PRESS RELEASE(2025/10/10)

# スパッタリングにより成膜された磁性絶縁体の電流誘起磁化反転に成功

## ～情報機器を大幅に省エネルギー化する技術開発を加速～

**ポイント**

① IoT/AI 社会の進展により情報機器の消費電力増大が世界的な課題となる中、従来の磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)では情報書き込み時のエネルギーロスが問題でした。

② MRAM の量産にも用いられる生産性の高い技術であるオンアクシス・スパッタリング法(※1)を用いて超省エネメモリの材料となる高品質な磁性絶縁体の単結晶薄膜を作製し、その電流誘起磁化反転(情報書き込み)に世界で初めて成功しました。

③ 本成果は、次世代メモリ材料の実用化を大きく加速させるものです。将来的に、情報機器の大幅な省エネルギー化へ貢献すると期待されます。

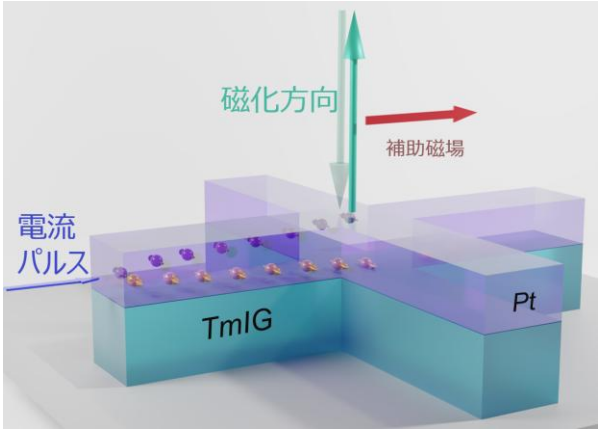
**概要**


情報社会の発展に伴い、電子機器の消費電力削減は喫緊の課題です。電源を切っても情報が消えない磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)は、その切り札として期待されていますが、情報書き込み時のエネルギー効率の向上が求められていました。新しい磁性絶縁体であるツリウム鉄ガーネット(TmIG)は低消費電力かつ高速制御可能なため世界中で研究が進められている注目材料ですが、従来の作製法は量産に不向きな特殊な手法に限られていました。

九州大学大学院システム情報科学研究院の山下尚人准教授、チャルマース工科大学のロゼル・ンガロイ氏(博士課程学生)、サロジ P. ダッシュ教授、大邱慶北科学技術院(DGIST)のユ・チョンヨル教授、信州大学の李垂範助教らの国際共同研究グループは、この課題を解決する新たな製造プロセスを開発しました。MRAM の量産にも用いられる汎用的な技術であるオンアクシス・スパッタリング法を用いて高品質な TmIG 薄膜を作製、さらに白金(Pt)層を堆積させて微小な電流を流すだけで磁石の向き(メモリ情報)を反転させることに成功しました。この情報書き込み効率は従来法で作製したものに匹敵し、汎用的な技術で高品質な磁性絶縁体の単結晶薄膜を作製できることを示しました。

今回の成果は、高性能な磁性絶縁体メモリ技術を、基礎研究から応用研究へと橋渡しする重要な一歩です。新たなスピントロニクスデバイスの開発研究を加速し、持続可能な情報社会の実現に貢献することが期待されます。

本研究成果は英国の雑誌「npj Spintronics」誌に 2025 年 10 月 10 日(金)午後 6 時(日本時間)に掲載されました。


**電流パルスによる磁化反転のイメージ図**

磁性絶縁体 TmIG の磁化を白金(Pt)の電流により反転させる。

**研究者からひとこと：**

TmIG は日本で開発された材料で、近年の高速・低消費電力での磁化反転の報告を機に、世界から注目されている材料です。本成果は世界中の研究者が挑んできた課題に対する解を示すことができたと考えています。多くの共同研究者の皆様との議論とご協力の賜物です。今後は産学連携を視野に入れ、新機能創出に向けた研究を加速させてまいります。

(山下准教授)

**【研究の背景と経緯】**

AI の急速な普及に伴い、その頭脳となるデータセンターの消費電力が世界的な問題になっています。この課題を解決するため、AI などを動かす電子デバイスの抜本的な省エネルギー化が急務となっています。その重要技術の一つが、電気を使って磁石の向きを制御し、情報を記録する方法である「スピン軌道トルク(SOT)(※2)」です。そして、室温で高速かつ低消費電力での情報書き換えが可能として現在世界中で注目されている新材料が「ツリウム鉄ガーネット(TmIG)」です。2012 年に日本で開発されたこの材料は「垂直磁気異方性(※3)」を持つ磁性絶縁体です。TmIG は電気を通しませんが、隣接させた白金(Pt)に電流を流すことで蓄積するスピンを活用して SOT が働き、磁石の向き(磁化) を制御できる画期的な材料です。

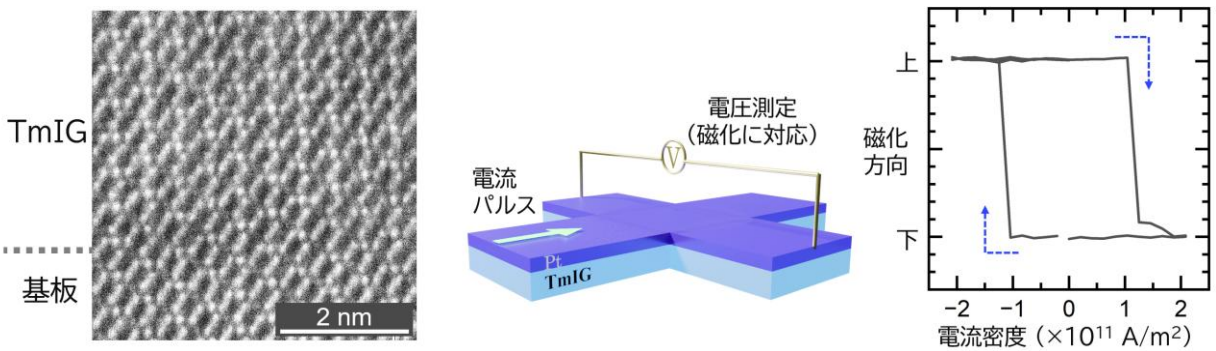
しかし、この技術は非常に高品質な薄膜でなければ実現できず、従来はパルスレーザー堆積法(PLD 法)のような 1cm 角程度の小さなサンプルでの学術研究に留まっていました。そこで九州大学大学院システム情報科学研究院の山下准教授らのグループは、この TmIG の優れた性質を実用化につなげるため、量産に適した「オンアクシス・スパッタリング法」による高品質な薄膜作製に取り組んできました。

**【研究の内容と成果】**

今回、九州大学、チャルマース工科大学、大邱慶北科学技術院(DGIST)、信州大学による国際共同研究グループは、MRAM の量産ラインで標準的に用いられている「オンアクシス・スパッタリング法」により高品質な TmIG 薄膜を作製するプロセス開発に挑みました。成膜中のガス流量や圧力、成膜後の熱処理といった条件を精密に最適化することで、原子レベルで平坦かつ理想的な結晶構造を持つ高品質な TmIG 薄膜を、この産業的な手法で初めて実現しました。参考図左は、本研究で作製した TmIG 膜の断面を高解像度の透過型電子顕微鏡を用いて観察した顕微鏡像です。基板の結晶構造を引き継いで原子が配列していることから、TmIG がエピタキシャル成長(※4)しており高品質な単結晶が得られていることが見て取れます。

また、この TmIG 薄膜と Pt を積層させて微細加工を行い、ホール素子を作製しました(参考図中央)。Pt 層に微小な電流パルスを流すことで、TmIG の磁化の向きが安定して 100 回以上繰り返し反転することを実証しました(参考図右)。さらに、この磁化反転(情報書き込み)に必要な電流密度は最低 $0.7\times10^{11}$ A/m²となり、PLD 法などの従来技術で作製された高品質の素子と比べても遜色のない低い値であり、低消費電力性を確認しました。以上より、量産に適した手法を用いて極めて高品質な TmIG 膜の作製に成功し、エネルギー効率の高い情報書き込みが可能であることを示しました。

**【参考図】**




左　：オンアクシス・スパッタリング法により作製された TmIG 膜の断面透過型電子顕微鏡像
中央：Pt を用いて TmIG 膜のスピン軌道トルク磁化反転を検証する実験の模式図
右　：室温におけるスピン軌道トルク磁化反転の測定結果

**【今後の展開】**

現在、本研究で開発した製造技術を基盤として、磁性ガーネットの特質を生かした新機能デバイスを開発中です。将来的には、メモリ内で演算を行うコンピューティング・イン・メモリへ展開し「ポストMRAM」時代のスピントロニクスデバイスを実現します。本技術を駆使して AI と人類が共存する持続可能な情報社会への貢献が期待されます。

**【用語解説】**

(※1) オンアクシス・スパッタリング法

薄膜材料(ターゲット)にイオンを衝突させて原子を叩き出し、その真正面(オンアクシス)に置いた基板に薄膜を堆積させる代表的な成膜技術。生産性が高く、産業界で広く利用されているため着目した。

(※2) スピン軌道トルク

金属中の電子が持つスピンの流れを利用して、隣接する磁石の向きを回転させるメカニズム。小さな電流で高効率な磁化反転が可能。

(※3) 垂直磁気異方性

磁石の向き(N/S 極)が、薄膜の表面に対して垂直方向を向きやすい性質。情報をより高密度かつ安定に保持できるため、メモリの高集積化に不可欠。

(※4) エピタキシャル成長

下地となる単結晶基板の上に原子が向きを揃えて並ぶよう薄膜を成長させる技術。これにより、薄膜も下地と同じように原子が規則正しく並んだ高品質な単結晶となり、材料が持つ性能を最大限に引き出すことができる。

**【謝辞】**

本研究は、科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業 ACT-X「スピン流を用いた磁壁カイラリティの電気的検出」(JPMJAX23KJ)、同 先端国際共同研究推進事業(ASPIRE)「最先端原子層プロセス国際共同研究ネットワークの構築」(JPMJAP2321)、日本学術振興会(JSPS) 科研費 (JP22K14292)、国際協力機構、日本板硝子材料工学助成会、村田学術振興・教育財団、スカンジナビア・ニッポン ササカワ財団、R1 TECHNOLOGIES 合同会社、European Innovation Council (EIC) project 2DSPIN-TECH (No. 101135853)の助成を受けたものです。実験の一部は九州大学木村崇研究室、板垣奈穂研究室、超顕微解析研究センター、低温センターの装置を利用して行われました。

**【論文情報】**

掲載誌：npj Spintronics

タイトル：Deterministic spin-orbit torque switching of epitaxial ferrimagnetic insulator with perpendicular magnetic anisotropy fabricated by on-axis magnetron sputtering

著者名：Roselle Ngaloy, Naoto Yamashita, Bing Zhao, Soojung Kim, Kohei Yamashita, Ivo P. C. Cools, Marlis N. Agusutrisno, Soobeom Lee, Yuichiro Kurokawa, Chun-Yeol You, Hiromi Yuasa, Saroj P. Dash

D O I ： 10.1038/s44306-025-00105-z

**【お問合せ先】**

<研究に関すること>

九州大学　大学院システム情報科学研究院　准教授 山下尚人(ヤマシタナオト)
TEL：092-802-3764　FAX：092-802-3764
Mail：yamashita.naoto.952@m.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学　広報課
TEL：092-802-2130　FAX：092-802-2139
Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

信州大学　総務部総務課広報室
TEL：0263-37-3056　FAX：0263-37-2182
Mail：shinhp@shinshu-u.ac.jp

科学技術振興機構　広報課
TEL：03-5214-8404　FAX：03-5214-8432
Mail：jstkoho@jst.go.jp

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構　戦略研究推進部　先進融合研究グループ 原田千夏子(ハラダ チカコ)
TEL：03-6380-9130　FAX：03-3222-2066
Mail：act-x@jst.go.jp

Kyushu University VISION 2030
総合知で社会変革を牽引する大学へ