# 電圧駆動 MRAM の反転電圧における形状磁気異方性の効果に関する シミュレーション研究

宮崎柊弥<sup>1,2</sup>, 荒井礼子<sup>2</sup>, 今村裕志<sup>2,1</sup>, 安川雪子<sup>1</sup> (<sup>1</sup>千葉工業大学, <sup>2</sup>産業技術総合研究所)

Simulation study on the effect of shape anisotropy on switching voltage of voltage-controlled MRAM Shuya Miyazaki<sup>1,2</sup>, Hiroko Arai<sup>2</sup>, Hiroshi Imamura<sup>2</sup>, Yukiko Yasukawa<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>2</sup>AIST)

#### <u>はじめに</u>

現在製品開発されている MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) は電流制御によって情報の書き 込みが行われるため、既存の揮発性メモリと比較して書き込み電力が大きいという問題を抱えている。この 問題を克服するために、電圧制御で書き込みを行う電圧駆動 MRAM (Voltage-controlled MRAM) が研究され ている。VC-MRAM ではパルス電圧印加によって記憶層の磁気異方性を小さくすることで磁化を反転させ情 報の書き込みを行う。従来の研究では反転電圧に対する形状磁気異方性の効果はあまり考慮されていなかっ たが、素子サイズを小さくすると記憶層のアスペクト比が小さくなり形状磁気異方性の効果が重要になると 考えられる。本研究ではマイクロマグネティクスシミュレーションを用いて素子の直径と反転電圧との関係 を調べたのでその結果について報告する。

#### <u>研究方法と結果</u>

マイクロマグネティクスシミュレーションは mumax3 [1] を用いて行なった。記憶層は円板形状とし、厚 さは 2 nm, 直径は 20 nm ~ 80 nm とした (Fig. 1)。飽和磁化 $M_s \varepsilon$  1 MA/m, ダンピング定数  $\alpha \varepsilon$  0.05, 交換 定数 $A \varepsilon$  20 pJ/m とし、外部磁場 $H_{ext}$  0.04 T  $\varepsilon x$ 軸方向に印加する [2]。初期状態をz軸方向とし、異方性定数  $K_u$ が 0.4 MJ/m<sup>3</sup> ~ 0.8 MJ/m<sup>3</sup>である場合の安定磁化状態を求め、 $K_u$ に対する $m_z$ の変化を調べた。結果を Fig. 2 に示す。 $m_z$ が 0 の時は磁化は面内方向を、1 の時は面直方向を向いていることを表している。素子の直径 が小さくなるにつれて、磁化状態が面内方向から面直方向へ変わる $K_u$ が小さくなっていることがわかる。こ れは素子の直径が小さくなるにつれてz軸方向の反磁場が小さくなるためであると考えられる。

次に、初期状態の $K_u$ を2 MJ/m<sup>3</sup>として磁気構造を緩和させたのち、パルス電圧印加による変化を想定して $K_u$ を0.4~0.7 MJ/m<sup>3</sup>の範囲で変えて磁化ダイナミクスの計算を行い、磁化反転が起こるか確認した。磁化反転は Fig. 2 中の星で示す $K_u$ (=  $K_u^{sw}$ )より小さい場合に起こることがわかった。初期状態の $K_u$ から $K_u^{sw}$ を引いた値が磁化反転に必要な異方性定数の変化( $\Delta K_u$ )であり、素子の直径に対するプロットを Fig. 3 に示す。素子の直径が小さくなるにつれて $\Delta K_u$ が大きくなる。このことから、素子の直径を小さくすると大きな反転電圧が必要になることがわかる。



Fig. 1 Schematic illustration of the free layer of a VC-MRAM.



unit vector for different diameters. Stars indicate  $K_u^{sw}$ .





#### 参考文献

- 1) Arne Vansteenkiste, et al., AIP Advances, <u>4</u>, 107133, (2014).
- 2) R. Matsumoto, S. Yuasa, and H. Imamura, Phys. Rev. Appl. <u>18</u>, 054069 (2022).

# 極薄 Ir キャップ層導入による電圧磁気異方性制御効率の改善

野﨑隆行, 一ノ瀬智浩, 山本竜也, 薬師寺啓, 湯浅新治 (産総研) Improvement of efficiency in voltage-controlled magnetic anisotropy effect by an introduction of an ultrathin Ir capping layer T. Nozaki, T. Ichinose, T. Yamamoto, K. Yakushiji, and S. Yuasa (AIST)

#### 1 はじめに

強磁性超薄膜における電圧磁気異方性制御(VCMA: Voltage-controlled magnetic anisotropy)は従来の電流駆動 と比較して超省電力なスピン制御を可能とする基盤技術として注目を集めており、電圧駆動型(Voltagecontrolled)-MRAM などへの適用が期待されている。VC-MRAM のスケーラビリティー実証および低電圧書 き込みに向けては、多結晶磁気トンネル接合(MTJ)素子における VCMA 効率の増大が求められている。我々 はこれまでに低温ステージを有する量産スパッタ成膜装置(EXIM: 東京エレクトロン株式会社製)を用いて高 品質な MgO/CoFeB 界面の形成を試み、垂直磁気異方性(PMA)やトンネル磁気抵抗効果(TMR)、VCMA 効率 の改善効果について報告してきた<sup>1-3</sup>)。本研究では MgO/CoFeB/極薄キャップ層 X/MgO をトップフリー層の 基本構造とする MTJ 素子において、様々な極薄キャップ層材料の導入が PMA、TMR、VCMA 特性に与え る影響を系統的に調べた。

#### 2 実験方法と結果

熱酸化膜付き Φ 300mmSi ウェハー上に Ta(5 nm)/Pt (5 nm)/Ru(3 nm)/Ta<sub>50</sub>B<sub>50</sub> (5 nm)/Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub> (3 nm)/MgO(2.1 nm)/CoFeB(1 nm)/極薄キャップ層 X(0.2 nm)/MgO(1 nm)/Ru(2 nm)/Ta(3 nm)/Ru(10 nm)構造を作製 した。面内磁界印加下での TMR 測定から PMA および VCMA 特性評価を行うため、下部 CoFeB 層は面内磁 化参照層、上部 CoFeB 層は面直磁化フリー層の 90 度磁化配置型 MTJ となっ

ている。各 CoFeB 層は 100K での低温成長で形成した。極薄 キャップ層 X(0.2 nm)として Ir, Mo, TaB, Mg, Cr, Ti, Ta を導入 した。ポストアニールは温度範囲 200~350℃において無磁界 下で行った。

図1に各ポストアニール温度における VCMA 効率の極薄キャップ材料依存性を示す。極薄キャップ層無し

(MgO/CoFeB/MgO, 57 fJ/Vm)と比較してほとんどのキャップ材料は同等もしくは低い VCMA 効率を示すのに対して、Ir キャップ層を用いた場合は明瞭な増大が見られ、300℃アニール条件下にてキャップ層無しの約 1.8 倍の VCMA 効率(105 fJ/Vm)を示した。同条件下において、PMA 値も約 1.7 倍に増大した。ポストアニール温度の上昇とともに増大する傾向から、極薄キャップ層から MgO/CoFeB 界面への低濃度 Ir 拡散が PMA、VCMA 効率増大の起源であると考えられる。





本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP16007)、 および JSPS 科研費(JP20H05666)助成の結果得られたものである。

- 1) T. Ichinose et al. ACS Appl. Electron. Mater. 5, 2178 (2023).
- 2) A. Sugihara et al. Appl. Phys. Exp. 16, 023003 (2023).
- 3) T. Nozaki et al. APL Mater. 11, 121106 (2023).

### Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 薄膜における反強磁性スピンの高効率変調と双方向反転

村山希1、鮫島寛生1、氏本翔1、豊木研太郎1.2.3、中谷亮一1.2.3、白土優1.2.3

(1大阪大学大学院工学研究科、2大阪大学先導的学際研究機構、3大阪大学 CSRN)

### High efficiency modulation and bipolar switching of antiferromagnetic spin in Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt epitaxial films Nozomi Murayama<sup>1</sup>, H. Sameshima<sup>1</sup>, K. Ujimoto<sup>1</sup>, K. Toyoki<sup>1,2,3</sup>, R. Nakatani<sup>1,2,3</sup>, and Y. Shiratsuchi<sup>1,2,3</sup> (1 Grad. Sch. Eng., Osaka univ., 2 OTRI, Osaka univ., 3 CSRN, Osaka univ.)

<u>はじめに</u>反強磁性体は、漏洩磁場がなく磁気共鳴周波数が THz帯にあることから超高密度・超高速通信デバイスへの応用が期待される。しかしながら、自発磁化を示さないため、磁気モーメントの検出・制御が困難である。我々は、反強磁性材料として、電気磁気効果を示す Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を用いて界面反強磁性スピンの検出・制御を進めており、ゲート電圧により界面スピンの反転磁場を変調できることを示してきた[1]。さらに、その変調効率が4T・nm/V以上の極めて大きくなることを報告してきた。また、この高い変調効率には、界面構造が強く影響するものと考えられている。本研究では、下地層として Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と同じコランダム構造をもつ V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いて、Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 積層膜における反強磁性スピン反転について調査し、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バッファー層の反強磁性スピン反転磁場の変調効率への影響について検討した。

**実験方法** Pt(2 nm)/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(20 nm)/V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(20 nm)/Pt(20 nm)積層膜を α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)基板上に製膜した。製膜には、DC マグネトロンス パッタリング法を用いた。反射高速電子回折法 (RHEED)、逆格 子マッピングを用いて、作製した薄膜の成長方位を評価し、い ずれの層もエピタキシャル成長していることを確認した。ホー ル効果測定に際して、幅 5µm・長さ 25µm のホールデバイスを 作製した。微細加工には、フォトリソグラフィ法、Ar イオンミ リング法を用いた。磁場と電場の印加方向は、いずれも、膜面 直方向とした。

**実験結果** Fig. 1 に、Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt エピタキシャル薄膜のホ ール効果曲線を示す。角型性の良いヒステリシスが観測され、 磁場により界面反強磁性スピンが反転していることが分かる。 また、ゲート電圧によりスピン反転磁場が変調することが分か る。ゼロ電圧付近でのスピン反転磁場の変調効率は 67.38 T・ nm/V となり、強磁性材料の VCMA による変調効率と比較して 約 1000 倍[2]となる。Fig. 2 に、ゲート電圧に対するスピン反転 磁場の変化を示す。強磁性材料では困難な電場による双方向反 転観測され、電気磁気効果による反強磁性スピンの超高効率か つ4象限アクセスを達成した。









[1] K. Ujimoto, Y. Shiratsuchi et al., NPG Asia Mater. 16, 20 (2024). [2] T. Nozaki et al., Sci. Rep. 11, 21448 (2021).

Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Irエピタキシャル薄膜における反強磁性スピン反転磁場の

## 電場変調と電圧誘起双方向反転

鮫島寛生<sup>1</sup>,村山希<sup>1</sup>,氏本翔<sup>1</sup>,豊木研太郎<sup>1,2,3</sup>,中谷亮一<sup>1,2,3</sup>,白土 優<sup>1,2,3</sup> (1大阪大学大学院工学研究科,2大阪大学先導的学際研究機構,3大阪大学 CSRN)

E-field modulation of AFM spin reversal field and bipolar switching in Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ir epitaxial thin film Hiroki Sameshima<sup>1</sup>, Nozomi Murayama<sup>1</sup>, Kakeru Ujimoto<sup>1</sup>, Kentaro Toyoki<sup>1,2,3</sup>, Ryoichi Nakatani<sup>1,2,3</sup>, and Yu Shiratsuchi<sup>1,2,3</sup>

(1 Grad. Sch. Eng., Osaka Univ. 2 OTRI, Osaka Univ., 3 CSRN, Osaka Univ.)

**はじめに** 反強磁性体は,漏洩磁場がなく磁気共鳴周波数が THz 領域にあることから 超高密度・超高速駆動デバイスへの応用が期待される.しかしながら,反強磁性体はスピンが内部で補償されているため,スピンの検出と制御において強磁性体とは異なるアプローチが必要とされている.これまでに我々は,電気磁気効果を示す反強磁性体 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を用いて, Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 積層膜における反強磁性スピン反転とスピン反転磁場の 電場変調について報告してきた[1].また,バルクとは異なる界面の電気磁気効果が発現することを示したが,この結果は,非磁性重金属材料の選択による界面構造の最適化により更なる高効率化が可能であることを示唆する.本研究では, Pt/ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ir 3 層膜における電場による反強磁性スピンの反転について報告する.

**実験方法** 試料作製には DC マグネトロンスパッタリング法を 用い, Pt(2 nm)/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(15 nm)/Ir(20 nm)//α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)薄膜を製膜 した.構造評価には,反射高速電子線回折法及び X 線回折法を 用いた.磁気特性評価には,ゲート電圧を印加しながら異常ホ ール効果を測定する手法を用いた.測定のために,作製した薄 膜はフォトリソグラフィ法及び Ar イオンミリング法を用いて, 幅 5 μm,長さ 25 μm のホール素子に微細加工した.測定時のゲ ート電圧及び磁場の印加方向は,膜面直方向とした.

**実験結果**図1に、275Kで測定したホール電圧のゲート電圧 依存性を示す.磁場は±0.5Tで固定し、電圧を0~-0.9Vで掃 引している.角形の明確なヒステリシスが観測され、両ヒステリ シスにおいて、-0.15V及び-0.80V付近で反強磁性スピンが 反転しており、正負の磁場によりヒステリシスの向きが反転し ていることが分かる.図2に、各磁場(電場)を固定して電場 (磁場)を掃引したときの反強磁性スピンが反転する電場(磁 場)のプロットを示す.電場・磁場のどちらを掃引した際も双 方向の反転が観測された.この4象限のプロットは、反強磁性 スピンの電場による変調が電気磁気効果由来であることを示唆 している.

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号 22H01757)および文部科学省「スピントロニクス学術研究基盤と 連携ネットワーク拠点(Spin-RNJ)」の支援を受けて行われました。

[1]. K. Ujimoto, Y. Shiratsuchi et al., NPG Asia Mater. 16, 20 (2024).



# W/CoFeB 界面への Gd-CoFeB 合金挿入による ダンピングライクトルクの向上

○(M2)徳永 和彦<sup>1</sup>, 黒川 雄一郎<sup>1</sup>, 湯浅 裕美<sup>1</sup> (九州大学<sup>1</sup>)

Improvement of dumping-like torque by inserting Gd-CoFeB alloy at the W/CoFeB interface OKazuhiko Tokunaga<sup>1</sup>, Yuichiro Kurokawa<sup>1</sup>, Hiromi Yuasa<sup>1</sup>

(Kyushu Univ.<sup>1</sup>)

#### 背景

重金属/強磁性体界面で発生するスピンオービットトルク (SOT) は、電流による磁化制御方法として MRAM や磁壁、スキルミオンデバイスなどに応用が可能であり、注目されている。この SOT は、大きなスピン軌道 相互作用 (SOC) に由来するスピンホール効果 (SHE) によって誘起される。さらに近年、SOC の大きさによ らず軌道角運動量が偏極する軌道ホール効果 (OHE) が次世代の磁化制御方法として注目されてきた。しか し、OHE に基づく軌道流は強磁性体に直接トルクを与えることが難しいため、軌道流からスピン流への変換 過程が必要となる<sup>1)</sup>。本研究では、SOC の大きいと予想される Gd を磁性層 CoFeB と合金化し、重金属と強 磁性体の界面に挿入することによって軌道流をスピン流に変換する。重金属での SHE によるスピン流と、Gd-CoFeB で OHE から変換されたスピン流の足し合わせでトルクの増強を目指し、ダンピングライクトルク の測定を行った。

#### 実験方法

熱酸化 Si 基板上に、W (5 nm)/Gd<sub>50</sub>(Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub>)<sub>50</sub> (*t*<sub>Gd-CFB</sub> nm)/CoFeB (1.0 nm)/MgO (1.5 nm)/Ta (3 nm) (*t*<sub>Gd-CFB</sub> =0, 0.3, 0.6)の多層膜をスパッタリングにより成膜した。今回、スピン流と軌道流の注入源としてWを使用した。 CoFeB に垂直磁気異方性を持たせるために、試料を 270℃で熱処理した。試料はフォトリソグラフィにより ホールバー状に加工した。ダンピングライクトルクは高調波ホール電圧測定によって求めた。印加した交流 電流と同方向に面内磁場を印加し、基本波および第二高調波を測定した。それらのフィッティング結果から ダンピングライクトルクによって生じる有効磁場を見積もり、実効ダンピングライクトルク係数 (ξ<sub>DL</sub>)を計算 した<sup>-2</sup>。

#### 実験結果

Fig.1 は高調波ホール電圧測定より求めた  $\xi_{DL}$  を示している。結果として、Gd-CoFeB を挿入することによって  $\xi_{DL}$  が向上した。挿入層の膜厚の増加に対して  $\xi_{DL}$  は線形に増加することが分かった。これは、W から流れ

込むスピン流が Gd-CoFeB 中で減衰する可能 性も考えられるが、それに対して、Wから流 れ込む軌道流が Gd-CoFeB 中の Gd によってス ピン流へと変換される効果が支配的であるこ とを示唆する。その結果、最終的に Gd-CoFeB の挿入と厚膜化により、CoFeB の磁化に働くト ルクが増大したと考えられる。この結果は磁化 制御効率をさらに向上させる道筋を示すもの である。

#### 参考文献

- 1) G. Sala and P. Gambardella Phys. Rev. Research 4, 033037 (2022)
- M. Hayashi, J. Kim, M. Yamanouchi, and H. Ohno Phys. Rev. B 89, 144425 (2014)



Fig.1 Dependence of effective damped-like torque efficiency ( $\xi_{DL}$ ) on insertion layer thickness

## 垂直磁化 W/CoFeB/MgO における電流駆動磁壁移動機構の解析

梅津信之,カンサミカエル,橋本進,近藤剛,門昌輝 (キオクシア株式会社 先端技術研究所)

Analysis of current induced domain wall motion in perpendicularly magnetized W/CoFeB/MgO systems

#### N. Umetsu, M. A. Quinsat, S. Hashimoto, T. Kondo, M. Kado

(Frontier Technology Research and Development Institute, Kioxia Corporation)

#### <u>はじめに</u>

Racetrack memory<sup>1</sup>) に代表される電流駆動磁壁移動現象を利用するデバイスの実現には、磁壁移動層 の磁気特性の調整による磁壁ダイナミクスの制御が要求される.垂直磁気異方性を有する W/CoFeB/MgO は spin orbit torque (SOT) 駆動の磁壁移動が生じる代表的な積層膜であるが、磁壁移動挙動の磁気特性依 存性は十分に調査されていない.我々はこの積層膜において、先行研究と一致する電流方向の磁壁移動 だけでなく<sup>2</sup>,電子流方向の磁壁移動も観測した.後者はSpin Hall angle とDzyaloshinskii-Moriya interaction

(DMI)の符号組合せ<sup>3)</sup>から予想される結果と矛盾しており,機構解明のためには実際の磁壁移動層の 磁気特性を反映したモデル構築が望まれる.本研究では,電流駆動磁壁移動に関与する磁気特性を系統 的に評価した結果,およびこれに基づいて磁壁移動特性をモデル計算した結果について報告する.

#### <u>解析方法</u>

飽和磁化,垂直磁気異方性は vibrating sample magnetometry 測定, DMI 磁場とデピニング磁場は磁区バ ブル拡大実験<sup>4,5)</sup>, SOT 効率は harmonic Hall 電圧測定<sup>6)</sup> により評価した.磁壁移動方向と磁壁移動しき い値電流密度は, 2um 幅の磁性細線に 20ns のパルスを印加する電流駆動磁壁移動実験において,磁壁位 置変化を磁気光学顕微鏡により測定することで取得した.磁壁移動特性の計算は磁壁ダイナミクスを磁 壁位置と磁壁磁化角度の2変数の時間発展で記述する1次元モデル<sup>7,8)</sup>を用いて実施した.数値計算に は磁気特性の評価結果を反映したパラメータを用いた.ただし,直接的な測定手法が確立していない外 因性ピニング磁場にはデピニング磁場を代用した.

#### <u>結果</u>

Fig.1 に 5 つのサンプルの磁壁移動しきい値電流密度 の実験結果と計算結果の比較を示す(符号は磁壁移動方 向を表す).成膜アニール温度 300 (400) ℃のサンプル において磁壁移動方向が電子流(電流)方向となる実験 結果をモデル計算によって再現することに成功した.モ デル解析により磁壁速度と磁壁移動しきい値電流密度 の磁気特性依存性を定式化し,SOT,DMIの他にSTT や外因性ピンニングも磁壁移動方向の決定因子である ことを見出した.

#### 参考文献

- 1) S. S. P. Parkin et al., Science **320**, 190 (2008).
- 2) J. Torrejon et al., Nat. Commun. 5, 4655 (2014).
- 3) M. Kim et al., J. Magn. Magn. Mater. 563, 169857 (2022).
- 4) R. Soucaille et al., Phys. Rev. B 94, 104431 (2016).
- 5) V. Jeudy et al., Phys. Rev. B 98, 054406 (2018).
- 6) M. Hayashi et al., Phys. Rev. B 89, 144425 (2014).
- 7) G. Tatara et al., Phys. Rep. 468, 213 (2008).
- 8) E. Martinez et al., J. Appl. Phys. 116, 023909 (2014).



Fig.1 Comparison of experiments and simulations on the threshold current density of domain wall motion (PHE: planar Hall effect, AHE: anomalous Hall effect)