

## 高磁気抵抗率と低閾電流密度の両立を目指す

## CoFeB/Tb-Fe 垂直磁化細線の電流誘起磁化反転の観察

藤本真大、上穂木有樂、黒川雄一郎、湯浅裕美  
(九州大学)

Investigation of current-induced magnetization switching in CoFeB/Tb-Fe wire for both high magnetoresistance and low operating current density

Masahiro Fujimoto, Uraku Kamihoki, Yuichiro Kurokawa, Hiromi Yuasa  
(Kyushu Univ.)

## はじめに

重金属/強磁性体界面で発生するスピナービットトルク(SOT)は電流による磁化反転を利用した Magnetic Random Access Memory (MRAM)などに応用が可能であり、注目されている。我々がこれまでに研究を行ってきた希土類フェリ磁性合金は、垂直磁気異方性と低い飽和磁化を有し、それにより低い閾電流密度での電流誘起磁化反転が可能である [1]。一方で、MRAM 応用を考えた場合、素子の磁気抵抗率が十分に大きくなければならず、希土類磁性合金は磁気抵抗率が低いため、応用を見据えると十分ではなかった。そこで今回、希土類磁性合金 Tb-Fe と高磁気抵抗率材料として一般的に用いられる CoFeB を磁気結合させ、高磁気抵抗率と低閾電流密度の両立を狙った。

## 実験方法

熱酸化Si基板上にTa/MgO/CoFeB/Tb-Fe/Pt多層膜をスパッタにより成膜した。多層膜の模式図をFig.1に示す。SOTを注入するための重金属層としてはPtを用いた。試料はフォトリソグラフィによりパターンニングを行い、リフトオフ法によりホールバー状に加工した。またCoFeBに垂直磁気異方性を持たせるために、素子作製後に細線を200°C15分で熱処理した。試料の磁気特性は振動試料型磁力計

(VSM)を用いて行った。電流誘起磁化反転の観察は一定面内磁場中で電流を印加し、ホール電圧の変化を観察する事で行った。

## 実験結果

まず、作製した多層膜の垂直磁場中でのVSM測定を行ったところ、分裂のない一つのヒステリシスが得られ、垂直磁気異方性が得られていること、かつCoFeBとTb-Feが磁気的に結合していることが分かった。次に、一定面内磁場を印加してホール電圧の変化を観察したところ、Fig.2のように閾電流密度で急峻なホール電圧の変化が観察され、Pt層からのSOTによって磁化反転が起こっていることがわかった。結果を解析したところ、CoFeB/Tb-Fe細線では閾電流密度( $J_{th}$ )は約 $10.0 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ だった。一方、磁化反転層がCoFeBのみの場合、 $J_{th}$ は約 $21.1 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ であることが報告されており [2]、今回の試料ではより低い閾電流密度が得られていることが分かった。

## 参考文献

[1] M. Wakae et al., Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SBBI02 (2019), [2] H.-Y. Lee et al., APL Mater. **7**, 3 (2018)

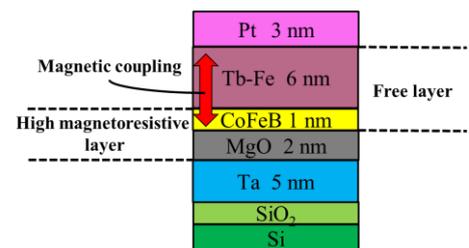


Fig.1 Schematic illustration of present film

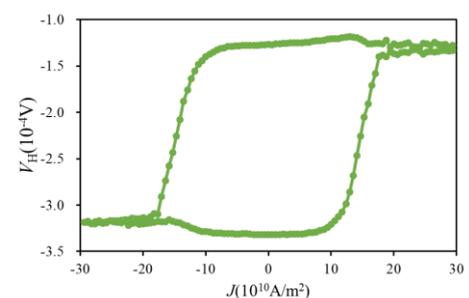


Fig.2 Anomalous Hall Voltage  $V_H$  as a function of current density  $J$  under in-plane magnetic field  $H_x = 1400 \text{ Oe}$

## Ni-Fe 単層膜におけるスピン軌道トルク

関剛斎<sup>1,2</sup>、ラウヨンチャン<sup>1,2</sup>、飯浜賢志<sup>2,3,4</sup>、高梨弘毅<sup>1,2,5</sup>

(<sup>1</sup>東北大金研、<sup>2</sup>東北大 CSRN、<sup>3</sup>東北大学際研、<sup>4</sup>東北大 WPI-AIMR、<sup>5</sup>東北大 CSIS)

Spin-orbit torque in a Ni-Fe single layer

T. Seki<sup>1,2</sup>, Y.-C. Lau<sup>1,2</sup>, S. Iihama<sup>2,3,4</sup>, and K. Takanashi<sup>1,2,5</sup>

(<sup>1</sup>IMR, Tohoku Univ., <sup>2</sup>CSRN, Tohoku Univ., <sup>3</sup>FRIS, Tohoku Univ., <sup>4</sup>WPI-AIMR, Tohoku Univ., <sup>5</sup>CSIS, Tohoku Univ.)

**はじめに** スピンホール効果(SHE)に代表される電流-スピン流の変換現象を利用すると、非磁性体(NM) / 強磁性体(FM)の2層構造において NM でスピン流を生成し FM の磁化にトルクを生じさせることができる。これは、スピン軌道相互作用を起源としたスピン流が作り出す量子力学的トルクということで、スピン軌道トルク(SOT)と呼ばれる。これまでは主に NM 層の材料に注目してスピン変換の研究が進められてきたが、最近になって FM 層においてもスピン流を生成できること<sup>1-2)</sup>、FM 層で生成したスピン流が FM 自身の磁化に SOT を作用させること<sup>3-6)</sup>が報告されるようになった。さらにこの自己誘導的な SOT を用いて、Ni-Fe(パーマロイ; Py)単層からなるナノコンタクトデバイスにおいて、SOT 誘起と考えられるスピントルク発振も観測されている<sup>7)</sup>。これは SOT を動作原理とするスピントロニクスデバイスの新しい可能性を示唆する結果であるが、自己誘導的な SOT の発生メカニズムは現在のところ統一的な理解が得られていない。そこで本研究では、SOT の実験で広く用いられている Py の自己誘導的な SOT に着目し、Py 単層膜におけるスピントルク強磁性共鳴(ST-FMR)を測定し、ダンピングライクトルクおよびフィールドライクトルクの Py 膜厚依存性を系統的に調べた。

**実験結果** イオンビームスパッタリング法を用いて熱酸化シリコン基板上に薄膜試料を作製した。本研究では「非対称構造の Py (Asym-Py)」と「対称構造の Py (Sym-Py)」の2種類の構造の試料を準備した。Asym-Py は Si-Ox 基板 // Py ( $t$  nm) / Al-O (5 nm)の積層構造からなり、Sym-Py は Si-Ox 基板 // Al-O (5 nm) / Py ( $t$  nm) / Al-O (5 nm)の積層構造を持つ。Py 層の層厚  $t$  は 1.5 nm から 10 nm の範囲で変化させ、成膜温度は全て室温とした。量子干渉素子磁束計を用いて磁気特性を評価した。作製した薄膜をフォトリソグラフィおよびイオンミリングによりコプレーナ導波路形状へと加工した。信号発生器を用いて高周波電力をコプレーナ導波路素子へと印加し、整流効果によって現れる直流電圧をロックインアンプにより検出することで ST-FMR を測定した。

Asym-Py と Sym-Py の両構造において、フィールドライクトルクが検出された。一方で、ダンピングライクトルクは  $t \leq 3$  nm の Asym-Py のみで観測され、膜面垂直方向への構造対称性の急峻な変化がスピン流の発生に寄与していることが示唆された。これらの結果をもとに、強磁性単層における ST-FMR のモデルを提案し、ダンピングライクトルク効率の定量評価を行った。講演時には、得られたダンピングライクトルク効率を先行研究と比較することで、自己誘導的な SOT の発生メカニズムについて議論する。

**参考文献** 1) B. F. Miao *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 066602 (2013). 2) T. Seki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 092401 (2015). 3) L. Liu, *Phys. Rev. B* **101**, 220402(R) (2020). 4) M. Tang *et al.*, *Adv. Mater.* **32**, 2002607 (2020). 5) L. Zhu *et al.*, *Adv. Funct. Mater.* **30**, 2005201 (2020). 6) W. Wang *et al.*, *Nat. Nanotechnol.* **14**, 819 (2019). 7) M. Haidar *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 2362 (2019).

# 面内空間反転対称性の破れた Pt/Co/Ir/Co/Pt 構造における 反対称層間交換相互作用

増田啓人<sup>1</sup>、関剛斎<sup>1,2,3</sup>、山根結太<sup>4,5</sup>、モダックラージクマール<sup>2</sup>、内田健一<sup>1,2,3</sup>、  
家田淳一<sup>6</sup>、ラウヨンチャン<sup>1,3</sup>、深見俊輔<sup>3,5,7,8</sup>、高梨弘毅<sup>1,3,8</sup>

(<sup>1</sup>東北大金研、<sup>2</sup>物材機構、<sup>3</sup>東北大 CSRN、<sup>4</sup>東北大学際研、<sup>5</sup>東北大通研、<sup>6</sup>原子力機構先端基礎、  
<sup>7</sup>東北大 WPI-AIMR、<sup>8</sup>東北大 CSIS)

Antisymmetric interlayer exchange interaction in Pt/Co/Ir/Co/Pt with in-plane spatial inversion breaking  
H. Masuda<sup>1</sup>, T. Seki<sup>1,2,3</sup>, Y. Yamane<sup>4,5</sup>, R. Modak<sup>2</sup>, K. Uchida<sup>1,2,3</sup>, J. Ieda<sup>6</sup>, Y.-C. Lau<sup>1,3</sup>, S. Fukami<sup>3,5,7,8</sup>,  
and K. Takashi<sup>1,3,8</sup>

(<sup>1</sup>IMR, Tohoku Univ., <sup>2</sup>NIMS, <sup>3</sup>CSRN, Tohoku Univ., <sup>4</sup>FRIS, Tohoku Univ., <sup>5</sup>RIEC, Tohoku Univ.,  
<sup>6</sup>ASRC, JAEA, <sup>7</sup>WPI-AIMR, Tohoku Univ., <sup>8</sup>CSIS, Tohoku Univ.)

**はじめに** Co/Cu/Co や Co/Ir/Co などの金属人工格子は層間交換結合を示すことが知られており、1980~1990年代に盛んに研究されてきた[1]。この金属人工格子は近年再び注目を集めており、特にスピン軌道トルクと反強磁性磁気構造を系統的に調べる研究対象として有用であることが明らかになっている [2]。また、強磁性的あるいは反強磁性的結合といった対称の交換相互作用だけでなく、スピン軌道相互作用の大きな非磁性金属を有する系ではジャロシンスキー・守谷相互作用といった反対称交換相互作用も誘起される。これまで反対称交換相互作用は強磁性層/非磁性層の界面近傍においてのみ発現すると考えられてきたが、金属人工格子の面内構造の空間反転対称性を破ることにより、非磁性層を介した2つの強磁性層の間に長距離の反対称交換相互作用(反対称層間交換相互作用)が働くことが近年報告された[3-6]。しかしながら、反対称層間交換相互作用の発現機構については理解が十分に進んでおらず、構造の非対称性を人工設計した系を用いた系統的な実験が不可欠である。本研究では、層厚を傾斜させた Pt/Co/Ir/Co/Pt 金属人工格子を用いて面内構造の非対称性を設計し、対称及び反対称の層間交換相互作用が誘起する磁気構造を明らかにすることを試みた。

**実験結果** リニアシャッターを有するマグネトロンスパッタ装置を用いて、熱酸化 Si 基板上に Co 層厚 ( $t_{Co}$ ) と Ir 層厚 ( $t_{Ir}$ ) を傾斜させたダブルウェッジ形状の Ta(1 nm)/Pt(2 nm)/Co( $t_{Co}$ )/Ir( $t_{Ir}$ )/Co(0.5 nm)/Pt(2 nm)/Ta(1 nm) を成膜した。9 mm 角の薄膜の内、下部 Co 層厚を 0.6 nm から 1.6 nm まで傾斜させ、下部 Co 層の傾斜方向から 90°回転させた方向に Ir 層厚を 0 から 1.5 nm まで傾斜させた。作製した層厚傾斜膜を微細加工法により幅 5~20  $\mu\text{m}$  のホールバー形状へと加工し、異常ホール効果を利用して磁気特性を調べた。 $t_{Ir}$  に対する飽和磁場 ( $\mu_0 H_s$ ) の周期的な変化が観測され、 $t_{Ir}$  に依存した Co/Ir/Co の強磁性あるいは反強磁性的な層間交換結合が確認された。 $t_{Ir} \sim 0.27$  nm、 $t_{Co} \sim 0.80$  nm のデバイスについて、50 mT の面内磁場を重畳させて異常ホール効果曲線を測定したところ、反対称層間交換相互作用の存在を示唆する非対称なヒステリシスループのシフトが観測された。面内磁場を電流方向から -60 deg. の方向に印加した場合と 120 deg. の方向に印加した場合とのシフト量の差 ( $\Delta\mu_0 H_{sw}$ ) は 14.8 mT と見積もられ、これまでの報告値 (0.7~1.7 mT [4, 6]) と比べて1桁大きな値のシフトが得られた。 $\Delta\mu_0 H_{sw}$  の  $t_{Ir}$  依存性を調べたところ、 $\Delta\mu_0 H_{sw}$  は  $t_{Ir} \sim 0.27$  nm から  $t_{Ir} \sim 0.87$  nm まで単調減少し、 $t_{Ir} \sim 0.87$  nm より厚くなると増加する傾向が見られた。これは反対称層間交換相互作用の大きさが  $t_{Ir}$  に対して周期的に変化することを示唆している。また、 $t_{Ir} \sim 0.87$  nm で極小値をとる傾向は  $\mu_0 H_s$  の  $t_{Ir}$  依存性と類似しており、対称及び反対称層間交換相互作用の間に相関性があることを示唆している。講演時には、反対称層間交換相互作用がスピン軌道トルク磁化反転に与える影響についても議論する予定でいる。

**参考文献** 1) M. D. Stiles, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 322-337 (1999). 2) H. Masuda *et al.*, *Phys. Rev. B* **101**, 224413 (2020). 3) E. Y. Vedmedenko *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 257202 (2019). 4) D.-S. Han *et al.*, *Nat. Mater.* **18**, 703 (2019). 5) A. Fernández-Pacheco *et al.*, *Nat. Mater.* **18**, 679 (2019). 6) K. Wang *et al.*, *Commun. Phys.* **4**, 10 (2021).

## LiNbO<sub>3</sub>単結晶基板上の2層構造Py/Ptにおける面内一軸磁気異方性によるスピン軌道トルクの変化

伊藤将慶<sup>1</sup>, 山口明啓<sup>2</sup>, 大島大輝<sup>3</sup>, 加藤剛志<sup>3</sup>, 嶋睦宏<sup>1</sup>, 山田啓介<sup>1</sup>  
(岐阜大院自<sup>1</sup>, 兵庫県大<sup>2</sup>, 名古屋大<sup>3</sup>)

M. Ito<sup>1</sup>, A. Yamaguchi<sup>2</sup>, D. Oshima<sup>3</sup>, T. Kato<sup>3</sup>, M. Shima<sup>1</sup>, K. Yamada<sup>1</sup>  
(Gifu Univ.<sup>1</sup>, Univ. of Hyogo<sup>2</sup>, Nagoya Univ.<sup>3</sup>)

**【緒言】**近年、不揮発性磁気メモリ(MRAM)の書き込み速度のさらなる向上や省電力化に向けて、強磁性/非磁性薄膜においてスピン軌道トルク(SOT)<sup>[1]</sup>による磁化反転に関する研究が盛んに行われている。本研究では、LiNbO<sub>3</sub>単結晶(LNO)基板の上にNi<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>合金(パーマロイ:Py)/Ptをスパッタ蒸着し、ハーモニック測定法<sup>[2]</sup>を用いてLNO基板/Pyに誘起された面内一軸磁気異方性( $K_u$ )とSOTの相関を明らかにすることを目的とした。

**【実験方法】**フォトリソグラフィによる微細加工とマグネトロンスパッタを用いて、LNO基板の上に2層構造Py/Ptのホールバーデバイスを作製した。試料構造は、LNO基板/Py(4nm)/Pt( $t$ nm)としてPtの膜厚を変化させた。また、LNO基板の(01.2)面に対してデバイスのパターンニング角度( $\chi$ )を変えて作製することで、 $K_u$ とSOTの相関を評価した。VSMにより磁気特性を、ハーモニック測定法によりSOTを定量化し、有効スピンホール角を評価した。

**【結果と考察】**図1はLNO基板/Py(4)/Pt(4)の試料薄膜における磁化曲線の印加磁場方向( $\chi'$ )依存性を示した結果である。図1より $\chi'$ ( $K_u$ 方向)による磁化曲線の変化を確認することができた。各 $\chi'$ における磁化曲線の飽和磁場の値から、LNO基板/Py界面に誘起された $K_u$ の大きさは $\sim 580$  J/m<sup>3</sup>と見積もった。図2には、パターンニング角度 $\chi$ における、ダンピングライクSOT効率( $\zeta_{DL}$ )のPt膜厚依存性の結果を示す。図2の実線に示すフィッティング解析から、有効スピンホール角 $\theta_{SH}^{eff}$ を算出した。解析結果より、 $\chi$ が小さくなるにつれて $\theta_{SH}^{eff}$ は減少する傾向が得られ、 $\chi = 0^\circ, 90^\circ$ の場合では、 $\theta_{SH}^{eff} = 0.073, 0.123$ となり、約1.7倍の差が生じた。この結果は、LNO基板/Pyの界面による面内一軸磁気異方性が、磁化の面内方向の歳差運動に影響を与え、SOTに影響を及ぼすためと考えられる。

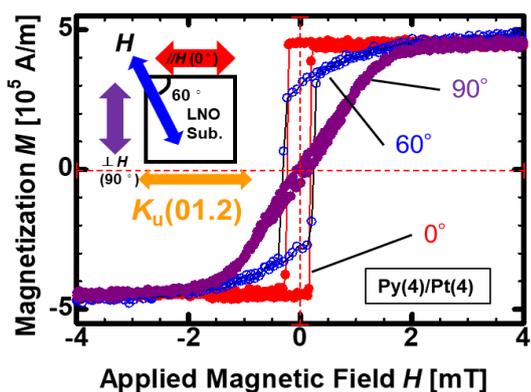


Fig.1 Magnetic hysteresis loops for LNO/Py(4)/Pt(4) film at various  $\chi'$  measured by VSM.

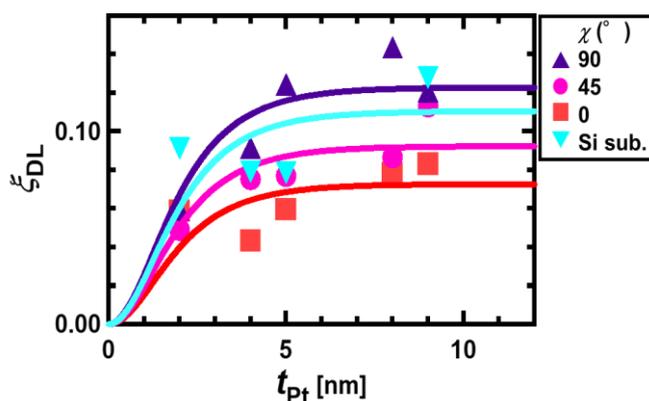


Fig.2 Dependence of  $\zeta_{DL}$  on Pt film thickness ( $t_{Pt}$ ) for LNO/Py(4)/Pt( $t_{Pt}$ ) samples at various  $\chi$  and Si/Py(4)/Pt( $t_{Pt}$ ) samples.

**【参考文献】** [1] I. M. Miron, et al., *Nature*, **476**, 189 (2011). [2] C. O. Avci, et al., *PRB*, **90**, 224427 (2014).

**【謝辞】**本研究の一部は、名古屋大未来材料・システム研究所の共同利用・共同研究の助成を受けて行われた。名古屋大学の岩田聡教授、熊澤正幸氏と、ハーモニック測定技術的助言をいただいた大阪大学理学研究科の上田浩平助教に心より感謝申し上げます。