

トンネル磁気抵抗効果の温度変化に対する新たな物理描像: 界面 s - d 交換相互作用の重要性

増田啓介, 只野央将, 三浦良雄
(物質・材料研究機構)

New physical picture on large temperature dependence of tunnel magnetoresistance:
Crucial role of interfacial s - d exchange interaction

K. Masuda, T. Tadano, and Y. Miura
(National Institute for Materials Science)

はじめに

磁気トンネル接合 (MTJ) は種々の磁気センサや磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) へ応用されるが、これら全ての用途において室温で高いトンネル磁気抵抗比 (TMR 比) を達成することが重要である。しかしながらこれまで作製されてきた全ての MTJ において、TMR 比は温度上昇とともに大きく低下することが知られている [1,2]。今後 TMR 比の温度変化が小さい MTJ を探索する上でも、この現象の物理機構を十分に理解することが必要不可欠である。このような主眼から本研究では TMR 比の温度依存性の理論解析を行った。

解析方法・結果

磁性材料の温度依存性に対する先行理論研究のほとんどはバルク磁性体の静的特性 (磁化等) を対象にしたものであり、そこでは d 電子状態密度の温度変化が議論されてきた。一方 TMR に関する多くの実験研究から、輸送現象である TMR には d 電子よりも有効質量が小さい sp 電子が重要であることが指摘されてきた。

これらの事情を鑑み、本研究では Fe/MgO/Fe(001) MTJ [Fig. 1(a)] の Fe 層における sd 交換相互作用 J_{sd} を考慮した有効タイトバインディングモデルを構築した [3]。このモデルは「温度上昇に伴い生じた d 電子スピンの揺らぎが sd 交換相互作用を通して s 電子状態にスピン反転散乱を与え TMR 比が減少する」という物理描像を記述するものである [Fig. 1(b)]。このモデルを用い TMR 比の温度依存性を計算した結果、実験結果を説明しうる大きな温度変化が得られた [Fig. 1(c)]。我々はさらに、界面 Fe 層における sd 交換相互作用が TMR 比の温度変化に主たる寄与を与えていることも明らかにした。講演ではこれらの結果の詳述に加え、時間が許せば sd 交換相互作用の結合定数 J_{sd} の非経験的評価法についても紹介したい。本研究は TDK 株式会社, JSPS 科研費 (JP16H06332, JP17H06152, JP20H02190, JP20K14782) の助成を受け行われた。

参考文献

- 1) B. Hu *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 094428 (2016).
- 2) T. Scheike *et al.*, Appl. Phys. Lett. **118**, 042411 (2021).
- 3) K. Masuda, T. Tadano, and Y. Miura, Phys. Rev. B **104**, L180403 (2021).

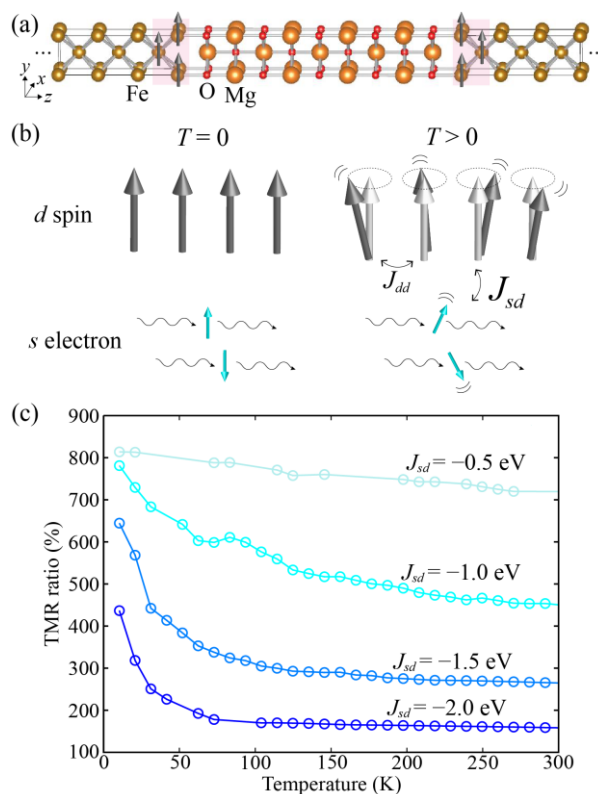


FIG.1 Schematics of (a) an Fe/MgO/Fe(001) MTJ and (b) s - d exchange interaction in interfacial Fe layers. (c) Calculated TMR ratios as a function of the temperature. From Ref. [3].

MBE 法による Co_2FeAl ホイスラー合金電極

強磁性トンネル接合の作製

北條 峻之、手束 展規、中野 貴文、角田 匡清、大兼 幹彦
(東北大工)

Fabrication of MTJs with Co_2FeAl Heusler electrode using MBE technique

T. Hojo, N. Tezuka, T. Nakano, M. Tsunoda, and M. Oogane
(Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)

はじめに

Co 基ホイスラー合金 Co_2YZ ($\text{Y}=\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Z}=\text{Al}, \text{Si}$) 電極と MgO 絶縁層を用いた強磁性トンネル接合 (MTJ) 素子は、Co 基ホイスラー合金のハーフメタル性と MgO 絶縁層のスピンフィルター効果の相乗効果により、高いトンネル磁気抵抗 (TMR) 比が期待されている。しかし、これらの MTJ 素子は、低温では高い TMR 比を実験的に実現できている一方で、室温では期待されるほどの高い TMR 比は得られていない。この TMR 比の温度依存性を改善することが大きな課題である。そこで本研究では、良質な薄膜を作製可能な分子線エピタキシー (MBE) 法に注目した¹⁾。MBE 法を用いることで、ホイスラー合金電極や MgO 絶縁層の結晶性が向上し、TMR 比の改善が期待される。また、ホイスラー合金/MgO 界面に極薄装飾を行うことで、TMR 比の温度依存性を改善できる可能性がある^{2),3)}。本発表では、 $\text{Co}_2\text{FeAl}/\text{MgO}$ 界面に極薄の挿入層を用いた MTJ 素子の TMR 効果について報告する。

実験方法

MgO(001)基板上に Cr (20)/ Co_2FeAl (30)/A (d)/MgO (2.0)/CoFe (5)/IrMn (10)/Cr (5) (nm)を MBE 法により作製した。ただし、IrMn のみマグネトロンスパッタ法により成膜を行った。ここで、 d は挿入層 A の膜厚である。微細加工後、1T の磁界印加中で 400°C の熱処理を行い、TMR 特性を 4 端子法により評価した。

実験結果

ホイスラー合金電極を有する MTJ において室温で TMR 比が低下する原因の一つが、界面での局所的なキュリー温度の低下であると考えられている⁴⁾。そこで、MgO との界面で高いキュリー温度を有する Fe 極薄膜を $\text{Co}_2\text{FeAl}/\text{MgO}$ 界面に挿入することで、室温での TMR 比が向上することが期待される。Fig. 1 は、Fe を挿入した際の室温での TMR 比と磁化平行状態における面積抵抗 RA_p である。期待していた結果に反し、Fe を挿入したことで TMR 比が低下した。これは Fe を挿入することで $\text{Co}_2\text{FeAl}/\text{MgO}$ 界面の酸化が促進されたためと考えられる。しかし、このことは、極薄の Fe 挿入が、TMR 特性に大きな影響を及ぼしていることも示唆している。学会当日は、他の極薄界面材料を挿入した MTJ 素子の TMR 効果についても併せて報告する。

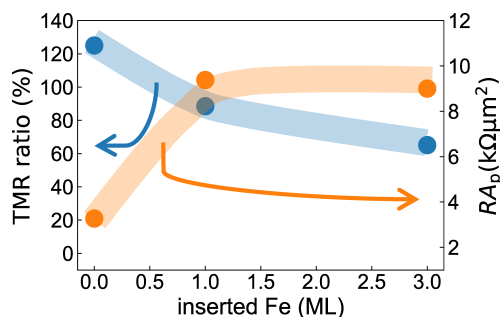


Fig.1 TMR ratio and resistance area product in magnetic parallel state RA_p of Fe inserted Co_2FeAl electrode-MTJ

謝辞

本研究は JSPS 科研費及び東北大学 GP-Spin プログラム、CSIS、CSRN 及び CIES の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) N. Tezuka *et al.*, Appl. Phys. Lett. 94, 162504 (2009)
- 2) Y. Miura *et al.* J. Phys.: Conf. Ser. 200, 052016 (2010)
- 3) H. L. Yu *et al.*, Appl. Phys. Lett. 109, 083509 (2011)
- 4) Y. Miura *et al.*, Phys. Rev. B 83, 214411 (2011)

Fe/MgAlO/Fe(001)単結晶トンネル接合における 巨大トンネル磁気抵抗効果

介川裕章、T. Scheike、Z. Wen、葛西伸哉、三谷誠司
(物材機構)

Giant tunnel magnetoresistance in epitaxial Fe/MgAlO/Fe(001) magnetic tunnel junctions
Hiroaki Sukegawa, Thomas Scheike, Zhenchao Wen, Shinya Kasai, and Seiji Mitani
(NIMS)

はじめに

強磁性トンネル接合 (MTJ) はハードディスク読み取りヘッドや磁気ランダムアクセスメモリの記録ビットなどスピントロニクス応用の中核となる素子である。しかし、現状では実用に用いることができるトンネル磁気抵抗比 (TMR 比) は 200~300%以下であり、応用の幅を広げるためには TMR 比の巨大化が必要である。最近、我々は Fe/MgO/Fe(001)の従来型 MTJ においても、界面構造の改善によって大幅に TMR 増大が可能であり、室温 400%以上の TMR 比が得られることを報告した [1]。しかし MgO と Fe との格子不整合により界面構造のさらなる構造改善は困難とわかった。このため本研究ではより格子整合性がよいスピネルバリアに着目した。Mg リッチ組成の Mg₄Al-O_x (MAO) をバリアとした Fe/MAO/Fe(001)素子を開発することで TMR 比の増大が観察されたこと、TMR 比のバリア膜厚に対する振動の振幅にも増大がみられたことを報告する [2]。また TMR 振動の精密なデータ取得のため多数の微細加工素子を用いたデータ収集を行った。

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 下地/Fe (50 nm)/Mg-Al-O ($t_{\text{MAO}} = 1-3$ nm)/Fe (5 nm)/IrMn (12 nm)/Ru 保護膜の構造を持つ面内磁化型 MTJ を作製した。MAO バリア層は Mg₄Al-O_x 組成の焼結体から電子線蒸着により作製し、線形移動シャッターによってウェハ内連続傾斜膜として形成した。磁場中熱処理後に 10×5 μm²サイズの MTJ へ微細加工し、直流 4 端子法によって磁気抵抗曲線と電流-電圧特性を評価した。素子は MAO 膜傾斜方向に 46 行、傾斜に垂直な方向に 20 列作製し全数評価を行うことで信頼性の高い MAO 膜厚依存性データを取得した。

実験結果

作製した Fe/MAO/Fe 素子の TMR 比は最大で室温 429%、10 K で 1,034%が得られ、Fe/MgO/Fe [1] よりも大きな値が得られた。MAO バリア導入により、低温では理論計算による Fe/MgO/Fe での典型的な予測値である 1,000%に到達した。TMR 比のバリア膜厚に対する振動も非常に大きくなり、振幅は室温で 125%に達した [2]。この振動をより明確に解析するためウェハ内素子全数評価を行ったところ、Fig. 1 に示すように単純な正弦曲線ではなく、ノコギリ刃形状であることが新たに明らかになった。未解決の TMR 振動の物理解釈のためにも重要な知見であると考えられる。本研究は JSPS 科研費 (21H01750、21H01397) 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。

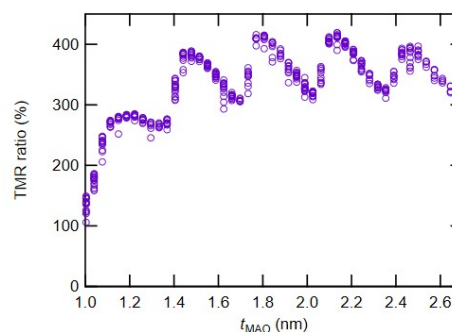


Fig. 1: TMR ratio vs. t_{MAO} of Fe/Mg₄Al-O_x/Fe(001) MTJs at room temperature.

参考文献

[1] T. Scheike *et al.*, Appl. Phys. Lett. **118**, 042411 (2021). [2] T. Scheike *et al.*, Appl. Phys. Lett. **120**, 032404 (2022).

fcc-Co₉₀Fe₁₀/MgAlO/Co₉₀Fe₁₀(111) フルエピタキシャル強磁性トンネル接合の開発

Jieyuan Song^{1,2}, Thomas Scheike², Cong He², Zhenchao Wen², 介川裕章²,
大久保忠勝², 宝野和博², 三谷誠司^{1,2}
(1 筑波大、2 物材機構)

Development of fcc-Co₉₀Fe₁₀/MgAlO/Co₉₀Fe₁₀(111) fully epitaxial magnetic tunnel junctions
Jieyuan Song^{1,2}, Thomas Scheike², Cong He², Zhenchao Wen², Hiroaki Sukegawa²,
Tadakatsu Ohkubo², Kazuhiro Hono², Seiji Mitani^{1,2}
(1 Univ. Tsukuba, 2 NIMS)

はじめに

強磁性トンネル接合 (MTJ) を用いた新規応用デバイスの創生、例えば超高密度磁気ランダムアクセスメモリや超高感度磁気センサーの実現など、には現在よりも大きなトンネル磁気抵抗 (TMR) の実現が不可欠である。現在の MTJ のほとんどは、Fe/MgO/Fe や CoFeB/MgO/CoFeB に代表される bcc(001)積層型であり、 Δ_1 バンド優先コヒーレントトンネル機構による TMR 効果が用いられている。最近第一原理計算によって、fcc(111)型積層を持つ Co/MgO/Co(111)や L1₁-CoPt/MgO/CoPt(111)構造において、従来とは異なる界面共鳴メカニズムによって大きな TMR 比 (~2000%) が得られる可能性が予測されている [1,2]。本研究では fcc 構造が安定に得られる Co₉₀Fe₁₀ を磁性層に用い、Co₉₀Fe₁₀/Mg-Al-O(MAO)/Co₉₀Fe₁₀(111)型のフルエピタキシャル MTJ を開発し TMR 効果が観測されたことを報告する。

実験方法

マグネトロンスパッタ装置を用い、サファイア(0001)単結晶基板上に Ru 下地/Co₉₀Fe₁₀ (20 nm)/Mg (0.5 nm)/MAO (2.8 nm)/Co₉₀Fe₁₀ (5 nm)/Ru (0.75 nm)/Co₅₀Fe₅₀ (2.2 nm)/IrMn (10 nm)/Ru 保護膜の構造を持つ面内磁化型 MTJ を作製した。MAO バリア層は Mg₄Al-Ox 焼結体の電子線蒸着 [3] によって作製した。また結晶性と界面平坦性を改善するため各層の成膜後のアニール条件を最適化した。各層の結晶性は反射高速電子回折 (RHEED)、X 線回折、断面走査透過顕微鏡 (STEM) 像により評価を行った。MTJ 多層膜は磁場中熱処理を行った後、10×5 μm² サイズのピラー状に微細加工パターンニングを行い直流 4 端子法によって MTJ の磁気伝導特性評価を行った。

実験結果

成長条件及びアニール条件の最適化により、Ru 下地層上の下部 Co₉₀Fe₁₀ 層、バリア層、上部 Co₉₀Fe₁₀ 層のいずれも fcc(111)エピタキシャル成長していることを確認した。断面 STEM 観察からも基板から上部層までエピタキシャル成長が明確に確認され、比較的平坦なバリア界面も得られていることが確認された。fcc-Co₉₀Fe₁₀ と MAO の格子不整合は 20%弱あるものの界面にミスフィット転移が周期的に導入されており、これが界面平滑化につながったと期待される。この薄膜試料から作製した MTJ において室温で 37%の TMR 比が観察された。電流-電圧特性はバイアス電圧極性に対して対称的であり、これはバリア上下界面がほぼ同一品質で形成できていることを示唆している。これらの結果から fcc(111)型 MTJ を安定に作製することが可能であることが明らかになった。界面構造の改善と強磁性層の開発によって今後更に TMR 特性の向上が期待できる。本研究は JST CREST (JPMJCR19J4) および JSPS 科研費 (21H01750) の支援により行われた。

参考文献

- [1] K. Masuda *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 144404 (2020).
- [2] K. Masuda *et al.*, Phys. Rev. B **103**, 064427 (2021).
- [3] T. Scheike *et al.*, Appl. Phys. Lett. **120**, 032404 (2022).

$L1_0$ -(MnCo)Al 電極と $MgAl_2O_4$ 絶縁層を用いた強磁性トンネル接合における TMR 効果

菊地竜太郎、アルマダウィ ミフタ、角田匡清、大兼幹彦
(東北大工)

Tunneling magnetoresistance effect in magnetic tunnel junctions using $L1_0$ -(MnCo)Al electrode and $MgAl_2O_4$ insulating layer

R. Kikuchi, M. Al-Mahdawi, M. Tsunoda, M. Oogane
(Graduate School of Engineering, Tohoku University)

はじめに

垂直磁化材料である $L1_0$ -MnAl は、高い磁気異方性、低飽和磁化、低ダンピング定数を有することから、スピントランスポール型磁気ランダムアクセスメモリ (STT-MRAM) 用の強磁性トンネル接合 (MTJ) への応用が期待されている。しかし、MnAl を電極に用いた MTJ において TMR 効果を観測するためには、MnAl/MgO 界面に極薄挿入層が必要であった¹⁾。この原因として、MnAl 層と MgO 絶縁層との格子不整合が大きく、 Δ_1 電子のコヒーレントトンネルが阻害されることが考えられる¹⁾。本研究では、Co を 2% 添加することで低ラフネスかつ高 (001) 配向の (MnCo)Al 電極を作製し、さらに絶縁層として $MgAl_2O_4$ を用いることで格子不整合を低減した MTJ 素子を作製し、その TMR 効果を評価することを目的とした。

実験方法

作製した MTJ 素子の構造、各層の成膜および熱処理温度を Fig. 1 に示す。試料は超高真空マグネトロンスパッタリング法により作製した。 $MgAl_2O_4$ の組成は X 線光電子分光法 (XPS) を用いて測定した。組成分析の結果、 $MgAl_2O_4$ の組成は Mg : Al : O = 9.2 : 18.9 : 41.5 (atom%) であった。結晶構造、表面特性、磁気特性および磁気抵抗特性は X 線構造解析 (XRD)、原子間力顕微鏡 (AFM)、振動試料型磁力計 (VSM)、物理特性測定システム (PPMS) を用いた直流 4 端子法により測定した。

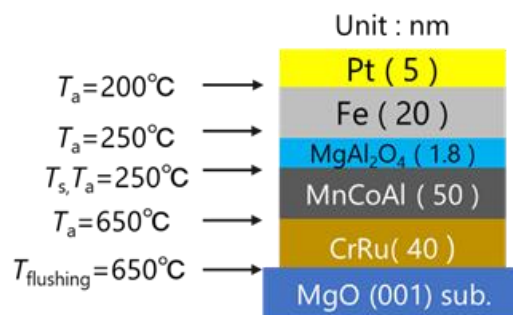


Fig. 1: Schematic illustration of a (MnCo)Al/ $MgAl_2O_4$ /Fe-MTJ structure.

実験結果

Fig. 2 に 300 K および 10 K における、(MnCo)Al/ $MgAl_2O_4$ /Fe-MTJ の垂直磁場印加の TMR 曲線を示す。作製した MTJ では、300 K および 10 K において、TMR 比が 17.4%、32.4% であった。界面挿入層無しで TMR 効果が観測されたことから、期待通り格子ミスマッチが低減できたと考えられる。さらなる TMR 比の改善のためには、 $MgAl_2O_4$ 成膜条件の更なる最適化が必要と考えられ、講演ではその最適化に関する結果も報告する予定である。

謝辞

本研究は、東北大学 GP-Spin プログラム、CSIS、CSRN 及び CIES の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) Haruaki Saruyama, *et al*, 2013 *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** 063003

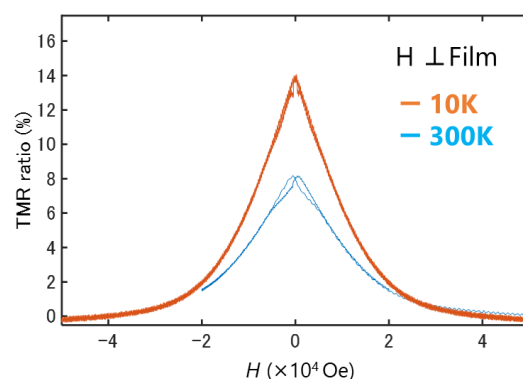


Fig. 2: TMR curve for MTJ with (MnCo)Al/ $MgAl_2O_4$ /Fe structure applying perpendicular magnetic field.

自発磁化を示す Al 添加 Cr₂O₃ 薄膜の異常ホール効果

飯野伊音, 櫻井皓基, 多田龍生, 豊木研太郎, 中谷亮一, 白土 優

(大阪大)

Anomalous Hall effect in Al-doped Cr₂O₃ thin films exhibiting spontaneous magnetization

I. Iino, H. Sakurai, T. Tada, K. Toyoki, R. Nakatani and Y. Shiratsuchi

(Osaka Univ.)

はじめに 反強磁性体は、超高密度磁気記録やテラヘルツ素子等の新規スピントロニクスデバイスの基盤材料として期待されている。しかしながら、反強磁性体は自発磁化を生じないため、磁気モーメント（ネールベクトル）をどのように制御し、検出するかが課題となっている。我々は、反強磁性体として Cr₂O₃ を用いることで、電気磁気効果[1]や、非磁性元素 (Al) の添加により生成する自発磁化[2]を用いたネールベクトルの制御とともに、Pt/Cr₂O₃ 界面で生じる異常ホール効果を用いたネールベクトルの検出[3]を進めている。一方、Pt/Cr₂O₃ 系では自発磁化が生じないため、異常ホール効果の起源が必ずしも明らかになっていない。本研究では、自発磁化を有する Al 添加 Cr₂O₃ 薄膜に対して、異常ホール効果の測定を行うことで、本系での異常ホール効果の起源について検討した。

実験方法 試料として、Pt(2 nm)/(Al_xCr_{1-x})₂O₃(200 nm)/α-Al₂O₃(0001)subs. (x = 0–0.255) を用いた。試料作製には、マグネトロンスパッタリング法を用いた。製膜時において、Cr に対する投入電力を固定し、Al に対する投入電力を変えることにより Al 組成を変化させた。構造評価には、X 線回折法、反射高速電子線回折法を用いた。Al 組成は、蛍光 X 線分析法により評価した。ホール効果測定のために、作製した薄膜をフォトリソグラフィ法、Ar イオンミリング法を用いて、ホール素子に微細加工を行った。磁化測定には、超伝導量子干渉磁束計を用いた。

実験結果 Fig. 1(a)に、200 K で測定した磁化曲線と異常ホール効果曲線を示す。Al 濃度は 4.04at.% とした。いずれも角型比が約 1 のヒステリシスを示し、保磁力も一致した。ここから、異常ホール伝導度 ($\sigma_{xy} = \rho_{xy}/\rho_{xx}^2$) と磁化は、磁場依存性に関して類似性を持つことがわかった。(b)に、同一試料に対する残留磁化と異常ホール伝導度の温度依存性を示す。自発磁化は、温度の上昇とともに単調に低下することに対して、 σ_{xy} は、温度の上昇により一度、上昇した後、ピークを取り、再度低下する。低温領域での σ_{xy} の上昇の原因は、明らかになっていないが、Pt/Cr₂O₃ 界面で予測されるキラルスピン構造[4]の存在を示唆する。磁化が 0 となる温度をキュリー温度とすると、 σ_{xy} が消失する温度は概ねキュリー温度に一致した。

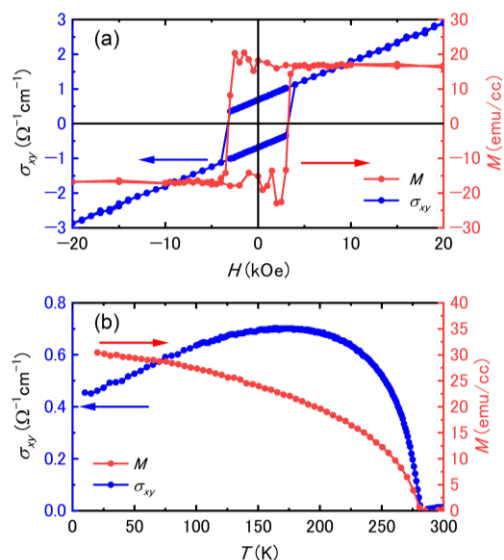


Fig. 1(a) 200 K で測定した磁化曲線 (右軸) と異常ホール効果曲線 (左軸). (b) 異常ホール伝導度と磁化の温度依存性.

[1] Y. Shiratsuchi *et al.*, JPCM 33, 243001 (2021). [2] 多田龍生他 日本金属学会第 169 回講演大会.

[3] X. Wang *et al.*, AIP Adv. 12, 035216 (2022). [4] T. Moriyama *et al.*, PRAppl. 13, 034052 (2020).

導電性コバルトフェライト電極上に作製した垂直磁化 コバルトフェライト薄膜によるトンネル型スピフィルター効果

田中雅章、古田元春、森下雅也、市川知幸、洪鈺珉*、本多周太**、小野輝男*、壬生攻
(名工大工、*京大化研、**関西大シス理)

Spin-filtering tunnel effect of perpendicularly magnetized insulative cobalt ferrite layers grown on
conductive cobalt ferrite electrodes

M. A. Tanaka, M. Furuta, M. Morishita, T. Ichikawa, Y.-M. Hung*, S. Honda**, T. Ono*, and K. Mibu
(Nagoya Inst. Tech., *ICR, Kyoto Univ., ** Kansai Univ.)

はじめに

強磁性絶縁体薄膜を用いたトンネル接合では、障壁の高さが電子のスピンにより異なるため、トンネル電子のスピンに依存した透過率の差が生じ、スピン偏極した電流を生成することができる。この現象はトンネル型スピフィルター効果と呼ばれ、新しいスピン注入源として期待できる。一方で、[001]配向した強磁性絶縁体コバルトフェライト薄膜は、面内方向の引張歪みにより垂直磁気異方性を示すことが知られている。キュリー温度が高いコバルトフェライトの垂直磁化薄膜は実用的な垂直磁化型のトンネル型スピフィルター層として期待できる。本研究では Fe^{2+} と Fe^{3+} が存在するため導電性を示すコバルトフェライト $\text{Co}_y\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+c}$ (C-CFO) 電極層上に Fe^{2+} がほとんど存在しないため絶縁性を示すコバルトフェライト $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_{4+\delta}$ (I-CFO) 薄膜を製膜し、垂直磁化のコバルトフェライト層を障壁層とする磁気トンネル接合(MTJ)素子を作製した。この MTJ 素子に対してトンネル磁気抵抗効果の測定を行い、コバルトフェライト薄膜のスピフィルター効率の評価を行った。

実験方法

YAG 2 倍波レーザーを用いたパルスレーザー堆積法で、MgO(001)基板上にバッファ層 I-CFO(20 nm)、下部電極用の C-CFO (20 nm)、スピフィルター層 I-CFO ($t=0, 0.8, 1.5, 3.0$ nm)、上下の強磁性層の磁気結合切断層 MgO (2.0 nm)の順番で製膜した。その上にスピン検出用強磁性層として $\text{Co}(1.0 \text{ nm})/\{\text{Tb}(0.45 \text{ nm})/\text{Co}(0.56 \text{ nm})\}_{15}/\text{Co}(2.0 \text{ nm})$ を電子ビーム蒸着法で製膜して MTJ 素子用の多層膜を用意した。X 線回折装置で結晶構造と格子歪みの評価を行い、SQUID 磁束計を用いて磁化測定を行った。またフォトリソグラフィと Ar イオンミリングを用いて直径が数 μm の MTJ 素子を作製し、膜面垂直方向に外部磁場を印加して磁気抵抗測定を行い I-CFO 薄膜のスピフィルター効率の評価を試みた。

実験結果

MgO(001)基板上では I-CFO 薄膜および C-CFO 薄膜は(001)方向にエピタキシャル成長することがわかった。また I-CFO 薄膜および C-CFO 薄膜の膜面垂直方向の格子定数はそれぞれ 8.32\AA と 8.37\AA であり、面内方向の格子定数はどちらも 8.42\AA であることから、面内方向の引張歪みが存在することがわかった。磁化測定から MTJ 素子用の多層膜は垂直磁化を示し、面内方向の引張歪みや層間の磁気結合により I-CFO 薄膜と C-CFO 薄膜は垂直磁気異方性が誘起されていることがわかった。MTJ 素子の電流電圧測定ではトンネル伝導を示す三次曲線が得られ、I-CFO 薄膜は良好なトンネル特性を示すことがわかった。また $t=0, 0.8, 1.5, 3.0$ nm のすべての MTJ 素子の磁気抵抗測定で強磁性層の磁化反転に伴う負の TMR 効果が観測された。第一原理計算から I-CFO の障壁高さはマイノリティスピンの方が低いため、負の TMR 効果は妥当である。TMR 比は $t=3.0$ nm の MTJ 素子において、100 K で -20% であり、I-CFO 薄膜のスピン注入効率は 18% 程度であった。TMR 比のバイアス電圧依存性の評価から、低バイアス電圧では TMR 比の絶対値が小さく、バイアス電圧を大きくすると TMR 比の絶対値が大きくなることがわかった。また $t=3.0$ nm の MTJ 素子では 150 K の場合 ± 0.25 V で TMR 比の絶対値が極大となり、それ以上のバイアス電圧では TMR 比の絶対値が低下することがわかった。この現象は I-CFO 薄膜における Fowler-Nordheim トンネル現象を用いて説明することができる。以上のように、本研究では I-CFO 薄膜による垂直磁化方式のトンネル型スピフィルター現象の観測に成功した。

FeCoNi/Cu 多層膜 GMR における NiFeCr 下地層組成の効果

Prabhanjan D. Kulkarni, 中谷友也, Zehao Li, 佐々木泰祐, 桜庭裕弥
(物質・材料研究機構)

The effects of the composition of NiFeCr seed layer on GMR in FeCoNi/Cu multilayer
Prabhanjan D. Kulkarni, Tomoya Nakatani, Zehao Li, Taisuke Sasaki, Yuya Sakuraba
(National Institute for Materials Science)

はじめに

反強磁性的に層間結合した強磁性/非磁性多層膜系における巨大磁気抵抗 (GMR) は、低コスト・量産性・耐久性の観点からエンコーダ等の磁気センサとして重要であり、軟磁気特性と高 GMR 比の両立は重要な課題である。高 GMR 比を得るためには、Co/Cu や Fe/Cr といった界面散乱のスピンの非対称性が大きい材料系の選択に加え、界面ラフネスなどに起因する 90°層間交換結合を低減し、反平行磁化を実現することが重要である。過去の研究から、NiFeCr などの下地層が、GMR 比に大きく影響することが知られているが[1, 2]、その組成依存性や GMR 増大のメカニズムについての理解は十分でない。本研究では、FeCoNi/Cu 多層膜の GMR、磁化特性、微細構造に対する NiFeCr 下地層組成の効果を調査した。

実験方法

スパッタリングによって熱酸化 Si 基板上に NiFeCr (5 nm)/[FeCoNi (3 nm)/Cu (1.1 nm)]₅/FeCoNi (3 nm)/Ru (5 nm) を室温成膜した。NiFeCr 下地層は Ni, Fe, Cr ターゲットから同時スパッタリングすることで、単体および 2 元合金を含めた 72 種類の組成について作製した。FeCoNi の組成は Fe₁₆Co₆₆Ni₁₈ (at. %) であり、軟磁性かつ低磁歪の組成を選択した。未熱処理の試料に対し、GMR、磁化特性、結晶・微細構造を評価した。

結果

図(a)に NiFeCr 組成に対する GMR 比 ($\Delta R/R$) の等高線図を示す。 $\Delta R/R$ は明確な NiFeCr 組成依存性を示し、(Ni_{0.55}Cr_{0.45})_{100-y}Fe_y (0 ≤ y ≤ 47 at. %) の組成の下地に対して、高い $\Delta R/R$ が得られる。図(a)中のクロスシンボルは代表的な試料 1-4 を示し、それらの GMR 曲線を図(b)に示す。図(c)に残留磁化の飽和磁化に対する比 (M_r/M_s) および $\Delta R/R$ の、反強磁性結合エネルギーの 90°結合エネルギーに対する比 (J_1/J_2) の依存性を示す。 J_1 と J_2 は磁化曲線から独立に求めることができる。層間交換結合の現象論モデルから導かれる通り、 $M_r/M_s = \sqrt{2 - J_1/J_2}/2$ に従い、 $\Delta R/R$ は J_1/J_2 に比例する。 $J_1/J_2 \geq 2$ であれば、 $M_r/M_s = 0$ すなわち完全な反平行磁化状態が実現され、 $\Delta R/R$ は 41.4% となることが予想されるが、実験における J_1/J_2 の最大値は 1.58 ($M_r/M_s = 0.33$) であり、反平行磁化状態は不完全である。

また、試料 1 と 3 は下地層の組成は近いものの、 $\Delta R/R$ は大きく異なる。X 線回折および走査透過電子顕微鏡による構造解析の結果、試料 3 は 1 に比べて、結晶粒が小さく、[111]結晶配向性が低く、界面ラフネスが大きいことがわかった。また、試料 2 は 3 に比べて、[111]配向性は低いものの、界面ラフネスが小さいために、比較的大きな $\Delta R/R$ を示すことが説明される。

文献 [1] Vas'ko *et al.* J. Appl. Phys. 93, 8409 (2003). [2] Bannikova *et al.* Phys. Met. Metallogr 116, 987 (2015).

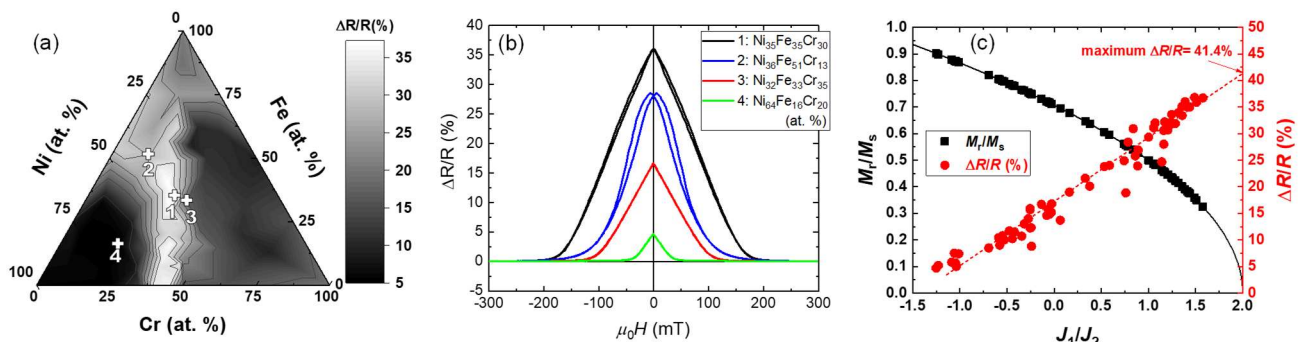


図 (a) $\Delta R/R$ の NiFeCr 組成依存性, (b) GMR 曲線, (c) M_r/M_s および $\Delta R/R$ の J_1/J_2 依存性.

異常ホール効果を用いた HDD 用リードセンサの検討

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

Study of HDD read sensors using anomalous Hall effect

Tomoya Nakatani, Prabhanjan D. Kulkarni, Hitoshi Iwasaki, Hirofumi Suto, Yuya Sakuraba
(National Institute for Materials Science)

はじめに

近年、次世代の HDD 用書き込み技術であるエネルギーアシスト記録の進展によって、HDD の記録密度が増大しており、3 Tbit/in² を超す面記録密度が実証されている[1]。高記録密度化に伴う記録パターンの縮小にあわせて、読み出し素子（リーダー）の寸法も縮小する必要があるが、4 Tbit/in² ではシールド間ギャップ G は 17 nm、幅 W は 9 nm 程度となることが予想されている[2]。図 1(a) に示す現行のスピバルブ型トンネル磁気抵抗 (TMR) リーダーでは、膜厚の観点から、4 Tbit/in² に対応した微小なリーダーの実現は難しい。そこで我々は、単一の強磁性体膜から構成される、異常ホール効果 (AHE) を用いたリーダーの可能性を検討した。

AHE リーダーの構造

図 1(b) は記録媒体対向面から見た AHE リーダーの模式図である。センサ層（スピバルブにおける自由層に相当）は AHE の大きな強磁性体からなり、その磁化はサイドシールドからの漏洩磁界によって横向きにバイアスされる。サイドシールドとセンサ層は、それらの間に挿入された導電性の非磁性層によって磁気的に分離されており、サイドシールドをリード電極として、センサ層にバイアス電流が通電される。上下シールドとサイドシールドは絶縁されており、リーダーの出力であるホール電圧 (ΔV) は上下シールドを電極として取り出され、その大きさはホールクロスとの類推から、 $\Delta V = 2\rho_{xy}J_xG\eta$ で表される。ここで、 ρ_{xy} は異常ホール抵抗率、 J_x はバイアス電流密度、 η は磁界回転範囲の利用率である。

信号雑音比の見積もり

超低抵抗 TMR センサ[3]と比較して、AHE リーダーの信号雑音比(SNR)を計算した。AHE リーダーのセンサ層には、現在知られている最も大きい AHE を示す材料の一つである Co₂MnGa 単結晶膜の値 ($\rho_{xy} = 20 \mu\Omega \text{ cm}$, 抵抗率 $\rho_{xx} = 220 \mu\Omega \text{ cm}$) を用いた[4]。リーダーやアンプの特性値は文献[2]に記載の値を用いた。

図 2 に SNR と記録密度の関係を示す。AHE リーダーは 2.4 Tbit/in² 以上の記録密度にわたって、TMR リーダーより優れた SNR を示す。これは、Co₂MnGa の大きな AHE（通常の 3d 金属・合金では $\rho_{xy} < 1 \mu\Omega \text{ cm}$ ）に加え、AHE リーダーではシールド間ギャップのほぼすべての空間をセンサ層で占めることができ、磁化の熱擾乱によるマグノイズが低減できるためである。この結果から、AHE リーダーは将来のリーダー技術としての可能性を有する。講演では、有限要素法シミュレーションによって見出された課題についても議論する。

文献 [1] Seagate Technology [2] Albuquerque *et al.* IEEE Trans. Magn. 58, 3100410 (2022). [3] Park *et al.* presented at TMRC 2019, D4 [4] Sumida *et al.* Commun Mater 1, 89 (2020).

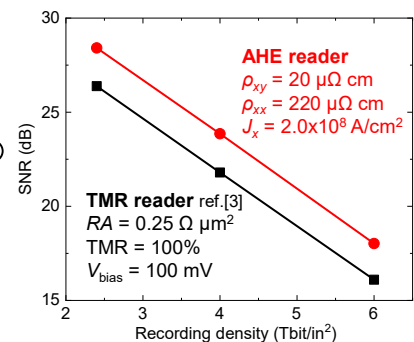
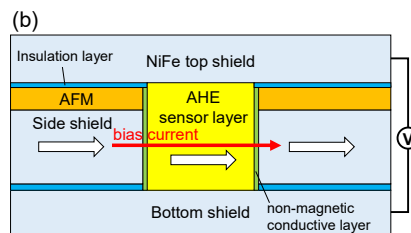
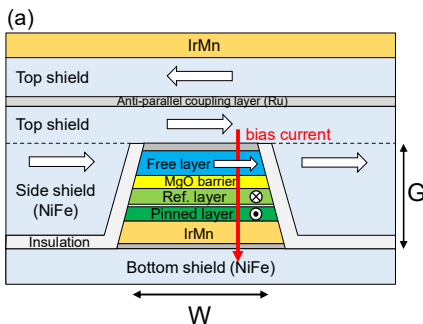


図 1 (a) スピバルブ TMR リーダーと, (b) AHE リーダー。

図 2 SNR の計算値。

Co₃Sn₂S₂ 化合物における強磁性転移によるスピンの変換効率の増大

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-スピン流間の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。スピンホール効果(SHE)は電流-スピン流変換(以下、スピン変換と記す)の代表的な現象であり、Pt や Ta などのスピン軌道相互作用の大きい非磁性金属がスピン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変換効率が報告されている。

スピン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ホール伝導度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、スピントルク強磁性共鳴(ST-FMR)法を用いて CSS のスピン変換の温度(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変換効率を見積もったところ、強磁性転移を境にスピン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).

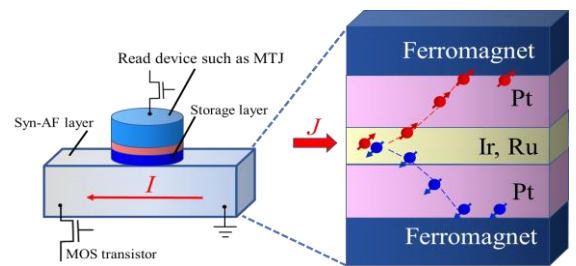


Fig. 1 Schematic diagram of our proposed memory cell with synthetic antiferromagnetic (AF) layer for SOT-MRAM.

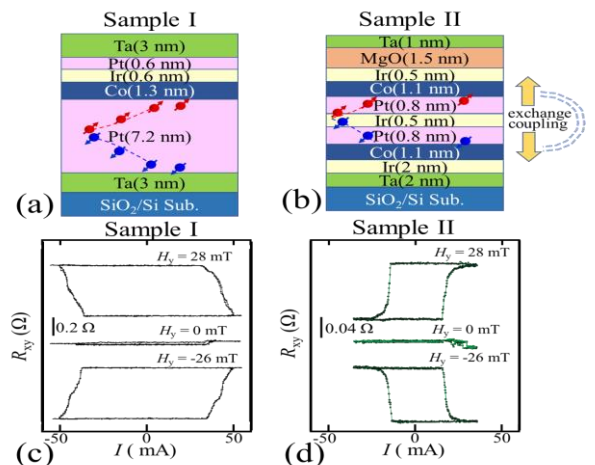


Fig. 2 Schematic of detailed film structures in (a) Sample I and (b) Sample II, and SOT switching properties under various fixed external magnetic fields (H_y) for (c) Sample I and (d) Sample II.

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).

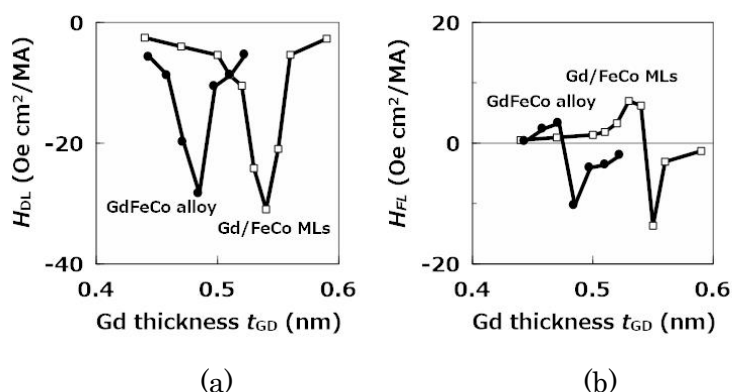


Fig.1 Gd thickness t_{Gd} dependence of (a) damping-like SOT effective field H_{DL} and (b) field-like SOT effective field H_{FL} of Ta / [Gd / FeCo] MLs (open symbols). H_{DL} and H_{FL} of Ta / GdFeCo bilayers are also shown as closed symbols³⁾.

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。図から明らかのように、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).

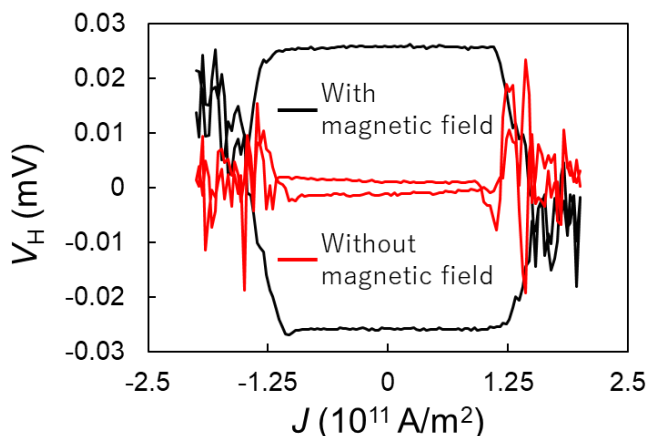


Fig. 1 Hall voltage (V_H) as a function of current density (J) under in-plane magnetic field $\mu_0 H_x = 0$ mT for the samples sputtered with (black line) or without magnetic field (red line).

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).

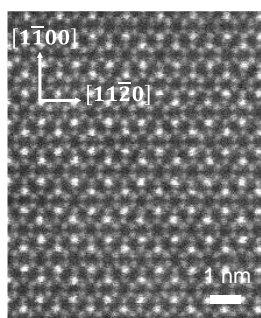


Fig.1 Cross-sectional STEM image of Mn_3Sn layer in prepared stack.

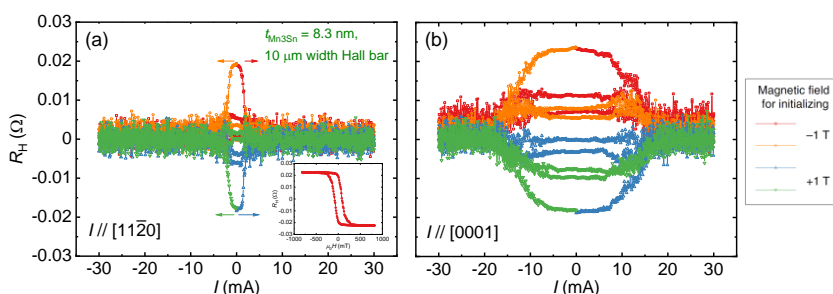


Fig. 2 (a), (b) Hall resistance (R_H) as a function of applied current pulse amplitude (I) in W(3 nm) / Ta(1 nm) / Mn_3Sn (8.3 nm) / Pt(4 nm) heterostructure for cases of $I \parallel [11\bar{2}0]$ and $I \parallel [0001]$, respectively. The width of current pulse is 100 ms. The inset of Fig. 2(a) shows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

スモールデータ機械学習に基づく磁性多層膜設計： アンサンブル学習とデータ拡張法による予測精度の向上

名和憲嗣^{1,2}, 萩原克幸¹, 三浦良雄², 中村浩次¹
(¹三重大院, ²物材機構)

Magnetic multilayer design by small-data-based machine learning:
Implementation of data augmentation and ensemble learning for high prediction accuracy

K. Nawa^{1,2}, K. Hagiwara¹, Y. Miura², K. Nakamura¹
(¹Mie Univ., ²NIMS)

はじめに

機械学習を応用したマテリアルズ・インフォマティクスに関する近年の研究開発は著しく、磁性・熱電・超伝導体などの多様な材料系で応用されるなど、その適用範囲は幅広い¹⁾。このようなデータ駆動型の材料開発を効率的かつ高精度に実施するには、高い信頼度のデータを膨大に含むビッグデータの構築が必要である。一方、第一原理計算の観点からは、定量的な物理量の評価にはしばしば大きな計算コストを要するため、十分な第一原理データベース構築は重大な障壁となり得る。我々は、スモールデータに基づく機械学習による材料設計の実現を目指している。本研究では、階層型ニューラルネットワーク (NN) を用いたスモールデータの適切な学習を目的に、アンサンブル学習 (Bootstrap aggregating; Bagging) とガウスノイズによるデータ拡張法 (GDA) を導入した。さらにケーススタディとして、人工多層膜 CoFe の磁気モーメント、生成エネルギー、結晶磁気異方性エネルギー、磁気ダンピング定数の学習・予測に適用した。ここでは MgO(001)上に9原子層の Co_{9-x}Fe_xを積層し、全 512 (=2⁹) 通りの積層配列に対する各物性値を、一般化勾配近似に基づくフルポテンシャル線形化補強平面波法²⁾により算出した。NN の入力データである積層配列は 2 値のダミー変数 (0 = Fe, 1 = Co) で定義した。NN の中間層を 3 層とし、中間層と出力層の活性化関数はそれぞれ ReLU (Rectified Linear Unit) および線形関数を用いた。

結果と考察

CoFe 多層膜の全 512 配列の中からランダムに選択した 102 配列 (全体の 20%) と対応する磁気モーメント (m_{spin}) を教師データとして NN に学習させた後、残り 410 配列 (全体の 80%) の m_{spin} を予測した。続いて、第一原理計算の結果に対する予測精度を決定係数 R^2 により評価した。Table I より、GDA および Bagging アンサンブル学習を用いない場合は、 $R^2 = 0.5895$ の予測精度が得られ、NN による予測の正解率は約 6 割弱となった。次に Bagging を導入したところ $R^2 = 0.7693$ と向上が見られ、さらに GDA も導入すると $R^2 = 0.9097$ となり、9 割超の高い予測精度が得られた。以上の結果から、スモールデータ駆動型の材料設計において GDA や Bagging が機械学習の予測精度向上に有効であることが示唆される³⁾。発表では、Bagging および GDA の導入による予測精度向上の起源と、生成エネルギーや結晶磁気異方性エネルギー、磁気ダンピング定数に対する適用結果も報告する。

本研究の一部は、科研費 (JP22K14290, JP21K03444, JP21H04562, JP19K03716)、岡三加藤文化振興財団、中部電気利用基礎研究振興財団の支援により実施された。

Table I. Summary of R^2 score for conventional NN and NNs with Bagging only or both Bagging and GDA applied.

	R^2 score
Conventional NN	0.5895
NN with Bagging	0.7693
NN with Bagging & GDA	0.9097

参考文献

- 1) Y. Iwasaki, et al., *Commun. Mater.* **2**, 31 (2021); V. Stanev, et al., *npj Compu. Mater.* **4**, 29 (2018).
- 2) K. Nakamura, et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **537**, 168175 (2021); 中村浩次, 加藤夕奈, まぐね **15**, 217 (2020).
- 3) K. Nawa, K. Hagiwara, K. Nakamura, submitted.

Pt/Co/Spacer(Pt, Ir, Au)/Cr₂O₃/Pt 積層膜における垂直交換磁気異方性 に対するスペーサ層材料の影響

江川浩史, 沈佳琦, 豊木研太郎, 中谷亮一, 白土優

(大阪大学)

Influence of heavy metal spacer layer on perpendicular exchange anisotropy
in Pt/Co/Spacer(Pt, Ir, Au)/Cr₂O₃/Pt stacked films

Hirofumi Ekawa, Shen Jiaqi, Kentaro Toyoki, Ryoichi Nakatani and Yu Shiratsuchi

(Osaka Univ.)

はじめに 強磁性体と反強磁性体の界面で発生する交換バイアスは、強磁性体の磁化方向を一方向に固定する効果として、磁気ランダムアクセスメモリなどの磁気メモリ素子に活用されている。最近では、外場によって交換バイアスを等温可逆的に制御することも可能になっており、新たな磁化制御方法としても注目されている。特に、反強磁性体としてCr₂O₃を用いた交換バイアスは、電気磁気効果による等温可逆反転が可能な有望な系である。本技術の実現に向けた一つの課題は、交換バイアスと保磁力の制御にある。本研究では、我々は強磁性体Co層と反強磁性体Cr₂O₃層の界面に重金属層をスペーサ層として挿入することで、交換バイアスの制御を試みた結果について報告する。

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た。作製した試料の構成は、Pt/Co/X(Pt, Ir)/Cr₂O₃/Pt 積層膜である。基板には、 α -Al₂O₃(0001)単結晶基板を用いた。スペーサ層の膜厚を、0.5 nm, 1.0 nm, 1.5 nm, 2.0 nm と変化させることで、Co-Cr₂O₃ 関連の交換結合強度を制御した。構造評価には、RHEED と X線回折法を用いた。磁気特性評価には、振動資料型磁力計と極磁気光学 Kerr 効果 (MOKE) 測定装置を用いた。MOKE 測定は、極配置で行い、入射光の波長を 405 nm とした。測定温度は、80 K から 300 K とした。

実験結果 室温での磁化曲線測定により、作製した全ての薄膜が垂直磁気異方性を示すことが分かった。Pt をスペーサ層として挿入した薄膜の交換バイアスと保磁力の温度依存性を、Fig. 1(a), (b) にそれぞれ示す。スペーサ層膜厚を 0.5 nm, 1.0 nm とした薄膜では、測定した温度範囲内で交換バイアスが観測された。80 K における交換バイアス磁場は、スペーサ層膜厚に対して指数関数的に低下する。同様の交換バイアス磁場の指数関数的低下は、スペーサ層材料を Ir, Au とした場合にも生じるが、減衰長はスペーサ層材料によって変化する。スペーサ層として Ir を用いた場合は、スペーサ層膜厚が 1.0 nm 以上で交換バイアスは低下し、Pt 層と比較して減衰長が早い。一方、スペーサ層として Au を用いた場合は、スペーサ層膜厚を 2.0 nm とした場合でも交換バイアスが保持され、減衰長が長いことが分かった。

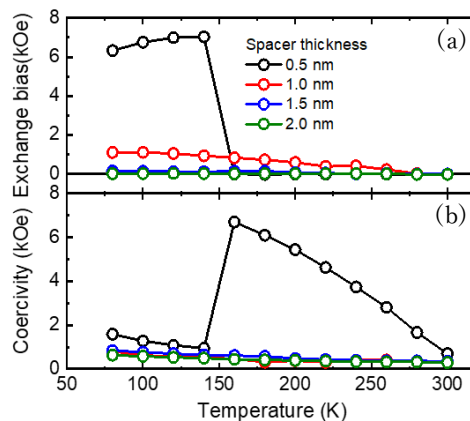


Fig. 1 Pt スペーサ層を挿入した試料に対する (a) 交換バイアス磁場と (b) 保磁力の温度依存性。

PMN-PT 基板を用いた Pt / CoFeB 二層膜系スピンドイナミクスの電界制御

一兜博人、飯森陸、大日方初良、大西紘平、山田和正、木村崇
(九大院理)

Electric field control of spin dynamics in Pt / CoFeB bilayer system using PMN - PT substrate

H. Hitotsukabuto, R. Iimori, S. Obinata, K. Ohnishi, K. Yamada and T. Kimura

(Dept. of Phys., Kyushu Univ.)

はじめに

強誘電体 / 強磁性体のマルチフェロイック界面における歪みを媒介とした電気 - 磁気結合は、超低消費電力なスピンドバイスにおける駆動機構として有望視されている^{1,2)}。本研究では、強誘電体の piezo 効果を利用した歪みの伝播または強誘電体ドメイン状態の変化等による重金属層のスピホール角の変調を捉えることを目的とし、強誘電体 / 重金属 / 強磁性体の素子構造におけるスピン流 - 電流変換の電界効果を評価した。

実験方法

薄膜作製は高真空マグネトロンスパッタ装置により行い、任意の面方位の $0.7\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.3\text{PbTiO}_3$ (PMN - PT) 単結晶基板の上に Pt / CoFeB の 2 層膜を成膜した。その後、200 nm 程度の Cu 膜を蒸着し、piezo 電極及び検出用電極とした。得られた PMN - PT / Pt / CoFeB において、強磁性共鳴を利用した動的スピン注入を実施し、逆スピホール効果を介したスピン流 - 電流変換強度の電界依存性を評価した。

実験結果

Fig. 1 に面内電極構造における素子の模式図、Fig. 2 に動的スピン注入実験により得られたスピン流 - 電流変換強度 $I(E)/I(0)$ の電界依存性、内挿図に各電界における検出スペクトル $\Delta V/V_{\max}$ を示す。Fig. 1 の素子構造において、 $\Delta V/V_{\max}$ は CoFeB の共鳴磁場に対応したピークを示した。 $I(E)/I(0)$ は、電界印加に伴い減少し、 $E > 10 \text{ kV/cm}$ では急激な減少を示した。 $E > 10 \text{ kV/cm}$ における振る舞いは、電界に誘起された PMN - PT の構造相転移³⁾が関与していると考えられる。講演では、CoFeB の磁化及び PMN - PT の構造の電界応答等を交え、PMN - PT / Pt / CoFeB における Pt のスピホール角の電界変調や制御の可能性について議論する。

参考文献

- 1) S. Fujii, *et al.* NPG Asia Mater., **14**, 43 (2022).
- 2) Song C., *et al.* Prog. Mater. Sci., **87**, 33 (2017).
- 3) W. Zhiguang, *et al.* Phys. Rev. B **90**, 134103 (2014).

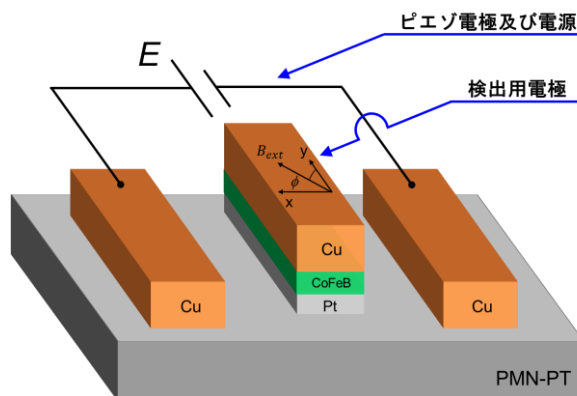


Fig. 1 面内電極構造における PMN-PT / Pt / CoFeB 素子の模式図

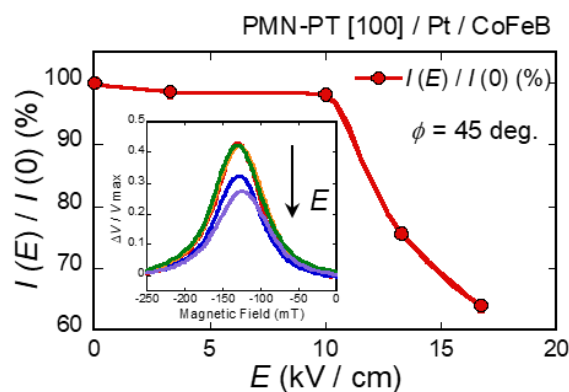


Fig. 2 磁場方向 $\phi = 45 \text{ deg.}$ における $I(E)/I(0)$ の電界依存性(内挿図は検出スペクトル)

NiFe/Pt 二層膜を伝播する表面弾性波の非相反的な減衰効果

篠崎 諒^A, 山野井 一人^A, 能崎 幸雄^{A,B}

(慶大理工^A, 慶大スピン研^B)

Nonreciprocal Attenuation of Surface Acoustic Wave Propagating in NiFe/Pt Bilayer

Ryo Shinozaki^A, Kazuto Yamnoi^A, Yukio Nozaki^{A,B}

(^ADept. of Phys. Keio Univ., ^BKeio Spintronics Center)

はじめに

スピンホール効果(SHE)などスピン軌道相互作用(SOI)を用いたスピン流の生成は、次世代スピンメモリの磁化スイッチングへの応用に向けて盛んに研究されている。一方、SHEの発現にはSOIの強い貴金属やその界面などが不可欠なため、これがデバイス応用における材料選択を限定していた。これに対し、巨視的な回転運動とミクロな電子スピンの角運動量変換理論(磁気回転効果)が松尾らによって予言されて以降[1]、物質固有のSOIに頼らないスピン流生成法が注目されている。実際、弱SOI物質のCu薄膜を伝播するレイリー型表面弾性波(SAW)の格子回転運動が交流スピン流を生成し、これによるスピン波共鳴の励起が実証されている[2]。今回、強SOI物質のPtと強磁性NiFeの二層膜にSAWを注入し、スピン波共鳴の誘引に伴うその原因の解明のために、SAWの減衰の外部磁場印加角度依存性を測定し、定量的に解析した。SAWの減衰強度を測定したところ、正負の共鳴磁場においてSAWの減衰強度が非対称になる非相反性を発見したのでこれを報告する。

実験方法

素子の模式図を図1に示す。電子ビーム蒸着を用いたリフトオフ法により、LiNbO₃圧電基板上にTi(3 nm)/Au(30 nm)からなる一对のSAW生成・検出用すだれ状電極(IDT)を作製し、IDT間に300 μm角のNiFe(20 nm)/Pt(40 nm)二層膜を成膜した。Pt層を伝播するSAWが磁気回転効果によりスピン流を生成すると、これがNiFeに注入され、スピントランスファートルクによりスピン波共鳴が生じる。このときのSAW減衰強度を、ベクトルネットワークアナライザを用いて測定した。なお、SAWの励起周波数は1.33GHzに固定した。

実験結果

図2(a)および(b)は、外部磁場をSAW伝播方向および伝播方向から160°面内に回転させた方向で正から負の方向に掃引しながら測定したSAW減衰強度である。印加したSAWと周波数、波長が一致するスピン波が励起される磁場で減衰強度が大きくなることを確認した。また、正磁場と負磁場で見られるSAW減衰強度は、磁場印加角度に依存して非対称になる結果が得られた。これは、SAWにより非相反的にスピン波が誘引されることを示唆している。これまで、磁気弾性効果[3]や磁気異方性[4]を有する強磁性薄膜においてSAW誘引のスピン波が非相反的になる報告はあるが、今回の実験のようにこれらが小さなNiFe薄膜で大きな非相反性が見られた例はほとんどない。発表では、その起源について議論する。

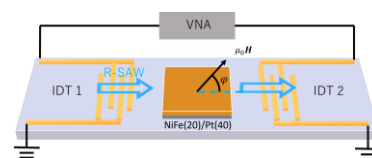


図1 SAW素子の模式図

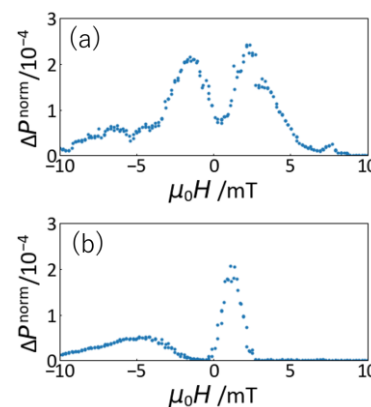


図2 SAW減衰強度の磁場依存性。磁場印加角度(a)0、(b)160°

[1] M. Matsuo et al., Phys. Rev. B, **87**, 180402 (2013).

[2] D. Kobayashi et al. Phys. Rev. Lett. **119**, 077202 (2017).

[3] R. Sasaki et al., Phys. Rev. B **95**, 020407(R) (2017).

[4] M. Xu et al., Sci. Adv. **6**, eabb1724 (2020).