



Tokyo Tech

報道機関各位

2022 年 2 月 14 日

東京工業大学

高スピン流生成効率と高熱耐久性を両立する新材料の開発に成功

ー超低消費電力な不揮発性メモリの実用化加速へー

【要点】

- 4.1 に及ぶ巨大なスピンのホール角と、600℃にも耐える高い熱耐久性を両立する新材料の開発に成功。
- スピン軌道トルク（SOT）方式に適した純スピン流注入源を開発。
- 次世代不揮発性メモリの開発加速へ貢献。

【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、白倉孝典大学院生（博士後期課程）、キオクシア株式会社 メモリ技術研究所 デバイス技術研究開発センターの近藤剛主幹を中心とした共同研究チームは、高いスピン流生成効率と高い熱耐久性を両立するハーフホイスラー型トポロジカル半金属（HHA-TSM）（用語 1）の一種である、YPtBi 薄膜の作製およびその動作実証に成功した。

近年、「スピン軌道トルク（SOT）方式」を利用した不揮発性メモリが、従来の「スピン移行トルク（STT）方式」よりも高効率にスピン流を生成できるという理由から注目を集めている。SOT 方式では、スピンのホール効果（用語 2）を利用してスピン流を生成する。このスピンのホール効果の強さはスピンのホール角 θ_{SH} で表され、その大きさは材料中の不純物濃度やバンド構造により決まる。

純スピン注入源材料として、初期から研究されてきた重金属類は、半導体集積プロセスに対して高い親和性を有するものの、 θ_{SH} が 0.1 台と小さいため、デバイス動作時の消費電力増大が問題となっていた。一方、近年注目されているトポロジカル絶縁体（用語 3）は、1 を超える巨大な θ_{SH} を有するものの、V 族と VI 族のみから構成されるため熱耐久性が 300℃程度と低く、半導体集積プロセスに対する親和性が低いという問題があった。

今回の研究では、4.1 という巨大な θ_{SH} と 600℃という高い熱耐久性を併せ持った、HHA-TSM の一種である YPtBi 薄膜の作製と、低電流密度で生成されたスピン流による磁化反転の実証に成功した。本研究成果により、SOT 方式を利用した超低消費電力な不揮発メモリの研究開発の加速が期待できる。

本研究成果は、2 月 14 日付（英国時間）の英国の学術誌「*Scientific Reports*」に掲載される。

●背景

IoT 社会の到来により、単位時間内に扱う情報量が爆発的に増大するなか、より高速で容量の大きい新たな不揮発性メモリの需要が高まっている。

この要件を満たすものとして期待が寄せられている、磁性体を利用した不揮発性メモリは、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で制御することによって動作する。

現在、その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。この方式では、スピン流の生成効率¹⁾は磁性体のスピン分極率で決まる。しかし、よく使われている磁性金属のスピン分極率は原理的に 1 を超えられず、0.6~0.7 程度にとどまるため、スピン流生成効率が小さく、磁化制御のために大電流を要するという欠点があった。

こうした欠点を解決する方法として、近年注目を集めているのが、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」だ。この SOT 方式では、スピン流の生成効率²⁾は、スピンホール効果の強さを示すスピンホール角 θ_{SH} だけでなく、非磁性体の構造によっても制御できる。さらに、 θ_{SH} は原理的に 1 を超えることも可能であり、STT 方式よりも容易に大きなスピン流生成効率を実現できると予測された。

●研究の経緯

「スピン軌道トルク (SOT) 方式」を用いる場合、純スピン注入源に用いる非磁性体の選択が重要であり、スピン流生成の観点から非磁性体は大きなスピンホール角 θ_{SH} を有していることが望ましい。

こうした条件を満たす非磁性体として、これまで W や Ta をはじめとする重金属や、 Bi_2Se_3 や BiSb などのトポロジカル絶縁体が研究されてきた。

重金属は薄膜作製手法が成熟しているため、磁性体と良好な界面を形成できるメリットがあり、融点が高いため加熱を伴う半導体集積プロセスに対しても高い親和性を有する。しかし、その θ_{SH} は 0.1~0.4 程度と小さいため、制御電流の低減効果は限定的であった。

一方、トポロジカル絶縁体は図 1(a)に示すバルクバンドのトポロジに保護されたトポロジカル表面状態 (TSS) の寄与により、1 を超える巨大な θ_{SH} を持っているという性質がある。しかし、既存のトポロジカル絶縁体は V 族、VI 族のみから構成されるため、熱耐久性が 300℃程度と低く、半導体集積プロセスに対する親和性が低いという問題があった。

●研究成果

研究チームはこの問題を解決するため、ハーフホイスラー型トポロジカル半金属（HHA-TSM）の一種である YPtBi に着目した。HHA-TSM は図 1(b)に示すようなハーフホイスラー構造を有する 3 元合金であり、トポロジカル絶縁体と同様、スピンの強いトポロジカル表面状態（TSS）を有することが特徴である。

産業応用を見据え、YPtBi 薄膜の作製には量産プロセスの一種であるスパッタリング法（用語 4）を用いた。

図 1(c)は成膜温度を変えて製膜した YPtBi 薄膜の Bi 含有量を示した図である。Bi 単体の融点は 270℃と低いが、YPtBi 膜中では理想組成である 1 を 600℃もの高さまで保持している。これは YPtBi 膜が 600℃まで安定であることを示している。

さらに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を用いて YPtBi 膜と強磁性体 CoPt 膜のヘテロ接合膜を作製した。YPtBi 膜は平均表面粗さ約 2Å（図 1(b)に示す単位格子の 3 分の 1）という超平坦な界面を有するため、CoPt 膜は強い垂直磁気異方性（用語 5）を示した。YPtBi の成膜条件を最適化することで、最大で 4.1 という巨大なスピンホール角 θ_{SH} を実現することに成功した。これらヘテロ接合膜を用いて、図 1(d)に示すようなパルス電流による磁化反転実験を行ったところ、図 1(e)に示すように、効率よく CoPt の磁化反転が確認できた。また、外部磁場を反転させることにより、磁化反転の方向が反転するという SOT 方式の典型的な振る舞いが見られた。これら実験の結果、YPtBi 膜はその巨大なスピンホール角により、重金属よりも 1 桁小さな電流密度で CoPt 膜の磁化反転を可能とするスピン流が生成できることが分かった。

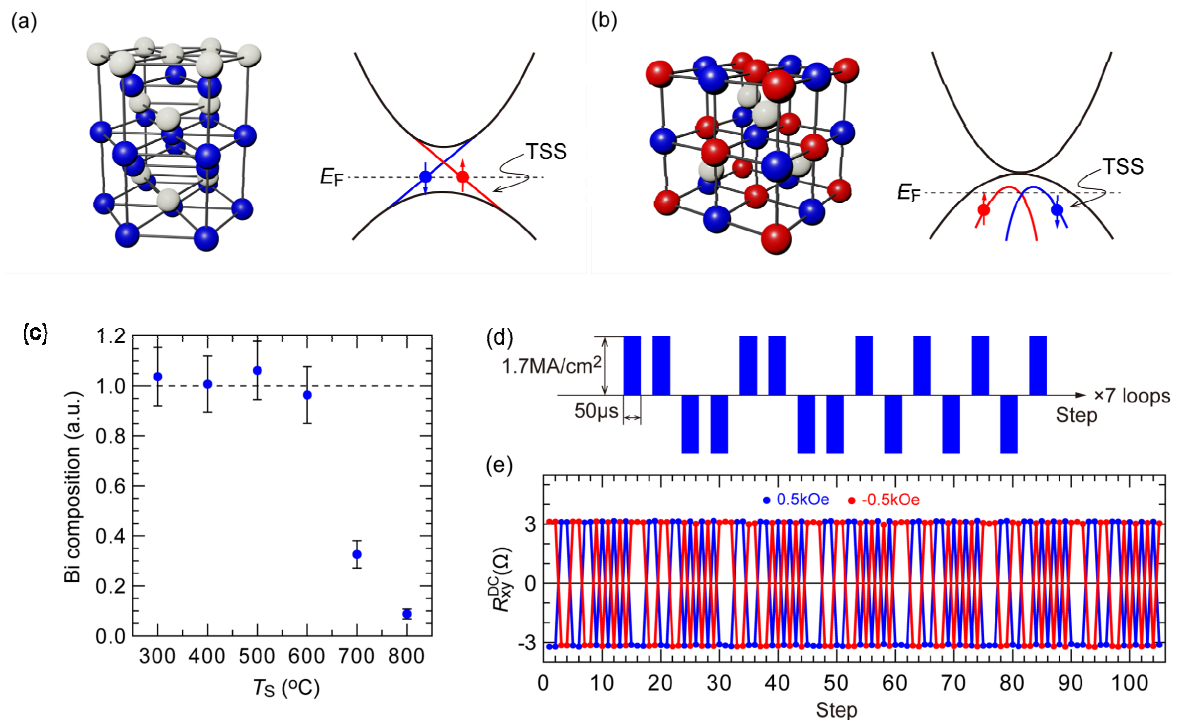


図 1 (a) V 族、VI 族に基づいた従来型のトポロジカル絶縁体の結晶構造(左)とそのエネルギーバンド構造(右)。(b) HHA-TSM の結晶構造(左)とそのエネルギーバンド構造(右)。(c) スパッタリング法で製膜した YPtBi 膜における Bi 組成比の成膜温度依存性。YPtBi 膜と磁性体 CoPt 膜のヘテロ接合膜での、磁化反転の実験における、(d) パルス電流印加シーケンス、および(e) それに対応する磁化反転の結果。青の点は電流に対して平行に 0.5kOe の外部磁場を印加した際の、赤の点は反平行に 0.5kOe の外部磁場を印加した際の磁化反転の結果に対応している。

●今後の展開

今回の研究によって、YPtBi が、4.1 という巨大なスピンホール角 θ_{SH} と 600°C という高い熱耐久性を併せ持つ高性能な純スピン注入源材料であることが示された。この成果により、今後、YPtBi を利用したさまざまな超低消費電力な不揮発性メモリの研究が加速されるとともに、他のハーフホイスラー型トポロジカル半金属 (HHA-TSM) を用いた材料研究の発展につながると期待される。

●付記

本研究は、キオクシア株式会社からの支援を受けて実施された。

【用語説明】

- (1) ハーフホイスラー型トポロジカル半金属 (HHA-TSM) : ハーフホイスラー構造を有する 3 元合金のゼロギャップ半導体のうち、表面に金属的な伝導状態を有する材料群。

- (2) **スピンホール効果**：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、アップスピンをもつ電子が右側に曲げられる状況において、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。
- (3) **トポロジカル絶縁体**：材料内部は絶縁体でありながら、その表面には金属的な伝導状態を有する物質群。
- (4) **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。大面積かつ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。
- (5) **垂直磁気異方性**：磁化のエネルギー異方性の一種。磁性体中の磁化が膜面に対して垂直に向いたときエネルギーが最小化する系では、系のエネルギーを下げるために外部磁場がなくても磁化が垂直方向を向く。磁化反転に必要なエネルギーおよび磁化の熱安定性の観点から、高記録密度媒体ではこの垂直磁気異方性を有していることが望ましい。

【論文情報】

掲載誌：*Scientific Reports*

論文タイトル：Efficient spin current source using a half-Heusler alloy topological semimetal with back end of line compatibility

著者：Takanori Shirokura, Tuo Fan, Nguyen Huynh Duy Khang, Tsuyoshi Kondo, and Pham Nam Hai

DOI：10.1038/s41598-022-06325-1

【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