

トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体二層膜における磁気特性の電圧制御

千葉貴裕¹, Alejandro O. Leon², 小峰啓史³

(1 福島高専, 2 チリメトロポリタン工科大学, 3 茨城大学)

Voltage-control of magnetic properties in topological-insulator/magnetic-insulator bilayers

T. Chiba¹, A. O. Leon², and T. Komine³

(National Inst. of Tech., Fukushima Coll., Metropolitan Tech. Univ., Ibaraki Univ.)

はじめに

近年注目を集めるトポロジカル絶縁体 (TI) は、物質内部は絶縁体であるが、その表面は低散逸で電気を流すことができる特殊な伝導特性をもっている。さらに注目すべき特性として、スピン運動量ロッキングと呼ばれる性質があり、表面に電流を流すことで高効率にスピンを生成できる。そのため、磁性体との界面では、巨大なスピン軌道トルクの発生が期待されている¹。一方でスピン運動量ロッキングの性質は磁気異方性にも影響を及ぼすことが指摘されている。しかしながら、これまでの研究では、TI 表面/界面における「スピン軌道トルク」、「磁気異方性」、さらに「磁化ダンピング」は独立に扱われていて、特にその同時電圧制御に関する知見は得られていなかった。そこで本研究では、TI 表面/界面に由来した上記3つの磁気特性に対する電界効果を理論的に解明することを目指した。

モデル

電子の運動を記述する有効ハミルトニアンに基づき、まず TI/磁性絶縁体二層膜の表面/界面における「スピン軌道トルク」、「磁気異方性エネルギー」、「磁化ダンピング」をフェルミエネルギーの関数として定式化した^{1,2}。またゲート電圧を想定し、フェルミエネルギーを電圧の関数として求めることで、上記3つの磁気特性に対する電界効果を理論的に扱った。さらに定式化に基づいて、電圧制御磁気異方性による磁化反転のシミュレーション、および電圧制御磁化ダンピングによるマグノン輸送のスイッチングを評価した。これら2つの計算には、磁化の運動を記述するランダウ-リフシッツ-ギルバート (LLG) 方程式を用いた。また具体的な系として、磁化反転のシミュレーションには磁性不純物をドーピングした TI である Cr-doped BiSbTe、マグノン輸送のスイッチングには BiSbTeSe(TI)/Y₃Fe₅O₁₂ を想定した。

計算結果

磁気特性の電圧制御 : Cr-doped BiSbTe において、スピン軌道トルクに対する電界効果が比較的小さい一方で、磁気異方性エネルギーは数ボルトの電圧により 0~数 kJ/m³ の範囲で変調できることがわかった¹。また Y₃Fe₅O₁₂ の垂直磁化膜の場合には、数ボルトの電圧により磁化ダンピングをオーダーで変調できることがわかった²。**磁化反転およびマグノン輸送** : Figure 1 のような Cr-doped BiSbTe 膜の磁化反転をシミュレーションしたところ、20K において従来の強磁性体よりも一桁小さい電力 (~1 fJ/bit) で磁化反転できることがわかった¹。また BiSbTeSe/Y₃Fe₅O₁₂ におけるマグノン輸送の電界効果を評価したところ、室温において On/Off 比 10² にてスイッチングできることがわかった²。これにより TI/磁性絶縁体二層膜という単純な構造を基にした電圧制御磁気デバイスへの応用が期待される。

参考文献

- 1) M. Mogi *et al.*, Nat. Commun. **12**, 1404 (2021).
- 2) T. Chiba and T. Komine, Phys. Rev. Appl. **14**, 034031 (2020).
- 3) T. Chiba, A. O. Leon, and T. Komine, Appl. Phys. Lett. **118**, 252402 (2021).

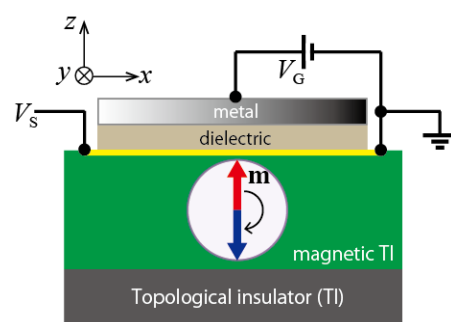


Fig.1 Schematic geometry (side view) of field-effect transistor (FET)-like device. **m** denotes the magnetization vector.

トポロジカル絶縁体 BiSb を接合した磁性細線における磁区の電流駆動

中谷 真規¹、高橋 真央¹、小倉 溪¹、石井 紀彦¹、Pham Nam Hai^{2,3}、宮本 泰敬^{1,3}
 (¹NHK 放送技術研究所、²東京工業大学、³JST CREST)

Current-driven magnetic domain motion in magnetic nanowire with topological insulator BiSb
 Naoki Nakatani¹, Mao Takahashi¹, Kei Ogura¹, Norihiko Ishii¹, Pham Nam Hai^{2,3}, Yasuyoshi Miyamoto^{1,3}
 (¹NHK Science & Technology Research Labs. ²Tokyo Institute of Technology, ³JST CREST)

はじめに

将来の立体映像用ストレージの実現を目指して、大容量かつ超高速転送が可能な磁性細線メモリの研究を進めており、[Co/Tb]積層膜からなる磁性細線における電流磁壁駆動現象の検証を進めてきた¹⁾。一方、巨大なスピンホール角 θ_{SH} を示すトポロジカル絶縁体 BiSb を磁性細線に接合することにより、磁区を 7×10^5 A/cm² 程度の低電流で駆動できる可能性がある²⁾。そこで、BiSb を接合した磁性細線メモリ素子を初めて試作し、磁気光学顕微鏡により磁区の電流駆動を評価したので報告する。

実験方法と結果

Fig.1 に示す磁性細線メモリ素子を、イオンビームスパッタ、レーザー描画により表面熱酸化 Si ウェハ上に試作した。磁性細線は表面より BiSb(10)/Pt(0.5)/[Co(0.3)/Tb(0.55)]₃ (単位 nm) の積層構造とし、4 μm 幅、60 μm 長に加工した。さらに絶縁層 SiO₂(20)/Si₃N₄(5) を介して、上部に磁区を記録するための金属線(記録素子)を配置し、メモリ動作を検証した。BiSb を接合しない Pt/[Co/Tb]積層膜からなる磁性細線では、磁区駆動に必要な電流密度は 2.5×10^7 A/cm² であったが³⁾、BiSb を接合することによって必要な電流密度は約 1/5 となる 5.0×10^6 A/cm² まで低減でき、BiSb によるスピントルクが一定の磁区駆動の低電流化に寄与している結果が得られた。ただし、想定ほど低電流化を実現できなかったため、その原因について検証を進めた。Fig.2 に BiSb の接合の有無に対する Pt/[Co/Tb]磁性細線の磁気光学カー特性の違いを示す。磁性細線自体の保磁力は BiSb を接合することで若干低くなるものの、カー回転角は 0.24° から 0.007° まで減少し、磁性細線の磁気特性が大幅に劣化していた。Fig.3 に BiSb の接合有無の磁性細線表面の原子間力顕微鏡像の違いを示す。BiSb を接合しない場合、表面粗さ R_a は 0.63 nm であったが、BiSb の接合によって 3.27 nm まで増大し、表面平坦性の劣化は BiSb の粒成長によることが判明した。これらの結果は、磁性細線の微細加工プロセスにおけるレジストベイク時の加温(150°C)で BiSb の粒成長が促進されたほか、BiSb は飽和蒸気密度が小さく Co/Tb 層への層間拡散が起きた可能性を示している。当日は、BiSb の製膜条件や磁性細線構造を調整し、Pt/[Co/Tb]の磁気特性劣化を抑制した場合の磁区の電流駆動についても報告する予定である。

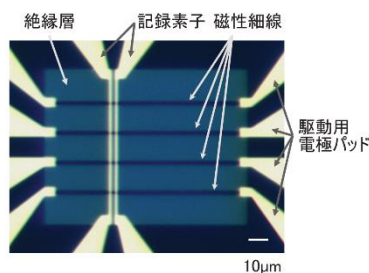


Fig.1 Fabricated magnetic nanowire memory element

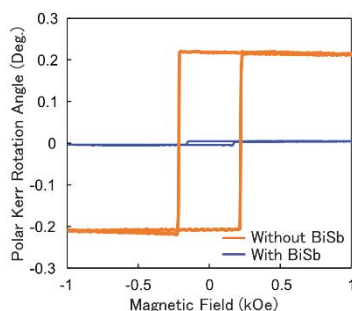


Fig.2 Magneto-optical properties of magnetic nanowires

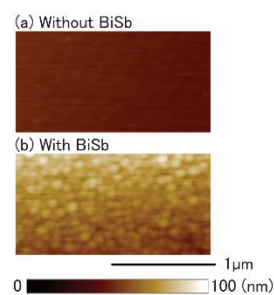


Fig.3 Surface AFM images of nanowire (a) without & (b) with BiSb

参考文献

- 1) Y. Hori *et al.*, MMM, R1-02 (2020)
- 2) N.H.D. Khang *et al.*, Sci Rep **10**, 12185 (2020)
- 3) 堀ほか, 第43回日本磁気学会学術講演会, 26aPS-21(2019)

Co₂MnSi/Pt におけるレーザー励起磁化歳差ダイナミクスと スピンミキシングコンダクタンス

佐々木悠太¹, 高橋有紀子¹, 葛西伸哉^{1,2}

(¹ 物材機構, ² JST さきがけ)

Laser pulse induced spin precessional dynamics and spin mixing conductance in Co₂MnSi/Pt

Y. Sasaki¹, Y. K. Takahashi¹, and S. Kasai^{1,2}

(¹ NIMS, ² JST-PRESTO)

はじめに

強磁性金属層(FM層)と非磁性重金属層(NHM層)を積層させたヘテロ構造は、スピン流を利用することで熱電材料やテラヘルツ波エミッタなどへの応用が検討されている.[1] FM層からNHM層へのスピン流注入の効率を調べる手法として spin-pumping 法がある. spin-pumping 法では、強磁性共鳴下における磁化歳差ダイナミクスによってスピン流をNHM層へと注入し、NHM層における逆スピンホール効果によってスピン流を面内方向の電流へと変換する. 注入されるスピン流の大きさはFM/NHM界面のスピンミキシングコンダクタンス $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ に比例するため、大きな $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ を有する積層構造や強磁性材料を探索する必要がある. 一方で、最近 Co₂MnSi/Pt において spin-pumping 法によって大きな逆スピンホール電圧が観測された.[2] この大きな逆スピンホール電圧から、Fe, CoFe/Pt と比較して3倍大きな $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ が示唆されたが、 $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ の測定は未だ行われていない.

本発表では、異なるキャップ層を有する単結晶 Co₂MnSi/Pt, MgO における磁化歳差ダイナミクスを全光学的手法によって調べ、その緩和過程からダンピング定数 α を求めた. 得られた α から $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ を見積もり、その規則度依存性を調べた.

実験方法および実験結果

MgO(001)基板上に超高真空マグネトロンスパッタ法を用いて試料を作製した. 薄膜構成は基板側から、MgO(20)/Co₂MnSi(7)/Pt(2) (膜厚単位 nm)である. また、参照試料としてPtキャップ層をMgO(5)/Ta(2)に置換した試料についても作製した. 試料の規則度を変化させるために熱処理温度を $T_a=300\sim 600^\circ\text{C}$ と様々に変化した. 磁化歳差ダイナミクスの測定には全光学的ポンプ・プローブ法による時間分解分光法(TRMOKE)を用いた. 光源には中心波長 1030 nm, 繰り返し周波数 10 kHz, パルス幅 230 fs の Yb:KGW レーザーを用いた. ポンプ光を 365 Hz に変調し、ウォラストンプリズムを用いた差動方式でプローブ光のカー回転角 $\Delta\phi_K$ を測定した. 測定時には膜面垂直方向から 35° の角度で外部磁場 $\mu_0 H$ を印加した.

キャップ層の異なる $T_a=500^\circ\text{C}$ の Co₂MnSi 薄膜に対して様々な $\mu_0 H$ で測定した歳差シグナルを Fig.1(a), (b)にそれぞれ示す. 歳差周波数はキャップ層によらず同じであった. 一方で、歳差シグナルの緩和時間は Co₂MnSi/MgO よりも Co₂MnSi/Pt の方が短いことが分かった. α の値は MgO, Pt キャップ層を有する試料に対してそれぞれ 0.002, 0.008 であった. これらの値から見積もられた $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ の値は $7.3\times 10^{19} \text{ m}^2$ であった. この結果から、Co₂MnSi/Pt の $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ が CoFe や Fe と比較して3倍程度大きいことが分かった. 発表では実験の詳細や規則度依存性について議論する.

本研究は JSPS 科研費 21K14218 および 18H03787 の助成を受けて行われた.

参考文献

- [1] T. Seifert, *et al.*, Nature Photon. **10**, 483 (2016).
[2] Y. Sasaki, *et al.*, AIP Advances **10**, 085311 (2020).

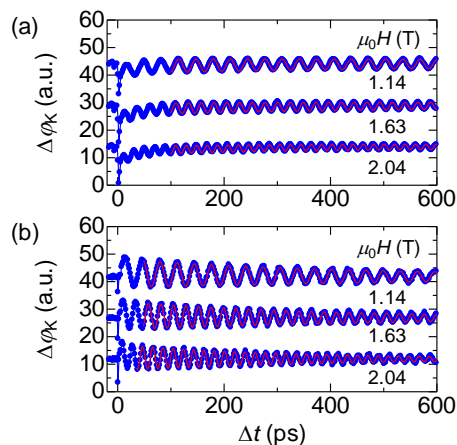


Fig.1 TRMOKE signal $\Delta\phi_K$ in (a)Co₂MnSi / MgO and (b)Co₂MnSi/Pt films with annealing temperature of 500°C. Solid lines are fitting results.

Magnetization switching driven by spin-orbit torque from a Co_2MnGa magnetic Weyl semimetal thin film

K. Tang^{1,2}, Z.C. Wen¹, Y.-C. Lau^{3,4}, H. Sukegawa¹, T. Seki^{3,4}, and S. Mitani^{1,2}

¹National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan

²Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8577, Japan

³Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

⁴Center for Spintronics Research Network, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

Magnetization switching driven by spin-orbit torques (SOTs) is crucial to realize ultrafast and energy-efficient spintronic memory devices. SOTs generated from ferromagnetic materials (FMs) are of great scientific and technological interest because the spin polarization orientations of spin currents in FMs can be controlled by their magnetization directions, and some of them, such as $L1_0\text{-FePt}$,¹⁾ exhibit large charge-to-spin conversion efficiency. Recently, a remarkable anomalous Hall effect was observed in the ferromagnetic semimetal Co_2MnGa owing to the topological Weyl state in its band structure,^{2,3)} which may contribute to the SOT. For example, the efficient SOT magnetization switching has been reported using nonmagnetic Weyl semimetal WTe_2 .⁴⁾ Thus, studying the spin transport properties of magnetic Weyl semimetal (MWS) combining FM and Weyl state is a promising step towards novel spintronic devices. In this work, we investigated the spin current generation and SOT-driven magnetization switching in Co_2MnGa -based MWS thin films.⁵⁾

Co_2MnGa -based heterostructures were deposited by magnetron sputtering. The films were characterized by reflection high-energy electron diffraction, atomic force microscopy, X-ray fluorescence and X-ray diffractometry. The magnetic properties were measured by a vibrating sample magnetometer. Furthermore, the samples were microfabricated into Hall bar structures by UV lithography. The transport properties of the films were characterized by harmonic Hall measurements in a physical property measurement system.

Epitaxial Co_2MnGa (001) films with flat surface morphology and highly $B2$ -ordered structures were grown on MgO (001) substrates. The spin Hall efficiency ζ_{SH} was evaluated to be -7.8% in a 1.3-nm -thick Co_2MnGa film. The SOT-induced magnetization switching of a perpendicularly magnetized CoFeB layer was demonstrated in a SOT device with the core structure of $\text{Co}_2\text{MnGa}/\text{Ti}/\text{CoFeB}$. The Hall resistance change after electric current application suggests almost all the magnetic moments of the CoFeB film were reversed by the applied electrical current. Then we studied the mechanisms of spin current generation in this trilayer structure. The second harmonic Hall signal shows a non-zero value when the magnetization of Co_2MnGa is parallel to the electrical field. The Co_2MnGa thickness (t_{CMG}) dependence of $|\zeta_{\text{SH}}|$ shows the amplitude of ζ_{SH} slightly decreases with increasing t_{CMG} . The shift of anomalous Hall effect loops with applied current is nearly negligible. Those results suggest that the spin-orbit filtering effect at the $\text{Co}_2\text{MnGa}/\text{Ti}$ interface and/or magnetization-independent spin Hall effect in Co_2MnGa may account for the spin current generation in the $\text{Co}_2\text{MnGa}/\text{Ti}/\text{CoFeB}$ heterostructure. This work not only provides contributions to the understanding of the mechanisms of spin-current generation from MWS-based heterostructures but also open a way for the applications of MWS in spintronics.

This work was partially supported by the KAKENHI (Nos. JP20K04569, JP20H00299, JP16H06332, and JP20K15156) from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), the Inter University Cooperative Research Program of the Institute for Materials Research, Tohoku University (No. 20K0058).

References

- 1) T. Seki *et al.*, *Phys. Rev. B*, **100**, 144427 (2019).
- 2) A. Sakai *et al.*, *Nat. Phys.*, **14**, 1119 (2018).
- 3) Q. Wang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **115**, 252401 (2019).
- 4) S. Shi *et al.*, *Nat. Nanotechnol.*, **14**, 945–949 (2019).
- 5) K. Tang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **118**, 062402 (2021).

Fe_{100-x}Rh_x合金における異常ネルンスト効果の組成依存性

山内友喜¹、濱田勇樹¹、黒川雄一郎¹、湯浅裕美¹
(¹九州大学)

Anomalous Nernst effect dependence on composition in Fe_{100-x}Rh_x alloys

T. Yamauchi¹, Y. Hamada¹, Y. Kurokawa¹, H. Yuasa¹
(¹ Kyushu Univ.)

はじめに

異常ネルンスト効果は磁性体に熱流が流れるときに、磁化と熱流の外積方向に起電力を生じる。起電力を向上して活用すべく研究され、従来から知られていた強磁性に加えて、ノンコリニア反強磁性でも発現すること、局所的な有効磁場が重要であることが報告されている^[1-3]。本報告では、反強磁性から強磁性に一次磁気相転移する FeRh 合金において、相転移点の磁気フラストレーションが異常ネルンスト効果に与える影響を調べるべく、FeRh 合金の組成を変化させて異常ネルンスト効果を測定することで、磁性状態と異常ネルンスト効果の関係を調べた。

実験方法

Fe_{100-x}Rh_x (50nm) / SiN (5nm) を Fe と Rh のコスツパタリングで熱酸化シリコン基板上に成膜し、等原子組成付近で $X=45, 48, 50, 52, 54, 60$ のように変化させた。成膜された Fe_{100-x}Rh_x 合金を規則化させるために、真空中で 1 時間、750°C でアニールした。その後、X-Ray Diffraction : XRD (θ - 2θ) で Fe_{100-x}Rh_x 膜の結晶構造を同定し、出来た膜について磁化測定、異常ネルンスト効果の測定を行った。

実験結果

Fig. 1 に XRD の結果を示す。全ての組成において CsCl 型規則相 FeRh (100) (110) の回折ピークを得ることができた。しかし、 $X=50\sim 60$ では、規則相と共に不規則 fcc 相も検出された。

次に、異常ネルンスト起電力を測定し、異常ネルンスト係数 $N: N = (\Delta V / \Delta T) \cdot (t / l)$ を算出し、飽和磁化と共に Fig. 2 に示す。CsCl 相かつ強磁性 FeRh である組成 $X=45, 48$ では、Fe 単体に比べ約 10 倍の異常ネルンスト係数が得られた。しかしながら、異常ネルンスト係数と磁化の大きさは Fe を除いて同じ組成依存性を示し、これは従来から知られている磁化と異常ネルンスト係数の関係であることから、磁気相転移に特有の増大では無いと推測される。一方、Fe に対して約 10 倍の N を示した理由については、異常ネルンスト角の測定などを踏まえて議論する予定である。

参考文献

- [1] A. Sakai *et al.*, Nature **581**, 53-57 (2020).
- [2] M. Mizuguchi *et al.*, Sci, Technol. Adv. Mater. **20**, 264 (2019).
- [3] M. Ikhlas *et al.*, Nature Physics **13**, 1085 (2017).

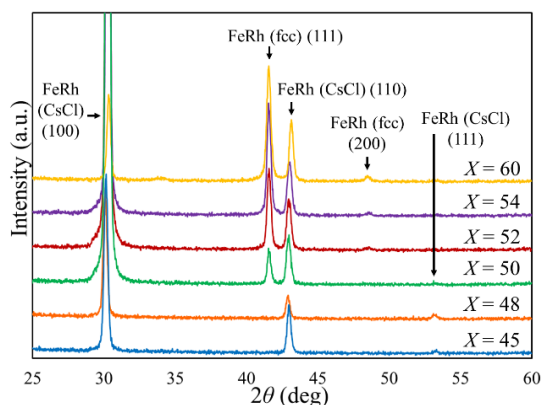


Fig. 1 XRD profiles for Fe_{100-x}Rh_x ($X=45, 48, 50, 52, 54$ and 60)

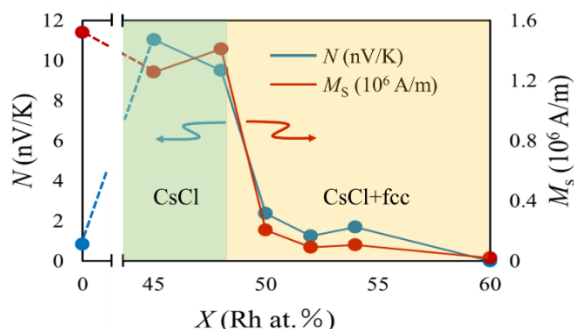


Fig. 2 Composition dependence of anomalous Nernst coefficient and magnetization.

半導体/強磁性体積層構造による横ゼーベック係数の増大

北浦 怜旺奈¹, 石部 貴史¹, Sharma Himanshu², 水口 将輝^{2,3}, 中村 芳明¹
(阪大院基礎工¹, 東北大金研², 名大未来研³)

Enhancement of transverse Seebeck coefficient using semiconductor/ ferromagnetic metal multilayer
Reona Kitaura, Takafumi Ishibe, Himanshu Sharma, Masaki Mizuguchi, Yoshiaki Nakamura
(Osaka Univ.¹, Tohoku Univ.², Nagoya Univ.³)

はじめに

熱から電気へ直接変換可能な熱電変換は、異常ネルンスト効果を利用したものとゼーベック効果を利用したものが多く研究されている。同じ無次元性能指数 ZT が得られた場合、異常ネルンスト効果を用いた熱電変換デバイスは、ゼーベック効果を用いたデバイスよりも熱電変換効率の最大値が高いことが理論的に提唱され、注目を集めている[1]。近年、強磁性金属/常磁性金属積層構造において、界面効果により異常ネルンスト効果の大きさの指標の一つである横ゼーベック係数が増大することが報告された[2]。しかし、一般に金属材料の熱伝導率は高いため、 ZT は低い値に留まる。このため、横ゼーベック係数の増大と同時に熱伝導率の低減が可能な材料が求められる。一方で、ゼーベック効果を用いた熱電変換では、半導体ナノ構造の導入による熱伝導率の低減[3,4,5]、アモルファス半導体を用いることで劇的に低い熱伝導率をもつ材料が多く報告されている[6]。そこで我々は、熱伝導率低減と横ゼーベック係数増大の同時実現を目指して、低熱伝導率なアモルファス半導体層と強磁性金属層からなる積層構造を提案する。本研究では、特に横ゼーベック係数増大に注目して、半導体 Si/強磁性金属 Co 積層構造を作製し、界面効果による横ゼーベック係数増大の観測を目的とした。

実験方法

電子線蒸着装置を用いて、Si (001)基板上に Co, Si をそれぞれ同じ膜厚(20 nm)で交互に積層した (基板温度: 室温)。比較用試料として、室温で Co 単層膜を作製した。構造評価には、走査型電子顕微鏡法 (SEM)、X 線回析法、ラマン分光法を用いた。横ゼーベック係数評価には、物理特性測定装置 (PPMS) を、熱伝導率測定には 2ω 法を用いた。

実験結果

Si/Co 積層構造の SEM 像を確認したところ、各層 20 nm で均一に積層されていることが分かった。横ゼーベック係数を測定したところ、この Si/Co 積層構造は、参照用の Co 単層膜よりも 2.4 倍程度高い横ゼーベック係数を示した。これより、従来、強磁性金属/常磁性金属積層構造においてのみ観測されてきた横ゼーベック係数増大効果が、半導体 Si/強磁性金属 Co 積層構造においても発現することが明らかとなった。本講演で詳細を報告する。

参考文献

[1] M. Mizuguchi, et al, *Sci. Technol. Adv. Mater.* **20**, 262 (2019). [2] K. Uchida, et al., *Appl. Phys. Lett.* **114**, 113902 (2019). [3] Y. Nakamura, et al, *Nano Energy* **12**, 845 (2015). [4] T. Taniguchi, et al, *ACS Appl. Mater. Interface* **12**, 25428 (2020). [5] Y. Nakamura *Sci. Technol. Adv. Mater. Interface* **19**, 31 (2018). [6] S. Kwon, et al, *ACS Nano* **11**, 2470 (2017).

(111)配向磁気トンネル接合の理論研究

増田啓介¹, 伊藤博介², 園部義明¹, 介川裕章¹, 三谷誠司¹, 三浦良雄¹
(物質・材料研究機構¹, 関西大システム理工²)

Theoretical study for unconventional (111)-oriented magnetic tunnel junctions

K. Masuda¹, H. Itoh², Y. Sonobe¹, H. Sukegawa¹, S. Mitani¹, and Y. Miura¹
(NIMS¹, Kansai Univ.²)

はじめに

磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) への応用のため、磁気トンネル接合 (MTJ) は高いトンネル磁気抵抗比 (TMR 比) に加えて大きな垂直磁気異方性 (PMA) を有する必要がある。このような必要条件を満足させるため、これまで bcc 構造を持つ Co(Fe)と MgO バリアによる(001)配向 MTJ が広く研究され、 Δ_1 コヒーレントトンネル効果による高い TMR 比と界面電子状態由来の PMA が報告されてきた [Fig. 1(a)]. その一方で、MTJ 電極に用いる強磁性体を fcc 構造のものにまで拡張できれば、バルク電子状態由来の PMA を利用することができ、MTJ 研究の幅を大きく広げることができると期待される。fcc 構造の最密面は(111)面であるため、fcc 強磁性体を用いた MTJ の自然な配向方向は[111]方向となる。以上のような理由で、本研究では様々な fcc 強磁性体を用いた(111)配向 MTJ の TMR 比と磁気異方性を理論的に解析した。

解析方法・結果

TMR 比、磁気異方性の計算とも密度汎関数法による第一原理計算を用いて行った [1,2]. TMR 比の計算ではバリスティック伝導を仮定して Landauer 公式を用い、磁気異方性の計算では Force theorem を利用した。

まず(111)配向 MTJ の TMR 比について基本的な知見を得るため、最も簡単な fcc Co, Ni と MgO による MTJ を考え、これらの系の TMR 比を計算した [1]. その結果、Co/MgO/Co(111)が 2000%を超える高い TMR 比を持つことがわかった。電子状態に関する解析の結果、このような高 TMR 比は Co-d 状態と O-p 状態の反結合によって形成される界面電子状態が MTJ の両界面間でトンネルする界面共鳴トンネル効果によるものであることがわかった [1].

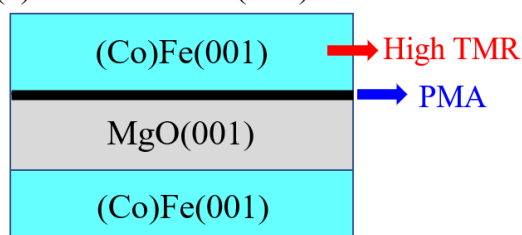
続いて強磁性電極として fcc 構造を持つ $L1_1$ 合金 (FeNi, CoNi, XPt, XPd; X = Fe, Co, Ni) を考え、これらを用いた MTJ の TMR 比と磁気異方性を評価した [2]. まず磁気異方性については、大きな PMA が CoNi, CoPt, CoPd を含む多くの系で得られた。続いて TMR 比について解析を行った結果、界面に Co 層を含む CoNi, CoPt, CoPd の MTJ で 2000%を超える高い TMR 比が得られた。

これは上記のシンプルな fcc Co の場合と同様に、界面共鳴トンネル効果由来の高 TMR 比であることが確認できた [2]. 以上のような結果から、我々は今回の(111)配向 MTJ が、従来とは異なる機構で高 TMR, 巨大 PMA を実現しうる系であることを提案する [Fig. 1(b)].

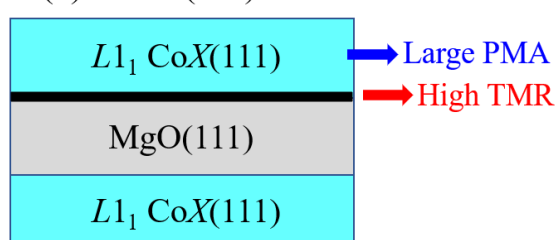
参考文献

- 1) K. Masuda, H. Itoh, and Y. Miura, Phys. Rev. B **101**, 144404 (2020).
- 2) K. Masuda, H. Itoh, Y. Sonobe, H. Sukegawa, S. Mitani, and Y. Miura, Phys. Rev. B **103**, 064427 (2021).

(a) Conventional (001)MTJ



(b) Novel (111)MTJ



X = Ni, Pt, Pd

FIG.1. Schematics of (a) conventional (001)-oriented MTJs and (b) novel (111)-oriented MTJs.

Fe/MgO/Fe(001) : 室温 400%・低温 900%を超える トンネル磁気抵抗比の観測

Thomas Scheike, Qingyi Xiang, Zhenchao Wen, ○介川裕章, 大久保忠勝, 宝野和博, 三谷誠司
(物材機構)

Fe/MgO/Fe(001): Observation of tunnel magnetoresistance exceeding 400%
at room temperature and 900% at low temperature

Thomas Scheike, Qingyi Xiang, Zhenchao Wen, ○Hiroaki Sukegawa, Tadakatsu Ohkubo,
Kazuhiro Hono, and Seiji Mitani
(NIMS)

はじめに

2004年にFe/MgO/Fe(001)構造の強磁性トンネル接合(MTJ)において室温180%の巨大トンネル磁気抵抗(TMR)効果が報告されたのち、スピントロニクス応用は飛躍的な進化を遂げた¹⁾。それまでのアモルファスバリアを用いたMTJより数倍大きい値が容易に得られるようになり、素子電気出力増大の恩恵によって新デバイス創成に大きく寄与してきた。一方、理論計算によるとFe/MgO/Feは1,000%を優に超えるTMR比が予測されており²⁾、室温180~220% (低温290~370%)の実験値とは大きな乖離がある。本研究ではその理由の一端を明らかにするためFe/MgO/Feに改めて着目した。単結晶成長法の改善の結果、素子の高品質化を達成し、室温で400%以上、低温では理論値に迫る900%を超える非常に大きな値が得られたので報告する³⁾。

実験方法

マグネトロンスパッタ装置を用いてMgO(001)単結晶基板上に、Crバッファ層、Fe/Mg/MgO/Fe/IrMn/Ruキャップ構造のMTJ多層膜を作製した。MgO層作製には電子線蒸着を用い、基板処理、バッファ層、上下Fe層、Mg層、MgO層、各層熱処理、後酸化の各プロセスの最適化を行った。多層膜成膜後、磁場中熱処理を行い、面内電流トンネル(CIPT)法によるTMR特性の評価を行った。その後、 μm サイズのMTJ素子に微細加工を行い、直流4端子法によって素子の磁気伝導特性評価を室温及び低温(5 K)において行った。

実験結果

各層の最適化に伴いTMR比の増大がみられ、磁化平行時の微分コンダクタンス曲線にも特徴的な極小構造が大きく発達することが確認された。最終的に室温で最大417% (CIPT: 405%)、5 Kにおいて914%の値を観測した(TMR曲線: Fig. 1)。またCoFe層をMgO下側界面に挿入することで、496%への室温TMR比増大がみられた。この結果、TMR比のMgO膜厚に対し振動する現象も非常に大きくなりFe/MgO/Fe報告値¹⁾の数倍の振動振幅が観測された(振動幅~80%、室温)。TMR比の大幅な増大がFe/MgO/Feという単純な構造でも観測できたことから、作製法のさらなる改善や強磁性層・バリア層への新材料の導入によって今後さらに巨大な室温TMR比の実現につながることが期待される。本研究の一部は佐橋ImPACTにより、科学技術振興機構を通して委託されて行われた。また、JSPS科研費(16H06332、21H01750)の支援により行われた。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(No. JPNP16007)の結果得られたものを含む。

参考文献

- 1) S. Yuasa *et al.*, Nat. Mater. **3**, 868 (2004).
- 2) W. Butler *et al.*, Phys. Rev. B **63**, 054416 (2001);
J. Mathon and A. Umerski, Phys. Rev. B **63**, 220403(R) (2001).
- 3) T. Scheike *et al.*, Appl. Phys. Lett. **118**, 042411 (2021).

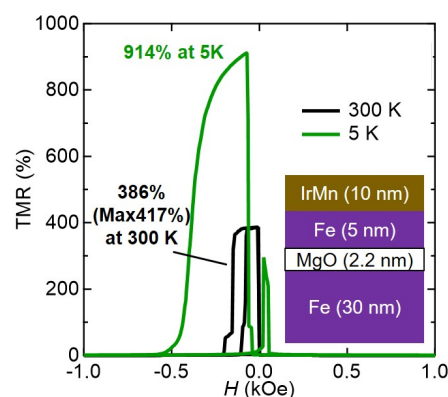


Fig 1. TMR ratio vs. magnetic field H of an Fe/MgO/Fe(001) MTJ at 300 and 5 K.

MgO と MgAl₂O₄ を用いた 3 層型バリアによる磁気抵抗効果のバイアス電圧依存性の改善

名和憲嗣^{1,2}, 増田啓介², 三浦良雄²
(三重大院工¹, 物質・材料研究機構²)

Improved bias-voltage dependence of magnetoresistance by tri-layered tunnel barrier of MgO and MgAl₂O₄

K. Nawa^{1,2}, K. Masuda², and Y. Miura²
(Mie Univ.¹, NIMS²)

はじめに

巨大トンネル磁気抵抗効果 (TMR) の実現に向け、MgO バリアを用いた磁気トンネル接合 (MTJ) は精力的に研究され、近年では極低温での TMR が CoFeB 電極系で 1144%¹⁾、Fe 電極系で 914%²⁾ と理論予測値 (~1000%) に匹敵するにまで至っている。一方、バイアス電圧の印加により TMR は急激に減少するため、情報読出し時の出力電圧信号が小さくなる点が課題である。MgAl₂O₄ (MAO) に代表されるスピネル酸化物は、種々の強磁性体と格子整合性が良く、MgO と比較して TMR のバイアス電圧依存性が大幅改善されることから、次世代バリア材料として期待される³⁾。第一原理計算から、例えば Fe/MAO/Fe MTJ の優れたバイアス電圧依存性は、MAO の面内格子定数が Fe より 2 倍大きいことから生じる Fe 電極のバンド折り畳み効果が起源とされる⁴⁾。しかし、Fe/MAO/Fe の TMR は Fe/MgO/Fe よりも低い。従って、高い TMR と優れたバイアス電圧依存性を両立するバリア材料の開発が急務である。この課題解決に向け、我々は、MgO 及び MAO で構成される 3 層型 MgO/MAO/MgO バリア型 MTJ の TMR とそのバイアス電圧依存性を第一原理計算により調べた。

計算方法と結果

典型的な Fe 電極を用い、単原子層の MgO を Fe/MAO 両界面に挿入した MgO/MAO/MgO バリア (3 層型) MTJ、及び比較対象として MAO バリア (単層型) MTJ に対し、非平衡 Green 関数法に基づく第一原理計算を実施した。TMR のバイアス電圧 (V_b) 依存性を図 1(a) に示す。 $V_b = 0$ V のとき、単層型 MTJ では低い TMR (125%) が得られた。これは上述のバンド折り畳み効果に起因する少数スピン状態における伝導性チャンネルの出現によることを確認した。一方、3 層型 MTJ の TMR は 1184% と巨大な値を得た。次に、バイアス電圧を印加すると、例えば $V_b = 1$ V 以下の領域では、3 層型 MTJ の TMR の変化は小さく一定の値を保った。これは、単層型 MTJ と同様の傾向である。図 1(b, c) に、各モデルに対する電流- V_b 依存性を示す。 $V_b = 1$ V 以下の領域の反平行 (AP) 磁化での電流について、3 層型 MTJ では電流値は極めて小さいが、単層型 MTJ では V_b の上昇に伴い電流値も大きくなった。波数空間におけるスピン透過率の解析から、3 層型 MTJ では MgO 層を挿入したことでバンド折り畳み効果による AP 磁化でのトンネル電子が抑制されていることが明らかになった。平行磁化では、いずれの MTJ モデルでもおおよそ単調増加し、大きな差は見られなかった。以上の結果から、3 層バリア型の MgO/MAO/MgO-MTJ が、高い TMR と優れたバイアス電圧依存性を両立する可能性が示唆された⁵⁾。本研究の一部は TDK 株式会社及び JSPS 科研費 (JP16H06332, JP17H06152, JP20H02190, JP20K14782) の助成により行われた。

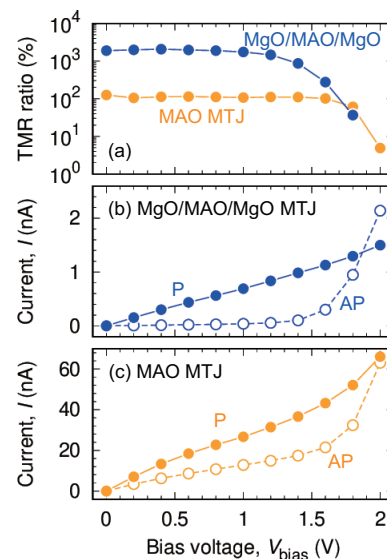


FIG. 1 Bias-voltage dependences of (a) TMR ratio and (b, c) current for the MTJs with tri-layered MgO/MAO/MgO and single MAO barriers, respectively.

参考文献

- 1) S. Ikeda *et al.*, APL 93, 082508 (2008). 2) T. Scheike *et al.*, APL 118, 042411 (2021). 3) H. Sukegawa *et al.*, APL 96, 212505 (2010). 4) K. Masuda *et al.*, PRB 96, 054428 (2017). 5) K. Nawa *et al.* (submitted).

格子整合 MgAl₂O₄ バリアトンネル磁気抵抗素子の絶縁破壊特性

介川裕章¹, Zhenchao Wen¹, 葛西伸哉¹, Ashutosh Kumar¹, 大久保忠勝¹,
宝野和博¹, 三谷誠司¹, 市川心人², 中田勝之²

(1 物材機構、2 TDK)

Dielectric breakdown characteristics of lattice-matched MgAl₂O₄-based magnetic tunnel junctions

Hiroaki Sukegawa¹, Zhenchao Wen¹, Shinya Kasai¹, Ashutosh Kumar¹, Tadakatsu Ohkubo¹,

Kazuhiro Hono¹, Seiji Mitani¹, Shinto Ichikawa², Katsuyuki Nakada²

(1 NIMS, 2 TDK)

はじめに

スピントルク駆動型磁気メモリ (STT-MRAM) などの応用では高い絶縁破壊耐電圧を持つ強磁性トンネル接合 (MTJ) の実現が望まれる。MTJ バリア層として MgO が広く用いられているが、その膜厚は 1 nm 程度と非常に薄くその耐電圧の確保が大きな課題である。MTJ の耐電圧はバリア層界面近傍の結晶品位や原子欠陥と密接に関係していることが知られている。CoFe(B)磁性層と格子不整合が非常に小さく、界面欠陥の抑制が容易な MgAl₂O₄ スピネルバリア MTJ では比較的良好な TDDB (経時破壊) 特性を持つことが報告されている²⁾。本研究では MgAl₂O₄ バリア MTJ に着目し、その耐電圧について直流 (DC) 電圧及び 10 ns 程度の短パルス電圧を用いて詳細に検討した。この目的のため、数 Ω・μm² 程度の面積抵抗 (RA) を持つ単結晶 CoFe/MgAl₂O₄/CoFe(001)格子整合 MTJ を作製し、同等のトンネル磁気抵抗 (TMR) 比、RA を持つ CoFe/MgO/CoFe 参照試料と電圧破壊特性を比較した。

実験方法

マグネトロンスパッタ装置を用い、MgO(001)単結晶基板上に [(Cr/Fe)下地]/CoFe/MgAl₂O₄ (0.9-1.2 nm)/CoFe/Fe/IrMn/Ru を基本構造とする面内磁化型 MTJ を作製した。低 RA 領域において高品位 MgAl₂O₄ バリア層を得るため、Mg、Mg-Al 成膜と後酸化を繰り返す 2 段階酸化法³⁾を採用した。多層膜は CIPT 法による TMR 比・RA の評価を行ったのち、250×100 nm²程度のサイズの MTJ ピラーに微細加工を行い、DC 電圧及びパルスジェネレーターによる ns オーダーのパルス電圧を用いて破壊電圧を 2 端子法で評価した。

実験結果

まず RA < 10 Ω・μm² 領域において MgAl₂O₄ バリア作製最適化を行った結果を Fig. 1 に示した。3~10 Ω・μm² の領域で 180%以上の良好な TMR 比が実現されている。次にバリア膜厚を固定し素子の耐電圧を評価した。Fig. 2 に RA = 4.9 Ω・μm² の DC 破壊テスト (25 素子) の結果例を示している。抵抗が急激に低下する電圧 (耐電圧) のばらつきは比較的小さく、平均して 1.0 V 程度と見積もられた。また 10 ns の電圧パルスでは耐電圧 1.5 V 程度が得られた。これらは MgO バリア参照試料で得られた耐電圧 (DC : 0.8 V、10 ns パルス : 1.2 V) に比べ有意に大きく、MgAl₂O₄ によるバリア界面微細構造の改善効果が考えられる。

参考文献

- 1) Ikhtiar *et al.*, Appl. Phys. Lett. **112**, 022408 (2018).
- 2) C.M. Choi *et al.*, Electronics Lett. **53**, 119 (2016).
- 3) S. Ichikawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **117**, 122409 (2020).

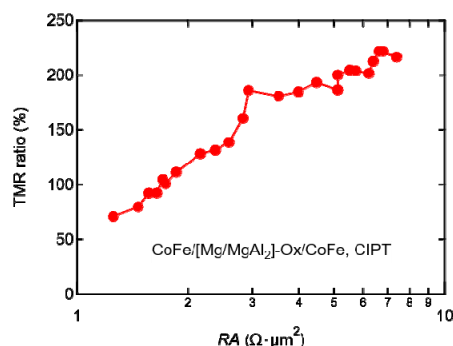


Fig. 1. TMR ratio vs. RA of CoFe/MgAl₂O₄/CoFe MTJs prepared by the 2-step process.²⁾

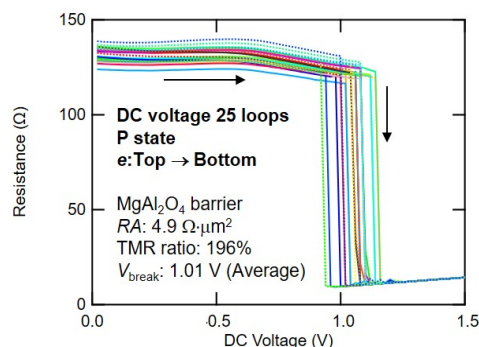


Fig. 2. DC breakdown test results of CoFe/MgAl₂O₄/CoFe MTJs with RA = 4.9 Ω·μm².

偶関数型抵抗-磁界特性を示すトンネル磁気抵抗素子の作製

中谷友也, Prabhanjan D. Kulkarni, 岩崎仁志, 桜庭裕弥
(物質・材料研究機構)

Fabrication of tunnel magnetoresistance devices with even-function type resistance-field response

T. Nakatani, P. D. Kulkarni, H. Iwasaki, Y. Sakuraba

(National Institute for Materials Science)

はじめに

生体磁気など微弱な低周波磁界の検出を目指し、磁気抵抗センサの研究が盛んに進められている。およそ 1 kHz 以下の周波数帯域では、磁気抵抗素子の $1/f$ ノイズが磁界分解能を決定するため、 $1/f$ ノイズの低減が重要課題である。最近、巨大磁気抵抗(GMR)センサに対し交流磁界を印加し、センサの動作周波数を高周波側にシフトすることで、 $1/f$ ノイズが低減されることが示された[1]。この方法を用いるためには、外部磁界の正負に対して対称な抵抗-磁界(R - H)特性を示すセンサが必要である。GMR の場合、スペーサー層を介した磁気結合や短冊状素子の形状磁気異方性により、自由層を平行磁化状態に安定化させ、外部磁界を自由層の困難軸方向に印加することで、偶関数型の R - H 特性が得られる。一方、トンネル磁気抵抗(TMR)の場合、Slonczewski の式[2]で表されるように、素子抵抗は強磁性電極間の磁化角度 $\theta = \pi/2$ に対し非対称な θ 依存性を示すため、高い感度(dR/dH)を得るためには、TMR センサを反平行磁化状態付近で用いることが重要である。

実験方法

図 1(a)に示すように、基板/電極/Ta (2)/Ru (2)/IrMn (6)/CoFe (2)/AgSn (2-3)/CoFe (1)/CoFeBTa (20)/Ta (0.3)/CoFeB (3)/MgO (2)/CoFeB (2.5)/Ta (0.3)/CoFe (1)/Ru (0.75)/CoFe (3)/IrMn (8)/Ru (8) (膜厚は nm) スピンバルブ構造を作製した。MgO バリアの基板側が自由層であり、軟磁性アモルファス CoFeBTa 層を有する。自由層は、AgSn スペーサーを介した固定層 1 との強磁性的な orange-peel 結合により微弱にピンングされており、ゼロ磁界で MgO バリアをはさんだ CoFeB 電極間の磁化配列は反平行となる。

実験結果

図 1(b)に自由層に対するピンング強度(H_{shift})の AgSn スペーサー層膜厚依存性を示す。スペーサー層膜厚の調整により、 H_{shift} を 1 mT 以下の微弱な領域で精密に制御することができる。また、AgSn は Ag や Cu に比べ平坦性に優れ、orange-peel 結合強度すなわち H_{shift} の微調整に適している。図 1(c)に R - H 曲線を示す。外部磁界をピンング方向に対し垂直 (困難軸) 方向に印加し、素子の形状を工夫することで、ほとんどヒステリシスのない偶関数 R - H 特性が得られる。 H_{shift} を小さくすることで感度 $1/R_{\text{min}} \cdot dR/dH$ は増大し、最大で 100 %/mT 程度の感度が得られた。講演ではこれらの TMR 素子のノイズ特性についても議論する。

参考文献 [1] Shirotori *et al.* IEEE Trans. Magn. **57**, 4000305 (2021). [2] Slonczewski, Phys. Rev. B **39**, 6995 (1989).

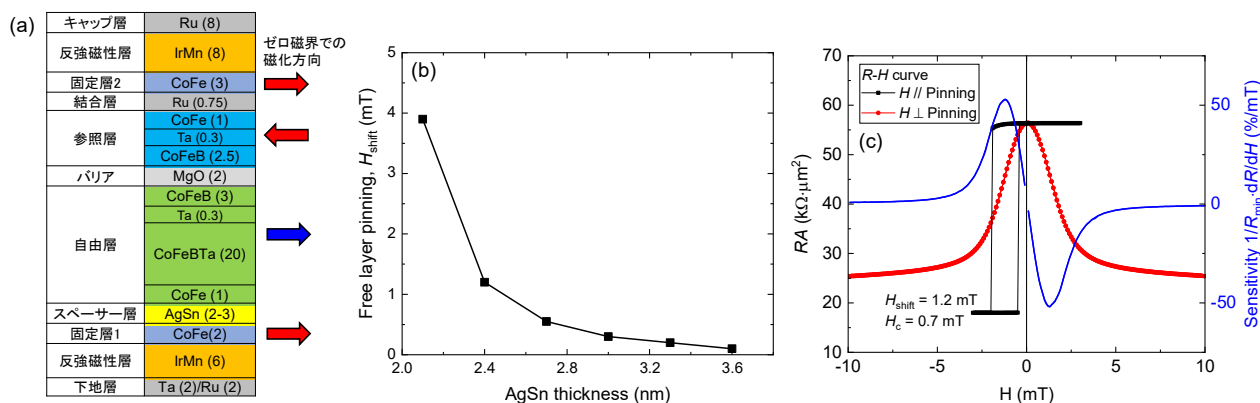


図 1(a) TMR 素子の積層構造, (b) 自由層のピンング強度と AgSn スペーサー膜厚, (c) TMR 素子の R - H 曲線。

高 T_C /低 T_C ハイブリッド層を用いた熱アシスト STT 磁化反転における 界面高 T_C 層の影響

趙望臻, 加藤剛志, 大島大輝, 岩田聡*
(名古屋大学, *名古屋産業科学研究所)

Effect of high T_C interface layer on the thermally assisted STT switching of high T_C / low T_C hybrid memory layer

W. Zhao, T. Kato, D. Oshima, S. Iwata*

(Nagoya Univ., *Nagoya Industrial Science Research Institute)

1. はじめに

熱アシスト (TA) スピントランスファートルク (STT) 磁化反転方式は 10 Gbit クラス磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) を実現できる書き込み方式として期待されている。我々は低キュリー温度 (T_C) の CoPd/Pd 多層膜 (ML) と高 T_C の Co/Pd ML を用いたハイブリッドメモリ層を用い、熱アシストによる高効率な STT 磁化反転が実現できることを検証した[1-3]。前回、スピン偏極電流による磁化反転トルクが作用する高 T_C 層の層厚比を変化させた $[\text{Co}(x)/\text{Pd}(1.6-x)]_1 / [\text{CoPd}/\text{Pd}]_2$ ($x = 0.4, 0.6, 0.8$) ハイブリッドメモリ層を用い、臨界電流密度 (J_{c0}) の温度依存性を報告した[4]。今回、時間分解磁気光学 Kerr 効果 (TRMOKE) を用い、ハイブリッドメモリ層のダンピング定数 (α) を測定し、界面層の膜厚比と STT 磁化反転の関係を調べた。

2. 実験方法

前回の報告と同様、リファレンス層 / Cu(2.5) / ハイブリッド層 (層厚の単位は nm) という CPP-GMR 構造を作製し、微細加工した。ハイブリッド層は高 T_C $[\text{Co}(x)/\text{Pd}(1.6-x)]_1$ ML / 低 T_C $[\text{Co}_{48}\text{Pd}_{52}(0.4)/\text{Pd}(1.2)]_2$ ML で構成されている。パルス幅 $\tau = 10 \mu\text{s} - 100 \text{ms}$ の電流パルスを CPP-GMR 素子に印加し、STT 磁化反転臨界電流を測定し、そのパルス幅依存性を $\tau = 1 \text{ns}$ まで外挿することで、臨界反転電流密度 J_{c0} を見積もった。また、 α の測定には、Ta(5) / Pd(5) / ハイブリッド層 / Ta(2) と Ta(5) / Pd(5) / 高 T_C 界面層 / Ta(2) をスパッタ成膜し、TRMOKE により磁化ダイナミクスを測定した。TRMOKE は、中心波長 1040 nm、パルス幅 500 fsec、繰り返し周波数 100 kHz のファイバーレーザーを光源とし、Pump 光として波長 1040 nm、Probe 光として二次高調波の 520 nm のレーザー光を試料に入射した。測定の際、14 kOe の外部磁界を膜面法線方向から $40^\circ \sim 85^\circ$ の範囲で印加した。測定した磁化の歳差運動を減衰振動関数 $\exp(-\tau/t)\sin(\omega t)$ でフィッティングし、緩和時間 τ の角周波数 ω 依存性から α を算出した。

3. 実験結果

Fig. 1 は $x = 0.4, 0.6, 0.8$ のハイブリッドメモリ層を有する CPP-GMR 素子の J_{c0} の温度依存性を示している。 J_{c0} は温度上昇により減少し、熱アシスト STT 磁化反転が確認される。 $x = 0.4, 0.6$ に対し、 $x = 0.8$ では J_{c0} が大きく減少している。Fig. 2 はハイブリッド層と界面高 T_C 層のみの α を示している。ハイブリッド層の α は Co の膜厚を増加すると共に減少しているが、Co の膜厚が 0.6 を超えると大きく減少する。これは Pd 膜厚の減少により高 T_C / 低 T_C 層間の交換結合が強くなるためと考えられる。この α の減少が Fig. 1 で示した室温における $x = 0.8$ の J_{c0} の減少を説明すると考えられる。また、 J_{c0} の温度依存性は $x = 0.8$ で最も小さくなっているが、これもハイブリッド層の α の減少、すなわち高 T_C / 低 T_C 層間の交換結合が強くなることと関係していると考えられる。以上から、高 T_C / 低 T_C 層間の交換結合が、ハイブリッドメモリ層の室温での J_{c0} およびその熱アシスト効果に大きく影響を与えていると考えられる。

4. 参考文献

- [1] Machida et al., IEEE Trans. Magn., **53**, 2002205 (2017).
- [2] W. Zhao et al., IEEE Trans. Magn., **54**, 3450405 (2018).
- [3] W. Zhao et al., J. Magn. Magn. Mater., **493**, 165749 (2020).
- [4] 日本磁気学会第 44 回講演会, 15pC-7(2020)

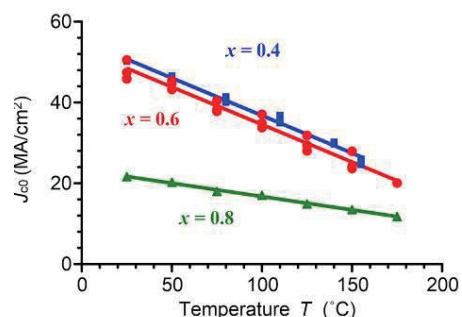


Fig. 1 Temperature dependence of intrinsic critical current density J_{c0} of the hybrid memory layer of $[\text{Co}(x)/\text{Pd}(1.6-x)]_1 / [\text{CoPd}/\text{Pd}]_2$

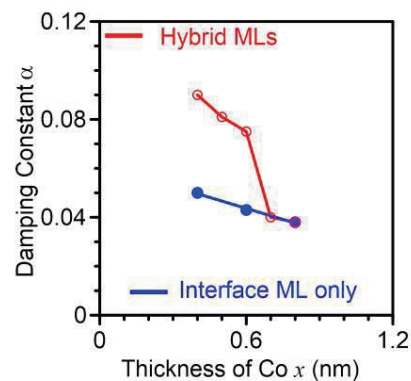


Fig. 2 Dependence of damping constant α on the thickness of Co x in interface Co/Pd layer.

微細素子における AFC 構造効果のシミュレーション II

木村大貴、仲谷栄伸

(電通大情報理工)

Computer simulation of AFC structure effect for small MTJ II

Hiroki Kimura, Yoshinobu Nakatani

(Univ. of Electro-Comm.)

はじめに

スピントルクにより磁化反転 [1] を行う STT-MRAM[2] は、高密度化のために記録素子の微細化、及び反転電流密度の低減などが必要とされている。近年、自由層の膜厚を厚くすることで体積の増加、及び形状異方性を利用して、熱安定性を確保しながらも素子の微細化が可能であることが示された [3]。しかし、この手法では高速動作時における反転電流密度の低減が課題となっている。以前我々は、直径 $d = 30$ nm、膜厚 $h = 2$ nm の自由層に対し、反強磁性交換結合 (AFC) した 2 層構造を用いることにより、反転電流密度が低減可能であることを示した [4]。本研究では、直径をより小さく、膜厚をより大きくした素子形状について AFC 構造の有用性を調べ、素子微細化の限界について調査した。

計算条件

今回は反強磁性交換結合 (AFC) した 2 層構造の自由層を計算対象とした。材料定数は CoFeB の値を用い、異方性定数 $K_u = 3.48$ Merg/cm³、飽和磁化 $M_s = 600$ emu/cm³、交換スティッフネス定数 $A = 1.0 \times 10^{-6}$ erg/cm、磁気回転比 $\gamma = 1.76 \times 10^7$ rad/(Oe · s)、スピン分極率 $P = 1.0$ とした。ここで、異方性定数は直径 $d = 30$ nm、膜厚 $h = 2$ nm の単層構造 (SL) が熱安定性指数 $\Delta = 60$ となる異方性定数を用いた。また、スピン電流のパルス幅 $t_p = 1.0$ ns とし、直径 d 、及び上層の膜厚 h_1 をそれぞれ 1 ~ 30 nm にて変化させ、下層の膜厚 h_2 は上層との比率より定めた。今回は $h_2/h_1 = 0$ (単層構造: SL), $1/2$ (2 層構造: AFC) となる形状を考えた。以上の条件より、磁化反転シミュレーションを行い、反転電流密度 j_{sw} を調べた。

結果

まず、SL における形状による熱安定性指数の変化を Fig.1 に示す。図より、熱安定性指数 Δ が 60 以上となっている点を反転電流密度の調査対象とした。微細素子に対する AFC 構造の有用性を調べるため、直径 $d = 10$ nm、上層の膜厚 $h_1 = 10$ nm (Pat. 1)、及び直径 $d = 5$ nm、上層の膜厚 $h_1 = 29$ nm (Pat. 2) に対して、損失定数 α による反転電流密度 j_{sw} の変化を求めた。結果を Fig.2 に示す。図より、AFC 構造によって反転電流密度 j_{sw} を低減可能であることがわかった。以前の報告 [4] では、直径 $d = 30$ nm、上層の膜厚 $h_1 = 2$ nm の形状に対して、AFC 構造による反転電流密度の低減率は 50 % 程度となることが示されていた。ここで、Pat. 1 の AFC 構造による反転電流密度の低減率は最大 51 % であったのに対し、Pat. 2 における低減率は最大 36 % であった。よって、直径 $d = 10$ nm においては以前の報告にて示された程度の低減率が得られたが、それ以下の直径においては低減率が減少していることが確認できた。このことから、AFC 構造を利用した素子の微細化には限界があることがわかった。

参考文献

- [1] J. C. Slonczewski, *J. of Magn. Magn. Mater.*, **159**, 1 (1996).
- [2] L. Thomas, *et al.*, IEEE International Electron Device Meeting pp. 27.3, 1-4 (2018).
- [3] K. Watanabe, *et al.*, *Nat. Commun.*, **9**, pp. 510, (2018).
- [4] K. Yamada, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **127**, 133906 (2020).

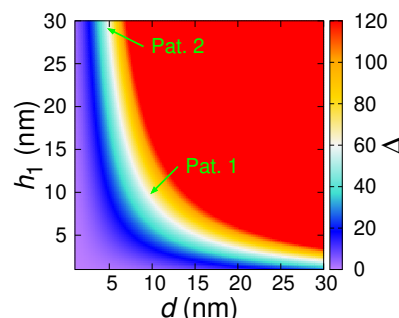


Fig. 1 Effect of d and h_1 on Δ

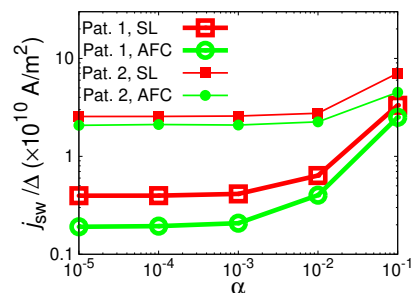


Fig. 2 Effect of α on j_{sw}/Δ

無磁界スピントルク発振素子の開発

常木澄人^{1,2}、薬師寺啓¹、福島章雄¹、湯浅新治¹、久保田均¹

(¹産総研, ²JST-さきがけ)

Development of zero field spin torque oscillator

Sumito Tsunegi^{1,2}, Kay Yakushiji¹, Akio Fukushima¹, Shiji Yuasa¹, and Hitoshi Kubota¹

(¹AIST, ²JST-RESTO)

はじめに

スピントルク発振素子(STO)はナノメートルサイズの自励発振素子であり、次世代通信の信号源や磁界センサーなどの応用を目指した研究開発が行われてきた。近年では、人工ニューラルネットワークの人工ニューロンとして STO を利用する演算器の開発研究も進められている¹⁾。これらの応用では高い発振出力と高い Q 値を両立することが望まれる。これらの要求に加えてシステムの低消費電力化や小型化のために、無磁界下で STO の発振を励起することは必須となる。しかしながら、これまでの STO では、無磁界下で $1 \mu\text{W}$ を超える高い発振出力および 1000 を超える高い Q 値を両立した報告は皆無である。本研究では、高い発振出力が期待される FeB を自由層、および、Co/Ni 多層膜からなる垂直磁化スピン注入層を用いることにより²⁾、無磁界で高い出力と高い Q 値を両立する STO の開発を行った。

実験方法

本研究で用いた磁気渦型 STO の膜構成を図 1(a)に示す。自由層 FeB 膜厚は 6 nm とし、Co/Ni 多層膜は Co 0.2 nm と Ni 0.5 nm の交互積層を 7 回繰り返し作製した。多層膜作製後、1T の磁界を膜面平行方向に印加し、330°C のアニール処理を行った。その後、膜面垂直方向に磁界を印加し磁気特性を評価した。また、直径 400 nm の STO を EB リソグラフィおよび Ar イオンミリングにより作製した。膜面垂直方向の磁界および直流電圧 V_{DC} を印加し、STO から出力される高周波信号をスペクトラムアナライザーで評価した。

実験結果

図 1(b)に多層膜の磁化曲線を示す。無磁界で有限の磁化を持つことから、Co/Ni 多層膜が垂直磁化していることが確認された。図 1(c)は無磁界、 $V_{\text{DC}}=290 \text{ mV}$ で得られた発振スペクトルである。無磁界にて $1 \mu\text{W}$ を超える高い出力と 1000 を超える高い Q 値を得ることに成功した。高い出力と狭い線幅を両立するこの無磁界発振素子は演算器などの応用に非常に有望であると期待される。

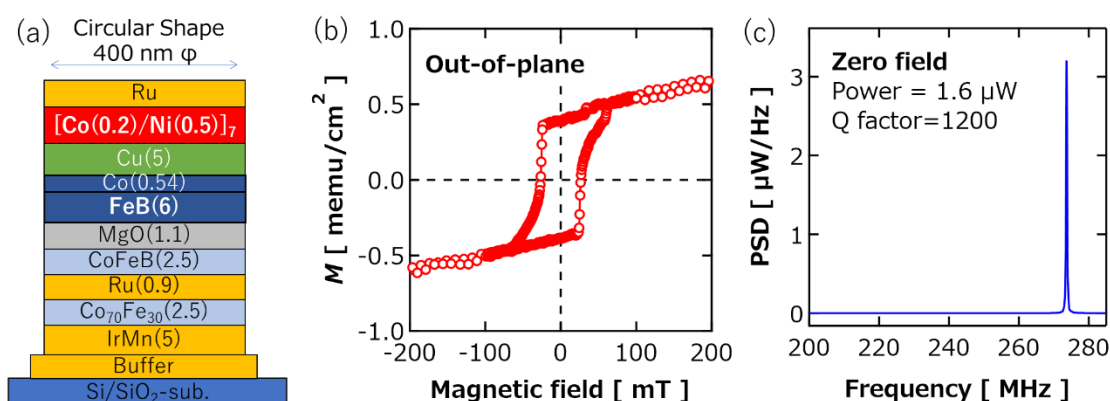


図 1(a)STO の素子構造。(b) 垂直磁界下での多層膜の磁化曲線。(c)無磁界における発振スペクトル。

<謝辞>本研究は、JST、さきがけ、JPMJPR20M5 の支援を受けたものです。

参考文献

- 1) J. Torejon et al., Nature **547**, 428 (2017)
- 2) A. Dussaux et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 022404 (2014)

マイクロ波磁界印加による injection locking を利用した スピントルク発振素子の磁化ダイナミクス解析

首藤 浩文¹, N. Asam¹, 田丸 慎吾², H. Sepehri-Amin¹, A. Bolyachkin¹,
周 偉男¹, 中谷 友也¹, 久保田 均², 桜庭 裕弥¹
(¹物材機構, ²産総研)

Analysis of a spin-torque oscillator using injection locking to a microwave magnetic field
H. Suto¹, N. Asam¹, S. Tamaru², H. Sepehri-Amin¹, A. Bolyachkin¹,
W. Zhou¹, T. Nakatani¹, H. Kubota², and Y. Sakuraba¹
(¹NIMS, ²AIST)

本研究の背景、本研究で提案した解析手法の原理

スピントルク発振素子 (STO) は、直流電流を通電することにより磁化の歳差運動を励起できるナノデバイスであり、マイクロ波アシスト磁気記録におけるマイクロ波磁界発生源などの応用が注目されている。これまで、STO の磁化ダイナミクスの解析には STO から発生する高周波電気信号 (STO 信号) が利用されてきた。しかしながら、この手法には、①磁化振動の軌道が対称的な場合、高周波電気信号が生じないため使用できない、②実際の磁化振動の周波数に対応しない周波数成分が生じ、磁化振動に対応した周波数成分との分離が困難、といった問題があった[1]。この問題を解決するため、外部マイクロ波磁界を STO に印加した際の injection locking を用いた新たな解析手法を考案し実験的に実証を行った[2,3]。新規手法は injection locking によって磁化の軌道が変化した場合の STO の DC 抵抗変化を利用する。この原理のため、①高周波信号が発生しない場合にも解析が可能、②実際の磁化振動の周波数のみが検出可能、という利点がある。

実験セットアップ

Fig. 1 に実験セットアップを示す。all-in-plane 型の STO の上部にマイクロ波磁界発生用のアンテナ線路を作製した。このアンテナ線路に、信号発生器から 1 MHz でパルス変調した高周波信号を導入し、変調に同期した STO 抵抗の変化 (Fig.1 IF 成分) をロックイン検出した。1 MHz は STO の磁化発振の周波数より十分低いため、injection locking によって生じる STO の DC 抵抗の変化が検出される。また、このセットアップでは従来手法である STO 信号 (Fig. 1 HF 成分) をスペクトラムアナライザによって測定できる。

実験結果

Fig. 2(a)に、従来手法により測定した STO 信号のスペクトルを示す。32 GHz 付近にピークがあらわれているが、STO の磁化発振が実際にこの周波数で起きていること直接示しているわけではない。Fig. 2(b)に、新規手法を用い、信号発生器の周波数をスイープして測定した STO 抵抗の変化を示す。STO 信号のピークに対応した周波数において、injection locking による磁化軌道の変化を反映した抵抗の変化があらわれた。また、信号発生器のパワーを増加させてマイクロ波磁界強度を上昇させた場合、磁化軌道の変化も大きくなるため抵抗変化も増大した。このように、新規手法では、STO 信号を測定することなく STO の磁化発振の解析が可能である。さらに、injection locking は実際の磁化振動の周波数でのみ生じることを考慮すると、新規手法の測定結果は STO の磁化発振が 32 GHz で起きていることを示している。

本研究は情報ストレージ研究推進機構 (ASRC)、JSPS 科研費 17H06152、19K05257 の支援、助成を受けた。

参考文献 1) W. Zhou, et al., APL. **114**, 172403 (2019). 2) H. Suto, et al., APEX **14**, 053001 (2021). 3) N. Asam, et al., APL(submitted).

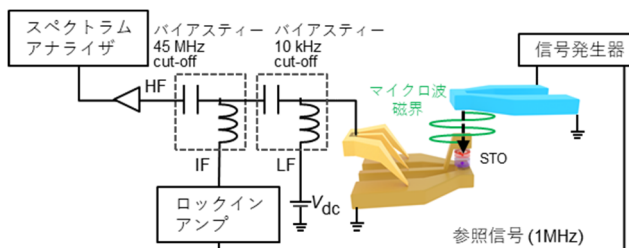


FIG. 1. 測定セットアップ

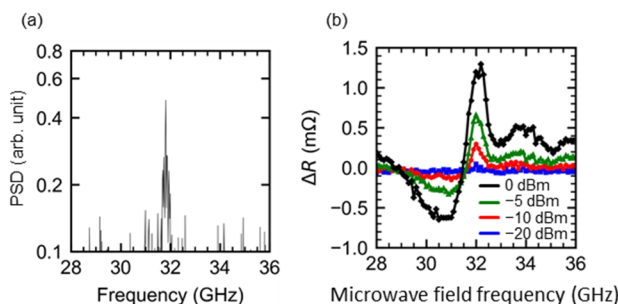


FIG. 2. (a)従来手法により測定した STO 信号のスペクトル。(b)新規手法を用いて測定した、STO の素子抵抗変化のマイクロ波磁界周波数依存性。

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の様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)

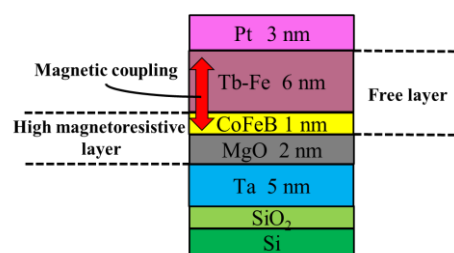


Fig.1 Schematic illustration of present film

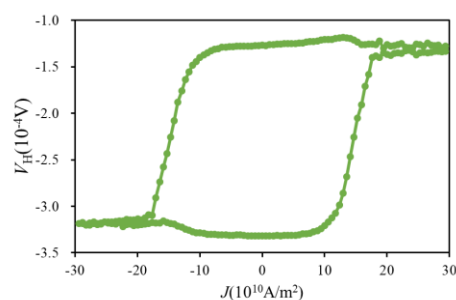


Fig.2 Anomalous Hall Voltage V_H as a function of current density J under in-plane magnetic field $H_x = 1400 \text{ Oe}$

Ni-Fe 単層膜におけるスピン軌道トルク

関剛斎^{1,2}、ラウヨンチャン^{1,2}、飯浜賢志^{2,3,4}、高梨弘毅^{1,2,5}

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

Spin-orbit torque in a Ni-Fe single layer

T. Seki^{1,2}, Y.-C. Lau^{1,2}, S. Iihama^{2,3,4}, and K. Takanashi^{1,2,5}

(¹IMR, Tohoku Univ., ²CSRN, Tohoku Univ., ³FRIS, Tohoku Univ., ⁴WPI-AIMR, Tohoku Univ., ⁵CSIS, 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¹⁻²⁾、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³⁻⁶⁾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⁷⁾。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¹、関剛斎^{1,2,3}、山根結太^{4,5}、モダックラージクマール²、内田健一^{1,2,3}、
家田淳一⁶、ラウヨンチャン^{1,3}、深見俊輔^{3,5,7,8}、高梨弘毅^{1,3,8}

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

Antisymmetric interlayer exchange interaction in Pt/Co/Ir/Co/Pt with in-plane spatial inversion breaking
H. Masuda¹, T. Seki^{1,2,3}, Y. Yamane^{4,5}, R. Modak², K. Uchida^{1,2,3}, J. Ieda⁶, Y.-C. Lau^{1,3}, S. Fukami^{3,5,7,8},
and K. Takanashi^{1,3,8}

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

LiNbO₃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¹, 山口明啓², 大島大輝³, 加藤剛志³, 嶋睦宏¹, 山田啓介¹
(岐阜大院自¹, 兵庫県大², 名古屋大³)

M. Ito¹, A. Yamaguchi², D. Oshima³, T. Kato³, M. Shima¹, K. Yamada¹
(Gifu Univ.¹, Univ. of Hyogo², Nagoya Univ.³)

【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)^[1]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、LiNbO₃単結晶(LNO)基板の上にNi₈₀Fe₂₀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^[2]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(χ)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(χ')依存性を示した結果である。図1より χ' (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 χ' 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 ~ 580 J/m³と見積もった。図2には、パターンニング角度 χ における、ダンピングライクのスピン軌道効率(ζ_{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 θ_{SH}^{eff} を算出した。解析結果より、 χ が小さくなるにつれて θ_{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。

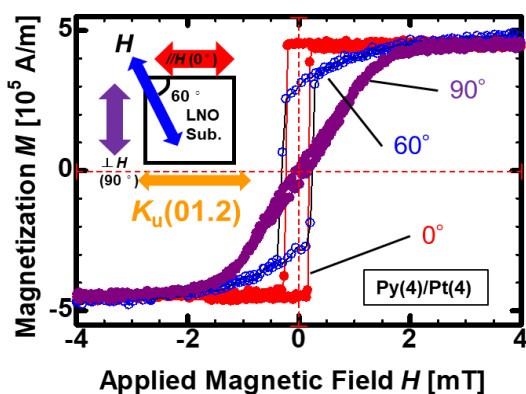


Fig.1 Magnetic hysteresis loops for LNO/Py(4)/Pt(4) film at various χ' measured by VSM.

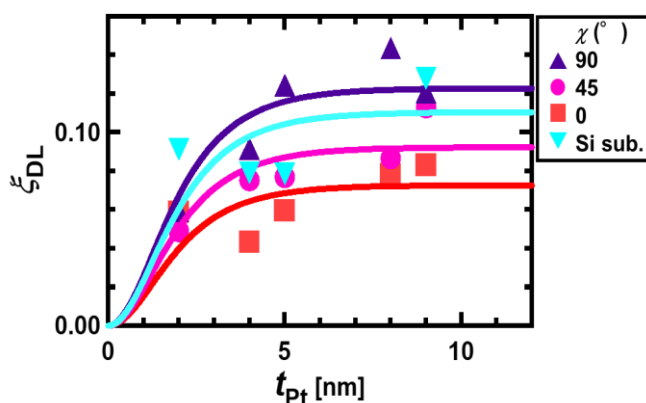


Fig.2 Dependence of ζ_{DL} on Pt film thickness (t_{Pt}) for LNO/Py(4)/Pt(t_{Pt}) samples at various χ and Si/Py(4)/Pt(t_{Pt}) samples.

【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、ハーモニック測定のための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。