

## Co/Pt 界面への酸化層挿入によるスピン軌道トルクの巨大変調

長谷川顕登, 小山知弘<sup>\*,\*\*</sup>, 千葉大地<sup>\*,\*\*</sup>

(東大, \* 阪大産研, \*\* 阪大 CSRN)

Significant modulation of spin-orbit torque by inserting oxidation layer into Co/Pt interface

K. Hasegawa, T. Koyama<sup>\*,\*\*</sup>, and D. Chiba<sup>\*,\*\*</sup>

(The Univ. of Tokyo, \*ISIR, Osaka Univ., \*\*CSRN, Osaka Univ.)

## はじめに

強磁性金属 / 重金属接合膜におけるスピン軌道トルク (SOT) 磁化反転は次世代の情報書き込み手法として磁気メモリへの応用が期待されているが、本格的な実用化に向けてはトルク生成の高効率化が必要とされている。これまでに強磁性金属層もしくは重金属層の酸化に伴う SOT の巨大変調が報告されており<sup>1,2)</sup>、界面における酸化が重要と考えられている。しかしながら、一方の層全体が酸化されていたために界面酸化による影響は不明瞭だった。そこで本研究では強磁性金属 (Co) / 重金属 (Pt) 界面に薄い酸化層 (CoO) を挿入することで界面酸化の効果を直接検証した<sup>3)</sup>。

## 実験手法

まず、Ta/Pd/Co 層を熱酸化 Si 基板上に RF スパッタリングを用いて製膜した。次に試料を大気暴露することで最上層である Co 層の表面を酸化させ、CoO 層を形成した。最後にその上から Pt 層を製膜し、これを界面酸化試料 (Ta/Pd/Co/CoO/Pt) とした。比較用に単位面積あたりの磁気モーメントが界面酸化試料と同程度の非酸化試料 (Ta/Pd/Co/Pt) も作製した。SOT 有効磁場は面直磁化容易試料における高調波ホール測定法によって求めた<sup>4)</sup>。

## 結果および考察

界面酸化試料および非酸化試料におけるダンピング (フィールド) ライク SOT 有効磁場  $H_{DL(FL)}$  の大きさを Fig. 1 に示す。横軸は Pt 層中の電流密度  $J_{Pt}$  である。界面酸化試料では金属 Co 層とスピン流源である Pt 層の電気的な結合は絶縁体の CoO によって遮断されているにも拘らず、非酸化試料に比べて  $H_{DL(FL)}$  が約 4 (10) 倍に増大している。

SOT 増大の起源としては、電荷密度分布の変化に起因した Co/Pt 界面におけるラシュバ・エデルシュタイン効果の増大が考えられる。ラシュバ・エデルシュタイン効果は主にフィールドライクトルクに寄与するとされ、 $H_{FL}$  の方が  $H_{DL}$  よりも顕著に増大したという実験結果とも矛盾しない。

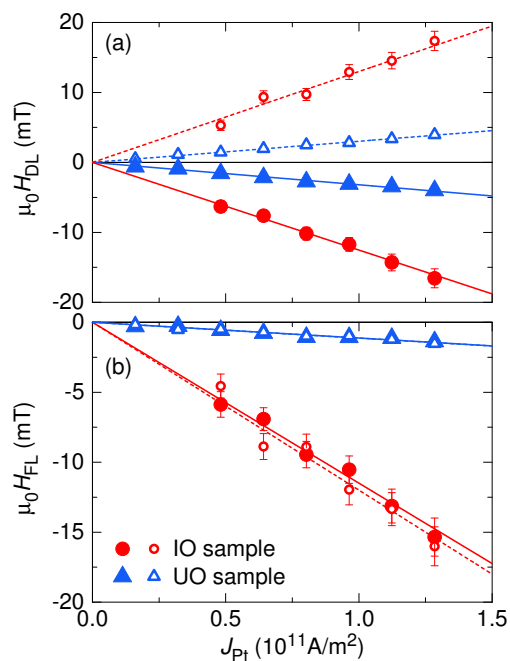
本研究により、SOT デバイスの開発における界面酸化の有用性が示された。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費および Spin-RNJ による援助の元に行われた。

## 参考文献

- 1) X. Qiu et al.: *Nat. Nanotechnol.*, **10**, 333 (2015).
- 2) K.-U. Demasius: *Nat. Commun.*, **7**, 10644 (2016).
- 3) K. Hasegawa et al.: *Phys. Rev. B*, **98**, 020405(R) (2018).
- 4) M. Hayashi et al.: *Phys. Rev. B*, **89**, 144425 (2014).



**Fig. 1** (a) The damping- and (b) field-like effective fields as a function of current density in the Pt layer for the interface-oxidized (IO) and unoxidized (UO) samples.

## SiN / GdFeCo / Ta 三層膜のスピントラックトルクの Gd 組成依存性

川上圭祐, 門脇圭佑, 大島大輝, 加藤剛志, 岩田聡  
(名古屋大)

Gd content dependence of spin orbit torques of SiN / GdFeCo / Ta trilayers

K. Kawakami, K. Kadowaki, T. Kato, D. Oshima, S. Iwata  
(Nagoya Univ.)

## はじめに

Gbit を超える MRAM 開発およびその低消費電力化において、磁性薄膜の高効率な磁化反転手法の開発が求められている。スピントラックトルク (SOT) を利用した磁化反転は、スピントランスファートルク (STT) 磁化反転に比べて高速化、低消費電力化が可能であり、また書き込みマージンの確保が容易であるなどの利点がある<sup>1)</sup>。本研究では、組成の異なる GdFeCo 膜に隣接 Ta 層から印加されるスピントラックトルクの Gd 組成依存性を調べたので報告する。GdFeCo は Gd と遷移金属の磁気モーメントが反平行に結合したフェリ磁性体であるため、組成によって正味磁化と FeCo の磁気モーメントを平行、反平行とすることができる。

## 実験方法

超高真空マグネトロンスパッタ装置により、熱酸化膜付き Si 基板上に Ta (20 nm) / Gd<sub>x</sub>(Fe<sub>90</sub>Co<sub>10</sub>)<sub>100-x</sub> (5 nm) / SiN (3 nm) を成膜した。素子の加工には、電子ビームリソグラフィと Ar<sup>+</sup>イオンエッチングを用い、幅 1 ~ 8 μm のホールクロス構造を作製した。GdFeCo 膜の SOT は周波数 310 Hz の交流電流  $I_{AC}$  をホールクロスに流すことで現れる異常 Hall 効果 (AHE) 電圧の高調波成分より見積もった<sup>2)</sup>。交流電流と平行および垂直方向に磁界  $H_{ext}$  を加えることによって、ダンピングライクトルク  $\tau_{DL}$  およびフィールドライクトルク  $\tau_{FL}$  を磁界に換算したもの (それぞれ,  $H_{DL}$ ,  $H_{FL}$ ) を得た。

## 実験結果

Fig. 1 は SiN / GdFeCo / Ta 三層膜の正味磁化  $M_{net}$ ,  $H_{DL}$ ,  $H_{FL}$ ,  $\tau_{DL}$ ,  $\tau_{FL}$  の Gd 組成依存性を示している。ここで、 $\tau_{DL}$ ,  $\tau_{FL}$  は高調波法により得られる  $H_{DL}$ ,  $H_{FL}$  に  $M_{net}$  を乗じることで見積もった。GdFeCo の補償組成は AHE の符号および  $M_{net}$  の Gd 組成から Gd 24.8 at.% 付近と見積もられる。Gd 組成が補償組成に近づくにつれ、 $|H_{DL}|$ ,  $|H_{FL}|$  は増加している。しかしながら、これに  $M_{net}$  を乗じた  $|\tau_{DL}|$ ,  $|\tau_{FL}|$  は Gd 組成  $22 \leq x \leq 28$  でおおむね一定値となっている。これはスピントラック効果により Ta 層より流入するスピントラックの角運動量が  $M_{net}$  に移行しているためと考えられる。 $H_{FL}$ ,  $\tau_{FL}$  は補償組成で符号が反転している。このような傾向は  $H_{DL}$ ,  $\tau_{DL}$  には現れていない。 $\tau_{DL}$ ,  $\tau_{FL}$  はそれぞれ、 $\mathbf{m} \times \mathbf{m} \times \mathbf{s}$ ,  $\mathbf{m} \times \mathbf{s}$  に比例する。ここで、 $\mathbf{m}$  は磁気モーメント、 $\mathbf{s}$  は流入するスピントラックのスピンドirection である。 $\tau_{FL}$  は  $\mathbf{m}$  の一次に比例し、補償組成で符号が反転することから、スピントラックは FeCo のモーメントにトルクを与えると考えられる。

## 参考文献

- 1) L. Liu *et al.*, Science, **336**, 555 (2012).
- 2) M. Hayashi *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 114425 (2014).

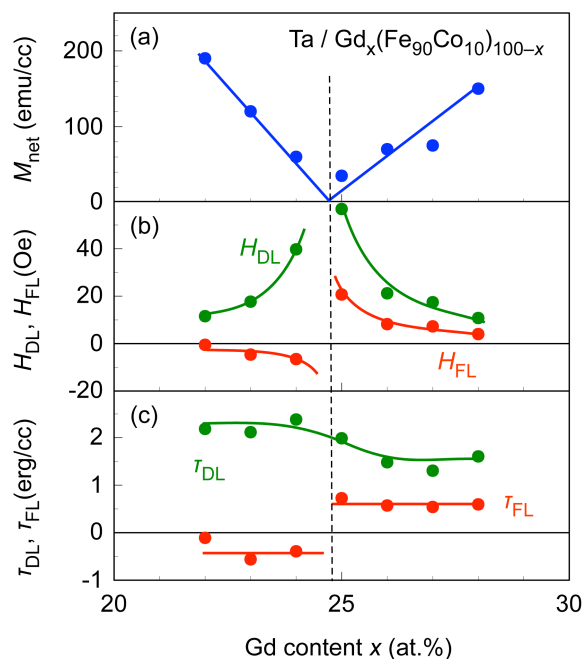


Fig. 1 Gd composition dependence of (a) net magnetization  $M_{net}$ , (b) damping- and field-like fields,  $H_{DL}$  and  $H_{FL}$ , respectively, and (c) damping- and field-like torques,  $\tau_{DL}$  and  $\tau_{FL}$ , respectively, in SiN / Gd<sub>x</sub>(Fe<sub>90</sub>Co<sub>10</sub>)<sub>100-x</sub> / Ta trilayers.

# NiAl バッファ上に成長した極薄 MnGa 垂直磁化膜の スピン軌道トルク磁化反転

下橋史明, グエンビエットバオ, 山ノ内路彦, 植村哲也  
(北海道大学)

Spin-orbit-torque induced magnetization switching for an ultra-thin MnGa grown on NiAl buffer layer  
Fumiaki Shimohashi, Nguyen Viet Bao, Michihiko Yamanouchi, and Tetsuya Uemura  
(Hokkaido University)

## 1. はじめに

スピン軌道トルク(SOT)磁化反転は次世代スピントロニクスデバイスの重要な基盤技術として最近注目されている。MnGa は比較的強い垂直磁気異方性を有すること、飽和磁化が比較的小さいこと、スピン偏極率が比較的高いことなどの特徴を持つことから、SOT デバイスの有望な電極材料として期待されている。しかしながら、SOT 磁化反転に必要な、厚さ数 nm 以下の良質な極薄膜の作製は容易ではなく、これまで SOT 磁化反転の実証は、MgO 基板上的 CoGa バッファ層上 [1]や GaAs 基板上 [2]に形成した MnGa に限られている。今回我々は、NiAl バッファ層を用い、厚さ 1 nm の極薄 MnGa に対し、良好な垂直磁化特性を確認するとともに、SOT 磁化反転を実証したので報告する。

## 2. 実験方法

MgO(001)単結晶基板上に、(基板側から) MgO buffer (10 nm)/NiAl buffer (3 nm)/MnGa (1 or 2 nm)/Ta (5 nm)/MgO cap (2 nm) からなる積層構造を成長した。NiAl (MnGa)は室温で堆積後、540 (400)°C でアニールを施した。成膜した層構造をホールバー形状に加工し、SOT 磁化反転特性を室温で測定した。

## 3. 結果及び考察

Fig. 1 に、成膜した素子の異常ホール効果測定結果を示す。厚さ 1 nm のにおいても明瞭な垂直異方性を示し、NiAl バッファ層は良好な垂直磁化特性を有する MnGa 極薄膜の形成に有効であることが分かった。Fig. 2 に厚さ 1 nm の MnGa に対する SOT 磁化反転の結果を示す。図の縦軸は規格化した異常ホール信号、横軸はホールバーに流したパルス電流  $I_p$  の大きさである。また、Deterministic switching のため、電流方向に補助磁場を  $\mu_0 H_x = \pm 0.1$  T 印加した。 $I_p \cong \pm 15$  mA で、異常ホール抵抗の明瞭な変化が観測され、これは、Ta 中で生成されたスピン流による MnGa の SOT 磁化反転を明瞭に示す結果である。

### 参考文献

- 1) R. Ranjbar et al., Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 120302 (2016).
- 2) K. Meng et al., Sci. Rep. **6**, 38375 (2016).

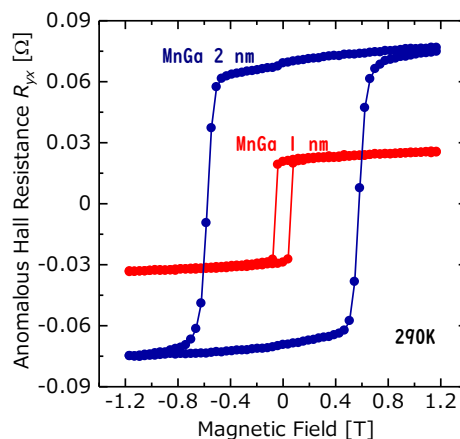


Fig. 1. Anomalous Hall resistance  $R_{yx}$  for NiAl/MnGa/Ta stack as a function of out-of-plane magnetic field.

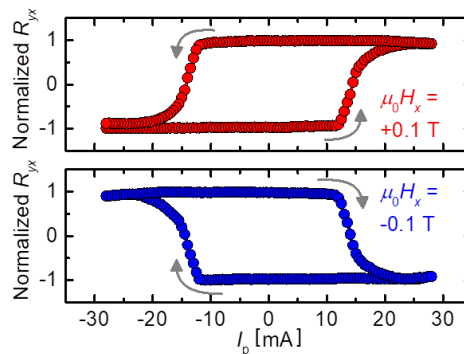


Fig. 2. Normalized  $R_{yx}$  as a function of pulse current  $I_p$  with the duration of 1 s under  $\mu_0 H_x = \pm 0.1$  T.

## MgO/Co/Pt 積層膜における電界アシストスピン軌道トルク磁化反転

國島 和哉, 周 興, 大島 大輝, 加藤 剛志, 岩田 聡  
(名古屋大学)

Electric-field-assisted spin orbit torque switching in MgO/Co/Pt trilayers

K.Kunishima, X.Zhou, D.Oshima, T.Kato, S.Iwata  
(Nagoya University)

## はじめに

次世代不揮発性メモリとして注目されている磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)には、書き込み時の消費電力が大きいという欠点があり、新たな磁化反転の手法として、スピンホール効果を用いた磁化反転が検討されている<sup>1)</sup>。しかし、この手法でも純スピン流を生成するために、重金属膜に  $10^6 \sim 10^7$  A/cm<sup>2</sup> 程度の大きな電流密度を必要とする。近年、磁性層に電界を印加することにより界面異方性を制御し、スピン軌道トルク(Spin-Orbit-Torque, SOT)磁化反転の反転電流密度を制御することが報告されている<sup>2)</sup>。ここでは、垂直磁気異方性を示す MgO/Co/Pt 積層膜において、電界による磁気特性の制御と電界アシストスピン軌道トルク磁化反転について調べた。

## 実験方法

超高真空マグネトロンスパッタリング装置を用いて、MgO (10 nm) / Co (0.4 nm) / Pt (3 nm) / SiN (5 nm) / (熱酸化膜付き) Si 基板を成膜した。電子線露光装置と Ar<sup>+</sup>イオンエッチング装置を用い、異常ホール効果測定用の幅 3 μm、6 μm の十字パターンに加工した。その後、電圧を印加して測定を行うため、フォトリソグラフィとスパッタリングにより絶縁層パターン HfO<sub>2</sub> (100 nm) と電極パターン Al (100 nm) を形成した (Fig. 1)。なお、HfO<sub>2</sub> 成膜時の Ar 圧  $P_{Ar,HfO_2}$  は 0.1 ~ 4 Pa とした。異常ホール効果は、膜面法線方向に 1 kOe の外部磁界を印加して測定した。SOT 磁化反転は、面内パルス電流 (パルス幅 10 μs ~ 1 ms) を印加後にホール抵抗を測定することで行った。このとき、電流方向に外部磁界を 200 Oe 印加した。これらの測定時に、Al 電極にゲート電圧  $V_G = -20$  V ~ +20 V を印加し、電界印加効果を調べた。

## 実験結果

Fig. 2 はゲート電圧  $V_G = -20$  V, +20 V を印加した場合の SOT 磁化反転の結果である。電流パルス幅は 0.1 ms であり、反転電流密度  $J_c$  は  $V_G = +20$  V のとき  $3.95 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>,  $V_G = -20$  V のとき  $3.66 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup> と 20 %/(V/nm) 程度の  $J_c$  の変化が確認された。Fig. 3 は SOT 磁化反転における、 $J_c$  の変化率の電流パルス幅  $\tau$  依存性を示している。 $P_{Ar,HfO_2}$  が 0.4 Pa のものと 1 Pa のものについて  $J_c$  の変化率を比較したところ  $P_{Ar,HfO_2} = 1$  Pa の方が大きいことが確認された。また、 $P_{Ar,HfO_2} = 0.4$  Pa, 1 Pa いずれも  $J_c$  の変化率は  $\tau = 0.1$  ms で最大となった。

## 参考文献

- 1) L.Liu et al., Phys. Rev. Lett., **109**, 096602 (2012).
- 2) T. Inokuchi et al., Appl. Phys. Lett., **110**, 252404 (2017).

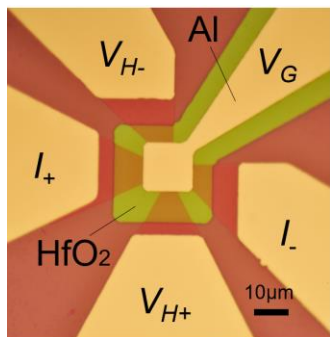


Fig. 1 Optical microscope image of the microfabricated MgO / Co / Pt trilayers.

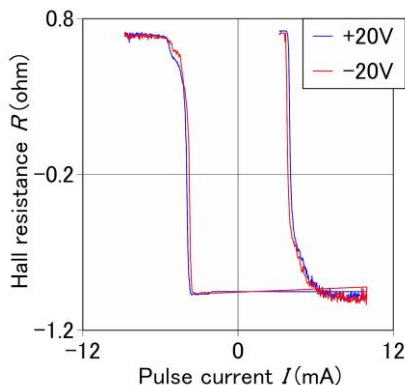


Fig.2 SOT switching of microfabricated MgO / Co / Pt measured under  $V_G = \pm 20$  V (Current pulse width 0.1 ms,  $P_{Ar,HfO_2} = 1$  Pa).

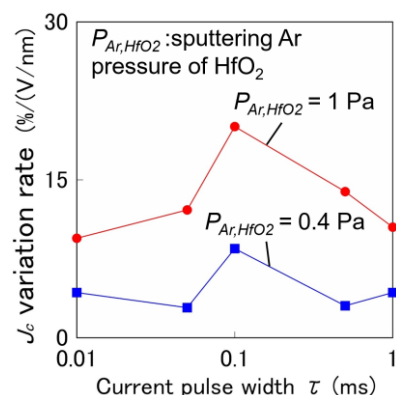


Fig.3 Pulse width dependence of  $J_c$  variation rate of SOT switching of MgO / Co / Pt trilayers ( $P_{Ar,HfO_2} = 0.4$  and 1 Pa).

## Domain wall propagation by spin-orbit torques in in-plane magnetized systems

Ryuhei Kohno<sup>1</sup>, João Sampaio<sup>1</sup>, Stanislas Rohart<sup>1</sup> and André Thiaville<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Physique des Solides, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Orsay, France

E-mail: ryuhei.kohno@u-psud.fr

The effect of damping-like spin-orbit torque (DL SOT) on in-plane domain walls (DWs) in tracks was studied by micromagnetic simulations and analytically. We considered a magnetic thin film on a heavy metal layer and investigated the situation where spin polarized current from the heavy layer is injected to the magnetic layer (Fig. a). We find that DL SOT can drive vortex DWs (VDWs) more efficiently than spin-transfer torque (STT) in a comparable system, whereas transverse DWs (TDWs), the other typical DW structure in soft tracks, are not driven in the absence of Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI). The trajectories of VDWs with different core polarities and windings have different propagation directions and dissipations toward the edge (Fig. b). Our analysis based on the Thiele equation shows that the driving force for the vortex DW is associated with a distortion from the perfect vortex configuration due to geometrical confinement. This distortion is higher, and the SOT DW driving is more efficient, in narrower, thinner tracks. Also it is revealed that the propagation direction depends on the core polarities, and the dissipation depends on the windings. In the presence of DMI, this distortion is also enhanced only in a certain direction, leading to faster movements with one core polarity and slower movements with the other. Interestingly DMI enhances the distortion of TDWs as well and it produces the driving force. In the end TDWs can propagate even faster than VDWs by SOT if the system has the DMI. We show also that it is possible to determine the relative amplitudes of STT and DL SOT by comparing the motion of different vortex DW structures in the same track.

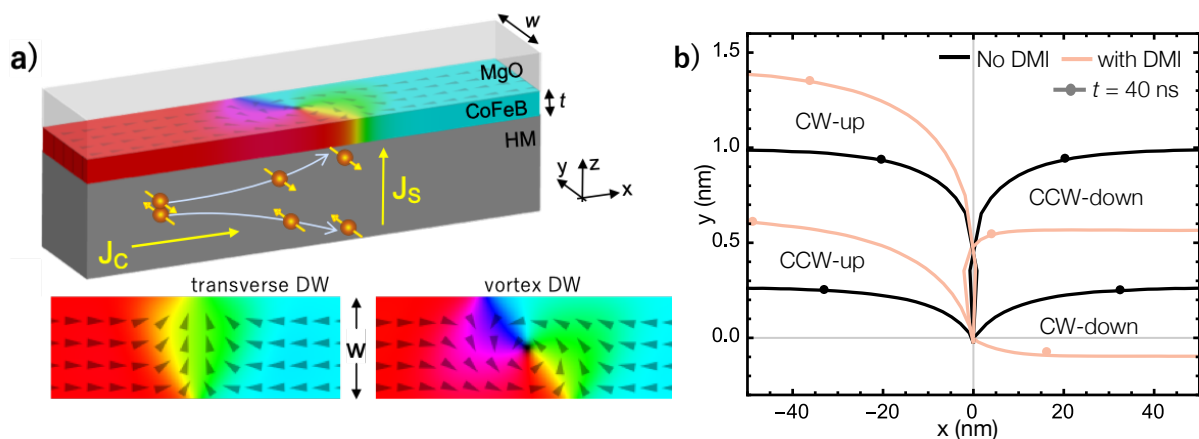


Fig. a: Schematic of SOT in a track of HM/CoFeB/MgO with in-plane DW structures. A charge current  $J_C$  flows mainly in the HM layer and induces a spin accumulation in the CoFeB layer

Fig. b: Trajectories of VDW cores with (black) and without (brown) DMI ( $J = 10 \text{ GA/m}^2$ ,  $t=5 \text{ nm}$ ,  $w=150 \text{ nm}$ ).