

Co₃Sn₂S₂ 化合物における強磁性転移によるスピントロニクス変換効率の増大

関剛斎¹、ラウヨンチャン^{1,2}、池田絢哉¹、藤原宏平¹、飯浜賢志^{3,4}、小沢耀弘¹、
野村健太郎⁵、塚崎敦^{1,6}

(¹ 東北大金研、² 中国科学院、³ 東北大学際研、⁴ 東北大材料高等研、⁵ 九大理、⁶ 東北大 CSIS)

Enhanced Spin Conversion Efficiency for Co₃Sn₂S₂ Compound by Ferromagnetic Phase Transition

T. Seki,¹ Y.-C. Lau,^{1,2} J. Ikeda,¹ K. Fujiwara,¹ S. Iihama,^{3,4} A. Ozawa,¹ K. Nomura,^{1,5} and A. Tsukazaki^{1,6}

(¹IMR, Tohoku Univ., ²CAS, ³FRIS, Tohoku Univ., ⁴WPI-AIMR, Tohoku Univ., ⁵Depart. of Phys., Kyushu Univ., ⁶CSIS, Tohoku Univ.)

はじめに 電流-スピントロニクス変換効率が高い材料の探索は、スピントロニクスデバイスの超省エネルギー化に向けた喫緊の課題である。スピントロニクス効果(SHE)は電流-スピントロニクス変換 (以下、スピントロニクス変換と記す) の代表的な現象であり、Pt や Ta などのスピントロニクス相互作用の大きい非磁性金属がスピントロニクス変換材料として利用されることが多い。最近では強磁性体や反強磁性体におけるスピントロニクス変換機構も重要な研究対象になっており、様々な材料で高いスピントロニクス変換効率が報告されている。

スピントロニクス変換材料の探索において、電子構造のトポロジカルな特徴に着目することが有効な指針となりうる。我々のグループでは、カゴメ格子を持つシャンドイト化合物である Co₃Sn₂S₂ (CSS) に注目し、CSS 薄膜における磁性および伝導特性を詳細に調べてきた¹⁻³⁾。CSS は磁性ワイル半金属の一つとして期待され、およそ 175 K の強磁性転移温度(T_c)以下で高いスピントロニクス分極率と巨大な異常ホール効果を示すことが知られている。一方で、 T_c 以上の温度で常磁性 CSS となるが、In あるいは Ni を元素ドーピングすることでフェルミ準位をチューニングでき、その結果としてスピントロニクス変換効率を増強できることがわかってきた⁴⁾。このことから常磁性 CSS はスピントロニクス変換材料の候補になることが示されたが、強磁性 CSS におけるスピントロニクス変換の効率および機構は未だ明らかになっていない。そこで本研究では、スピントロニクス強磁性共鳴(ST-FMR)法を用いて CSS のスピントロニクス変換の温度(T)依存性を評価し、強磁性転移により CSS のスピントロニクス変換効率がどのように変化するかを調べた。

実験結果 RF マグネトロンスパッタ法を用いて Al₂O₃ (0001)基板上に CSS 層および Si-O キャップ層を 400°C で成膜した後に 800°C でアニール処理した。その後、Si-O キャップ層を Ar イオンミリングで除去し、イオンビームスパッタ法により Cu 層、Co₂₀Fe₆₀B₂₀ (CFB)層および Al-O キャップ層を成膜した。この CSS (10 nm) / Cu (1.8 nm) / CFB (2 nm) / Al-O の積層膜を、ホールバー形状およびコプレーナ導波路形状へと微細加工し、電気伝導特性および ST-FMR スペクトルを測定した。

$T > T_c$ では、常磁性 CSS 層の SHE によるスピントロニクス軌道トルクと CFB 層の異方性磁気抵抗(AMR)効果によって整流電圧を生じて、ST-FMR の信号が観測された。一方、 $T < T_c$ では、CSS の強磁性転移に伴い CSS / Cu / CFB 三層構造での GMR 効果も発現するため、 $T < T_c$ における ST-FMR スペクトルの起源を説明するためには、CFB の AMR 効果のみならず CSS / Cu / CFB の GMR 効果の寄与も考慮する必要があることがわかった。さらに、ST-FMR スペクトルの磁場角度依存性を解析した結果、強磁性 CSS 層における SHE あるいはスピントロニクス異常ホール効果がダンピングライクトルク発生の主要因であることが示された。50 K $\leq T \leq$ 300 K の温度範囲でスピントロニクス変換効率を見積もったところ、強磁性転移を境にスピントロニクス変換効率の増大が観測され、 $T = 50$ K では 300 K の値の 1.4 倍に変換効率が向上することが明らかになった。

参考文献 1) K. Fujiwara *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 050912 (2019). 2) J. Ikeda *et al.*, *Commun. Mater.* **2**, 18 (2021), 3) J. Ikeda *et al.*, *Commun. Phys.* **4**, 117 (2021). 4) Y.-C. Lau *et al.*, arXiv:2203.02356.

Synthetic AF 構造を用いた Spin-orbit torque 効率の増大

斉藤好昭¹、池田正二^{1,4}、遠藤哲郎¹⁻⁵

(東北大¹CIES、²CSIS、³CSRN、⁴RIEC、⁵工学研究科)

Enhancement of current to spin current conversion efficiency in synthetic antiferromagnetic layer

Yoshiaki Saito¹, Shoji Ikeda^{1,4}, and Tetsuo Endoh¹⁻⁵

(Tohoku Univ. ¹CIES, ²CSIS, ³CSRN, ⁴RIEC, ⁵Graduate School of Engineering.)

はじめに

スピン軌道トルク(SOT)-MRAM、skyrmion、domain wall デバイス等の実現を目指し、重金属/強磁性接合系のスピン軌道トルク技術の研究開発が盛んに行われている。特に、磁化反転の効率、つまり、ある電流(J_C)を流したときのスピン流(J_S)の生成効率であるスピンホール角($|\theta_{SH}|=|J_S/J_C|$)を増加させるため、多くの重金属材料や重金属/強磁性界面の研究が行われ、 $|\theta_{SH}|$ が日に日に増加している。しかし、 $|\theta_{SH}|$ が大きな重金属材料の多くは、比抵抗が大きいのが現状である。LSIなどの大規模回路中で大きな比抵抗材料を配線として用いると、消費エネルギーの増大、スピードの遅延、大きな電圧降下をもたらす好ましくない。これらの課題を解決するためには、比抵抗の増大に起因する $|\theta_{SH}|$ の増大に頼らずにスピンホール効果を増大することが重要である。我々はこれら課題を解決するために、(Pt/Ir(またはRu)/Pt)多層膜材料を基軸とした Synthetic 反強磁性(AF)構造(Fig. 1)による $|\theta_{SH}|$ の増大を試みている¹⁻³)。Synthetic AF 構造は、漏れ磁場が無い点、外部磁場に対する感受性が低い点、強磁性体よりも高速スイッチングが可能な点(反強磁スピントロニクス)からも最近注目されており、その観点からも大変興味深い。

実験方法

超高真空スパッタ装置を用いて、様々な Pt, Ir, Ru, Co 膜厚を有する Synthetic AF 構造を作製した。比較のため、Pt 単層膜を有する試料も作製した¹⁻³)。例として、Sample I (Pt 単層膜)、Sample II (Synthetic AF 構造)の詳細構造をそれぞれ、Fig. 2(a) 2(b)に示す。磁気特性評価から、全ての試料は垂直磁気異方性を有していることを確認している^{1, 2})。それらの試料を微細加工しホールバー形状に加工し、SOT switching 特性を測定した。その反転磁場の電流によるシフトおよびスピンホール MR (SMR) の測定結果からスピン Hall 角の評価を行った¹⁻³)。

実験結果

Fig. 2(c) 2(d)に、電流パルス幅 200 μ sec で測定した Sample I, Sample II の Switching 曲線を示す³)。異常 Hall 効果の大きさは、Hall 曲線の値と一致していることから³)、Pt 単層膜/Co は Co 膜全体がスピン反転し、Co/Pt/Ir/Pt/Co synthetic AF 構造は上下の Co が反強磁性結合を保ったまま電流パルスにより同時に反転していることが明らかになった³)。反転電流密度の大きさの外部磁場 $H_y = 0$ Oe への外挿値は、Sample I, Sample II のそれぞれに対して、 $J_C (H_y = 0) = 7.9 \times 10^7$ A/cm²、 4.2×10^7 A/cm²と求めた³)。以上より、Co/Pt/Ir/Pt/Co synthetic AF 構造のスピン反転電流密度は Pt 単層膜/Co のそれに比べて、約 1/2 倍に低減されることが明らかになった。 θ_{SH} の大きさは、Sample I, Sample II のそれぞれに対して、 $\theta_{SH} = 7\%$ 、 15.6% と求まり³)、上記に示した反転電流密度の大きさと Consistent な値が得られた。当日は、磁気特性、電気特性の詳細を報告する。本研究は CIES コンソーシアム事業、JST-OPERA(JPMJOP1611)、文部科学省 次世代 X-nics 事業、科研費 (JP19H00844, JP21K18189) の支援のもとで行われた。

参考文献

1) Y. Saito, N. Tezuka, S. Ikeda and T. Endoh, Phys. Rev. B 104, 064439 (2021). 2) Y. Saito, S. Ikeda and T. Endoh, Appl. Phys. Lett. 119, 142401 (2021). 3) Y. Saito, S. Ikeda and T. Endoh, Phys. Rev. B 105, 054421 (2022).

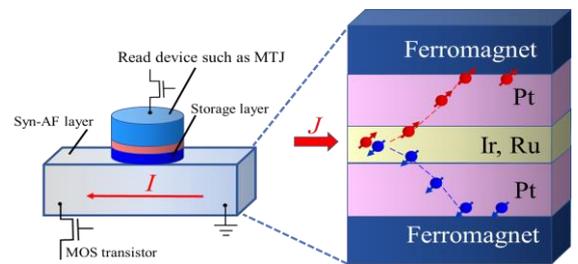


Fig. 1 Schematic diagram of our proposed memory cell with synthetic antiferromagnetic (AF) layer for SOT-MRAM.

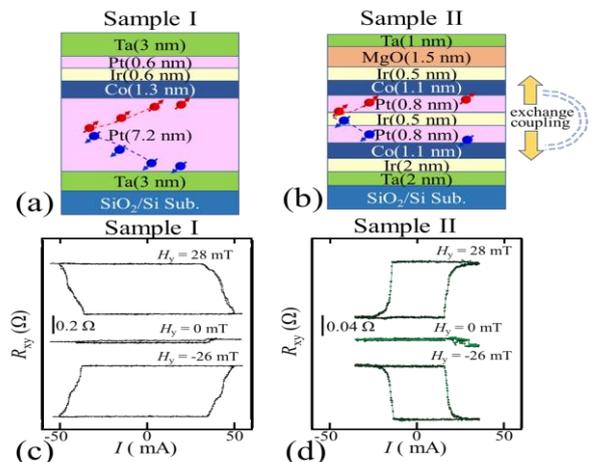


Fig. 2 Schematic of detailed film structures in (a) Sample I and (b) Sample II, and SOT switching properties under various fixed external magnetic fields (H_y) for (c) Sample I and (d) Sample II.

Ta 層上に積層した Gd / FeCo 多層膜のスピン軌道トルク

矢内峻介, 大島大輝, 高橋茂樹*, 平山義幸*, 加藤剛志
(名古屋大, *サムスン R&D)

Spin orbit torques of Gd / FeCo multilayers on Ta layer
S. Yanai, D. Oshima, S. Takahashi*, Y. Hirayama*, T. Kato
(Nagoya Univ., *Samsung R&D Institute Japan)

はじめに

スピン軌道トルク (SOT) 磁化反転は, 現行の MRAM 磁化反転方式であるスピン移行トルク (STT) 磁化反転方式に比べ高速かつ低消費エネルギーで書き込みでき, 読み出し・書き込み電流を別経路とすることが可能であるという特徴を有し, 次世代の MRAM 書き込み方式として注目されている^{1), 2)}。これまで我々は Ta 上に積層した GdFeCo 合金の SOT を調べ, ダンピングライクトルクによる有効磁界が磁化補償組成に近づくほど大きくなること, フィールドライクトルクによる有効磁界の符号が磁化補償組成を境に反転することを報告した³⁾。GdFeCo 合金に対して Gd/FeCo 多層膜はより高い垂直磁気異方性を示し, GdFeCo 合金と同様に磁化補償組成を持つことが知られている。また GdFeCo 合金において Gd 原子と FeCo 原子の膜厚方向の組成勾配により DMI が発現することが報告されており⁴⁾, Gd/FeCo 多層膜では膜厚方向の組成勾配を層厚比により容易に制御できる。本研究では Gd/FeCo 多層膜の SOT を測定し, GdFeCo 合金の SOT と比較した。

実験方法

試料作製には RF マグネトロンスパッタ装置を用いて, 熱酸化シリコン基板の上に Ta(20) / [Gd(t_{Gd}) / Fe₉₀Co₁₀(1 - t_{Gd})]₅ / SiN(5) (数字の単位は nm) を積層した。Gd 膜厚 t_{Gd} は 0.44 nm から 0.59 nm まで変化させた。サンプルはホールクロス幅が 8 μm になるように微細加工を行い, 異常ホール効果 (AHE), SOT 磁化反転, ダンピングライクトルクとフィールドライクトルクによる有効磁界 (それぞれ H_{DL} , H_{FL}) の測定を行った。

実験結果

図1の(a)と(b)は Gd/FeCo 多層膜の H_{DL} , H_{FL} の Gd 層厚依存性を示したものである。また同図に GdFeCo 合金のデータの Gd 原子組成比を Gd 層厚に変換し載せている。図1の(a)より, Gd/FeCo 多層膜の H_{DL} の大きさは GdFeCo 合金と同様に補償点に近づくほど大きくなる。また図1の(b)より, Gd/FeCo 多層膜の H_{FL} の符号は GdFeCo 合金と同様に補償点を超えると変化することが分かった。したがって Gd/FeCo 多層膜の SOT は GdFeCo 合金とほぼ同じとなる。

参考文献

- 1) L. Liu et al.: Science **336**, 555 (2012).
- 2) L. Liu et al.: Phys. Rev. Lett. **109**, 096602 (2012).
- 3) K. Kawakami et al.: J. Appl. Phys. **59**, SEEF01 (2020).
- 4) D.-H. Kim et al.: Nature Mater. **18**, 685 (2019).

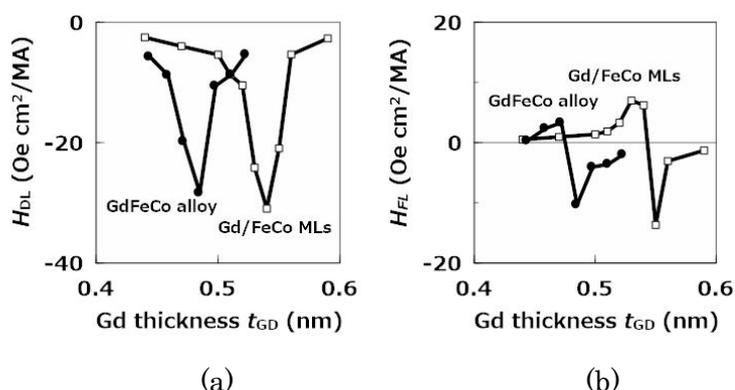


Fig.1 Gd thickness t_{Gd} dependence of (a) damping-like SOT effective field H_{DL} and (b) field-like SOT effective field H_{FL} of Ta / [Gd / FeCo] MLs (open symbols). H_{DL} and H_{FL} of Ta / GdFeCo bilayers are also shown as closed symbols³⁾.

交換バイアスを印加した Tb-Fe 層における無磁場中 スピノービットトルク磁化反転の観察

黒川雄一郎、若江将和、濱田勇樹、藤本真大、伊藤正裕、湯浅裕美
(九大)

Observation of field free spin orbit torque-induced magnetization switching in Tb-Fe alloy film with
exchange bias field

Y. Kurokawa, M. Wakae, Y. Hamada, M. Fujimoto, M. Itoh, H. Yuasa
(Kyushu Univ.)

序論

電流による磁化方向の操作は不揮発性メモリである MRAM(MagnetoResistive Random Access Memory)への応用が可能であり、多くの研究が行なわれている。電流によって生じる磁化を操作するためのトルクは大きく分けて二つ存在し、そのうちの一つが Spin Orbit Torque (SOT)である。SOT による磁化操作は非常に高速に行うことができるという、MRAM で用いるうえでのメリットが存在するが、一方で、SOT を用いた磁化反転には外部から面内磁場を印加する必要があるというデメリットが存在する。メモリに応用する際には外部面内磁場を印加する機構は小型化の障壁となりうる。そのため、SOT 磁化反転の観測に必要な外部面内磁場を取り除くことは、実用化する上で重要な課題である。近年、この問題を解決する方法として、反強磁性体と強磁性体の界面で生じる交換バイアスを用いる方法が提案された[1]。しかしながら、この手法では面内磁場中での熱処理を必要とし、工程が増えるという課題がある。本研究では面内磁場を印加しながら磁性体を積層することで、交換バイアスの付与を行い、熱処理工程を無くしても無磁場中 SOT 磁化反転が観察可能であるかどうかを調べた。

実験方法

熱酸化 Si 基板上に Pt/Tb-Fe/IrMn 多層膜をスパッタリングによって堆積した。その際、永久磁石を試料ホルダにセットすることで、面内方向の磁場を基板に印加した。その後、フォトリソグラフィを用いて $5\mu\text{m}$ の幅を持つ細線に加工した。SOT 磁化反転は印加電流を変化させながら異常ホール効果を観察することで検出した。

実験結果

図 1 に作製した試料に無磁場中で通電したときのホール電圧を示す。黒い線は磁場中で試料の製膜を行ったもの、赤い線は無磁場中で試料の製膜を行ったものをそれぞれ示している。図から明らかなように、無磁場中製膜では SOT 磁化反転が観察されなかったのに対し、磁場中で製膜を行ったものはヒステリシスを有し、無磁場中でも SOT によって磁化反転していることが分かる。これより、磁場中製膜を行うことで、明らかに Tb-Fe に IrMn からのバイアス磁場が印加されることが分かった。したがって、熱処理を行わなくても磁場中製膜により面内方向にバイアス磁場を印加できることが分かった。

謝辞

この研究は科研費(JP18K13805、JP21K14487)の支援を受けて行われたものです。

参考文献

- 1) S. Fukami, C. Zhang, S. DuttaGupta, A. Kurenkov, and H. Ohno, Nat. Mater. **15**, 535 (2016).

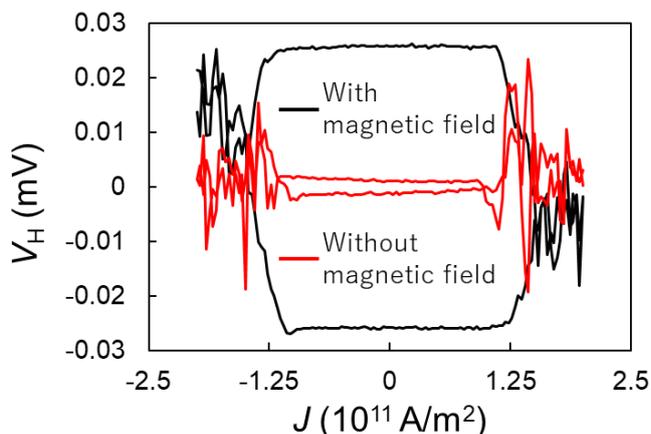


Fig. 1 Hall voltage (V_H) as a function of current density (J) under in-plane magnetic field $\mu_0 H_x = 0$ mT for the samples sputtered with (black line) or without magnetic field (red line).

スピン軌道トルクによるノンコリニア反強磁性体の カイラルスピン構造の回転

竹内祐太郎¹、山根結太^{2,3}、尹注鏞^{3,4}、伊藤隆一^{3,4}、陣内佛霖¹、金井駿³⁻⁵、家田淳一⁶、大野英男^{1,3-5,7}、深見俊輔^{1,3-5,7}

(¹東北大学 WPI-AIMR、²東北大学 FRIS、³東北大学 通研附属ナノ・スピン実験施設、⁴東北大学 工学研究科、⁵東北大学 CSIS、⁶原子力機構 ASRC、⁷東北大学 CIES)

Spin-orbit torque induced rotation of chiral-spin structure in non-collinear antiferromagnet

Y. Takeuchi¹, Y. Yamane^{2,3}, J.-Y. Yoon^{3,4}, R. Itoh^{3,4}, B. Jinnai¹, S. Kanai³⁻⁵, J. Ieda⁶,
H. Ohno^{1,3-5,7}, and S. Fukami^{1,3-5,7}

(¹WPI-AIMR, Tohoku Univ., ²FRIS, Tohoku Univ., ³Laboratory for Nanoelectronics and Spintronics, RIEC, Tohoku Univ., ⁴Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., ⁵CSIS, Tohoku Univ., ⁶ASRC, JAEA, ⁷CIES, Tohoku Univ., Japan)

反転対称性が破れた磁性ヘテロ構造などでは電流の印加によってスピン軌道トルク(SOT)が誘起され、種々の磁性材料の磁気秩序を電氣的に制御できる¹⁾⁻⁵⁾。このような中、ノンコリニア反強磁性体が僅かな非補償磁化しか有さないにもかかわらず大きな異常ホール効果⁶⁾を示すことから近年注目されている。また、最近では SOT によるノンコリニア反強磁性体の非補償磁化の反転⁷⁾が報告されるなど機能性デバイス応用に向けた研究が活発になっている。一方、ノンコリニア反強磁性体特有の現象や新機能に着目した研究はきわめて少ない。本講演では、ノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn のエピタキシャル薄膜からなるヘテロ構造において、SOT によって誘起されたカイラルスピン構造の恒常回転現象を観測した結果を報告する。

スパッタリング法によって MgO(110)基板上に W(3 nm)/Ta(1 nm)/ Mn_3Sn (8.3-22.3 nm)/Pt(4 nm)の構造の薄膜⁸⁾を成膜し、成膜後に 500°C で熱処理を行ったのち、ホール素子に加工した。Fig. 1 は成膜した薄膜の走査透過電子顕微鏡像である。 Mn_3Sn 層が M 面配向エピタキシャル成長している様子が確認できる。SOT に対する Mn_3Sn カイラルスピン構造の応答を調べるために、 Mn_3Sn のホール抵抗 R_H とパルス電流の振幅 I の関係を調べた。Fig. 2(a),(b)にその結果を示す (R_H と外部磁場 H の関係も Fig. 2(a)中に示す)。電流による異なる R_H 状態への遷移、その閾値電流の電流方向依存性、高電流領域での R_H の擾乱、といった特徴的な振る舞いが観測された。より詳細な実験と計算結果から、この R_H の特徴的な振る舞いは SOT による Mn_3Sn のカイラルスピン構造の回転によるものであることが明らかになった⁹⁾。この現象は従来のスピントロニクス現象とは一線を画すものであり、今後の高効率・新機能デバイスへの展開が期待される。

参考文献

- 1) I. M. Miron *et al.*, Nature **476**, 189 (2011).
- 2) L. Liu *et al.*, Science **336**, 555 (2012).
- 3) S. Fukami *et al.*, Nat. Nanotechnol. **11**, 621 (2016).
- 4) P. Wadley *et al.*, Science **351**, 587 (2016).
- 5) S. DuttaGupta *et al.*, Nat. Commun. **11**, 5715 (2020).
- 6) S. Nakatsuji *et al.*, Nature **527**, 212 (2015).
- 7) H. Tsai *et al.*, Nature **580**, 608 (2020).
- 8) J.-Y. Yoon *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 013001 (2019).
- 9) Y. Takeuchi *et al.*, Nat. Mater. **20**, 1364 (2021).

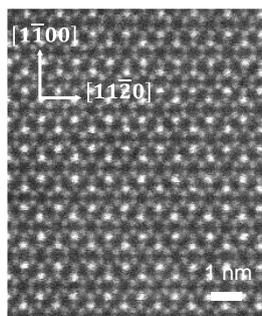


Fig.1 Cross-sectional STEM image of Mn_3Sn layer in prepared stack.

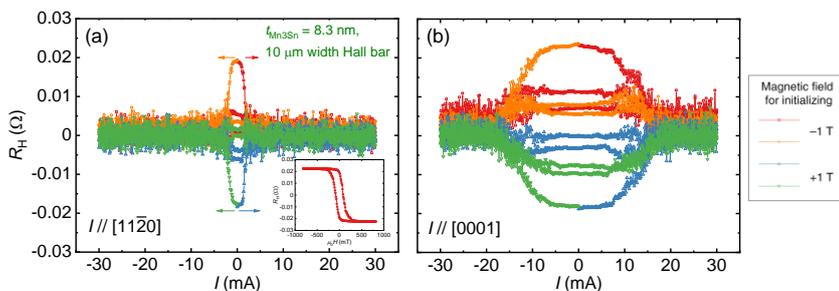


Fig. 2 (a), (b) Hall resistance (R_H) as a function of applied current pulse amplitude (I) in W(3 nm) / Ta(1 nm) / Mn_3Sn (8.3 nm) / Pt(4 nm) heterostructure for cases of $I \parallel [11\bar{2}0]$ and $I \parallel [0001]$, respectively. The width of current pulse is 100 ms. The inset of Fig. 2(a) shows R_H versus out-of-plane magnetic field (H).

人工反強磁性体における電流誘起磁化反転プロセスの 磁区構造イメージング

増田啓人^{1,2}、山根結太^{3,4}、関剛斎^{1,5}、ラークラウス⁶、土肥昂堯⁶、モダックラー・ジクマール⁵、
内田健一^{1,5}、家田淳一⁷、クラウイマティアス⁶、高梨弘毅^{1,7}

(¹東北大金研、²東北大院工学研究科、³東北大学際研、⁴東北大通研、⁵物材機構、
⁶ヨハネスグーテンベルク大メインツ、⁷原子力機構先端基礎)

Domain structure imaging of current-induced magnetization switching process in a synthetic antiferromagnet
H. Masuda^{1,2}, Y. Yamane^{3,4}, T. Seki^{1,5}, K. Raab⁶, T. Dohi⁶, R. Modak⁵, K. Uchida^{1,5}, J. Ieda⁷,
M. Kläui⁶, and K. Takanashi^{1,7}

(¹IMR, Tohoku Univ., ²Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ., ³FRIS, Tohoku Univ., ⁴RIEC, Tohoku Univ., ⁵NIMS,
⁶Johannes Gutenberg Univ. Mainz, ⁷ASRC, JAEA)

はじめに 反強磁性体は、磁場ノイズ耐性、漏れ磁場の抑制及び高速な磁化ダイナミクスなど磁気メモリデバイスの高密度化及び高速化に有利な性質を備え、近年スピン軌道トルクを用いた磁気構造の電氣的制御が実証されたことからデバイス応用化に向けた研究が盛んに行われている[1]。しかしながら、反強磁性磁気構造と伝導電子スピン間の相互作用については未だ不明な点も多く、系統的な実験に基づいた物理機構の解明が求められている。反強磁性磁気構造と伝導電子スピンの相互作用を系統的に調べる対象として注目されているのが、人工反強磁性体である。Co/Cu/Co や Co/Ir/Co など強磁性層と非磁性層を nm オーダーで交互に積層した構造では、層間交換結合により特定の層厚で二つの強磁性層の磁化が非磁性中間層を介して反強磁性的に結合し、さらに層厚変調により反強磁性結合強度が周期的に変化することが知られている[2,3]。この性質はバルク反強磁性体にはなく、反強磁性磁気構造に作用するスピン軌道トルクの系統的な実験を可能にする。これまで中間層もしくは隣接する外部層にスピンホール効果を示す非磁性材料を配置することで電流誘起磁化反転が調べられてきたが[4,5]、反強磁性結合が強い系において効率的に磁化反転させるための指針は確立されておらず、反転機構についても十分な理解が得られていない。そこで本研究では、結合強度を層厚によって大きく変調できる Co/Ir/Co を人工反強磁性体として選択し、それを大きなスピンホール効果を示す Pt で挟んだ構造において、カー顕微鏡を用いた磁区構造観察により電流誘起磁化反転プロセスの解明を試みた。

実験結果 マグネトロンスパッタリングにより熱酸化 Si 基板上に Ta(1 nm)/Pt(2 nm)/Co(0.65 nm)/Ir($t_r = 0.45$ nm, 0.5 nm, 0.8 nm, 1.3 nm)/Co(0.9 nm)/Pt(2 nm)/Ta(1 nm) を成膜した。振動試料型磁力計により測定した垂直磁化曲線から t_r に対する飽和磁場の周期的変化が観測され、Co/Ir/Co 構造における層間交換結合が確認された。また、 $t_r = 0.5, 0.8$ 及び 1.3 nm では垂直磁気異方性が支配的であったが、 $t_r = 0.45$ nm においては面内方向にも残留磁化が観測された。これらの試料を微細加工法により幅 5 μm のホールバー形状へと加工し、100 ms 幅の dc 電流を印加しながらカー顕微鏡により磁区構造観察を行なった。反強磁性結合を有する $t_r = 0.5$ 及び 1.3 nm では 20 mA 程度の電流印加後にワイヤー部分の広い領域でコントラスト変化が生じ、電流誘起磁化反転が観測された。一方、強磁性結合を有する $t_r = 0.8$ nm では電流値 10 mA の印加後に部分的なコントラスト変化がワイヤー内でまばらに生じ、電流値が増加するにつれて徐々に反転領域が広がっていく振る舞いが観測された。また、面内磁化成分を持つ $t_r = 0.45$ nm では異なる色のコントラスト変化の混在が観測された。これらの観察結果は、電流誘起磁化反転プロセスが結合強度の大きさや磁化の面内成分の有無に強く依存することを示唆している。講演時にはマクロスピンモデルを用いた解析も示し、より詳細な磁化反転機構を議論する予定である。

参考文献 1) V. Baltz *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **90**, 015005 (2018). 2) H. Masuda *et al.*, *Phys. Rev. B* **101**, 224413 (2020). 3) H. Masuda *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **17**, 054036 (2022). 4) G. Y. Shi *et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 104435 (2017). 5) Q. Ma *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **117**, 172403 (2020).