

Sputter growth and anisotropic magnetoresistance effect in epitaxial thin films of Mn-based Heusler alloys: Mn_2VGa and Mn_2VAl

H. Suto¹, V. Barwal¹, Z. Li¹, K. Masuda¹, T. Sasaki¹, S. Kokado², and Y. Sakuraba¹

¹Research Center for Magnetic and Spintronic Materials, NIMS, Tsukuba, 305-0047, Japan

²Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, Hamamatsu, 432-8561, Japan

Introduction

Mn-based ferrimagnetic Heusler alloys: Mn_2VGa (MVG) and Mn_2VAl (MVA) are expected to possess negative spin polarization, which means that the direction of spin-polarized conduction electrons is opposite to the magnetization direction [1,2]. Such negative spin-polarization materials are of growing technological importance because they can increase the freedom in the structure of spintronics devices and improve their performance [3,4]. In this study, we sputter-deposited epitaxial thin films of Mn_2VGa and Mn_2VAl and investigated anisotropic magnetoresistance (AMR) as AMR can provide insights into the scattering process of spin-polarized conduction electrons [5].

Results

Figure 1 shows the calculated DOS of L_{21} ordered MVG and MVA. In both materials, the majority spin band exhibits a gap-like feature near the Fermi energy, which can give rise to negative spin polarization. The spin polarization is higher for MVA as the Fermi energy exists closer to the center of the gap.

Thin films of MVG and MVA were sputter deposited on MgO (001) substrates. The MVG film was deposited at RT and post-annealed at 600°C, and the MVA film was deposited at the substrate temperature of 600°C. The formation of L_{21} order was confirmed by the 002 and 111 superlattice peaks in XRD profiles, as shown in Fig. 2.

AMR effect was measured at 10–300 K using the four-probe method. An in-plane magnetic field of 10 kOe was applied to the samples, and a current was introduced along $\langle 100 \rangle$ and $\langle 110 \rangle$ directions. Figure 3 shows AMR ratio defined as $(R(\varphi) - R_{\perp}) / R_{\perp}$. Both materials exhibited positive and negative AMR for the current along the $\langle 110 \rangle$ and $\langle 100 \rangle$ directions, respectively, and the AMR ratio slightly enhanced with lowering the temperature. Such a sign change of AMR by the current direction was reported for Co_2MnGa Heusler alloy [6]. In the presentation, we will report the analysis of the AMR results.

Reference

- [1] K. Özdoğan, et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **18**, 2905 (2006).
- [2] C. Klewe, et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **25**, 076001 (2013).
- [3] M. Takagishi, et al., *IEEE Trans. Magn.* **57**, 3300106 (2021).
- [4] H. Suto, et al., *Appl. Phys. Express* **16**, 013003 (2023).
- [5] S. Kokado, et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 024705 (2012).
- [6] T. Sato, et al., *Appl. Phys. Express* **12**, 103005 (2019).

This work was supported by Advanced Storage Research Consortium (ASRC) and JSPS KAKENHI Grant Number 21K20434, 23K03934.

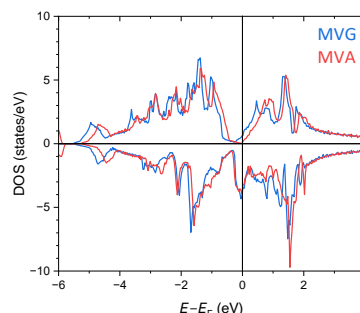


Fig. 1. Spin-resolved DOS for L_{21} ordered MVG and MVA.

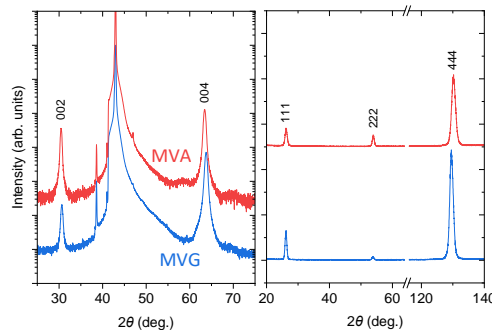


Fig. 2. XRD profile of [001]- and [111]-direction scan.

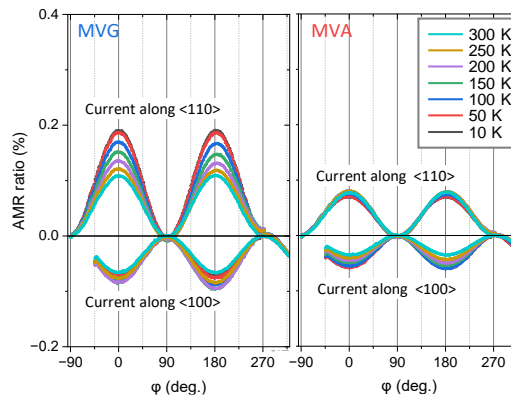


Fig. 3. AMR curves of MVG and MVA films for the two current directions along $\langle 110 \rangle$ and $\langle 100 \rangle$.

スピン角度分解光電子分光実験による Fe₄N 薄膜の電子状態の観測

中西楓恋, 大和田清貴, 黒田健太, 角田一樹*, 宮本幸治,
奥田太一, 佐藤仁, 磯上慎二**, 増田啓介**, 桜庭裕弥**, 木村昭夫
(広島大, *原子力機構, **物材機構)

Electronic Structures of Fe₄N Thin Films Revealed by Spin-ARPES

K. Nakanishi, K. Ohwada, K. Kuroda, K. Sumida*, K. Miyamoto, T. Okuda,
H. Sato, S. Isogami**, K. Masuda**, Y. Sakuraba**, A. Kimura
(Hiroshima Univ., *JAEA, **NIMS)

背景

逆ペロブスカイト型窒化鉄 (Fe₄N) は室温で大きな逆トンネル磁気抵抗 (TMR)効果[1], 負の異方性磁気抵抗 (AMR)効果[2]などの特徴的な輸送特性を示すことから, 物性的な興味のみならずスピントロニクス実用材料候補として注目を集めている[3]. 輸送特性の起源として, フェルミ準位近傍の状態密度が少数スピンバンドで構成されること, 加えて *d* 軌道の少数スピンの電気伝導を支配するという理論的な提案もなされている[4]. これらの理論的な提案を実証し, 輸送特性に関する従来の理解を深めるためには, フェルミ準位近傍の電子状態を直接的に観測する必要がある。

実験方法

そこで本研究では, スピン・角度分解光電子分光(Spin-ARPES)実験を用いた。本実験に相応しいバルク単結晶 Fe₄N 作製が困難なため薄膜形成が必要であるが, それには物質・材料研究機構の超高真空マグネトロンスパッタリング装置を用いた。薄膜試料の清浄表面が必要とされるため, 成膜後は可搬型超高真空スーツケースで大気暴露なく広島大学放射光科学研究センターHiSOR に輸送した。成膜構成は, MgO(100)基板/Fe₄N(膜厚 42 nm)である。ARPES と Spin-ARPES 実験をそれぞれ広島大学 HiSOR BL-7 と BL9B にて行った。また第一原理計算コード WIEN2k を用いて理論的にもバンド構造を求め実験結果と比較した。

実験結果

まず入射光エネルギー($h\nu$)を 50 - 120 eV の範囲で変化させて ARPES 実験を行うことにより, 面直波数との関係を見出した。その結果, Γ 点と M 点を囲む電子ポケットが観測された。次に, $h\nu = 85$ eV に設定し, Brillouin zone の Γ - M 高対称線に沿ったバンド構造[Fig.1(a)]といくつかの面内波数 (k_{\parallel})におけるスピン分解エネルギー分布曲線を測定した。 $k_{\parallel} = 0 \text{ \AA}^{-1}$ におけるスピン分解エネルギー分布曲線を Fig.1(b)に示す。その結果, 観測されたフェルミ準位を横切るすべてのバンドが少数スピン状態に帰属できることが判明した。これらは, 負の AMR 比や逆 TMR 効果の起源として理論提案された電子状態と矛盾しない結果と言える[4]。また, 第一原理計算との比較を行ったところ, Γ 点と M 点を囲む電子ポケットは, それぞれ FeII サイトの t_{2g} および e_g 軌道成分が優勢であることもわかった。さらに, 講演では Co を Fe サイトに置換した電子状態の変化についても議論したい。

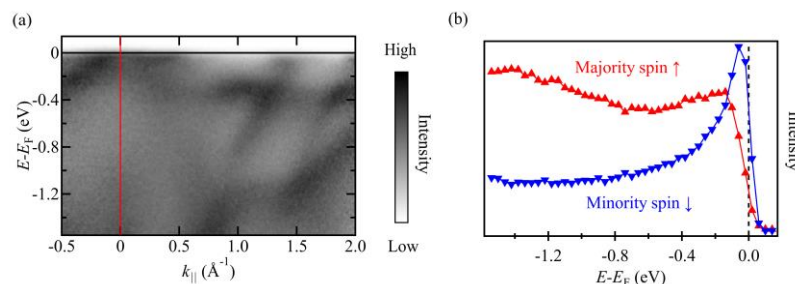


Fig.1 (a) ARPES energy dispersion curves along the ΓM line acquired at $h\nu = 85$ eV. (b) Spin-resolved energy distribution curves acquired at a wavenumber position denoted with red dashed line in panel (a).

参考文献

- [1] Y. Komazaki *et al.* J. Appl. Phys. **105**, 07C928 (2009).
 [2] M. Tsunoda *et al.*, Appl. Phys. Exp. **2**, 083001 (2009).
 [3] S. Isogami *et al.*, Adv. Elect. Mater. **9**, 2200515 (2023); 磯上慎二, 日本磁気学会会報「まぐね」 **17**, 89 (2022).
 [4] S. Kokado *et al.*, Phys. Rev. B. **73**, 172410 (2006).

Co₂MnSi のバルク敏感スピン分解電子状態

上田茂典, 三浦良雄, 藤田裕一, 桜庭裕弥
物質・材料研究機構

Bulk-sensitive spin-resolved electronic structures of Co₂MnSi

S. Ueda, Y. Miura, Y. Fujita, Y. Sakuraba

National Institute for Materials Science

フェルミ準位近傍でのスピン偏極度が 100% であるハーフメタルは、伝導に寄与する電子が完全にスピン偏極しているためスピントロニクス素子への応用が期待されている。ハーフメタル候補物質の 1 つである Co₂MnSi を強磁性体電極に用いた磁気抵抗素子において、低温での巨大な磁気抵抗比は室温では急激に減少することが知られており [1]、この強い温度依存性は、解決すべき課題として残されている。磁気抵抗比の温度依存性と Co₂MnSi のバルク領域のスピン偏極度との相関関係の有無を明らかにするために、我々は近年開発されたバルク敏感なスピン分解硬 X 線光電子分光 [2] にて、Co₂MnSi 薄膜のスピン分解電子状態の温度依存性測定を行った。測定は、SPring-8 BL15XU にて X 線エネルギーを 5.95 keV、総エネルギー分解能を 0.65 eV に設定し、低温 (21 K) と室温 (300 K) にて行った。試料は、MgO (2 nm) 層でキャップされた Co₂MnSi (30 nm) エピタキシャル薄膜を用いた。

図 1(a) に、低温で行った Co₂MnSi のスピン分解硬 X 線光電子スペクトルを示す [3]。多数スピンと少数スピン状態に明瞭な差が見られることが分かる。加えて多数スピン状態は金属的なフェルミ端を示すのに対し、少数スピン状態はフェルミ準位でギャップが開いているのが分かる。図 1(b) および (c) はそれぞれ低温および室温で測定したスピン偏極度スペクトルである。両者は互いによく似ており、温度依存性は殆ど見られない。また、ハーフメタル性から予測されるようにフェルミ準位で高いスピン偏極度 (~90%) を示した。これらの結果は、Co₂MnSi のバルク領域では少なくとも 300 K まではハーフメタル性が保持されていることを示している。

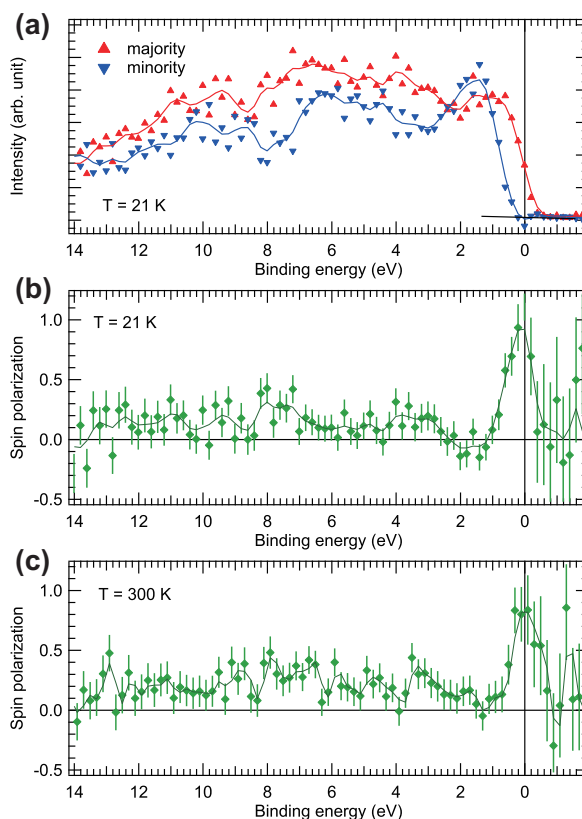


図 1: (a) $T = 21$ K での Co₂MnSi 薄膜のスピン分解光電子スペクトル。スピン偏極度スペクトル (b) 21 K, (c) 300 K [3]。

参考文献

- 1) K. Elphick *et al.*, *Sci. Tech. Adv. Mater.* **22**, 235 (2021).
- 2) S. Ueda, Y. Sakuraba, *Sci. Tech. Adv. Mater.* **22**, 317 (2021).
- 3) S. Ueda, Y. Miura, Y. Fujita, Y. Sakuraba, *Phys. Rev. B* **106**, 075101 (2022).

スピン輸送測定を用いた歪み $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ 伝導帯バレー分裂の推定と低温における不純物散乱の影響

岡田拓也¹, 川島一彰¹, 山田道洋^{2,3,4}, 内藤貴大¹, 我妻勇哉⁵, 澤野憲太郎⁵, 浜屋宏平^{2,1,4}
 (¹阪大基礎工システム創成, ²阪大基礎工 CSRN, ³JST さきがけ, ⁴阪大 OTRI, ⁵東京都市大)

Estimation of valley splitting energy in strained $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ by lateral spin transport measurements and effect of impurity scattering at low temperatures

T. Okada¹, K. Kawashima¹, M. Yamada^{2,3,4}, T. Naito¹, Y. Wagatsuma⁵, K. Sawano⁵, and K. Hamaya^{2,1,4}
 (¹Grad. Sch. Eng. Sci., Osaka Univ., ²CSRN, Osaka Univ., ³JST PRESTO, ⁴OTRI, Osaka Univ., ⁵Tokyo City Univ.)

最近我々は、Ge と同様の伝導帯バンド構造を有する歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ が、 $n\text{-Ge}$ を超えるスピン拡散長(λ)およびスピン緩和時間(τ)を示すことを明らかにした[1]. これは、歪み印加による伝導帯バレー分裂(ΔE)に起因する移動度の向上およびバレー間スピン反転散乱の減少によるものと考えられる[2]. 歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ (111)の ΔE は、理論的に 55-90 meV と予測されているが[2,3], 実験的な検証は行われていない. 本研究では、異なるキャリア濃度(n)を有する歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ において低温でのスピン輸送特性を調べ、 ΔE の値を実験的に考察した.

キャリア濃度の異なる歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ チャネルを用いた横型スピンバルブ素子を作製し、スピン輸送測定を行った. 非局所スピン信号の電極間距離依存性からそれぞれの濃度に対して λ を見積もり、ホール効果測定により得られた拡散係数(D)を用いて τ を計算した. Fig. 1 に、 $n \sim 1 \times 10^{18}$, 2×10^{18} , $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ と $n \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の $n\text{-Ge}$ における τ の温度(T)依存性を示す. $n \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ (赤)と $n\text{-Ge}$ (黒)の結果を比較すると、200 K 以下の低温において歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ の τ は顕著に増大している. これは Fig. 2 に示すように、歪みによる伝導帯バレー分裂によってスピン反転散乱が抑制されているためである[1,4]. 200 K 以下で歪みの効果が見られていることから、歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ の ΔE は、 $n \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ における 200 K でのフェルミ準位(E_F)と熱エネルギー($k_B T$)の和($\sim 82 \text{ meV}$)より大きいと推定される. さらに $n \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ において、すでにバレー間スピン反転散乱が抑制されているにもかかわらず、より低濃度の $n \sim 1 \times 10^{18}$ (青), $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (緑)の歪み $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ において 50 K 以下でさらに τ が顕著に増大している. これは、歪み印加によるバレー間スピン反転散乱抑制後も、バレー内での不純物誘起スピン反転散乱が存在することを示唆している.

本研究の一部は、日本学術振興会科研費(No. 19H05616, No. 19H02175, No. 21H05000), JST さきがけ(No. JPMJPR20BA), スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク(Spin-RNJ), 文部科学省 X-NICS(No. JPJ011438)の支援を受けて行われた.

参考文献

- [1] T. Naito *et al.*, Phys. Rev. Applied **18**, 024005 (2022).
- [2] J.-M. Tang *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 045202 (2012); Y. Song *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 167201 (2014).
- [3] Q. M. Ma and K. L. Wang, Appl. Phys. Lett. **58**, 1184 (1991); R. Vrijen *et al.*, Phys. Rev. A **62**, 012306 (2000).
- [4] T. Naito *et al.*, Phys. Rev. Applied **13**, 054025 (2020).

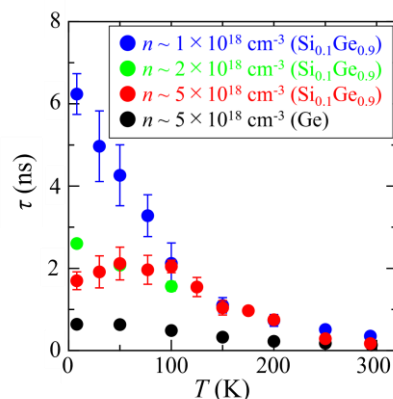


Fig. 1. T dependence of τ for the strained $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ with $n \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (blue), $n \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (green), and $n \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (red), together with that for $n\text{-Ge}$ with $n \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (black).

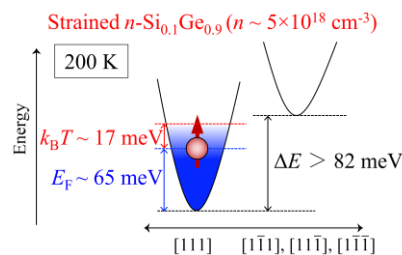


Fig. 2. Schematic of the conduction band valleys in the strained $n\text{-Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ with $n \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ at 200 K.

単結晶ダイヤモンドを応用した横型スピバルブ素子における導電性ナノカーボンオーミック電極の成膜とスピン注入の評価

綿谷 敦志¹, 牧 謙汰¹, Sreenath Mylo Valappil¹, 堺 研一郎², 大曲 新矢³, 吉武 剛¹
(九大¹, 久留米高専², 産総研³)

Conductive Nanocarbon Ohmic Electrode and Evaluation of Spin Injection
into Spin Valve Devices Utilizing Single Crystal Diamond
A.Watatani¹, K.Maki¹, S.M.Valappil¹, K.Sakai², S.Oomagari³, T.Yoshitake¹
(Kyushu Univ.¹, Nit, Kurume College.², AIST³)

研究背景

半導体パワーデバイスにおいて、単結晶ダイヤモンドは高い絶縁耐力と広いバンドギャップを持ち、SiCよりも優れた材料として注目されている。スピントランジスタは、来のトランジスタに比べて小型化の限界を克服するため、ソースやドレイン電極に強磁性体材料を使用するデバイスである。材料ではスピン拡散長が長くなる傾向があり、結晶ダイヤモンドは炭素原子で構成されており、最も原子番号が小さいため、長いスピン拡散長が期待される。しかし、単結晶ダイヤモンドは広いバンドギャップと負の電子親和力のため、オーミック接触の形成が難しいという課題がある。本研究では、超ナノ微結晶ダイヤモンド膜とフォトリソグラフィ法を用いて、単結晶ダイヤモンドを中間層として組み込んだ横型スピバルブ素子を作製、その評価を行った。

実験方法

まず単結晶ダイヤモンド基板を有機洗浄し、アークプラズマ蒸着法により導電性ナノカーボンオーミック電極（膜厚：10nm）を成膜した。その後、フォトリソグラフィ法を用いてレジストパターンを形成し、対向ターゲット式直流スパッタリング法を用いて強磁性電極Fe（膜厚：50nm）を成膜した。さらに、酸素プラズマの影響を抑えるためにPd膜（膜厚：5nm）を成膜し、リフトオフを行い、電極間に10 μ mのギャップを形成した。磁気抵抗曲線の測定は、局所スピバルブ効果測定回路を使用し、4端子プローブを用いて室温で行った。

結果と考察

Fig. 2に異なるBドーブ濃度 (10²² cm⁻³) を有する単結晶ダイヤモンド基板を用いたスピバルブ素子に導電性ナノカーボンオーミック電極を成膜した試料の磁気抵抗曲線を示す。明瞭なスピバルブ効果が観測されなかったが、接触抵抗の低減と磁化反転による抵抗値の変化が確認された。これは、プロセスの複雑化やPd膜、導電性ナノカーボンオーミック電極の成膜によるFe電極の保持力変化が磁化反転機能に影響を与えたと推測される。

参考文献

- 1) K. Takahashi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 49, 110001 (2010).
- 2) M. Ohishi, et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 46, L605 (2007).

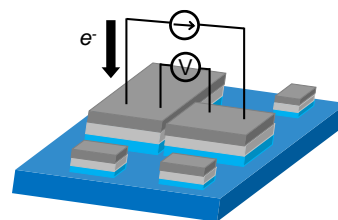


Fig. 1 electrical circuit for measuring local spin valve signal.

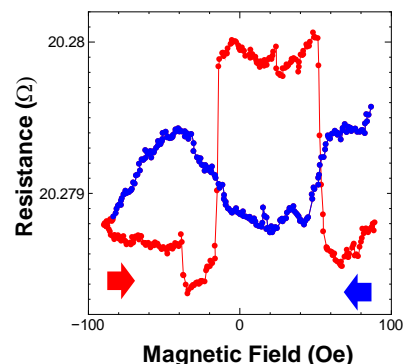


Fig. 2 magnetoresistance curves of spinvalve junctions
B Concentration: 10²² cm⁻³

静磁表面スピン波ソリトンの形成の外部磁場依存性

岩田時弥, 関口康爾
(横浜国立大学)

External magnetic field dependence of formation of magnetostatic surface spin-wave soliton

Tokiya Iwata and Koji Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

スピン波は電子スピンの角運動量の伝播であり電荷の移動を伴わないため、ジュール熱の損失無しで導波路を伝搬する。この性質によりスピン波は超低消費電力での情報処理を実現させる可能性を有しており、次世代の情報キャリアとして注目されている。しかしスピン波伝搬に伴う信号の減衰・歪みが課題であり、スピン波ソリトンの利用はその解決策の1つとして考えられている。スピン波ソリトンが形成されると波形は安定化し、長距離伝搬が可能となる。これまでにスピン波ソリトンの実験的な観測¹⁾や理論的な形成条件²⁾が報告されている。本研究では安定的なソリトン形成を目指し、静磁表面スピン波ソリトンの外部磁場依存性を調べた。

2. 実験方法

実験基板を Fig. 1 に示す。導波路としてイットリウム鉄ガーネット(YIG)を使用した。厚さ、幅、長さはそれぞれ 10 μm、2 mm、20 mm、アンテナ間距離は 4 mm である。外部磁場 H_{ex} を導波路に対して面内垂直に印加し、入力アンテナに励起パルスを印加することで静磁表面スピン波(MSSW)を伝搬させ、出力信号の振幅が最大となる周波数でスピン波伝搬を観測した。測定電圧 V_{out} を特性インピーダンス $Z_0 = 50 \Omega$ を用いて $P_{out} = V_{out}^2 / Z_0$ により出力信号 P_{out} に変換した。

3. 結果および考察

$H_{ex} = 300, 1300 \text{ Oe}$ における出力波形の結果の代表例を Fig. 2 に示す。励起パルスの幅は 25 ns とした。どちらの外部磁場においても、入力電力が大きくなるにつれて出力電力のピーク値は大きくなり、出力波形の急峻化が観測された。また、 $H_{ex} = 300, 1300 \text{ Oe}$ における入力電力とスピン波信号のピーク電力、半値全幅の解析結果を Fig. 3 に示す。入力電力 P_{in} の増加に伴うスピン波電力の応答に関して、 $H_{ex} = 1300 \text{ Oe}$ においては $P_{in} \geq 54.5 \text{ mW}$ の領域(網掛け部分)で線形関係(破線)から上方への逸脱が見られ、非線形性が観察された。この非線形性は先行研究¹⁾でソリトンの特徴とされている。 $H_{ex} = 300 \text{ Oe}$ においてはそのような応答は見られず、線形に増加した。一方、半値全幅に関してはどちらの場合も減少し、 $H_{ex} = 300 \text{ Oe}$ では 3.4 ns、 $H_{ex} = 1300 \text{ Oe}$ では 8.5 ns へ飽和した。分散関係によると、波数 k と群速度 v_g はそれぞれ、 $H_{ex} = 300 \text{ Oe}$ で $k = 8.5 \times 10^3 \text{ rad/m}$ 、 $v_g = 1.3 \times 10^5 \text{ m/s}$ 、 $H_{ex} = 1300 \text{ Oe}$ で $k = 1.3 \times 10^4 \text{ rad/m}$ 、 $v_g = 5.1 \times 10^4 \text{ m/s}$ であった。ソリトンの形成には波形を急峻化させる非線形効果が必要である。 $H_{ex} = 300 \text{ Oe}$ で非線形性が観察されなかったのは、群速度が大きいため伝搬時間が短くなり、十分な非線形効果を受けなかったためであると考えられる。

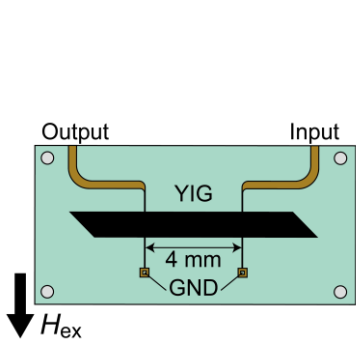


Fig. 1 : Schematic of the experimental device. A pair of microstrip lines were used as the input and output antennas.

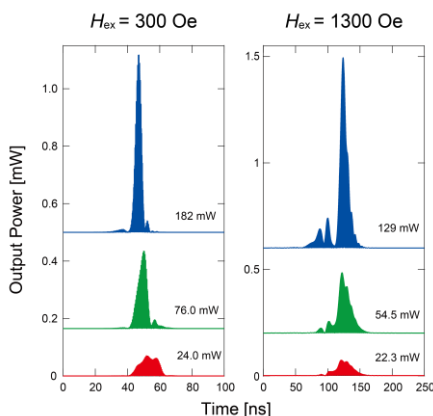


Fig. 2 : The output signal of propagating spin waves, as a function of input excitation power.

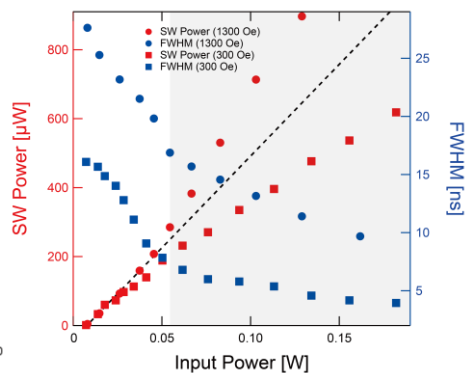


Fig. 3 : Powers and FWHMs of output signals for different input powers.

References

- 1) T. Eguchi, M. Kawase, and K. Sekiguchi, *Appl. Phys. Express* **15**, 083001 (2022).
- 2) M. J. Lighthill, *IMA J. Appl. Math.* **1**, 3 (1965).
- 3) J. S. Harms and R. A. Duine, *J. Magn. Magn. Mater.* **557**, 169426 (2022).

スピン波リザーバー高性能化に向けた短期記憶容量のスケーリング

○飯浜賢志^{1,2}, 小池雄也^{3,2,5}, 水上成美^{2,4}, 義永那津人^{2,5}

(¹東北大学学際科学フロンティア研究所, ²東北大学材料科学高等研究所,
³東北大学工学研究科応用物理学専攻, ⁴東北大学先端スピントロニクス研究開発センター,
⁵産総研・東北大数理先端材料モデリングオープンイノベーション)

Scaling of memory capacity for high-performance spin-wave reservoir computing

S. Iihama^{1,2}, Y. Koike^{3,2,5}, S. Mizukami^{2,4}, N. Yoshinaga^{2,5}

(¹FRIS, Tohoku Univ., ²WPI-AIMR, Tohoku Univ., ³Department of Applied Physics, Tohoku Univ.,
⁴CSIS, Tohoku Univ., ⁵MathAM-OIL AIST)

はじめに

近年、省電力人工知能の実現に向けてスピントロニクスを用いた脳型計算機の物理実装が注目を集めている。リザーバー計算はニューラルネットワーク内部の重みを調整しないため、物理実装の有望な手法となる。これまでにスピントルク発振器[1]やスピン波[2]を用いた物理リザーバー計算が実験的に報告されてきたが短期記憶容量といった性能は他の物理系である光リザーバーに比べて劣っているのが現状である。そのため、スピントロニクスを使ったリザーバー計算の高性能化、短期記憶容量を大きくする手法の検討が必要である。本研究では、スピン波リザーバー計算をマイクロマグネティックシミュレーションによって実行し、短期記憶容量に関するスケーリングを示すこと、および高性能な時系列予測タスクの実証を目的とする。

計算手法

図1にスピン波リザーバー計算の模式図を示す。直径500 nmの円周上にスピン注入かつ検出のための物理ノードを配置した。各物理ノードにおいてスピン移行トルクを用いることでスピン波を励起でき、磁化情報は各ノードにおける磁気抵抗効果によって検出できる。材料は低ダンピング定数を有するホイスラー合金 Co_2MnSi を想定した。外部磁場を印加し磁化を面直方向に飽和させ、磁化のx成分(m_x, m_x^2)を計算に用いた。また物理ノードに加え、複数の仮想ノードを使いリザーバー計算で重要となる自由度を大きくした。マイクロマグネティックシミュレーションはMumax³および線形化したLLG方程式による解析的な式を用いた。リザーバー計算性能評価には短期線形記憶容量(MC)、2次の非線形記憶容量(IPC)、NARMA10タスクを用いた。

リザーバーコンピューティング性能評価

8つの物理ノード、8つの仮想ノードを用いたスピン波リザーバー計算においてMC, IPC ~ 60を達成した。仮想ノード間隔を大きくするとMC, IPCが小さくなる傾向を示した。この傾向は解析的な応答関数によるシミュレーションで再現することがわかった。大きなMC, IPCを有する系でNARMA10タスクを実行すると規格化平均二乗偏差で約0.2と高性能な時系列予測を実現した。解析的な応答関数を用いることで物理ノードの間隔、スピン波の群速度を変えたシミュレーションを実行しスケーリングを示した。情報伝搬速度と入力データ時間間隔、物理ノードの距離に関する統一的なスケーリングを見出し、スピン波を用いることでナノスケールにおける高性能リザーバー計算を実現できる[3]。

【謝辞】

本研究の一部はJST PRESTO(No. JPMJPR22B2), JST FOREST (No. JPMJFR2140), 科研費(Nos. 21H04648, 21H05000), X-NICS of MEXT(No. JPJ011438)の援助のもと行われた。

参考文献

- 1) S. Tsunegi *et al.* Appl. Phys. Lett. **114**, 164101 (2019)
- 2) S. Watt *et al.* Phys. Rev. Appl. **15**, 064060 (2021)
- 3) S. Iihama *et al.* arXiv:2301.02193

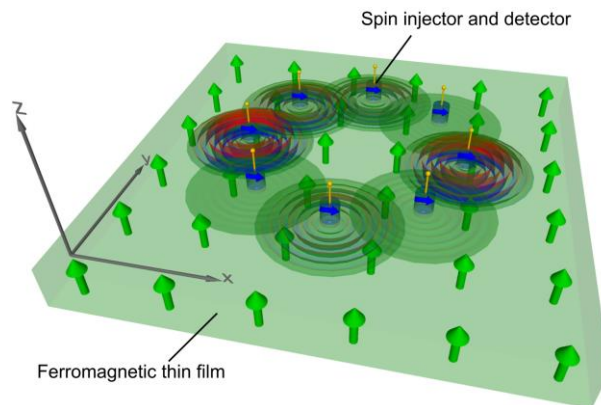


Fig. 1 (a) Schematic illustration of spin-wave reservoir computing.

立方異方性材料におけるパラメトリック励起スピン波の閾値電力の研究

根津昇輝¹, Thomas Scheike², 介川裕章², 関口康爾¹
(横浜国立大学¹, 物質・材料研究機構²)

Threshold power of parametrically excited spin waves in cubic anisotropic materials

Shoki Nezu¹, Thomas Scheike², Hiroaki Sukegawa² and Koji Sekiguchi¹
(Yokohama National Univ.¹, NIMS²)

1. はじめに

情報社会の発展に伴う計算需要の増加により、あらゆる分野において電子デバイスの超低消費電力化に向けた技術開発が行われており、スピントロニクス分野ではスピン波を用いた演算素子の開発が進行している。近年では、立方磁気異方性材料特有の静磁スピン波伝搬特性からエピタキシャル鉄薄膜はスピン波デバイスの開発において有望な材料であることが示された^{1,2)}。本研究では、エピタキシャル鉄薄膜を利用したスピン波増幅システムや量子デバイスの開発を目指し、エピタキシャル鉄薄膜上においてパラメトリックポンピングによって生成されたスピン波の伝搬特性を調査した。

2. 実験方法

実験模式図を Fig. 1 に示す。スピン波導波路は DC マグネトロンスパッタリングによって MgO(001) 基板上的 Cr 薄膜を下地として作製された膜厚 25 nm のエピタキシャル Fe(001) 薄膜であり、リフトオフ法及び Ar イオンミリングによって $180 \mu\text{m} \times 110 \mu\text{m}$ の矩形に加工した。導波路上にはスピン波励起・検出のためのマイクロ波アンテナを作製した。アンテナ間距離は $5 \mu\text{m}$ である。エピタキシャル鉄薄膜の磁化困難軸方向に沿って印加した外部磁場 H_{ex} の存在下で、励起アンテナに $f_p = 8.9 \text{ GHz}$ の連続波を入力し、パラメトリックポンピングによりスピン波を生成した。励起されたスピン波を検出アンテナに接続されたスペクトラムアナライザによって観測した。

3. 結果および考察

パラメトリックポンピングによるスピン波生成の閾値電力 P_{th} と外部磁場 H_{ex} の関係を Fig. 2 に示す。Fig. 2 の挿入図は $\mu_0 H_{\text{ex}} = 80 \text{ mT}$ におけるパラメトリックポンピングで生成された $f_p/2$ の周波数を有するスピン波振幅の入力電力依存性である。閾値電力 P_{th} は観測されたスピン波振幅を関数 $a\sqrt{P - P_{\text{th}}}$ によるフィッティングにより解析した。ただし、 a と P_{th} はそれぞれフィッティング係数と閾値電力である。閾値電力は外部磁場の増加に伴い緩やかに減少し、 $\mu_0 H_{\text{ex}} = 80 \text{ mT}$ を境として急峻な増加が確認され、非対称なバタフライカーブが得られた。閾値電力の最小値は $\mu_0 H_{\text{ex}} = 80 \text{ mT}$ における 0.29 mW であり、先行研究の ZnO/YIG/GGG/YIG/Pt 構造バルク音響波共振器におけるパラメトリック励起スピン波生成の閾値電力と比較して約 28% 減少した³⁾。立方異方性による導波路の内部磁場の減少と素子の微細化による励起磁場の増大により低い入力電力でのスピン波生成が実現したと考えられる。

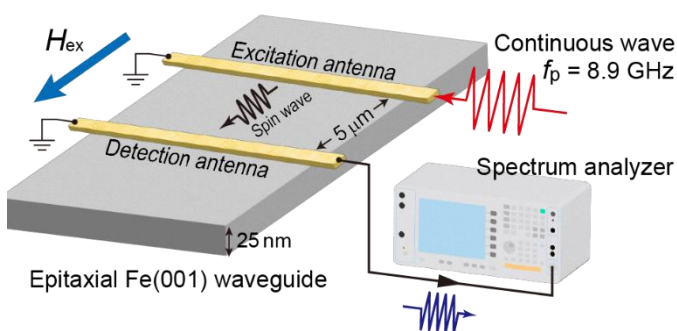


Fig. 1 : Schematic diagram of an experimental setup. Pumped spin waves were generated by a continuous wave at $f_p = 8.9 \text{ GHz}$ and detected by a spectrum analyzer.

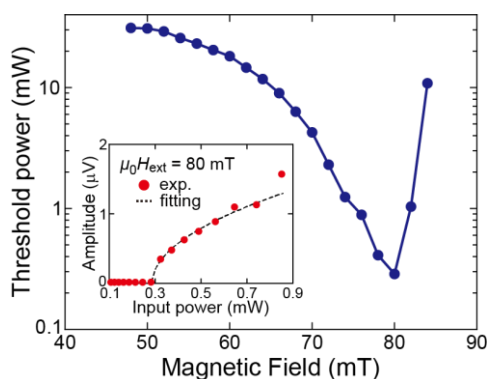


Fig. 2 : The magnetic field dependence of the threshold power at $f_p = 8.9 \text{ GHz}$. The inset represents the amplitudes of pumped spin waves as a function of the input power at $\mu_0 H_{\text{ex}} = 80 \text{ mT}$.

References

- 1) K. Sekiguchi, S-W. Lee, H. Sukegawa, *et al.*, *NPG Asia Mater.* **9**, e392 (2017).
- 2) S. Nezu, T. Scheike, H. Sukegawa, *et al.*, *AIP Adv.* **12**, 035320 (2022).
- 3) S. G. Alekseev, S. E. Dizhur, N. I. Polzikova, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **17**, 072408 (2020).

ナノスピノ波増幅器に向けた帰還構造の開発

岩場雅司¹, 関口康爾^{2,3}

(¹横浜国立大学 大学院理工学府, ²横浜国立大学 大学院工学研究院 ³横浜国立大学 先端科学高等
研究院)

Development of nano-scaled spin-wave amplifier using feedback structure

Masashi Iwaba¹ and, Koji Sekiguchi^{2,3}

(¹Graduate school of engineering Yokohama national university, ²Faculty of engineering Yokohama national
university, ³Institute of advanced sciences Yokohama national university)

概要

磁化の歳差運動を波として伝搬させるスピノ波は、ジュール損失のない超低消費電力の情報伝達システムとして注目されている。現在は微細加工によるスピノ波導波路を使用して、nm, μm スケールのスピノ波素子が研究されている¹⁾。しかし、スピノ波は磁気損失の極めて小さい材料を用いてもスピノ波が減衰するという本質的な欠点がある。そのため、スピノ波の多段化・集積化に向けては増幅器の開発が不可欠となる。増幅器の開発のため、平面的な制御ができる曲線伝搬に着目した²⁾。本研究では直線の導波路にリング型ループ回路を接続した帰還構造を考案し、平面的な制御を用いて増幅器の開発を目指す。帰還構造はスピノ波の位相によって強度が大きく変化すると考えられるため、励起位相によるスピノ波強度の変化を観測した。

実験方法・結果

スピノ波導波路として強磁性金属であるパーマロイ薄膜を用いた。電子線描画およびリフトオフ法により帰還構造をパーマロイ薄膜で作製した。スピノ波帰還構造は図 1(a)より全長 $4\ \mu\text{m}$, 線幅 $w_{\text{py}} = 300\ \text{nm}$, ループ径 $R = 600\ \text{nm}$ である。スピノ波励起には周波数 $f = 6\ \text{GHz}$, 電力 $P = 9\ \text{mW}$ の高周波電力を用いた。帰還構造の端とループ回路の中央にそれぞれ線幅 $w_1 = w_2 = 300\ \text{nm}$ の金アンテナを配置し、ループ中央のアンテナに位相変換器を接続した。スピノ波の検出にはマイクロブリルアン散乱分光法を使用した。

ループ回路を通過した後の直線部の点 $x = 3.7\ \mu\text{m}$ に対して測定した結果を図 1(b)に示す。位相変換器により励起電力の位相を $0 \sim 3\pi/2\ \text{rad}$ で変化させた結果、 $0 \sim \pi\ \text{rad}$ まではスピノ波強度 $I_{\text{sw}} = 9 \sim 15$ とランダムに強度が変化しているが、 $\pi \sim 3\pi/2\ \text{rad}$ ではスピノ波強度が最大 $I_{\text{sw}} = 22$ まで増大した。これはループ回路をスピノ波が伝搬したことで、スピノ波干渉による強め合い・打ち消し合いが生じたためと考えられる。

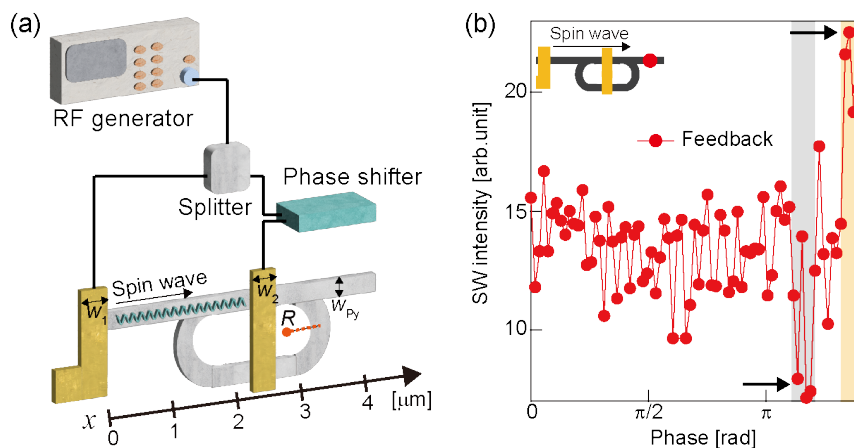


図 1 (a) 2 アンテナ励起によるスピノ波帰還構造の実験概略図。(b) スピノ波強度における励起電力の位相依存性。挿入図より、導波路の直線部の点 $x = 3.7\ \mu\text{m}$ で観測した。

参考文献

- 1) B. Heinz, Q. Wang, M. Schneider et al., *Appl. Phys. Lett.* **118**, 132406 (2021).
- 2) A. V. Sadovnikov, C. S. Davies, V. V. Kruglyak et al., *Phys. Rev. B* **96**, 060401(R) (2017).

微細 Y 字型構造におけるスピン波伝搬の時間分解電気計測

林龍之介, 根津昇輝, 関口康爾
(横浜国立大学大学院)

Time-domain electrical detection of spin waves in Y-shaped microstructures

Ryunosuke Hayashi, Shoki Nezu, and Koji Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

電荷の移動を伴わないスピン波は低消費電力な情報キャリアとして有望視されており、スピン波を用いた情報処理デバイスについて様々な研究がなされている。近年では、バルクサイズのイットリウム鉄ガーネット(YIG)を用いた多数決論理ゲートが実現された¹⁾。スピン波演算デバイスの開発を促進するためには、微細構造を連結させた導波路におけるスピン波の伝搬特性の解明は不可欠である。本研究では、静磁表面スピン波(MSSW)を利用したスピン波演算デバイスの開発を目指し、Y字型のYIG微細構造における時間領域でのスピン波伝搬特性を調査した。

2. 実験方法

実験模式図を Fig. 1 に示す。スピン波導波路は RF マグネトロンスパッタリングによって作製された膜厚 115 nm の YIG 薄膜であり、結晶化のために 800°C で 6 時間アニール処理をした後にリフトオフ法及び Ar イオンミリングによって幅 50 μm の Y 字型に加工した。導波路上にはスピン波励起・検出のためのマイクロ波アンテナを作製した。アンテナ間距離は 100 μm である。導波路の幅方向に外部磁場 H_{ex} を印加し、励起アンテナ 1、2 にパルス幅 25 ns の正弦波パルス波を入力することで MSSW を励起し、アンプで信号を増幅した後にオシロスコープによりスピン波を検出した。励起アンテナ 1 の入力に位相変換器を接続することで、位相変化に伴う波の干渉による信号強度の変化について観測した。

3. 結果および考察

YIG 薄膜の減衰定数 α は FMR 測定の結果、 1.35×10^{-3} であった。Fig. 2 は Y 字型導波路において測定した時間領域信号である。外部磁場の増加によりスピン波パケットの到達時間が変化し、到達時間の差 Δt が MSSW の理論値である $H_{\text{ex}} = 50\text{--}100$ Oe 間で $\Delta t = 17.2$ ns、 $H_{\text{ex}} = 100\text{--}140$ Oe 間で $\Delta t = 11.8$ ns と概ね一致しており、アンテナ間距離 100 μm かつ斜め方向に渡って伝搬した MSSW の信号を時間領域で電氣的に検出できた。2 つの励起アンテナに入力する正弦波パルスの位相差 $\Delta\phi$ を 0 と π に変化させたときの検出したスピン波信号を Fig. 3 に示す。アンテナ 2 のみで励起したスピン波振幅 1.14 mV に対して、 $\Delta\phi = 0$ のときには 2.25 mV、 $\Delta\phi = \pi$ のときには 0.24 mV のスピン波振幅が得られた。 $\Delta\phi = 0$ のときにスピン波の強め合う干渉、 $\Delta\phi = \pi$ のときにスピン波の弱め合う干渉が観測されたと考えられる。この結果から、Y 字型導波路において MSSW の位相を制御することでスピン波干渉による論理演算が可能であることが示された。

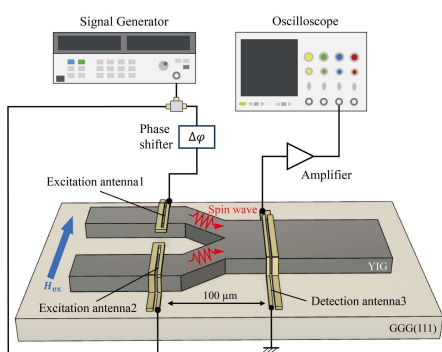


Fig. 1 : Schematic diagram of an experimental setup.

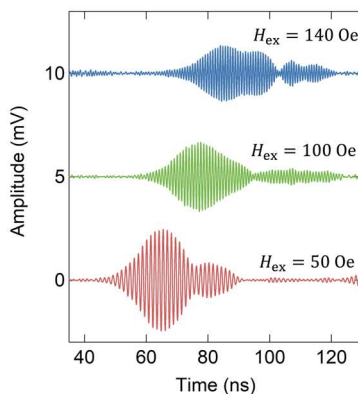


Fig. 2 : Output profiles of detected spin-wave waveforms for three different external magnetic fields.

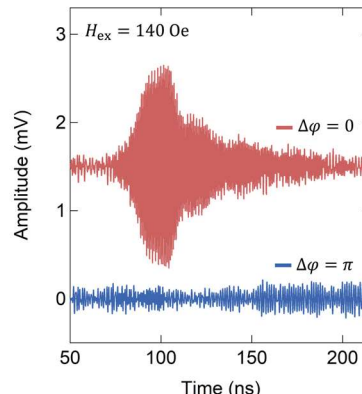


Fig. 3 : Real-time waveforms of output signals with input phase differences $\Delta\phi$. The phase differences of the sinusoidal waves are π and 0, respectively.

Reference

- 1) Naoki Kanazawa, Taichi Goto, Koji Sekiguchi, *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 7898(2017).

アンテナ法によるスピン波の励起・観測を用いた物理リザーバーの実証

長瀬翔, 根津昇輝, 関口康爾
(横浜国立大学大学院)

Physical reservoir devices using excitation and observation of spin-wave via antenna method

Sho Nagase, Shoki Nezu, and Koji Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

テクノロジーの劇的な進歩により IoT 社会の到来が一部実現している現代では、膨大な情報処理の効率化を図るエッジコンピューティングが重要視されており、ニューラルネットワークのような高度な演算を行なうためには低消費かつ高効率なデバイスが必要不可欠である。そのデバイスとして非線形性と履歴依存性を有する物理現象を用いて学習の負荷を抑える物理リザーバーという手法があり、スピン波を用いた物理リザーバードバイスが研究されている。本研究ではパーマロイ薄膜(Py)を微細加工し、アンテナ法を用いた物理リザーバードバイスを作製した。アンテナ法を用いることで実測データとしてリザーバー動作の検証が可能であり、検出されたスピン波の電気信号を利用した学習タスクにて物理リザーバーの動作を確認した。

2. 実験方法

実験模式図を Fig. 1 に示す。酸化膜付き Si 基板上に二層構造の試料を作製した。一層目は Py ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$)を用いたスピン波導波路であり、スパッタリング法を用いたミリングプロセスにて膜厚 300 nm、 $40\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$ の形状に加工した。二層目はスピン波の励起及び観測に用いるアンテナであり、真空蒸着法を用いたリフトオフプロセスにて Ti (5 nm)/ Au (100 nm) で作製した。入力アンテナに幅 10 ns、振幅 5 V の矩形波信号を印加し Surface Mode のスピン波を励起した。励起アンテナ直下の導波路には 2 つのスリットが配置されており、励起されたスピン波は 3 つの球面波として伝搬する。隣り合う球面波と干渉を起こしたスピン波を 4 つの検出アンテナに接続されたサンプリングオシロスコープより観測した。面内 x 軸方向に $B_{\text{ext},x} = 600\ \text{Oe}$ 、面内 y 軸方向に $B_{\text{ext},y} = 20 \sim 90\ \text{Oe}$ の 8 パターンの外部磁場を印加した。各磁場におけるスピン波の電気信号から法則性を学び、 $B_{\text{ext},y}$ の大きさを予測する学習タスクを行った。

3. 結果および考察

面内 y 軸方向に印加した外部磁場 $B_{\text{ext},y}$ と観測されたスピン波の電気信号を用いた磁場予測 (機械学習) 結果の関係を図 2 に示す。 $B_{\text{ext},y} = 30, 50, 70, 90\ \text{Oe}$ の 4 つはトレーニングデータとして重みづけを行った。 $B_{\text{ext},y} = 20, 40, 60, 80\ \text{Oe}$ の 4 つはテストデータであり、トレーニングデータより調整された重みベクトルを用いて磁場予測を行った。学習精度を確認する指標に平均平方二乗誤差 (RMSE) を利用している。予測する各値の差は 10 であるため、各値の ± 5 以内に予測値が収まるのが望ましく、RMSE が 5 より小さければ全ての入力パターンで学習が成功したと判断する。トレーニングデータの RMSE は 2.953、テストデータの RMSE は 4.670 となり、アンテナ法を用いた Py 薄膜デバイスはスピン波の電気信号より法則性を適切に学習し、物理リザーバーとしての汎化性を有していることが示された。

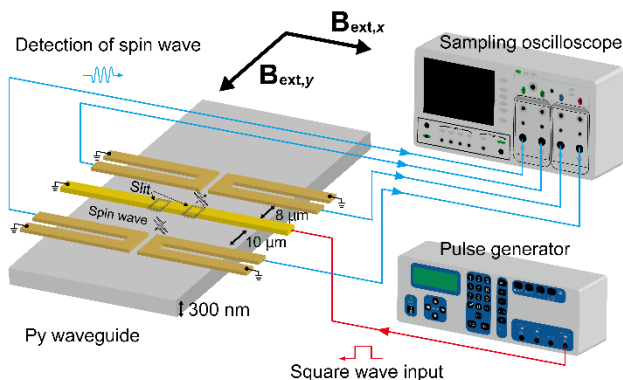


Fig. 1 : Schematic diagram of an experimental setup.

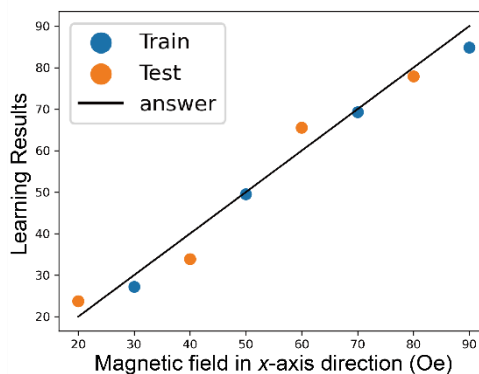


Fig. 2 : The magnetic field dependence of the learning result.

References

- 1) R. Nakane et al., IEEE Access 6, 4462 (2018)

Cu₂Sb 型(Mn-Cr)AlGe 超薄膜の sub-THz 磁化歳差ダイナミクス

佐々木 悠太¹, 平松 諒也², 小田 洋平³, 窪田 崇秀², 園部 義明¹,
佐久間 昭正², 高梨 弘毅^{2,4}, 葛西 伸哉¹, 高橋 有紀子¹
(¹ 物材機構, ² 東北大, ³ 福島高専, ⁴ 原研)

All-optical investigation of sub-THz magnetization dynamics in Cu₂Sb-type (Mn-Cr)AlGe ultrathin film
Y. Sasaki¹, R. Hiramatsu², Y. Kota³, T. Kubota², Y. Sonobe¹,
A. Sakuma², K. Takanashi^{2,4}, S. Kasai¹, and Y. K. Takahashi¹
(¹NIMS, ²Tohoku Univ., ³NIT Fukushima College, ⁴JAEA)

はじめに

0.1~10 THz 程度の周波数帯域における電磁波はテラヘルツ波と呼ばれている。テラヘルツ波は光の直進性と電磁波の透過性を両立することから、非接触の薬品・危険物検査や 6G および Beyond 5G と呼ばれる次世代通信規格への応用が期待されている。また、スピンやマグノンの超高速なダイナミクスがテラヘルツ波帯を含むことからテラヘルツスピントロニクスという分野が近年注目を集めている。特に高い磁気異方性と小さなダンピング定数を両立する MnGa 薄膜においてはテラヘルツ波帯の磁化ダイナミクス・テラヘルツ波放射が報告されている[1,2]。一方で、テラヘルツ波放射や磁化歳差励起の高効率化のためには、金属層の厚みを数 nm 程度まで薄膜化する必要がある。本研究では、Si 基板上に高品位な配向多結晶超薄膜の成長が最近報告された Cu₂Sb 型(Mn-Cr)AlGe[3]における磁化歳差ダイナミクスについて全光学的手法を用いて調べた。

実験方法

熱酸化 Si 基板上にマグネトロンスパッタ法を用いて MnAlGe および (Mn-Cr)AlGe 薄膜試料を作製した。薄膜構成は基板側から、Ta(3)/W(0.3)/CoFeBTa(1)/MgO(1.5)/Mg(1.4)/MnAlGe, (Mn_{0.77}Cr_{0.23})AlGe(*d*)/Mg(3)/MgO(1.5)/Ta(3) (膜厚単位 nm) である。磁性層膜厚 *d* は 3.0~30 nm まで変化させた。試料は室温製膜後に 400°C で熱処理した。試料の磁気特性は VSM, 試料の断面構造は TEM を用いて評価した。磁化ダイナミクスの測定には時間分解磁気光学カー効果 (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。

実験結果および考察

図 1(a) に膜厚 *d*=5 nm とした際の MnAlGe および (Mn-Cr)AlGe 薄膜の歳差周波数 *f* の磁場角度依存性を示す。磁化歳差シグナルは実線で示す Kittel の式で説明できることが分かった。図 1(b) には実効的なダンピング定数の膜厚依存性を示す。(Mn-Cr)AlGe 薄膜では、MnAlGe よりも小さなダンピング定数 $\alpha_{\text{eff}}=0.012$ を極薄膜領域で示すことが分かった。発表ではダンピング定数の詳細を議論する。[4]

本研究は JSPS 科研費(21K14218, 20K05296, 20K15017, 18H03787)および特別研究員奨励費(19J20596)の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] S. Mizukami, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 117201 (2011).
- [2] N. Awari, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **109**, 032403 (2016).
- [3] T. Kubota, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **118**, 262404 (2021).
- [4] Y. Sasaki, *et al.*, Small **18**, 2200378 (2022).

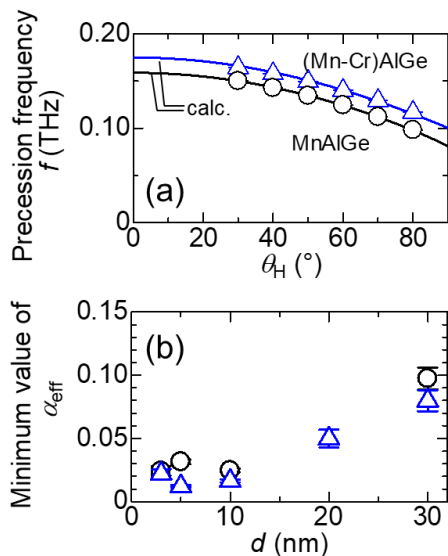


図 1. (a) MnAlGe および (Mn-Cr)AlGe 薄膜における磁化歳差周波数 f の磁場角度 θ_H 依存性. 実線は Kittel の式による解析結果を示す. (b) 実効的なダンピング定数 α_{eff} の膜厚 d 依存性.

垂直磁化人工反強磁性体における広帯域円偏波分解磁気共鳴測定

塩田陽一^{1,2}、荒川智紀³、久富隆佑^{1,2}、森山貴広^{1,2}、小野輝男^{1,2}
 (1京大化研、2京大 CSRN、3産総研)

Broadband polarization-selective magnetic resonance spectroscopy using circularly-polarized microwave field in perpendicularly-magnetized synthetic antiferromagnets

Y. Shiota^{1,2}, T. Arakawa³, R. Hisatomi^{1,2}, T. Moriama^{1,2}, and T. Ono^{1,2}
 (1ICR, Kyoto Univ., 2CSRN, Kyoto Univ., 3AIST)

はじめに

磁気モーメントが反平行に結合した反強磁性体は、二つの異なる回転極性を有する磁気共鳴モードを有しており、その回転極性を利用することでマグノンに偏光自由度を追加することが可能である^{1,2)}。一般に、磁気共鳴測定には振動面が一方向に限られた直線偏波のマイクロ波が用いられるため、これまで磁気共鳴の回転極性の議論はほとんどされてこなかった。また、反強磁性体は強い交換結合によって共鳴周波数が THz 領域にあるため、観測手法が限られてしまう。そこで本研究では、非磁性層を介して二つの強磁性層の磁化が反平行に結合した人工反強磁性体の磁気共鳴に着目し、交差型のマイクロストリップ導波路とハイブリッドカップラを用いることで広帯域円偏波分解磁気共鳴測定を行ったので報告する³⁾。

実験方法

試料は垂直磁化容易軸を持つ Co/Ni 多層膜ベースの人工反強磁性体を用いた。広帯域に円偏波マイクロ波を発生させるためにオーバーカップリングさせた交差型マイクロストリップ導波路とハイブリッドカップラを用いた⁴⁾。Fig. 1(a)に示すように、磁性薄膜に対して垂直に磁場を印加しベクトルネットワークアナライザ (VNA) で S_{21} と S_{12} をそれぞれ測定することで、左右円偏波マイクロ波による対する共鳴吸収を測定した。また、 S_{21} スペクトルと S_{12} スペクトルの差分を取ることで、磁気共鳴の回転極性をピークの符号で可視化できるように信号処理を行った。

実験結果

Fig. 1(b)に垂直磁化人工反強磁性体 [Co(0.2)/Ni(0.6)]_{8.5}/Ru(0.5)/[Co(0.2)/Ni(0.6)]_{8.5} (単位: nm) の試料において測定した結果を示す。この結果から、磁化反平行の磁場領域 (-100 ~ 100 mT) において回転極性の異なる二つの磁気共鳴モードの直接観測に成功した。また図中の実線と破線は理論的な解析から求めた共鳴周波数の磁場依存性であり、共鳴周波数および回転極性も実験結果と一致する結果が得られた。

講演では数値シミュレーションによって行ったマイクロ波の極性に依存した磁化ダイナミクスの詳細についても議論する。

参考文献

- 1) R. Cheng *et al.*, *Sci. Rep.* **6**, 24223 (2016).
- 2) J. Lan *et al.*, *Nat. Commun.* **8**, 178 (2017).
- 3) Y. Shiota *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **18**, 014032 (2022).
- 4) T. Arakawa *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **93**, 013901 (2022)

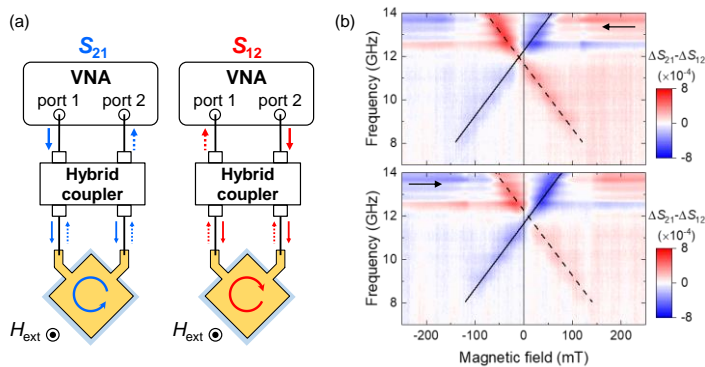


Fig. 1 (a) Schematic illustration of measurement setup for broadband polarization-selective magnetic resonance spectroscopy using circularly-polarized microwave field. (b) Color plots of $\Delta S_{21} - \Delta S_{12}$ on perpendicularly magnetized synthetic antiferromagnets.

Electrical detection of antiferromagnetic dynamics in thin films by using gyrotron

Shinsaku Funada¹, Yuya Ishikawa², Motoi Kimata³, Yuusuke Yamaguchi², Kanata Hayashi²,
Tomonori Sano², Koki Sugi¹, Yutaka Fuji², Seitaro Mitsudo², Yoichi Shiota^{1,4}, Teruo Ono^{1,4},
○Takahiro Moriyama^{5,6}

¹Institute for Chemical Research, Kyoto University, Uji 611-0011, Japan

²Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui, Fukui 910-8507, Japan

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

⁴Center for Spintronics Research Network, Kyoto University, Uji 611-0011, Japan

⁵PRESTO, Japan Science and Technology Agency, Kawaguchi 322-0012, Japan

⁶Department of Materials Physics, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan

THz magnetization dynamics is a key property of antiferromagnets that could harness the THz forefront and spintronics. Recently, advancements in THz techniques have realized some of the key experiments on antiferromagnetic resonance. However, the measurement principles used in those studies rely on the volume of the materials and thus the same principle can hardly be applied for characterizing thin films which is a central interest when considering any antiferromagnetic integration devices.

One of the solutions could be the DC voltage detection of the magnetic resonance resulting from a nonlinear coupling of the induction current and the magnetoresistance change associating with the magnetization dynamics, both of which are irrespective to the volume of the material. The only concern for this method is that it generally requires a sizable irradiation power of > mWatt, which is to be resolved by the gyrotron irradiation that is introduced in this study.

Test samples, ferrimagnetic Gd_{1-x}Co_x (20 nm)/ Ta (3 nm), were shaped into a 1.5 mm x 5 mm piece with electric leads connected on the longitudinal ends for measuring DC voltage. The sample is then placed at the end of a hollow waveguide carrying 154 GHz continuous electromagnetic wave fed from the gyrotron apparatus. DC voltage measurements were carried out with sweeping external magnetic field. Figure 1 shows DC voltage measurements for Gd_{0.17}Co_{0.83}/Ta film at various temperature. We observed a clear DC voltage peak (marked by the star) at a certain magnetic field and the peak shifts with varying the temperature, which are consistent with the resonant properties of GdCo.

As the gyrotron frequency is scalable up to THz, our demonstration can be an important milestone toward the THz measurements for antiferromagnetic thin films.

[1] S. Funada *et al.*, *Phys. Rev. Applied* **19**, L031003 (2023)

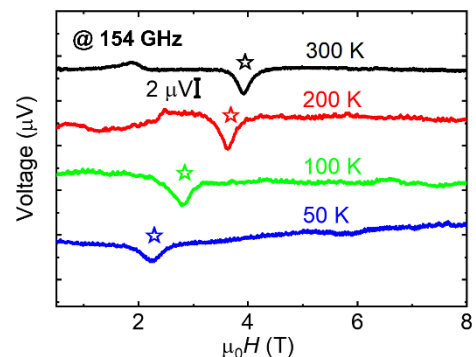


Fig. 1 DC voltage spectra at different temperatures [1].

人工反強磁性体における混成マグノン分散関係の観察

林大寿¹、塩田陽一^{1,2}、石橋未央¹、久富隆佑^{1,2}、森山貴広^{1,2}、小野輝男^{1,2}
(¹京大化研、²京大 CSRN)

Observation of dispersion relation for hybridized magnons in synthetic antiferromagnets

D. Hayashi¹, Y. Shiota^{1,2}, M. Ishibashi¹, R. Hisatomi^{1,2}, T. Moriyama^{1,2}, and T. Ono^{1,2}
(¹ICR, Kyoto Univ., ²CSRN, Kyoto Univ.)

はじめに

2つのマグノンモードのコヒーレント結合により新しいマグノン状態を作り出すことは、将来のマグノンデバイス開発に大きく貢献すると期待されている[1]。人工反強磁性体(SAF)上に励起されるマグノンには、二つの磁化の同位相歳差運動、逆位相歳差運動に対応する音響マグノンと光学マグノンの2種類が存在することが知られている。最近の研究で、動的な双極子相互作用によりマグノンマグノンカップリングと呼ばれるそれらの2つのマグノンモードの混成が実現できることが明らかになった[2]。この結果は、コプレーナ導波路を用いたマイクロ波反射測定による電氣的スピン波分光法によって得られた。しかしこの測定法では励起されたマグノンの伝搬特性については評価できなかった。本研究ではヘテロダイン磁気光学カー効果(MOKE)[3]を用いて SAF 中の混成マグノンの実空間での伝搬を測定し、マグノンの性質を理解する上で重要なマグノン分散関係を得た。

実験方法

SAF の構成は Ta(3)/Ru(3)/Fe₆₀Co₂₀B₂₀(15)/Ru(0.6)/Fe₆₀Co₂₀B₂₀(15)/Ru(3) (nm) であり、熱酸化 Si 基板上に DC マグネトロンスパッタリング法を用いて作製した。さらにそれを文献[2]にあるようにスピン波デバイスに微細加工した。ベクトルネットワークアナライザ (VNA) のポート 1 からアンテナにマイクロ波電流を流してマグノンを励起し、極カー配置で磁化の歳差運動を集光レーザービームで光ヘテロダイン信号に変換して VNA のポート 2 に送った。光学マグノンは磁化振動の面直成分を持たない為、このセットアップでは音響マグノンのみが検出される。集光レーザービームの照射位置を移動させながら測定することにより、実空間を伝搬する音響マグノンについて測定した。

結果と考察

Fig. 1 はマグノンマグノンカップリングが顕著に観察される 38.1 mT の面内磁場をマグノンの伝搬方向から 45° の方向に印加し、得られた伝搬マグノンの強度と位相の実空間信号を複素高速フーリエ変換して得られたマグノン分散関係である。この磁場角度では音響マグノンと光学マグノンが同時に励起され、さらに動的な双極子相互作用によって2つのマグノンの対称性が破れてそれぞれのマグノン同士の結合強度が最大となる。負の波数領域で顕著なモード分裂が観測されたが、これは音響マグノンが光学マグノンとカップリングしたことによるものであると考えられる。

本発表では、磁場強度や角度に対する依存性など、さらなる検討について議論する。

参考文献

- 1) G. Kurizaki et al., Proceedings of the National Academy of Sciences **112**, 3866-3873(2015).
- 2) Y. Shiota et al., Phys. Rev. Lett. **125**, 017203(2020).
- 3) Y. Shiota et al., Appl. Phys. Lett. **116**, 192411(2020)

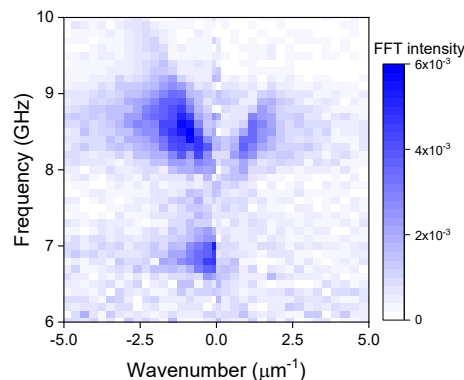


Fig. 1 Dispersion relation of acoustic magnons on SAF.

負のスピンの分極を有する Fe₄N/Pt のテラヘルツ波放射特性

○磯上慎二, 佐々木悠太, 高橋有紀子
(物質・材料研究機構)

Laser-induced terahertz emission in Fe₄N/Pt bilayers with negative spin polarization

○S. Isogami, Y. Sasaki, and Y. K. Takahashi
(NIMS)

1. はじめに 超短パルスレーザーで誘起されるスピン流は、超高速磁化反転に貢献するなど実用的な観点から注目を集めている¹⁾。また、逆スピンホール効果によってスピン流が電場に変換された結果、テラヘルツ波として放射される現象が重金属/強磁性ヘテロ接合膜で得られている。近年、例えば CoFeB に接合する種々の重元素についてテラヘルツ波強度の対比実験が行われ、スピンホール伝導率の大小関係と定性的に一致すると報告されている²⁾。さらにホイスラー合金層を含む Co₂MnSi/Pt ヘテロ接合では、CoFe/Pt に対する放射強度として最大 2 倍程度の増大が観測され、L₂₁ よりも B₂ 規則相からの寄与が支配的と議論されている³⁾。以上に対し本研究では、磁性層側の電子状態からの寄与を実験的に理解するため、フェルミ準位におけるスピン偏極率符号とテラヘルツ波極性ととの相関解明を目的とした。金属強磁性窒化鉄 (Fe₄N) は、フェルミ準位において負のスピン偏極率をもつことが、理論計算⁴⁾、バンド構造の直接観察⁵⁾両面から示されている上に、負のスピン偏極とスピンプッキングで検出された逆スピンホール起電力との相関が解明されている⁶⁾。また近年、軽元素を含む遷移金属合金 (窒化物/炭化物/ホウ化物) 薄膜が次世代スピントロニクス材料として進展しつつあることも踏まえ⁸⁾、本研究では Fe₄N/Pt ヘテロ接合におけるテラヘルツ放射の検証実験を行った。

2. 実験方法 試料の膜構成は、MgO(100)単結晶基板/ Fe₄N ($d_{\text{Fe}_4\text{N}}$) / Pt (d_{Pt}) (膜厚単位: nm) とした。Fe₄N 膜の成長には窒素反応性 DC マグネトロンスパッタリング法を用いた。結晶構造解析、磁化過程評価にはそれぞれ、X 線回折装置と振動試料型磁力計を用いた。Fe₄N 薄膜は逆ペロブスカイト構造に規則化し、Pt 薄膜もその上にエピタキシャル成長することを確認した。異方性磁気抵抗効果の測定において、負のスピン偏極を示唆する負の抵抗変化率を確認した。波長 1028 nm, 周波数 10 kHz, パルス幅 230 fs の Yb ドープ KGW レーザーを光源とし、電気光学サンプリングによってテラヘルツ波放射を測定した。Fe₄N 層の磁化を面内に飽和させるため約 0.5 kOe の磁場を印加した。ポンプ光を 570 Hz で強度変調させ、CdTe(110)結晶を透過したプローブ光の偏光変調をロックインアンプで検出した。以上の実験は室温、窒素置換雰囲気下で行った。

3. 実験結果 Figure 1(a)は膜厚を $d_{\text{Pt}} = 2$ nm に固定し、 $d_{\text{Fe}_4\text{N}} = 10$ nm (赤) と 5 nm (青) でテラヘルツ波を対比した結果を示す。まず極性 (波形の極大値が示す符号と定義) に関して、Co₂MnSi ホイスラー合金、CoFe 合金の場合と定性的に一致したことから、テラヘルツ波の極性は強磁性層のフェルミ準位におけるスピン偏極率の符号には依存しないことが判った。次に $d_{\text{Fe}_4\text{N}} = 10$ nm より 5 nm の方で振幅の増大が見取れるが、この傾向は先行研究の結果と類似することが判った。現時点で観測された最大 0.25 程度の振幅強度は、Co₂MnSi, CoFe それぞれ 5 nm における値と同等であることが判った。しかしながら、 $d_{\text{Fe}_4\text{N}} < 5$ nm 領域で更なる増大の可能性があるため、膜厚依存性を系統的に調べる必要がある。講演会ではテラヘルツ放射効率の見積り、電子状態に照らした放射特性の解釈、種々の材料系における Fe₄N ヘテロ接合の位置づけを議論する予定である。

参考文献

1) Xu *et al.*, Adv. Mater. 29, 1703474 (2017). 2) Seifert *et al.*, Nature Photonics 10, 483 (2016). 3) Sasaki *et al.*, APEX. 13, 093003 (2020). 4) Kokado *et al.*, JPSJ. 81, 024705 (2012). 5) Nakanishi *et al.*, AP02, Intermag2023. 6) Isogami *et al.*, APEX. 6, 063004 (2013). 7) Isogami *et al.*, JJAP. 55, 043001 (2016). 8) Isogami *et al.*, Adv. Electron. Mater. 9, 2200515 (2023).

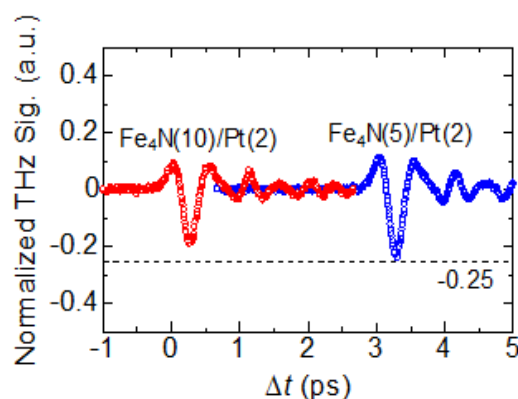


Fig.1 Normalized amplitude of THz wave forms for the samples, MgOsub/Fe₄N (10 and 5)/Pt(2) (in nm). The wave for 5 nm is shown with horizontal shift.

Amplified transport of low-energy magnons in Bi-doped YIG by local heating

R. Kohno^{1*}, K. An^{1,2}, V. V. Naletov¹, J. Ben Youssef³, D. Gouéré⁴, V. Cros⁴, A. Anane⁴,
G. de Leubens⁵, L. Vila¹ and O. Klein¹

¹Université Grenoble Alpes, CEA, CNRS, Grenoble INP, Spintec, 38054 Grenoble, France

²Quantum Technology Institute, KRISS, Daejeon, Republic of Korea

³Lab-STICC, CNRS, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France

⁴Unité Mixte de Physique, CNRS, Thales, Université Paris Saclay, Palaiseau, France

⁵SPEC, CEA-Saclay, CNRS, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

Magnonics aims at proposing novel circuits operated by spin waves, or their quanta magnons, especially on insulators with reduced energy losses. Using a prototypical device which consists of two Pt electrodes, such magnons can be incoherently generated through spin orbit torques at the emitter, and can be sensed electrically through the inverse spin Hall effect [1-3] at the collector. We use a 20 nm Bi-doped YIG thin film with perpendicular uniaxial anisotropy and fabricated a transport device with an additional electrode to control the transport (Fig.1). We observed reversibly the amplification of the conduction of low-energy magnons by a factor of 3 by heating locally the region beneath the collector electrode (Fig.2). For that purpose, we fabricated a modulator electrode deposited on top of the collector in thermal contact but electrically isolated by an intercalation layer of Si₃N₄ of 20 nm thickness. The motivation comes from the idea of amplifying the oscillation amplitude (cone angle of the precession) by locally reducing the magnetization. Previously reported methods for amplifying the transport were focusing on using a third Pt electrode in between the emitter and collector to provide an additional source of damping compensation, which already deteriorates the signal because Pt itself absorbs magnons[4,5]. Our method is free from such deterioration with a comparable amplification ratio and could be useful for future magnonic devices to control the transport.

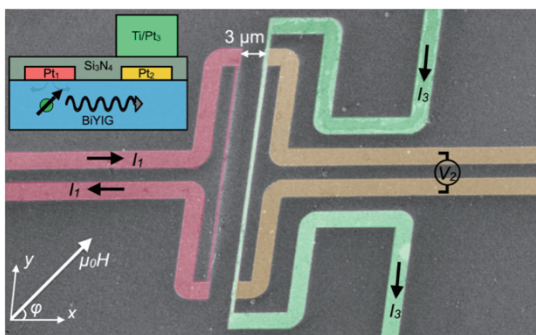


Fig. 1: SEM image of the device which consists of three Pt wires on a 20 nm Bi doped YIG film. Pt₁ for the emission Pt₂ for the collection of magnons, and Ti/Pt₃ for controlling the transport.

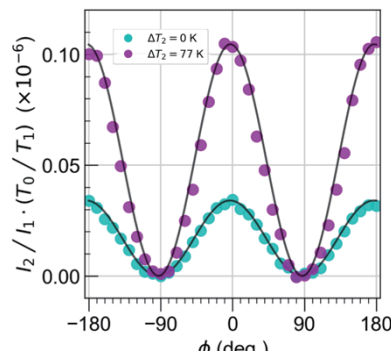


Fig. 2: Renormalized signal from electrically excited magnons probed at Pt₂ as a function of the angle of applied magnetic field with or without local heating.

Reference

- [1] L. J. Cornelissen, J. Liu, R. Duine, *et. al.*, *Nat. Phys.* (2015).
- [2] Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, *et. al.*, *Nature* (2010).
- [3] S. T. B Goennenwein, R. Schlitz, M. Pernpeintner, *et. al.*, *Appl. Phys. Lett.* (2015).
- [4] L. J. Cornelissen, J. Liu, B. L. Van Wees, *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* (2018).
- [5] T. Wimmer, M. Althammer, L. Liensberger, *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* (2019).

トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体二層膜における強結合磁気共鳴

千葉貴裕^{1,2}, 小峰啓史³, 青野友祐³¹東北大学学際科学フロンティア研究所, ²東北大学大学院工学研究科, ³茨城大学大学院理工学研究科)

Strong-coupled magnetic resonance in topological-insulator/magnetic-insulator bilayers

Takahiro Chiba^{1,2}, Takashi Komine³, and Tomosuke Aono³¹FRIS, Tohoku Univ., ²Tohoku Univ., ³Ibaraki Univ.)

1. はじめに

近年、コヒーレントなマグノン光子結合の実現を契機として、量子情報とスピントロニクスが融合した共振器スピントロニクスが急速に発展している¹⁾。そのような中、最近新たに散逸過程を介したマグノン光子結合が報告された²⁾。この散逸的なマグノン光子結合は、強結合(ポラリトン)状態の安定性に大きな影響を与えるため、マグノンをベースとした量子情報技術を開発する上でその機構を系統的に理解する必要がある。一方、これまで我々はトポロジカル絶縁体(TI)を活用した磁性絶縁体(MI)のspin緩和制御を提唱してきた^{3,4)}。本研究では、これまでに得た知見からspin緩和が非常に強いTIの表面(界面)状態に着目して、TI/MI二層膜におけるspin緩和に起因した散逸的なマグノン光子結合を理論的に解明することを目指した。

2. 数理モデル

Fig.1(a)に示すようなRLC共振回路を想定して、spin緩和に起因した散逸的なマグノン光子結合をモデル化した。コイル内にはFig.1(b)に示した垂直磁化を有するTI/MI二層膜⁴⁾が挿入されている。このコイルに交流 $I(t)$ が流れるとアンペール則によりrf磁場 $H(t)$ が生じ、MIにおいて磁気共鳴 $m(t)$ が駆動される。このときTIの強いspin緩和に起因したspinポンピング効果によりTI/MI界面に環状電流が生じ³⁾、その結果、軌道磁気モーメントが誘起される。これが $m(t)$ と交換結合することにより、散逸的なマグノン光子結合を生み出す。本研究では、TI/MI二層膜の界面状態を記述する有効ハミルトニアンに基づいて、この散逸的なマグノン光子結合を定式化した。さらに、ランダウ-リフシッツ-ギルバート方程式とRLC回路方程式に基づいて、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3(\text{TI})/\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}(\text{MI})$ 二層膜において定式化した散逸的な結合がポラリトン状態に及ぼす影響を解析した。

3. 計算結果

定式化した散逸的なマグノン光子結合は、ダンピング増強係数と帯磁率に比例することから、動的透磁率を通じてコイルのインダクタンスを変調する。そのため実験的にはRLC共振回路のアドミッタンス $Y(\omega)$ として観測可能である。定式化した散逸的な結合に対応するアドミッタンス成分 $Y_d(\omega)$ を解析したところ、Fig.1(c)に示すようにモード交差点近傍にて同期的な振舞いを確認した。一方で、定量的には同系でのポラリトン状態(反同期)への影響は十分小さいことがわかった。この結果は、垂直磁化を有するTI/MI二層膜においてポラリトンを安定化できることを意味しており、共振器スピントロニクス技術への今後の展開が期待される。

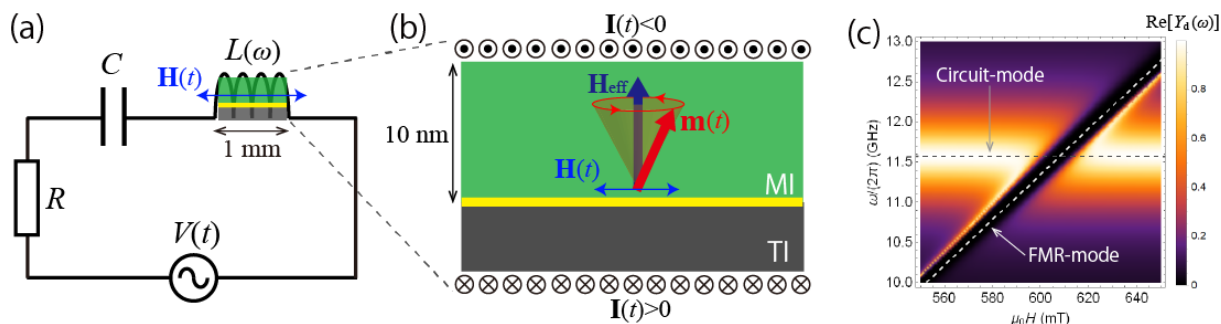


Fig.1. (a),(b) Schematic diagram of a RLC synchronized circuit with a dynamical inductor involving a TI/MI bilayer that is zoomed in the illustration (b). (c) Calculated admittance $Y_d(\omega)$ for a dissipative magnon-photon coupling at the TI/MI interface.

参考文献

- 1) B. Z. Rameshti *et al.*, Phys. Rep. **979**, 1 (2022).
- 2) Y. P. Wang and C.-M. Hu, J. Appl. Phys. **127**, 130901 (2020).
- 3) T. Chiba, A. O. Leon, and T. Komine, Appl. Phys. Lett. **118**, 252402 (2021).
- 4) T. Chiba and T. Komine, Phys. Rev. Appl. **14**, 034031 (2020).

Fe-Si 薄膜における構造と磁気特性の Si 組成依存性

蔣曄, 室賀翔, 宮崎孝道, 遠藤恭 (東北大学)

Dependence of structure and magnetic properties on the Si compositions for Fe-Si thin films

Ye Jiang, Sho Muroga, Takamichi Miyazaki, Yasushi Endo (Tohoku Univ.)

はじめに

磁性薄膜における磁化の動的挙動は、歳差運動項と制動項からなる Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式によって現象論的に記述される⁽¹⁾。なかでも、ダンピング定数 (α) は磁化の歳差運動に対する減衰量の大きさを左右する重要なパラメータである。これに加えて、 α はスピントロニクスデバイス応用の性能にも大きく影響する。したがって、 α のメカニズムを理解することが必要不可欠である。

我々はこれまでに Fe-Ni 合金薄膜において α と磁歪が相関関係にあることを報告してきた⁽²⁾。しかしながら、この相関関係が他の Fe 系合金薄膜においても成立するか不明確である。本研究では、Fe 系二元合金とした Fe-Si 合金を選択し、 $\text{Fe}_{100-x}\text{Si}_x$ 薄膜における構造と磁気特性の Si 組成依存性について検討した。得られた結果をもとにして、 α と磁歪の関連性を議論する。

実験方法

試料作製には DC マグネトロンスパッタリングを用いた。作製した膜構成はガラス基板上に製膜した 10 nm 厚の Fe-Si 薄膜である。試料の Si 組成 (x) は 9.7 - 21.7 at.% であり、EDX を用いて評価した結果である。

Fe-Si 膜の構造に関しては、XRD および TEM を用いて、また、磁気特性に関しては、VSM、光てこによる磁歪測定法およびブロードバンド強磁性共鳴 (B-FMR) 法を用いて評価した。

研究結果

Fig.1 は、10 nm 厚の Fe-Si 膜における飽和磁歪 (λ_s) と有効ダンピング定数 ($\alpha_{//}$, α_{\perp}) の Si 組成依存性である。 λ_s は、Si 組成の増加とともに増加し、Si 組成 13.7 at.% で最大となり、さらに Si 組成を増加させると減少した (Fig.1 (a))。この挙動は 100 nm 厚の Fe-Si 多結晶薄膜と異なっており、また λ_s 値も他の場合と比べても高くなった⁽³⁾。この原因は、製膜時の基板と膜の間で生じる引張り応力に起因するものと考えられる。

有効ダンピング定数 ($\alpha_{//}$, α_{\perp}) に関しては (Fig.1 (b))、 $\alpha_{//}$ は Si 組成 15.7 at.% 以下ではほぼ一定となり、15.7 at.% 以上の Si 組成では Si 組成を増加させると増加し、19.6 at.% で極大値 0.0103 となり、その後減少した。一方、 α_{\perp} は Si 組成 15.7 at.% までにほぼ一定であり、さらに Si 組成の増加にもなって増加し、19.6 at.% で極大値 0.0060 となり、その後減少した。このように、 $\alpha_{//}$ と α_{\perp} の Si 組成に対する変化は類似した挙動となった。また、 $\alpha_{//}$ 値は Si 組成によらず、 α_{\perp} 値より高くなった。これらの違いは、 $\alpha_{//}$ は外的要因によるダンピングと材料固有ダンピングが重なっていることによるものと考えられる。なお、当日 α と λ_s の関連性についても報告する予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 JPJ011438 の助成を受けた。また、本研究の一部は、東北大学 CSIS、東北大学 CSRN、東北大学 CIES および ASRC の支援のもと行われた。

参考文献 (1) T. L. Gilbert, IEEE Trans. Magn, 40, 3443-3449 (2004). (2) Y. Endo, O. Mori, Y. Shimada, S. Yabukami, S. Sato, and R. Utsumi, Appl. Phys. Lett., 112, 252403 (2018). (3) A. Hosono and Y. Shimada, J. Appl. Phys., 67, 6981-6990, (1990).

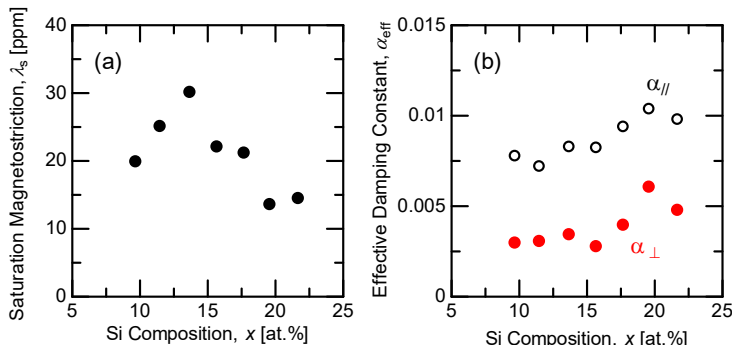


Fig.1 Dependence of saturation magnetostriction (a) and effective damping constant (b) on the Si compositions for 10 nm thick Fe-Si thin films

Inverse magneto-optical effect in Co-Pt disordered alloy films

Kouki Nukui^{1,2}, Satoshi Iihama^{3,2}, Shigemi Mizukami^{2,4}

¹Dept. of Appl. Phys., Tohoku Univ., ²WPI-AIMR, Tohoku Univ., ³FRIS, Tohoku Univ., ⁴CSIS, Tohoku Univ.

Introduction The inverse magneto-optical effect, such as the inverse Faraday effect (IFE), has attracted much attention toward the realization of ultrafast optical control of magnetization for next-generation information devices [1]. IFE-driven magnetization dynamics was first reported in magnetic insulators [2], and has been widely used to induce magnetization dynamics in various materials. However, microscopic physics of the IFE in metals is unclear. The origin of the IFE may be related to spin-orbit coupling (SOC) in metals [3]. Heavy metal elements have large SOC; thus, in this study, we investigate helicity-dependent laser-induced magnetization dynamics for Co-Pt alloy to gain insight into spin-orbit physics of the IFE.

Experimental methods The 5-nm-thick $\text{Co}_{1-x}\text{Pt}_x$ alloy thin films were deposited on thermally-oxidized Si substrates with ultra-high vacuum magnetron sputtering. The Pt composition x was systematically varied from 0.3 to 1.0 using co-sputtering technique. Time-resolved magneto-optical Kerr effect (TRMOKE) measurement was performed with a Ti: Sapphire femtosecond laser. A magnetic field of 20 kOe was applied in the film plane using an electromagnet (Fig. 1 (a)).

Experimental results Fig. 1 (b) shows the typical data of magnetization precession for $\text{Co}_{80}\text{Pt}_{20}$ films with different helicities of the circularly-polarized (CP) laser. The signals show the polarity changes against right (RCP) and left circular polarization (LCP), indicating almost purely optical induction of magnetization precession. Fig. 2 shows the composition dependence of the amplitude and phase of the laser-induced magnetization precession which were evaluated via sinusoidal function fits. Here, those amplitude and phase are governed, respectively, by the strength and direction of the laser-induced torque acting on magnetization (Fig. 1(a)). As observed in Fig. 2, the amplitude significantly increases with Pt concentration, demonstrating enormous enhancement of the laser-induced torque and/or the inverse magneto-optical effect. More surprisingly, we observe large change of the precession phase with different Pt concentration (Fig. 2). Traditionally, the IFE is considered to cause an effective magnetic field; thus it induces a *field-like torque* with the negligible phase, as observed in Co-rich CoPt films (Fig. 2). On the other hand, with increasing Pt concentration, the phase changes and reaches 45 deg., which cannot be explained by the *field-like torque* due to IFE and implies an additional *damping-like torque* emerged with Pt addition, unveiled in this study.

This work was supported by KAKENHI and X-NICS. S. I. thanks to JST PREST (No. JPMJPR22B2), the Asahi Glass Foundation, and the Murata Science Foundation.

References [1] G. Kichin, *et al.*, Phys. Rev. Appl. **12**, 024019 (2019). [2] A. V. Kimel *et al.*, Nature **435**, 655 (2005). [3] Popova, *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 094419 (2012).

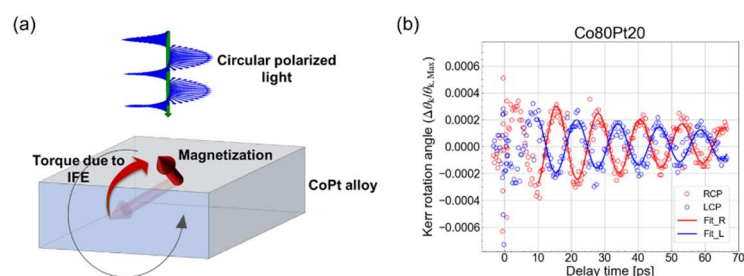


Fig. 1 (a) Schematic diagram of experiments in this study. (b) All-optical TRMOKE measurements with different circularly polarization of laser in $\text{Co}_{80}\text{Pt}_{20}$ films.

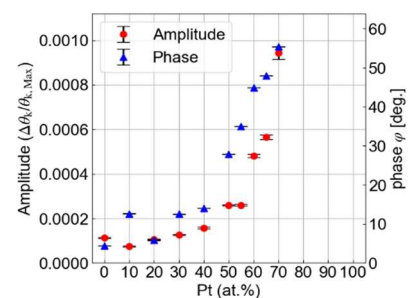


Fig. 2 Composition dependence of the amplitude and phase of laser-induced magnetization precession.

音響電流測定によるフォノン-マグノン変換の検出

松本啓岐¹、戸高安裕²、安田偉²、川田拓弥³、河口真志²、林将光²(¹京大化研、²東大理、³阪大理)

Phonon-magnon conversion probed by acoustoelectric current

Hiroki Matsumoto¹, Yasuhiro Todaka², Isamu Yasuda², Takuya Kawada³, Masashi Kawaguchi², and Masamitsu Hayashi³(¹Institute for Chemical Research, Kyoto Univ. ²Dept. of Phys, The Univ. of Tokyo, ³Dept. of Phys, Osaka Univ.)

はじめに

表面弾性波は固体表面に局在する振動モードであり、強誘電体基板にくし型電極を作製したデバイスに交流電圧を印加することで励起できる。表面弾性波の遅延線上へ強磁性体薄膜を作製し、表面弾性波を印加すると、磁気弾性結合により強磁性体中にスピン波が励起される（フォノン-マグノン変換）¹⁾。この過程では表面弾性波のエネルギーが強磁性体中のスピン波のエネルギーへと変換され、散乱行列測定によって透過率の減少として検出される。この手法では、検出可能な表面弾性波の帯域がくし型電極の設計に強く依存しており、非線形音響効果²⁾などに伴い周波数が非線形に変化した表面弾性波を検出することは難しい。本研究では、こうした従来手法とは異なる手法でのフォノン-マグノン変換の検出に取り組んだ。具体的には、表面弾性波デバイスの遅延線上へ強磁性体薄膜とは別に金属薄膜を作製し、薄膜中の直流電圧の測定を行った。表面弾性波が導体中へと伝搬する際、圧電基板と導体との界面に音響電流と呼ばれる直流電流が生じる³⁾。音響電流の大きさは表面弾性波のパワーに比例する⁴⁾ことが知られている。フォノン-マグノン変換に伴う表面弾性波のパワー減少によって音響電流も減少し、これが金属薄膜の直流電圧を介して検出される。

実験手法

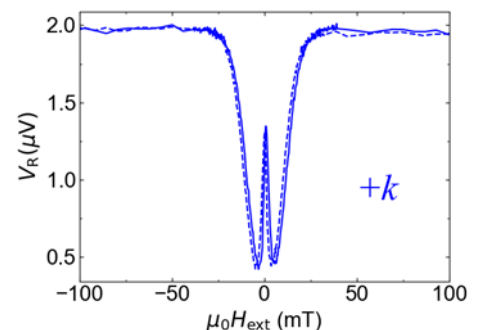
Y+128°カットニオブ酸リチウム基板上へ、Ta/Cu(50 nm)/Pt からなるくし型電極をリフトオフ法により作製した。くしの細線幅および細線の間隔はいずれも 2 μm である。その後、くし型電極間の中心に Ni(10 nm)/Cu/MgO/Ta から成る多層膜を作製した。さらに、Ni を含む構造体の両側に Ta(3 nm)/MgO/Ta からなる音響電流検出用金属薄膜を作製した。製膜には rf マグネトロンスパッタリングを、パターンニングにはフォトリソグラフィを用いた。ベクトルネットワークアナライザによる散乱行列測定から、5 次の高調波である 2.3 GHz の表面弾性波を励起できることが確認できた。シグナルジェネレータで 2.3 GHz の交流電圧をくし型電極へ印加し、外部磁場を掃引しながら Ta 膜に生じる直流電圧を測定した。

実験結果

表面弾性波を左から右へ伝搬させたとき、Ni 膜の右側にある Ta 膜の直流電圧の磁場依存性を図に示した。ある磁場から直流電圧が減少し、0 磁場の近くで極小値を取るような曲線となっている。これは、マグノン励起により表面弾性波のパワーが吸収されたことで音響電流が減少したことを示している。

参考文献

- 1) M. Weiler et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 117601 (2011).
- 2) M. Kraimia et al., Phys. Rev. B **101**, 144425 (2020).
- 3) V. Miseikis et al., Appl. Phys. Lett. **100**, 133105 (2012).
- 4) T. Poole et al., Appl. Phys. Lett. **106**, 133107 (2014).



図：Ni 薄膜の右側に作製した Ta 膜に生じる直流電圧の磁場依存性。表面弾性波は左から右へ伝搬している。

スピントルク発振器を用いたスパイクングニューロンモデル

伊勢翔, Simon John Greaves, 田中陽一郎
(東北大学)

Spiking neuron model using coupled spin-torque-oscillators
Tsubasa Ise, Simon John Greaves, Yoichiro Tanaka
(Tohoku University)

はじめに スピントルク発振器(Spin-Torque-Oscillator : STO)の非線形な動作をニューラルネットワークに利用し、音声認識¹⁾に成功した例が報告されている。この応用例では STO の位相同期を用いて基準値との一致度を測っている。互いに近距離に配置された STO ではデバイス間の静磁気相互作用によって位相同期が生じそれは STO の直径や間隔に影響を受ける。本研究では直径の異なる STO 配列を用いることで多数決関数を実装し、その特性を調査した。

実験方法 LLG 方程式に基づくマイクロマグネティックシミュレーションを用いた。各 STO は円筒形で直径は 30nm と 60nm であり、5nm のスピン注入層、2.5nm の非磁性層、一様に磁化された 10nm の自由層で構成される。スピン注入層の飽和磁化 M_s は 637 emu/cm^3 で垂直軸方向に $8 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ の単軸異方性 K_u を持つ。自由層の M_s は 1591 emu/cm^3 , K_u は 0 で形状異方性により磁化は水平方向にある。減衰定数は全層で 0.02, 温度は 300K とした。シミュレーションの時間長は $1 \mu\text{s}$ である。Fig.1 に示すように直径の異なる STO を 2 次元配置し、直径 60nm の STO1 に $1.2 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$, STO6 に $1.7 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ の電流を印加した。直径 30nm の STO2~5 に印加する電流を変化させた際の STO 同士の同期を測定した。

実験結果 Fig.2.1 に STO2~5 の 4 つの STO の電流を変化させたとき、STO1 に対するそれぞれの相関時間を示す。 $1.7 \sim 1.9 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ の範囲で STO1 と STO6 の位相が同期した。 Fig.2.2 に $1.7 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ の電流を印加した STO2~5 の数と STO1 と STO6 の相関時間を示す。その STO の数が 3 つ以上になると、STO1 と STO6 の相関時間が大きく増加することが確認された。

まとめ 静磁気相互作用の下、直径の異なる STO の配列を同期させることで多数決関数を実装できた。

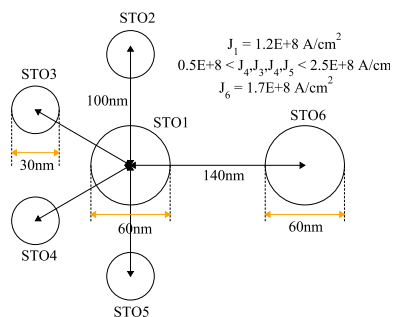


Fig.1 Schematic of STO arrangement

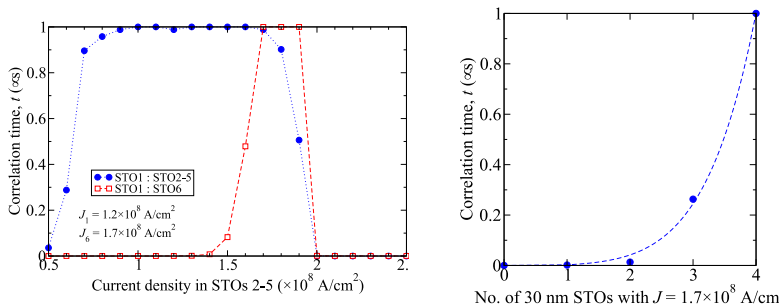


Fig.2.1 (left) Correlation time of STOs 1 and 6 vs current density in STOs 2-5. Fig.2.2 (right) Correlation time of STOs 1 and 6 vs number of 30nm STOs driven by a current density of $1.7 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$

参考文献 1) M. Romera et al., “Vowel recognition with four coupled spin-torque nano-oscillators,” Nature, vol. 563, pp. 230–234, Nov. 2018

ナノワイヤに形成された連結したスキルミオン

西谷泰知¹, 本多周太^{1,2}, 伊藤博介^{1,2}

(¹関西大学, ²大阪大学)

The connected-skyrmions stabilized in a nanowire

Taichi Nishitani¹, Syuta Honda^{1,2}, and Hiroyoshi Itoh^{1,2}

(¹Kansai University, ²Osaka University)

はじめに

磁気スキルミオンは垂直磁化の磁性細線に形成される渦状の磁化状態である。スキルミオンは低電流で駆動できるためレーストラックメモリにおける情報担体などでの活用が期待されている。細線に2つのスキルミオンが形成されたとき、コア間の相互作用により反発し離れる¹⁾。ところが、時計回り渦と反時計回り渦などのように互いに逆向きのヘリシティを持つ2つのスキルミオンを接近させて設置した場合には、2つのスキルミオンが近づいた状態で渦を共有し安定する。最近、2つのスキルミオンが連結した磁化形状がナノドットやナノワイヤに安定することが示された^{2,3)}。また、2つ以上連結したスキルミオンも孤立したスキルミオンと同様に細線を流れるスピン偏極電流で駆動可能であった³⁾。連結したスキルミオンはスキルミオン間距離が小さいため、情報担体への活用でストレージ密度を増加できる。しかし、安定する距離などの特性は明らかになっていない。そこで、マイクロマグネティクスシミュレーションを用いて、ナノワイヤに形成された連結したスキルミオンの磁化特性を調べる。

計算方法

垂直磁気異方性を有する細線に形成された連結した2つのスキルミオンの磁化状態をランダウ-リフシッツ-ギルバート方程式(LLG方程式)に基づいたマイクロマグネティクスシミュレーションを用いた。細線のサイズを200 nm×50 nm×4.0 nmとした。細線に右回りに渦をもつスキルミオンと左回りの渦をもつスキルミオンを設置し、磁化状態を緩和させて安定な磁化状態を得た。2つのスキルミオンが逆向きのヘリシティを持つため、ジャロシンスキー-守谷相互作用は導入しなかった。飽和磁化などの磁気パラメータを変えながらバイスキルミオンが安定する距離や形状を調べた。磁気パラメータを固定したままスキルミオン間を制御し静磁エネルギー、交換エネルギー、垂直磁気異方性エネルギーとスキルミオン距離依存性を検討する。

シミュレーション結果

細線の飽和磁化が $M_s = 396$ kA/m と 413 kA/m において、形成された連結したスキルミオンの磁化状態を Fig. 1 に示す。各スキルミオンの渦が逆向きのため、渦の一部を共有して2つのスキルミオンが連結して安定した。飽和磁化が大きくなるにつれて各スキルミオンのサイズが大きくなった。これは、孤立したスキルミオンと同じ性質である。また、各スキルミオンのコア間の距離が飽和磁化の増加とともに長くなり、また、渦の共有された領域の割合が減少した。各状態におけるエネルギーを比較したところ、渦を共有することによって交換エネルギーと垂直磁気異方性エネルギーが減少した。接近による静磁エネルギーの増加量よりもこれらのエネルギーの減少量が大きかったために、スキルミオンが連結して安定することが明らかとなった。しかし、2つのスキルミオン間距離をある値以上離れた状態から磁化状態を緩和させると、スキルミオンは近づかずに離れた。同じ向きの渦をもつ2つのスキルミオンの場合には、接近すると交換エネルギーが増加し、2つのスキルミオンが接近して安定する位置は得られなかった。

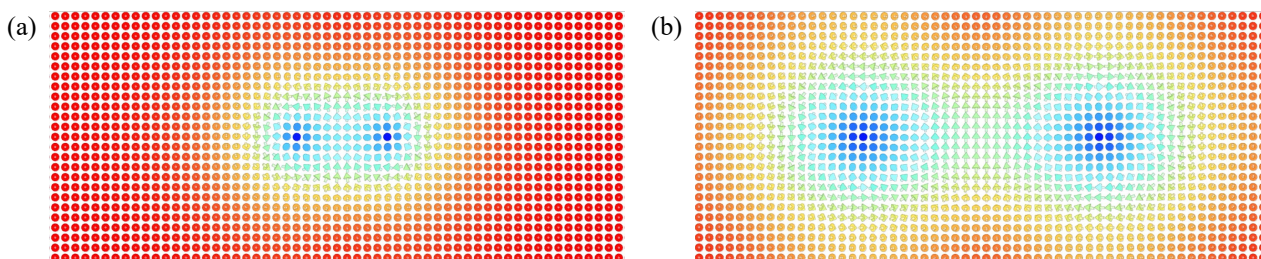


Fig. 1. Magnetic moments of the two-connected skyrmions stabilized in the nanowire with M_s of (a) 396 kA/m and (b) 413 kA/m.

参考文献

[1] M. Kato, et. al.: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55**, 475002 (2022).

[2] Y. Yuan, et. al.: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55**, 435010, (2022).

[3] T. Nishitani, S. Honda, and H. Itoh: *Intermag 2023*, CS-15 (2023).

磁性薄膜パターンにおける磁性粒間交換結合強度と skyrmion 磁化構造の熱安定性の関係

大中秀斗, Xiaorui Ya*, 田中輝光
(九州大学, *Chongqing College of Electronic Engineering)

Relationship between the strength of inter-grain exchange coupling and the thermal stability of the skyrmion magnetization configuration in magnetic thin film patterns

Shuto Onaka, Xiaorui Ya*, Terumitsu Tanaka
(Kyushu Univ., *Chongqing College of Electronic Engineering)

はじめに

近年, 磁性体メモリとして利用可能なスキルミオンに関する研究が盛んに行われており[1,2], その磁化構造の熱安定性について報告例のあるものは, 完全な連続膜の場合[3]である. 一方で, 一般的には連続膜であっても薄膜は微細な磁性粒で構成されており, 粒間の交換結合強度は粒内よりも小さいことが知られている. 本研究では, 粒径 8 nm 程度の薄膜について, 磁性粒間交換結合強度を粒内交換結合強度より小さくした場合, また, 磁性粒の異方性磁界(H_k)・飽和磁化(M_s)に分散がある場合のスキルミオン磁化構造の熱安定性($\Delta E/k_B T$)について評価した.

シミュレーション手法

マイクロマグネティック計算には LLG 方程式を用いた. また, スキルミオンが崩壊する際のエネルギー障壁 ΔE の大きさはナジドエラスティックバンド法により求めた. シミュレートしたエネルギーの遷移過程は, 薄膜にスキルミオンが存在する状態から消失した状態までである. また, 磁化構造の初期状態は, 完全な連続膜において得られたサイズが 50 nm 程度のスキルミオンを粒径分散モデルに与え, 磁化を緩和させた状態である.

結果と考察

Fig.1 に, H_k, M_s の標準偏差 σ をともに 5% とし, 粒内交換結合強度に対する磁性粒間交換結合強度(A)を 10~100% とした際の $\Delta E/k_B T$ を示す. また, 磁化構造の初期状態を示す. Fig.1 より, A が小さいほどスキルミオン磁化構造の熱安定性が高くなることが分かる. これは, 粒間における交換定数の不均一さと H_k, M_s の分散により, 完全な連続膜の場合とは異なり磁壁部分の磁化の動きが制限されることが理由であると考えられる. また, 完全な連続膜におけるスキルミオンと Fig.1 の A=100% の場合のスキルミオンのサイズはほぼ等しかったが, 前者の $\Delta E/k_B T$ はおよそ 57, 後者はおよそ 68 であった. これより, 磁性粒の H_k, M_s に分散を与えると, 熱安定性が高くなると言える.

Fig.2 に磁性粒の H_k, M_s の各 σ を 5, 10, 20% とした場合の $\Delta E/k_B T$ を示す. Fig.2 より, H_k 及び M_s の σ が大きくなるほどスキルミオンの熱安定性が高くなることが分かる. これも Fig.1 と同様, 磁壁部分の磁化の動きが制限されることが理由であると考えられる. また, H_k の σ は 5~10%, M_s の σ は 10~20% の間で $\Delta E/k_B T$ に大きく影響を与えることが分かった.

参考文献

- [1] Gajanan Pradhan *et al.*, *JMMM*, **528**, 167805, (2021).
- [2] Raphael Gruber *et al.*, *nature communications*, **13**, 3144, (2022).
- [3] David Cortés-Ortuño *et al.*, *scientific reports*, **7**, 4060, (2017).

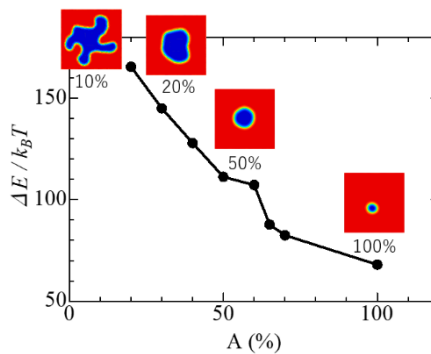


Fig. 1 Relationship between A and magnetization thermal stability.

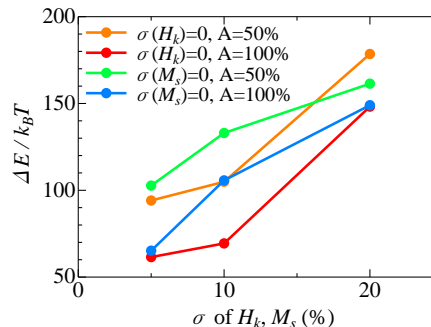


Fig. 2 Relationship between distribution of magnetic parameter and magnetization thermal stability.

磁気スキルミオンのブラウン運動における カイラルな回転のポラリティ依存性

三木颯馬¹⁻³、新村農文¹、後藤穰¹⁻³、田村英一¹⁻³、塩田陽一^{4,5}、
大兼幹彦⁶、Jaehun Cho⁷、Chun-Yeol You⁷、石川諒⁸、野村光¹⁻³、鈴木義茂¹⁻³

(¹阪大基礎工、²阪大 OTRI、³阪大 CSRN、⁴京大化研、
⁵京大 CSRN、⁶東北大工、⁷DGIST、⁸アルバック協働研)

Polarity dependence of the chiral rotation in the Brownian motion of a single magnetic skyrmion

S. Miki¹⁻³, A. Shimmura¹, M. Goto¹⁻³, E. Tamura¹⁻³, Y. Shiota^{4,5},
M. Oogane⁶, J. Cho⁷, C. Y. You⁷, R. Ishikawa⁸, H. Nomura¹⁻³, Y. Suzuki¹⁻³

(¹Osaka Univ., ²OTRI-Osaka, ³CSRN-Osaka, ⁴Kyoto Univ.,
⁵CSRN-Kyoto, ⁶Tohoku Univ., ⁷DGIST, ⁸ULVAC, Inc.)

はじめに

磁気スキルミオンはトポロジカルに安定なスピン構造で粒子としてふるまう。そのトポロジカルな性質に由来したスキルミオンのダイナミクスとしてはジャイロ運動が挙げられ、例えば電流駆動によるスキルミオンホール効果¹やブラウン運動における回転成分の存在^{2,3}などが報告されている。スキルミオンのジャイロ運動の回転方向はスキルミオン数、すなわちスキルミオンのポラリティと密接に関係している。しかし拡散中の回転の方向はいまだ決定されていない。この回転方向の決定は科学的関心および新奇デバイスへの応用の観点からも必要不可欠である。したがって本研究では拡散における回転方向のポラリティ依存性を決定することを目的とする。

実験方法

スパッタリング法により Si/SiO₂ sub. | Ta(5) | Pt(0.04) | Co-Fe-B(1.09) | Ta(0.18) | MgO(1.5) | SiO₂(3) (0内は nm) を成膜した。詳細な運動を観測するために 1000fps にて撮影可能な高速カメラを備えた磁気光学 Kerr 効果(MOKE)顕微鏡によってスキルミオンを観察した。トラッキングにより得られた軌跡から速度位置相関関数 $\langle \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{x}(t) \rangle$ および $\langle (\mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t))_z \rangle$ を計算しブラウン運動における回転成分の観測を試みた。

実験結果

Fig. 1 はスキルミオンのポラリティ (a) $p = -1$ および (b) $p = +1$ の場合での速度位置相関関数の解析結果である。十分時間が経過した後、 $\langle \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{x}(t) \rangle$ および $\langle (\mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t))_z \rangle$ はそれぞれ拡散係数テンソルの対角項および非対角項に対応する。 $\langle (\mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t))_z \rangle$ の符号、すなわちスキルミオンの拡散中での回転の方向はポラリティ p の符号に依存する。この回転方向は以前我々が報告した結果[3]と一致する。また軌跡に対するフラクタル解析から、スキルミオンの拡散は低周波側では試料中の浅いポテンシャル揺らぎから、また高周波側にてピンングサイトから影響を受ける。本研究は本成果は JST CREST JPMJCR20C1、JSPS 若手研究 (23K13660)、科研費 基盤研究 S (JP20H05666)、特別研究員奨励費(23KJ1477)、文部科学省次世代 X-NICS 半導体創生拠点形成事業 (JPJ011438)、豊田理研スカラーの支援を受けたものである。

参考文献

- 1) S. Woo, *et al. Nat. Mater.* **15**, 501 (2016)
- 2) L. Zhao, *et al. Phys. Rev. Lett.* **125**, 027206 (2020)
- 3) **S. Miki**, *et al. J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 083601 (2021).

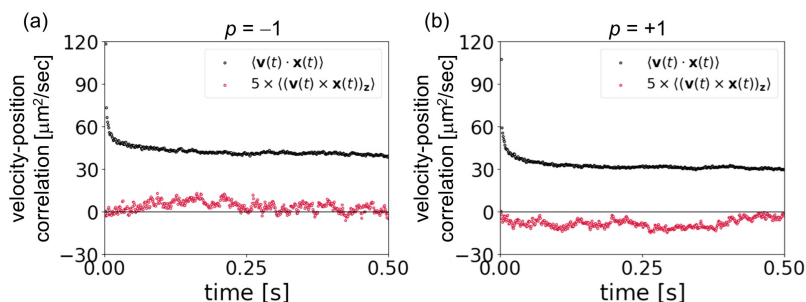


Fig. 1 Velocity-position correlation function with the polarity of (a) -1 and (b) +1

段差構造を導入した磁性細線における磁区駆動の磁気光学観察

加藤 大典、小倉 溪、高橋 真央、井口 義則、宮本 泰敬
(NHK 放送技術研究所)

Magneto-optical observation of recorded domain shift in magnetic nanowire memory with step trap-sites
Daisuke Kato, Kei Ogura, Mao Takahashi, Yoshinori Iguchi, Yasuyoshi Miyamoto
(NHK Science & Technology Research Labs.)

はじめに

将来の3次元映像用ストレージの実現を目指して、超高速転送が可能な磁性細線メモリの研究を進めている。確実なメモリ動作のためには記録ビットとなる磁区を一定長ずつシフトさせる必要があり、これまでラチェット構造等の狭窄部を周期的に導入した磁性細線において、磁気光学カー効果顕微鏡(MOKE)により磁壁電流駆動現象の評価を進めてきた^{1,2)}。一方でこの狭窄部は磁壁のトラップ力が強すぎ、多数の記録磁区をまとめてシフトさせる際に支障があった。今回、磁性細線に段差構造を周期的に導入することにより、その凹凸凹を単位として磁区のシフト長一定化を実現できる見込みを得たので報告する。

実験方法および結果

Fig.1 に示す段差構造付磁性細線メモリを作製するべく、イオンビームスパッタとレーザーリソグラフィーにより、段差高4 nm、段差周期6 μm のSiN からなる段差構造を表面熱酸化Si 基板上に設置し、その後Pt(3 nm)/[Co(0.35 nm)/Tb(0.85 nm)]₄ からなる垂直磁化膜を幅3 μm 、長さ60 μm の磁性細線としてパターン形成した。さらにSiO₂(25 nm)/SiN(3 nm)からなる層間絶縁層を介して、磁性細線の直交方向に幅6 μm のTa/Au/Ta 金属線(全厚150 nm)からなる記録素子を形成した。試作デバイスの光学顕微鏡像をFig.2 に示す。Fig.3 は磁区の記録とシフトの様子を順次観察したMOKE像であり、暗状態が上向き、明状態が下向きの磁化方向に対応する。最初に1 kOe の外部磁界により磁性細線を上向きに初期化し(a)、以下の手順で記録・シフトの様子を確認した。まず記録素子の下から上に波高値50 mA、パルス幅10 μs の記録電流を印加し、誘起された電流磁界によって記録素子の右側に下向き磁区を記録した(b)。次に2.5 mA、10 μs の駆動電流を磁性細線に印加してこの磁区を右方向へシフトさせた後、-50 mA、10 μs の記録電流を印加して2つ目の上向き磁区を記録した(c)。同様な手順で先行2磁区をシフトさせ、3つ目の下向き磁区を記録した(d)。最後に、先行3磁区をシフトさせ、4つ目の上向き磁区を記録した(e)。以上、複数の記録磁区をまとめてシフトできる見通しを得た。現状はシフト後の磁区長に若干のバラつきが見られ駆動電流等の最適化は必要なものの、段差構造は磁性細線メモリの記録・シフト制御に有効と考えられる。当日はこれらの詳細を報告する。

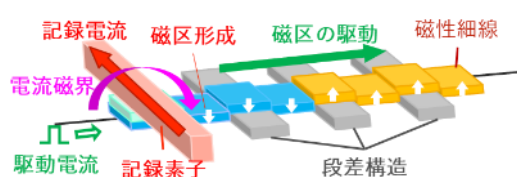


Fig.1 Magnetic nanowire memory with step trap-sites

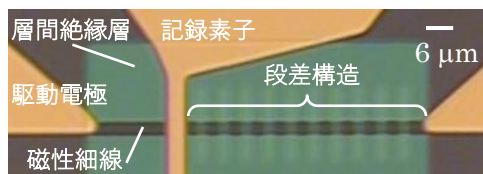


Fig.2 Fabricated magnetic nanowire memory with step trap-sites

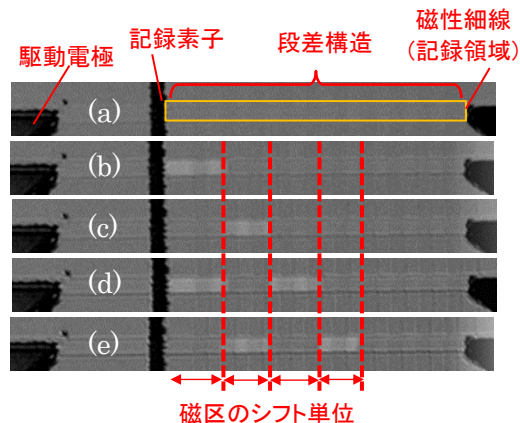


Fig.3 Differential images of magneto-optical microscope for memory operation

参考文献

- 1) M. Takahashi *et al.*: MMM2022, IPA-05 (2022) 2) 高橋ほか: 応物 2022 秋季学術講演会, 21a-P02-21 (2022)

Fe/Ir/Co/MgO/ZrO₂ 構造における電圧磁気異方性制御

小野田 浩成, 野崎 友大, 野崎 隆行, 湯浅 新治
(産総研)

Voltage-controlled magnetic anisotropy in Fe/Ir/Co/MgO/ZrO₂ structures

Hiroshige Onoda, Tomohiro Nozaki, Takayuki Nozaki, and Shinji Yuasa

(AIST)

はじめに

磁気抵抗効果型ランダムアクセスメモリ (MRAM) に適用可能な低消費電力な書き込み手法として、電圧磁気異方性制御 (VCMA) が注目を集めている。純電子論的な VCMA 効果の起源は、絶縁体/強磁性金属接合への電圧印加により誘起される界面軌道磁気モーメント変化や界面電気四重極の変調により理解されている¹⁾。従って VCMA 効果の増大には界面に蓄積される電荷量の増大が有効と考えられる。本研究では、代表的な high-k 誘電層である ZrO₂ 層を導入した構造における VCMA 特性を評価した。

方法

MBE 法およびスパッタリング法を用いて MgO(001) 基板上に Cr (50nm)/超薄膜 Fe (0.5-1.0 nm)/Ir (0.06 nm)/Co (0.1 nm)/MgO (0.7, 1.0 nm)/ZrO₂ (2 nm)/キャップ層 Pt (5nm) 構造を作製した。ZrO₂ 層は室温 (RT) もしくは 200°C の基板温度にて作製し、特性比較を行った。VCMA 特性は微細加工素子を用いて、電圧印加下における極カー効果測定から評価した。

実験結果

Fig. 1 に MgO/ZrO₂ 層の XRD 測定結果を示す。MgO/ZrO₂ (RT) の試料では、ZrO₂ の回折パターンが確認されていないのに対し、MgO/ZrO₂ (200°C) では $2\theta = 30^\circ$ 付近に回折パターンが確認された。つまり ZrO₂ 層は室温成膜では非晶質構造となり、200°C 成膜では結晶化している。この結果は in-situ 反射電子線回折の結果とも一致した。Fig. 2 に MgO/ZrO₂ (200°C) 素子における極カー効果のバイアス電圧依存性の例を示す。Fe/Ir/Co 層の垂直磁気異方性を反映する面直方向の飽和磁界が電圧印加により明瞭に変化した。規格化した磁化曲線から求めた VCMA 係数は、MgO/ZrO₂ (RT) 素子で -406 fJ/Vm, MgO/ZrO₂ (200°C) 素子では -488 fJ/Vm となり、MgO のみの素子 (-239 fJ/Vm) より大きな VCMA 効果が観測された。講演当日は、各試料の磁気特性や誘電率の詳細についても報告する。

本講演で発表した研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP16007) の結果得られたものである。

参考文献

- 1) T. Nozaki *et al.*, *Micromachines*, **10**, 327 (2019).

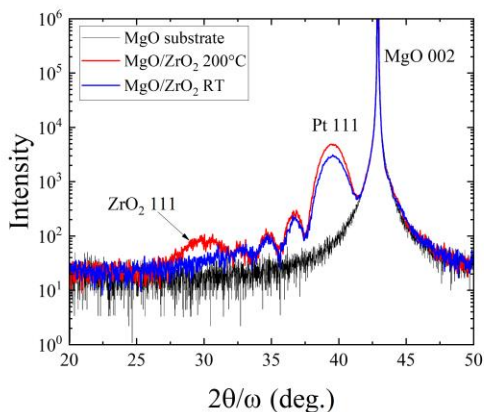


Fig. 1 XRD patterns of MgO/ZrO₂ structures and MgO substrate.

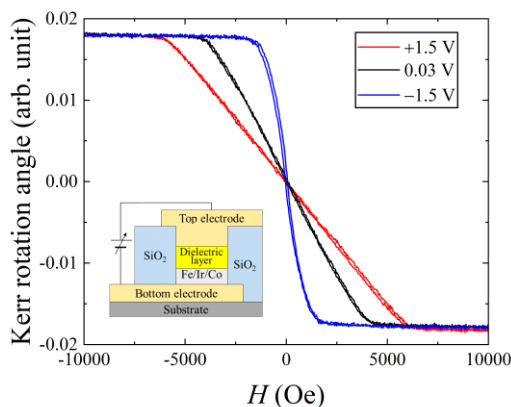


Fig. 2 MOKE hysteresis loops of Fe (0.85 nm)/Ir (0.06 nm)/Co (0.1 nm)/MgO (1.0 nm)/ZrO₂ (2 nm) deposited at 200°C with and without applied DC voltages.

界面制御 Co/MgO 接合における VCMA 効果に対する下地層の影響

中山裕康、野崎隆行、野崎友大、湯浅新治
(産総研)

Underlayer effect on the voltage-controlled magnetic anisotropy in interface engineered Co/MgO junctions
with heavy metals

H. Nakayama, T. Nozaki, T. Nozaki, S. Yuasa
(AIST)

はじめに

低消費電力・高速動作・高書き換え耐性を実現する電圧による磁化の制御手法は、次世代の不揮発性磁気メモリ(MRAM)の情報書き込み技術の候補として注目されている¹⁾。特に、電圧磁気異方性制御(Voltage-controlled magnetic anisotropy; VCMA)効果は電圧駆動型MRAMにおける基盤技術として期待されており、垂直磁気異方性(PMA)のより大きな磁性材料の効率的な磁化制御を行うため、その高効率化が求められている。VCMA効果の大きさはVCMA効率(印加電圧に対する磁気異方性エネルギーの変化)により特徴付けられ、強磁性金属/絶縁体界面への重金属挿入によってVCMA効率を向上できることが理論的に指摘されている²⁾。その一方で、従来用いられてきた強磁性金属はbcc-Fe(Co)系の材料が中心であり、十分なPMAを得るためには薄膜試料のアニールが不可欠であった。しかし、この加熱プロセスにより、界面制御層及び下地層材料の拡散が避けられず、VCMA効果に対する界面制御層の影響を実験的に評価することは困難であった。本研究では、アニールを行うことなく比較的容易にPMAの得られるCoを用いて、異なる界面制御層及び下地層材料を用いた積層構造を作製し、界面制御層におけるVCMA効果と下地層の影響を調べた^{3),4)}。

実験方法

スパッタリングと電子ビーム蒸着を併用することで、熱酸化膜付きシリコン基板上にTa(5 nm)/Ru(10 nm)/Ta(5 nm)/[Pt(0.8 nm) or Pt(2 nm)/Os(4 nm)]/Co(0.7-1.5 nm)/X(=Pt, Ir, Os)(0-0.28 nm)/MgO(3 nm)/ITO(20 nm)積層薄膜を全て室温下で作製した。ここで、Co層及び界面制御層Xはウェッジシャッターを用いて傾斜膜とし、Pt下地膜厚は面直磁界下における異方性磁界評価のため、面直容易磁化膜とならないように最適化を行った。作製した薄膜について μ MOKEと試料振動型磁力計を併用することで、磁気特性を調べた。フォトリソグラフィとイオンリングを用いて、薄膜を電圧印加素子に加工した。加工した試料について、DC電圧を印加しながら μ MOKEによる磁気特性の測定を行った。

実験結果

磁気特性について、Pt下地試料・Os下地試料ともに、界面制御層X(=Pt, Ir, Os)を導入することにより、実効的な垂直磁気異方性エネルギーの向上が見られた。電圧効果について、界面制御層無しのCo/MgOではPt下地試料・Os下地試料ともに、-40 fJ/Vm程度のVCMA効率が得られ、VCMA効果に対する下地層の影響は小さいことが確認された。これに対し、界面制御層を導入したPt下地試料では、Pt及びIr界面挿入により、VCMA効率の増大(最大-69及び-80 fJ/Vm)が見られ、Os挿入では、VCMA効率は-13 fJ/Vmまで減少した。さらに、界面制御層を導入したOs下地試料では、Pt界面挿入により最大-100 fJ/Vm程度まで及ぶVCMA効率が得られた一方、Ir挿入ではVCMA効率の変化はほとんどなく、Os挿入により正のVCMA効果が観測され、下地層材料に依存して、重金属挿入界面におけるVCMA効果は劇的に変化することが明らかとなった。これらの結果は、下地層のわずかな拡散及び界面制御層との間の電荷移動を示唆するものと考えられる^{3),4)}。

謝辞

本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP16007)の結果得られたものである。

参考文献

1) Y. Shiota *et al.*, Nat. Mater. **11**, 39 (2012). 2) K. Nakamura *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **429**, 214 (2017). 3) H. Nakayama *et al.*, Appl. Phys. Lett. **122**, 032403 (2023). 4) H. Nakayama *et al.*, Adv. Mater. Interfaces **10**, 2300131 (2023).

低温成長 CoFeB を用いた電圧磁気異方性制御効率の最適化

野崎隆行¹, 一ノ瀬智浩¹, 山本竜也¹, 埋橋淳², 甲野藤真¹, 薬師寺啓¹, 大久保忠勝², 湯浅新治¹
(¹産総研, ²物質・材料研究機構)

Optimization of efficiency in voltage-controlled magnetic anisotropy effect using
an ultrathin CoFeB layer deposited at low temperature

T. Nozaki¹, T. Ichinose¹, T. Yamamoto¹, J. Uzuhashi², M. Konoto¹, K. Yakushiji¹, T. Ohkubo¹, and S. Yuasa²
(¹AIST, ²NIMS)

1 はじめに

電圧磁気異方性制御(VCMA: Voltage-controlled magnetic anisotropy)は超低駆動電力な電圧制御型(VC)-MRAM を実現する基盤技術として注目を集めている。VC-MRAM では電圧印加により記録層の垂直磁気異方性(PMA)を打ち消すことで磁化反転を誘起するため、素子サイズ縮小による高 PMA 化とともに大きな VCMA 効率が求められる。これまでエピタキシャル磁気トンネル接合素子(MTJ)では Ir などの重元素ドーピングを利用して-300 fJ/Vm 級の高 VCMA 効率が達成されているが、CoFeB/MgO ベースの標準的な多結晶 MTJ では-50~-70 fJ/Vm 程度に留まっており、特性改善が求められている。我々は最近、低温ステージを有する量産スパッタ成膜装置(EXIM: 東京エレクトロン株式会社製)を用いて MgO トンネル障壁層上のトップフリー超薄膜 CoFeB 膜の作製を試み、ステージ温度 100K での成膜により高品質な MgO/CoFeB 界面が形成されること、さらには室温成膜と比較して、飽和磁化、PMA、磁気ダンピング、VCMA 効率など種々の特性が改善されることを報告した^{1,2}。本発表では、Ta および TaB 上のボトムフリー-CoFeB 超薄膜に対して低温成長プロセスを導入し、VCMA 特性比較を行った。

2 実験方法と結果

熱酸化膜付き Φ300mmSi ウェハ上にて Ta(5 nm)/Ru(5 nm)/Ta(5 nm)/Ru(5 nm)/Ta or Ta₅₀B₅₀ (5 nm)/Co₄₀Fe₄₀B₂₀ (0.9 nm)/MgO(2 nm)/CoFeB(3 nm)/Ta(5 nm)/Ru(7 nm)構造を作製した。面内磁界印加下での TMR 測定から PMA および VCMA 特性評価を行うため、下部 CoFeB 層は垂直磁化、上部 CoFeB 層は面内磁化の 90 度磁化配置構造となっている。CoFeB の buffer 材料として Ta および TaB を用いた場合、また TaB 上 CoFeB に関しては、室温および 100K 成膜での特性比較を行った。Ta buffer の場合、ポストアニール温度 350°C で飽和磁化の低下が見られたのに対し、TaB buffer は温度依存性が小さく、Ta buffer と比較して高い耐熱性を示す傾向が確認された。

図 1 に 100K 成膜の Ta/CoFeB、TaB/CoFeB 構造、および室温成膜の TaB/CoFeB 構造をフリー層とする MTJ 素子における VCMA 効率のポストアニール温度依存性を示す。Ta/CoFeB および室温成膜 TaB/CoFeB 構造と比較して低温成膜 TaB/CoFeB は約 -100 fJ/V の高い VCMA 効率を有し、かつ 350°C アニール後においても特性が維持される傾向が見られた。発表では CoFeB/MgO 界面への重元素ドーピング効果も含めた最適化についても議論する。

本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP16007)、および JSPS 科研費(JP20H05666)助成の結果得られたものである。

- 1) T. Ichinose *et al.* *ACS Appl. Electron. Mater.* **5**, 2178 (2023).
- 2) A. Sugihara *et al.* *Appl. Phys. Exp.* **16**, 023003 (2023).

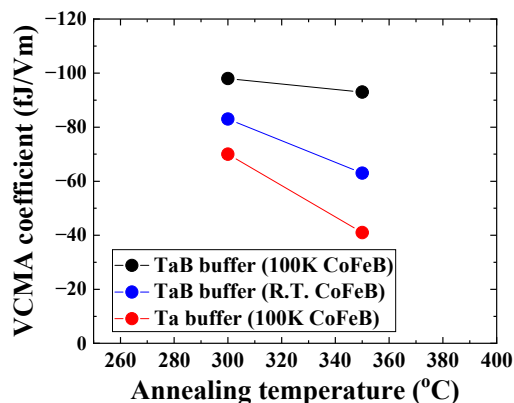


図 1 Ta/CoFeB(100K 成膜) および TaB/CoFeB(100K および室温成膜)における VCMA 効率のポストアニール温度依存性