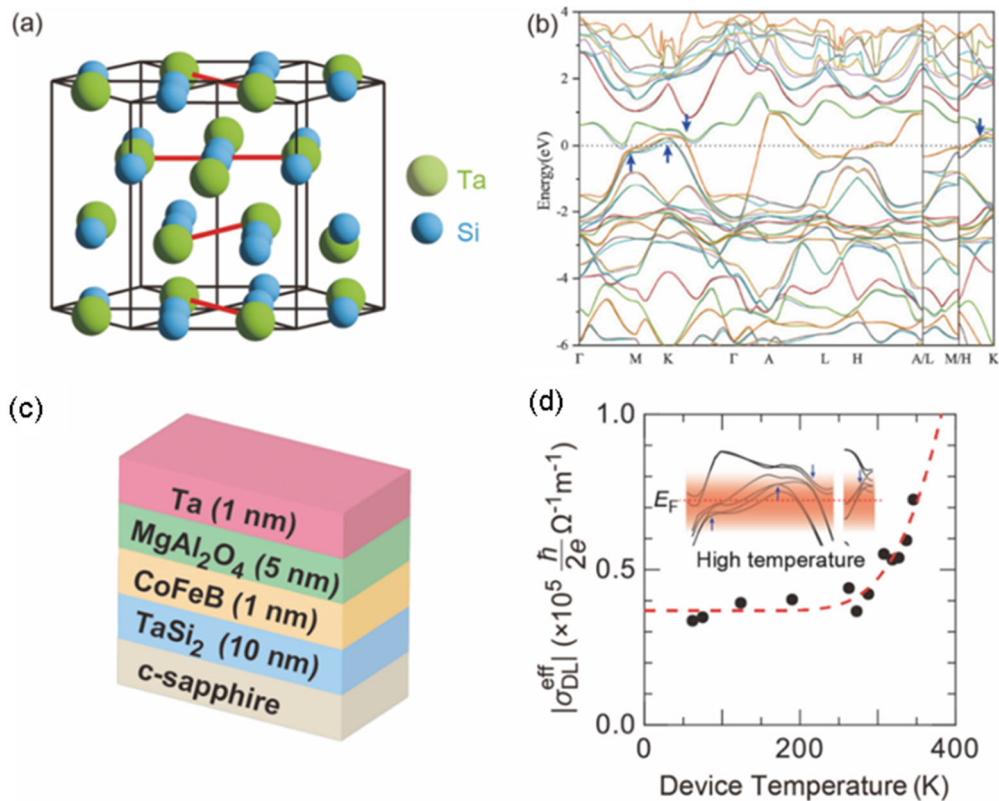


図1 (a) TaSi₂が持つカイラル構造。(b) スピン軌道相互作用を考慮して、第一原理計算により計算されたバンド図。青い矢印はフェルミレベル近傍のディラックポイントを指す。(c) スパッタリング法で製膜したスタックの構造図。(d) スピンホール伝導率の温度依存性。赤い点線はディラックポイントの寄与を考慮したモデルによる理論曲線。

●社会的インパクト

一般的に電子デバイスは、動作温度が増大すると性能が低下してしまう。今回の研究で発見された、温度が高くなるにつれてスピホール伝導率が増大する現象を利用すれば、磁気抵抗メモリの高温での書き込み性能を改善できるため、高温性能が求められる車載半導体の不揮発性メモリに応用できると考えられる。

また今回の研究では、バンド構造の幾何学的位相である「ベリー位相」のモノポールをフェルミレベル近傍に配置することで、高温下でスピホール性能を増大できる「ベリー位相モノポールエンジニアリング技術」という手法を確立した。こうした成果は、SOT方式を利用した超低消費電力な磁気抵抗メモリの高温での性能改善につながると期待される。これは現在採用が進みつつある磁気抵抗メモリが、IoTに限らず産業機器や自動車分野へ普及することをさらに後押しする、社会的インパクトの大きな成果だと言える。

●今後の展開

今回の研究では TaSi₂ 物質において、ベリー位相の強い発生源と知られているバンドの縮退点（ベリー位相のモノポール）の寄与を工夫し、高温でスピホール伝導率を増大させる新原理の実証に成功した。一方で、今回用いた TaSi₂ のスピホール伝導率自体はそれほど高くない。今後は、表面にディラックポイントを有し、かつ巨大なスピホール伝

導率を示したトポロジカル絶縁体にもこの原理を応用して、物質設計すれば、トポロジカル絶縁体の高温におけるスピホール性能の改善が期待できる。

●付記

本研究は、科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（CREST）「トポロジカル表面状態を用いるスピン軌道トルク磁気メモリの創製」（研究代表者：ファム ナムハイ、課題番号：JPMJCR18T5）の支援を受けて行われた。

【用語説明】

- (1) **スピホール効果**：スピン軌道相互作用により、材料中を流れる電子がそのスピンの向きに応じて逆向きに曲げられる現象。例えば、アップスピンを持つ電子が右側に曲げられる状況においては、ダウンスピンをもつ電子は左側に曲げられる。この現象により、左右に逆向きのスピンの蓄積される。この状況下において磁性体を接合すると、蓄積スピンの磁性体に拡散し、スピン角運動量を受け渡すことができる。
- (2) **フェルミレベル**：絶対零度において、電子が占有可能な最高のエネルギー準位を指す。
- (3) **スパッタリング法**：イオン化した原子（主に希ガス）を材料ターゲットに衝突させ、運動量交換により材料を弾き飛ばすことで物理的に蒸発させる方法。大面積に対して均一に材料を蒸着できるため、半導体や磁気記録における量産プロセスに広く使われている。

【論文情報】

掲載誌：*Applied Physics Letter*

論文タイトル：Enhanced spin Hall effect at high temperature in non-centrosymmetric silicide TaSi₂ driven by Berry phase monopoles

著者：Ken Ishida, Takanori Shirokura and Pham Nam Hai

DOI：10.1063/5.0165333

【問い合わせ先】

東京工業大学 工学院 電気電子系 准教授

ファム・ナムハイ

Email: pham.n.ab@m.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-3934 FAX: 03-5734-3870

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661