

スパッタエピタキシーによる 酸化物スピンオービトロニクスの開拓

九州大学 大学院システム情報科学研究所 山下尚人

Development of Oxide-based Spin-orbitronics by Implementing Sputtering Epitaxy

Naoto Yamashita

Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

マグネトロンスパッタリングによる $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ の大面積成膜技術及び白金を用いたスピン軌道トルク磁化反転を研究した。スパッタ成膜の条件を詳細に検討することで従来と比較して同程度の磁気ダンピング、垂直磁気異方性、飽和磁化および低消費電流を維持したまま大面積化への基盤技術を開発した。さらに、磁化ダンピングおよびスピン波伝搬のスピンダイナミクスの測定データも獲得した。これにより、磁性絶縁体酸化物の電流誘起磁化反転という新たな研究分野の裾野を広げ、応用研究への端緒を拓く成果となった。

We investigated large-area deposition techniques for $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (TmIG) using magnetron sputtering, alongside spin-orbit torque (SOT)-induced magnetization switching in Pt/TmIG bilayers. By rigorously optimizing the sputtering parameters, we achieved large-area productivity comparing with pulse laser deposition, while maintaining high-quality magnetic properties—including low magnetic damping, strong perpendicular magnetic anisotropy (PMA), and high saturation magnetization, as well as low power consumption. Furthermore, we investigated dynamical properties, such as ferromagnetic resonance and spin-wave propagation spectra. These results have significantly expanded the scope of the research on current-induced magnetization switching in magnetic insulating oxides, providing a critical foundation for future practical applications.

1. はじめに

近年の生成 AI の普及により情報処理デバイスおよび記録デバイスの消費電力が爆発的に増大している。2024 年には世界の全発電量の 1.5% がデータセンターで消費されていたが、消費電力の増加量が全世界での電力増加より 4 倍速く、2030 年には 3% に達する¹⁾。これより、データセンターでの消費電力抑制のため新たな情報処理デバイスの開発が急務となっており、スピンオービトロニクスと呼ばれる新たな技術に期待が高まっている。スピン軌道トルク (SOT) やスピンホール磁気抵抗効果といった、スピン軌道相互作用による電流スピン流変換を用いることにより新たな磁気ランダムアクセス (MRAM) などのデバイスが提案されている²⁾。本研究では、酸化物の垂直磁化膜であるツリウム鉄ガーネット ($\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, TmIG) に着目し、スパッタエピタキシーによる大面積成膜技術および SOT 磁化反転の高効率化に向けた研究を行った。

2. 実験

2.1 オンアクシススパッタリングによる高品質 TmIG の作製

筆者は SRIM シミュレーションにより組成ずれの要因の理由は鉄とツリウム原子のスパッタ率および広がり角であることを明らかにした³⁾。そのうえで、これを回避することで均一成膜が可能になると考え、スパッタリングターゲット作製レシピとスパッタリング成膜条件の最適化を行い、高品質単結晶 TmIG 膜の作製に成功した⁴⁾。

図 1 に本研究で作製した TmIG 膜の X 線回折パターンと断面透過型電子顕微鏡像を示

す。 $2\theta=51.6^\circ$ のピークは TmIG が GGG 基板に対して疑似格子整合したときにのみ表れるピークで、エピタキシャル成長により応力が誘起されていることの証拠である(図 1a)。また、透過型電子顕微鏡からも高品質単結晶 TmIG 膜が疑似格子整合成長していることを確認した(図 1b)。

2.2 SOT 磁化反転

膜厚 6 nm の TmIG 上に白金を 3 nm 堆積させて図 2a, b に示すホールデバイスを作製した。チャンネル幅は $8\mu\text{m}$ とし、フォトリソグラフィとイオンミリングによりデバイスを作製した。この素子を用いて面内磁場とパルス電流を印加することにより室温にて SOT 磁化反転の実験を行った(図 2c)。面内磁場の方向によりヒステリシスの極性が反転することから、SOT による磁化反転が実証された(図 2d)。さらに、パルス電流の正負を切り替えて繰り返し印加すると、閾値電流密度を超えた時だけ磁化反転することから、磁気メモリとして動作することを確認した(図 2e)。閾値電流密度は $0.7 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ となり、従来手法で作製された試料と同等の性能を持つことを示した⁵⁾。

2.3 磁化ダイナミクス

比較的新しい磁性ガーネットである TmIG は、垂直磁気異方性による垂直スピン波デバイスへの展開も期待されている。筆者は TmIG の物性研究に多角的に取り組み、複数の共同研究を通じてスピン波伝搬、ギルバートダンピング定数を測定した。広帯域強磁性共鳴(FMR)測定を室温で行った。マイクロ波周波数 7~12 GHz の範囲で明瞭な FMR 信号が観測され、18 nm 厚の TmIG でギルバートダンピング定数は 1.5×10^{-2} を得た(図 3a)。これは先行研究のネオジムガリウムガーネット基板上的 TmIG 薄膜の値の半分以下であり、研究代表者の作製した TmIG が磁氣的な欠陥の少なく、垂直スピン波輸送に資する結果である。

そこで、磁性絶縁体中でスピン流の媒体となるスピン波の測定を行った。図 3b の構造を作製して室温面直磁場中で測定された伝搬スピン波スペクトルを図 3c に示す。チャンネル長 $3.6\mu\text{m}$ において明瞭なスピン波伝搬を観測した。さらに、異なるチャンネル長で同様の測定を行い、S21 パラメーターの絶対値をプロットした結果を図 3d に示す。片対数プロットの線形フィッティングによりスピン波の伝搬長を $6\mu\text{m}$ と長い伝搬長を得た。これらの結果はいずれも、本研究で作製された TmIG 膜が他の研究グループと比較して高品質な単結晶であることを指示する結果である。

3. 結論

本研究では、磁性酸化物 TmIG のスパッタエピタキシー技術を開発した。本手法によって、世界最大の生産性を獲得し、新しい材料の多様な物性評価を行った。断面透過電子顕微鏡像および X 線回折の結果より高品質な単結晶構造を得た。次に、白金を堆積することにより、室温で SOT による磁化反転と異常ホール効果による電氣的磁化検出に成功した。さらに、ダンピング定数は 0.012 となりいずれも先行研究の値と比肩する結果となった。これより、酸化物スピンオービトロニクスデバイス応用に向けた礎を築いた。

4. 謝辞

本研究は日本板硝子材料工学助成会令和 5 年度(第 45 回)研究助成を受けて行われました。同助成会に心より感謝申し上げます。

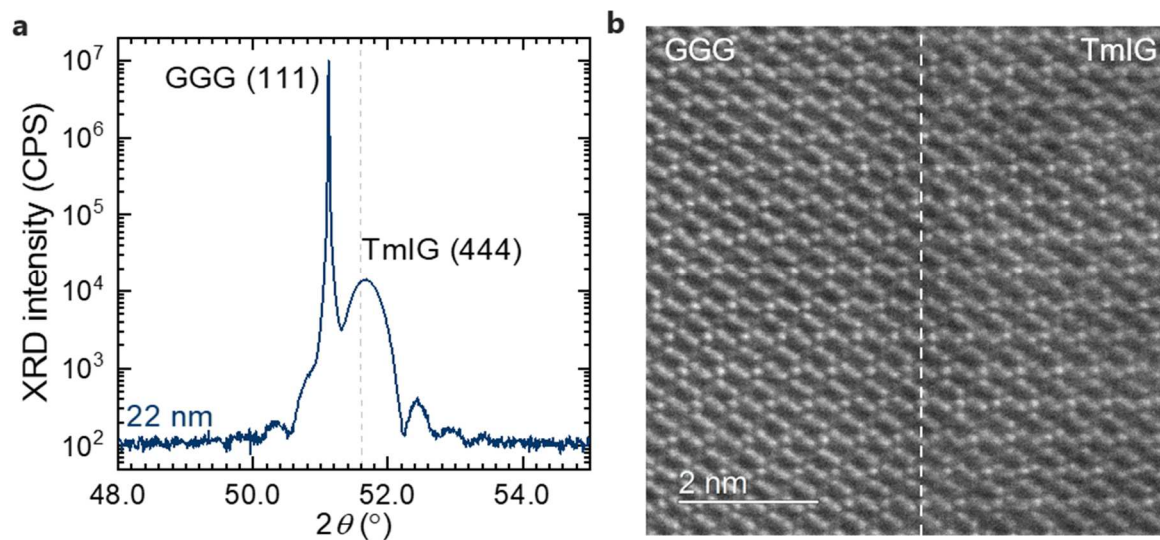


図 1 TmIG 膜の構造評価

a. X 線回折スペクトル b. 断面の透過型電子顕微鏡像

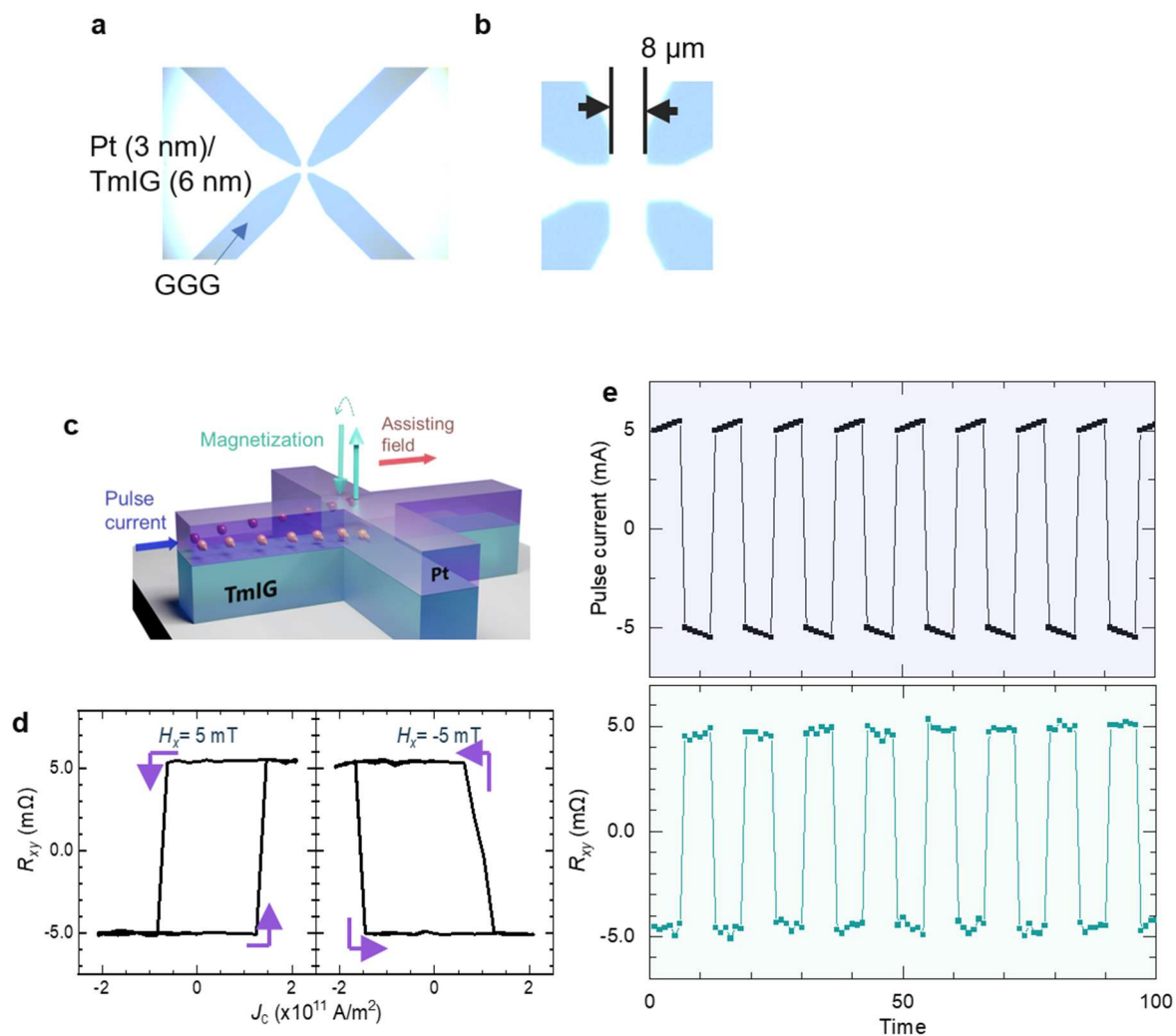


図 2 TmIG 膜の SOT 磁化反転

a. b. 作製したホールデバイスの顕微鏡像(a)およびその拡大像(b)

c. SOT 磁化反転実験の模式図 d. 正負の外部磁場中でのヒステリシスループ

e. 繰り返しパルス印加による磁化反転の実験結果

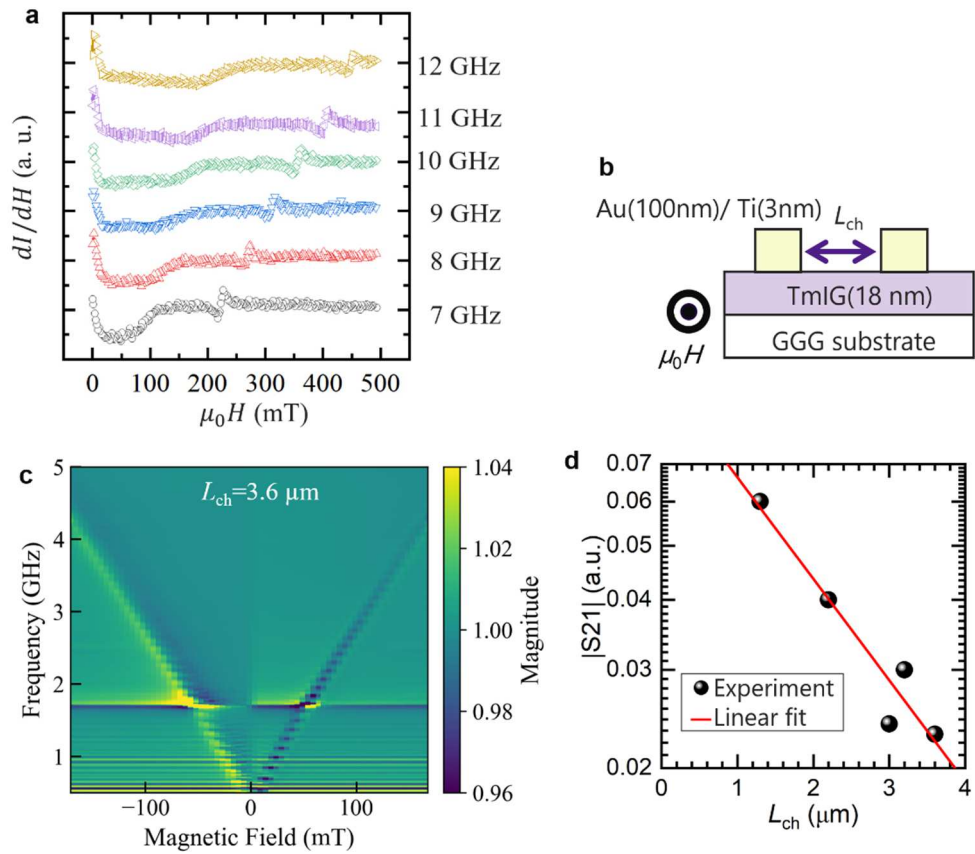


図 3 TmIG のマグノンスピンの流輸送特性

a. 広帯域強磁性共鳴スペクトル **b.** 伝搬スピン波測定の様式図

c. 伝搬スピン波スペクトル **d.** スピン波スペクトル強度の電極間距離依存性

5. 参考文献

- 1) IEA Reports, Energy and AI (2025).
- 2) Q. Shao *et al*, *IEEE Trans. Magn.* **57**, 7 (2021).
- 3) M. N. Agusutrisno, N. Yamashita *et al*, *Thin Solid Films* **788**, 140176 (2024).
- 4) M. N. Agusutrisno, N. Yamashita *et al*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 07SP06 (2024).
- 5) R. Ngaloy, N. Yamashita, S. P. Dash *et al*, *npj Spintronics* **3**, 40 (2025).