

MgO barrier layer thickness dependence of electrical $1/f$ noise in magnetic tunnel junctions

Yupeng Wang¹, Muftah Al-Mahdawi², Zhenhu Jin³, and Mikihiro Oogane^{1,2}

¹Department of Applied Physics, Tohoku University, Sendai, 980-8579, Japan

²CSIS, Tohoku University, Sendai, 980-8579, Japan

³State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100090, China

The investigation of noise characteristics in magnetic tunnel junctions (MTJs) holds significant scientific and technological importance for magneto-resistance (TMR) sensors based on MTJs. This is due to the anticipated application of TMR sensors in bio-magnetic field detection, attributed to their advantages such as high sensitivity and low cost. For the application of bio-magnetic field sensors, $1/f$ noise serves as a performance-limiting factor in the low-frequency range. The exact cause of $1/f$ noise remains uncertain, but it is generally believed to be associated with the quality of the MTJ films and disturbances in the magnetization and magnetic domain walls in the ferromagnetic layers. The thickness of the MgO barrier layer in the MTJs may potentially impact the thin film quality and the electron tunneling process. Therefore, this study investigates the relationship between the low-frequency $1/f$ electric noise in MTJs with various thickness of the MgO barrier layer.

MTJ films with different MgO barrier layer thicknesses were deposited using a magnetron sputtering system. The MgO barrier thicknesses (t_{MgO}) were set to 1.0 nm, 1.2 nm, 1.4 nm, 1.6 nm, and 1.8 nm, respectively. Figure 1(a) illustrates the dependence of the tunnel magneto-resistance (TMR) ratio on the MgO barrier thickness. Starting from the sample with $t_{\text{MgO}} = 1.2$ nm, the TMR ratio increases with an increase in the MgO barrier thickness. At $t_{\text{MgO}} = 1.6$ nm, the TMR ratio was saturated, exceeding 200%. On the other hand, as depicted in Figure 2(b), the noise power density S_V at 10 Hz initially decreases with an increase in t_{MgO} , reaching the lowest noise level at $t_{\text{MgO}} = 1.4$ nm. Thereafter, it increases with further increases in t_{MgO} . The potential causes of variations in the noise level could be attributed to changes in film quality resulting from the variation in MgO barrier thickness. This could include the occurrence of lattice defects or pinholes, among other phenomena, leading to metallic conduction processes other than the Δ_1 electron tunneling. Further investigation is required to determine the specific reasons behind these effects and their impact on the noise characteristics.

Acknowledgements This work was supported by JST SPRING, Grant Number JPMJSP2114, X-nics project, CSIS, and CIES in Tohoku University.

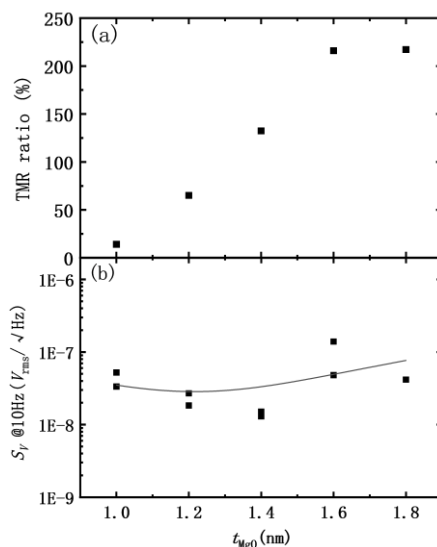


Fig. 1 MgO barrier thickness (t_{MgO}) dependence of (a) TMR ratio and (b) Noise power density (S_V) at 10 Hz.

フェリ磁性体 GdCo 薄膜における非局所スピン輸送測定

伊藤智也¹、船田晋作¹、桑野恭輔¹、杉浦達¹、塩田陽一^{1,2}、森山貴広³、小野輝男^{1,2}
(¹京大化研、²京大 CSRN、³名大工)

Non-local spin transport measurement in ferrimagnetic GdCo thin films

T. Ito¹, S. Funada¹, K. Kuwano¹, I. Sugiura¹, Y. Shiota^{1,2}, T. Moriyama³,
and T. Ono^{1,2}

(¹ICR, Kyoto Univ., ²CSRN, Kyoto Univ., ³Department of Materials Physics, Nagoya Univ.)

はじめに

スピン波スピン流は電流と違いジュール熱の発生がないという利点を有する一方、距離に応じて散逸する非保存流であるため、長距離伝播が困難である。しかし近年、2次元的な磁気秩序を有する反強磁性体において、「スピン超流動」とよばれる超低散逸なスピン流伝導機構が理論的に予測されている[1,2]。一方でフェリ磁性体は、2つの副格子磁化の大きさが等価となる磁化補償温度 T_M において、反強磁性体と類似する状態を示す。加えて、外部磁場によるスピントップ転移によって2次元的な磁気秩序が誘起されることから、スピン超流動の実現が期待される材料である。今回我々は、外部磁場による磁気秩序の制御のもと、フェリ磁性体 GdCo/Pt 二層膜において非局所測定を行うことで、スピン超流動の観測を試みた。

実験方法

熱酸化処理した Si 基板上に Gd₂₉Co₇₁(5)/Pt(5) (単位: nm) を DC スパッタリング法で成膜後、測定用に素子加工を行った。Gd₂₉Co₇₁層はGdとCoを適当なパワーでコスパッタリングすることにより成膜されており、磁化測定の結果 T_M は 200 K 付近であることが確認された。Pt層はキャップ層としての役割と、スピン流と電流を双方向に変換するスピンスースとしての役割を担っている。この素子において Fig. 1(a) に示すように、電流印加方向を軸に外部磁場を回転させながら (β スキャン)、A-B 間に電流を流し C-D 間の電圧を検出した。

実験結果

Fig. 1 (b)に注入-検出端子間距離 $8\mu\text{m}$ の素子における β スキャンでの非局所シグナルを示す。印加した磁場は 3 T であり T_M 近傍であればスピントップ転移を誘起できる。ここでみられる変調は主にリーク電流由来のスピンホール磁気抵抗効果 (SMR) [3,4] とスピントップ転移によって説明可能である。一方で、磁化補償温度 T_M においてのみ現れるプラトー領域に関しては、SMR の寄与に加えてスピン流伝搬によるシグナル変調が生じていることが示唆される。

当日はこの結果の解析に加え、距離依存性から導かれるスピン超流動の可能性についても詳細に議論する予定である。

参考文献

- 1) E. B. Sonin, Adv. Phys. **59**, 181 (2010).
- 2) S. Takei and Y. Tserkovnyak, Phys. Rev. Lett. **115**, 156604 (2015).
- 3) W. Zhou *et al.*, Phys. Rev. Mater. **2**, 094404 (2018).
- 4) D. Chen *et al.*, Phys. Rev. Mater. **6**, 014402 (2022).

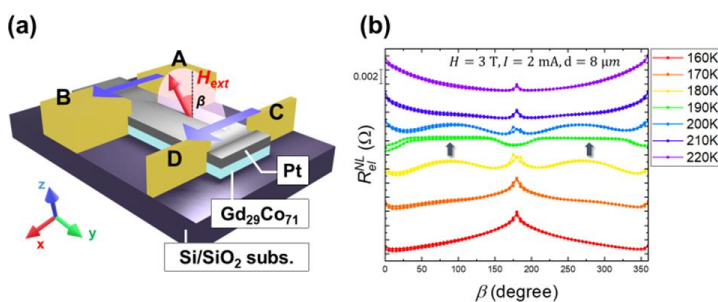


Fig. 1 (a) Schematic illustration of measurement setup for non-local measurement rotating applied magnetic field about the x -axis. (b) Non-local resistance under an applied magnetic field of 3 T over a wide range of temperatures for β -scan. T_M is about 190 K, where plateau signal can be observed.

Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}/GeSn 接合の スパッタリング法による作製と結晶性と磁性の評価

河原林雄大、國吉望月*、竹内将人*、石川諒*
(大和大理工、*アルバック協働研)

Structural analysis and magnetic properties of Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}/GeSn junction deposited by sputtering method
Y. Kawaharabayashi, *M. Kuniyoshi, *M. Takeuchi, *R. Ishikawa
(Faculty of Science and Engineering, Yamato Univ., *ULVAC, Inc.)

研究背景

ホイスラー合金/Ge 接合は、ホイスラー合金から Ge に高効率なスピン注入が可能であることから、半導体スピントロニクスを実現する上で重要である。また、Ge は引っ張り歪みを加えることで直接遷移化することができ、歪み Ge を用いたスピン LED 応用も提案されている。歪み Ge と同様に、Ge は Sn を添加することでも直接遷移化でき、光・スピンデバイスとして応用することが期待されるが、ホイスラー合金と GeSn の接合については十分に調べられていない。そこで、本研究では、Si 基板上に Ge バッファ層を 2 段階成長法により成膜し、その上に GeSn 薄膜とホイスラー合金である Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}(CFAS)を積層した接合を作製し、結晶性評価と磁性の評価を行った。また、本研究では、Ge ならびに GeSn 成膜に一般的に用いられる MBE 法や CVD 法を用いずに、すべての層をスパッタリング法を用いて成膜している。

実験方法

スパッタリング法を用いて、フッ酸により洗浄した Si(111)基板上に Ge バッファ層を基板温度 350°C(Low Temperature-Ge : LT-Ge)および 600°C(High Temperature-Ge : HT-Ge)として、それぞれ 30 nm および 70 nm 成膜を行った。その後、基板温度 300°C、膜厚 200 nm の GeSn 層(Sn 組成 5 at%)を堆積させ、その上に、CFAS を室温で 25 nm 積層した。X 線回折法(XRD)を用いて結晶構造を評価し、走査電子顕微鏡法(SEM)を用いて結晶表面の評価を行った。また、振動試料型磁力計(VSM)を用いて磁性評価も行った。

実験結果

はじめに CFAS を積層していない GeSn/HT-Ge/LT-Ge について評価した。Fig.1 は XRD の 2θ - θ スキャンの結果である。Ge もしくは GeSn(111)と Si 基板のピークのみが確認され、その他の結晶面からの回折ピークは確認されなかった。よって、Si(111)基板上の GeSn/HT-Ge/LT-Ge はエピタキシャル成長している可能性が高い。Fig.2 に GeSn 表面の SEM 観察像を示す。(111)表面に特有の三角形の構造やボイドがみられ、格子レベルで平坦な GeSn 表面の実現には至らなかった。Fig.3 に CFAS/GeSn/HT-Ge/LT-Ge の磁化曲線を示す。飽和磁化は 4 μ_B /f.u.程度であり、保磁力が 10 mT 程度であった。MBE で作製した同一の接合と比べ、スパッタリング法で作製したものは飽和磁化の値が小さくなり、保磁力が大きくなっていることが分かった。講演では、より詳細な結晶性と磁性の関係について報告する予定である。本研究は、JSPS 科研費 23K13660 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Y. Fujita *et al.*, Phys. Rev. Applied **8**, 014007 (2017).

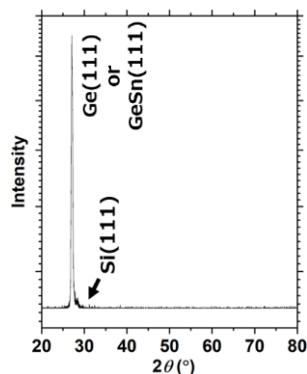


Fig.1 The XRD pattern of the GeSn/HT-Ge/LT-Ge/Si(111).

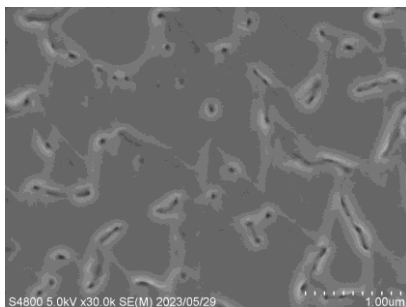


Fig.2 SEM image of GeSn surface.

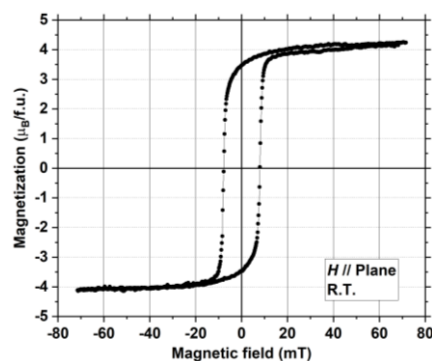


Fig.3 M - H curve at room-temperature of CFAS/GeSn junction.

Co₂Mn(Al,Ga)薄膜における異常ホール効果と異常ネルンスト効果の評価

菅原聖威, 山ノ内路彦, 植村哲也
(北海道大学)

Characterization of anomalous Hall effect and anomalous Nernst effect in Co₂Mn(Al,Ga) thin films
Kiyotake Sugawara, Michihiko Yamanouchi, and Tetsuya Uemura
(Hokkaido University)

1. はじめに

近年 IoT を支えるセンサーの需要が高まる中、異常ホール効果(AHE)と異常ネルンスト効果(ANE)を利用した3次元磁場センサーが注目されている¹⁾。Co基ホイスラー合金のCo₂MnAl(CMA)やCo₂MnGa(CMG)は磁性ワイル半金属であることが指摘され、バルクにおいてその特異なバンド構造に起因した比較的大きなAHEやANEが報告されている²⁻⁴⁾。しかしながら、AHEとANEの評価は個別に行われ、特に薄膜においては、両者の相関をはじめ、基本的な特性についても十分には明らかになっていない。本研究では、CMAとCMG、さらにはそれらを混合したCMAG薄膜のAHE及びANEの特性評価を行った。

2. 実験方法

MgO(001)単結晶基板上に、厚さ30nmの(Co₂Mn_{0.91}Al_{0.99})_{1-x}(Co₂Mn_{0.81}Ga_{0.65})_x薄膜(x=0, 0.38, 0.48, 0.55, 1)をコスパッタ法により600°Cで成長した。続いて、作製したCMAG薄膜をホールバーに加工した後、Fig.1に示すように、(a)磁場を面直に掃引、または、(b)面内で回転させながら、横抵抗率(ρ_{yx})および縦抵抗率(ρ_{xx})を測定した。CMAGの磁化が面直方向を向いた時に得られる抵抗率から異常ホール角 θ_{AH} ($=\rho_{yx}/\rho_{xx}$)を算出した。一方、磁化がチャネル方向を向いたときに得られる ρ_{yx} からプレーナーホール効果による寄与を差し引いた横抵抗率成分 $\rho_{yx}^{(AN)}$ に対し、 $\rho_{yx}^{(AN)}/\rho_{xx}J$ で定義される K_{ANE} をANE効果の効率の指標とした¹⁾。ここで、 J はチャネル方向に印加した電流密度である。 J によるジュール熱を起因とした熱勾配を仮定すると、 K_{ANE} は異常ネルンスト係数に比例する量に対応する。

3. 結果および考察

Fig. 2にCMAG薄膜の θ_{AH} 及び K_{ANE} の x 依存性を示す。 θ_{AH} の値の x 依存性は比較的小さく、得られた θ_{AH} の値はおよそ10%程度となった。一方、 K_{ANE} は x に大きく依存し、 $x=0.55$ の膜において最大値となった。以上より、CMAG薄膜では比較的大きなAHEとANEが同時に発現することが明らかとなった。

参考文献

- 1) J. Shiogai et. al., Commun. Mater. **2**, 102 (2021).
- 2) P. Li et. al., Nat. Commun. **11**, 3476 (2020).
- 3) K. Manna et. al., Phys. Rev. X. **8**, 041045 (2018).
- 4) A. Sakai et. al., Nat. Phys. **14**, 1119-1124 (2018).

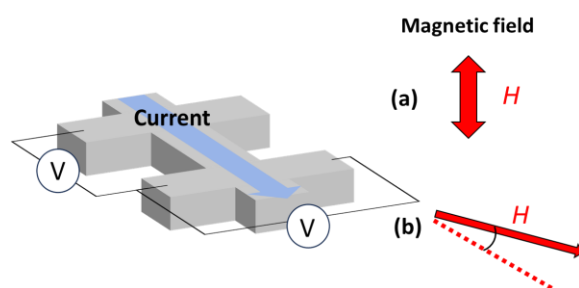


Fig.1. Measurement systems for (a) AHE and (b) ANE.

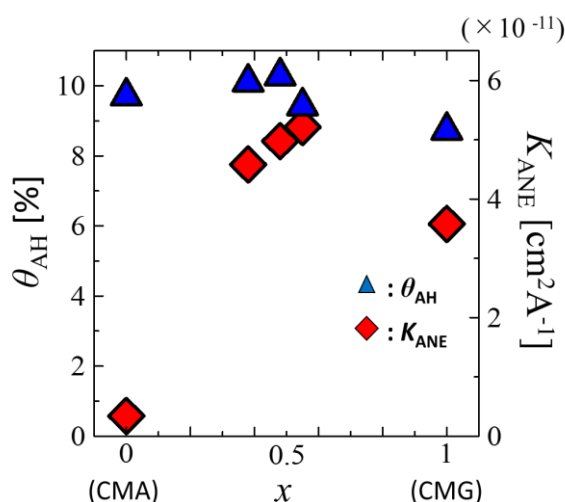


Fig.2. The value of θ_{AH} and K_{ANE} as a function of x in the CMAG thin film at room temperature.

凹凸構造を利用した異常ネルンスト型熱流センサの高感度化

今枝寛人, 小田切美穂, 坂本美雨, 鷺見聡, 栗野博之, 田辺賢士 (豊田工業大学)

Sensitivity improvement of a heat flux sensor based on anomalous Nernst effect by uneven structure

H. Imaeda, M. Odagiri, M. Sakamoto, S. Sumi, H. Awano and K. Tanabe

(Toyota Technological Institute)

はじめに

熱流センサは温度センサとは異なり、熱エネルギーの流れをベクトル量として検知することができるため熱マネージメントの要素技術として期待されている。特に異常ネルンスト効果 (ANE) [1]を利用した熱流センサは、安価でフレキシブルな熱流センサになることが期待されている[2]。熱流センサの高感度化には、熱流 $[W/m^2]$ あたりの起電力 V_{ANE} を増大させる必要があり、 V_{ANE} は材料パラメータである S_{xy} と強磁性体内部の温度勾配 ∇T に比例する。従来の研究では S_{xy} の向上を目指した材料探索が行われていたが、強磁性体の構造を工夫し ∇T の向上を目指しても高感度化が実現可能である。強磁性体内部の熱流密度を考えると、強磁性体構造の幅が狭く、高さ(厚さ)が高い細線構造(高アスペクト比構造)がより大きな ∇T を生み出すことが期待される。そこで我々は基板に作製された凹凸構造上に強磁性膜を成膜することで、高アスペクト比構造の作製に挑戦し、熱流センサの高感度化の研究を行った。強磁性膜には Co、GdFe、GdFeCo を用い、材料依存性についても評価した。

実験方法および結果

まずナノインプリント法を用いて、プラスチック基板上表面に 2, 5, 10 μm の凹凸構造を作製した。次に SiN(10 nm)/Co(Gd₂₂Fe₇₈, Gd₂₁Fe₅₇Co₂₂)(20 nm)多層膜を、マグネトロンスパッタを用いてこの凹凸構造の上に成膜することで、凹凸部側面に高アスペクト比構造を作製した (Fig. 1)。Fig. 1 の挿入図はそのときの断面 SEM 画像である。本素子を用いて、熱流あたりの起電力を評価した (Fig. 2)。Co の場合、凹凸高さが増加するほど、熱流あたりの起電力が増加しており、平坦構造に比べておおよそ 10 倍の高感度化に成功した。一方で GdFe 及び GdFeCo の場合、熱流あたりの起電力が単調増加とはならなかった。この原因は、熱伝導率の差と凹凸部上下面に成膜された薄膜による影響で説明できる。

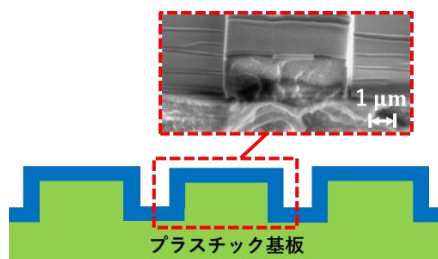


Fig. 1 凹凸構造 (挿入図は SEM による断面観察図)

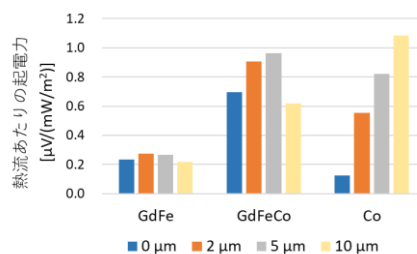


Fig. 2 各材料の V_{ANE} と凹凸高さの関係

参考文献

[1] M. Mizuguchi et al., Sci. Tech. Adv. Mater. 20, 262 (2019).

[2] W. Zhou and Y. Sakuraba, Appl. Phys. Express 13, 043001 (2020).

謝辞 この研究はパロマ環境技術開発財団の助成を受けて行われたものです。

電圧制御によるスキルミオンの相変化

笠川未来翔¹、三木颯馬¹⁻³、橋本拳^{1,2}、石川諒⁴、後藤穰¹⁻³、野村光¹⁻³、鈴木義茂¹⁻³
 (大阪大学¹、大阪大学 CSRN²、大阪大学 OTRI³、アルバック協働研⁴)

Phase transition of skyrmion by applying voltage

M.Kasagawa¹, S.Miki¹⁻³, K.Hashimoto^{1,2}, R.Ishikawa⁴, M.Goto¹⁻³, H.Nomura¹⁻³, Y.Suzuki¹⁻³
 (Osaka Univ.¹, CSRN-Osaka², OTRI-Osaka³, ULVAC, Inc.⁴)

はじめに

近年、磁気スキルミオンは室温付近でブラウン運動を示すことから、超低消費電力のブラウンian計算機の情報キャリアの候補として期待されている[1, 2]。このようなデバイスを実現するためには、スキルミオンの電圧制御が欠かせない。スキルミオンの電圧制御の先行研究として、直流電圧印加によるスキルミオンのゲート操作[3, 4]や拡散[5]、生成消滅の制御[6]が報告されている。しかし、DMI 変調もあり、単なる VCMA 効果だけではなく、その微視的機構はまだ明らかでない。そこで本研究では、スキルミオンの電圧効果の機構解明の糸口を探し、スキルミオンの生成消滅やダイナミクスの電圧依存性について調べた。

実験方法

スパッタリング法により Si/SiO₂ 基板/Ta/Co₁₆Fe₆₄B₂₀/Ta/MgO/SiO₂、及び Si/SiO₂ 基板/Ta/Pt/Co₁₆Fe₆₄B₂₀/Ta/MgO/SiO₂ の 2 種類の積層構造を作製した。ここでは、DMI を上げるために Pt を挿入した。そして、これらの試料の上に Cr(1 nm)/Au(5 nm) の超薄膜電極を形成した。Fig. 1 は作製したデバイスの構造である。それぞれの試料の面直方向に電圧を印加しながら、MOKE 顕微鏡で Kerr ヒステリシスの電圧変化やスキルミオンの拡散を観察した。

実験結果

スキルミオンの温度と電圧の相関について、スキルミオンの生成温度は正電圧で下がり、負電圧で上がる。発表当日は電圧ヒステリシスや温度-電圧の相関、及び交流電圧印加時の拡散係数の周波数依存性について議論する。本研究は JSPS 科研費基盤研究 S(JP20H05666)、科研費若手研究(23K13660)、特別研究員奨励費(23KJ1477)及び CREST (JPMJCR20C1)、次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業(JPJ011438)の助成を受けたものである。

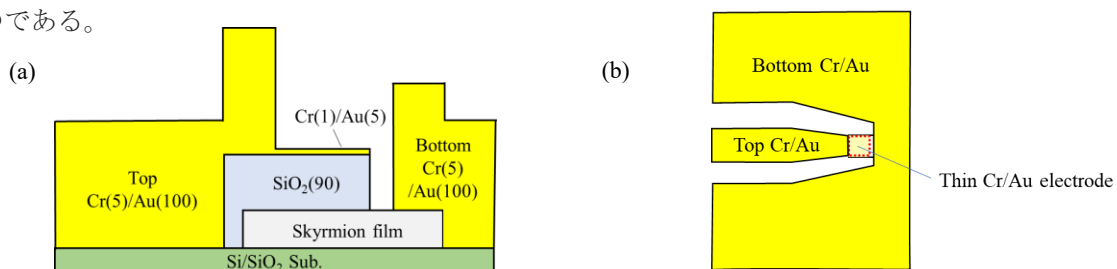


Fig. 1(a) Cross sectional view and (b) top view of sample configuration (nm)

- [1] Y. Jibiki *et al.*, Appl. Phys. Lett., **117**, 082402 (2020), [2] K. Raab *et al.*, Nature Communications, **13**, 6982 (2022), [3] K.Hashimoto *et al.*, MMM, EOC-06, Minneapolis (2022), S.Miki *et al.*, Intermag, HOD-14, Sendai (2022), [4] C. Fillion *et al.*, Nature Communications, **13**, 5257 (2022), [5] T. Nozaki *et al.*, Appl. Phys. Lett., **114**, 012402 (2019), [6] R.Ishikawa *et al.*, Appl Phys. Lett, **121**, 252402 (2022)

スキルミオンの高密度と高速動作を目指した界面エンジニアリング

○(M1)佐藤根 隆太¹, 黒川 雄一郎¹, 湯浅 裕美¹
(九州大学¹)

Numerical study on skyrmion transport with small size and high speed

○Ryuta Satone¹, Yuichiro Kurokawa¹, Hiromi Yuasa¹
(Kyushu Univ. ¹)

背景

近年、重金属層に隣接する磁性層中のスキルミオンは、そのナノサイズと微小電流による高速転送により、新しい情報キャリアとして注目されている。しかし、典型的な例では、サイズと電流を大きくすると転送速度が大きくなるというトリレンマがある[1,2]。一方で、二層間の界面に高スピンミキシングコンダクタンス材料の超薄膜を挿入することで転送速度を高めることができる[3]。しかしながら、挿入した磁性層によってスキルミオンの維持に必要なジャロシンスキー・守谷相互作用 (DMI) の大きさが変化することが予想される。そこで本研究では、スキルミオンに対しスピン流を注入した際の磁化の挙動を MuMax3[4]を用いてシミュレーションし、DMI およびスピンミキシングコンダクタンスがスキルミオンの生成と安定、転送に与える影響を求める。

計算方法

スキルミオンの転送は、磁化の挙動を記した LLG 方程式を解くことによってシミュレートされる。磁性体は CoFeB を想定し、各種パラメータは Table 1 に示したものを使用する。スピンミキシングコンダクタンスは重金属層のスピンホール角とともに電流分極に作用するため、電流分極の値を変化させた。

parameter	value
Saturation magnetization (A/m)	1.0×10^6
Magnetic anisotropy (J/m ³)	6.8×10^5
Stiffness constant (J/m)	1.0×10^{-11}
Current density (A/m ²)	1.0×10^{11}
Cell size (nm)	2×2×1
External magnetic field (mT)	90
Current Polarization	0.1~0.3

結果

Table 1

Fig.1(a)はスピンミキシングコンダクタンスを固定し、外部磁場と DMI 係数を変化させた場合の転送速度と直径の関係を示し、Fig.2(b)は電流分極を 0.1 から 0.3 に変化させた場合の DMI 係数に対する転送速度の変化を示している。スピンミキシングコンダクタンスの変化がない場合は速度に応じて直径が大きくなったが、スピンミキシングコンダクタンスを変化させた場合は速度が上昇したのに対し、スキルミオンの直径は変化しなかった。このことから、界面のスピンミキシングコンダクタンスを上昇させることでスキルミオンのトリレンマを打破する可能性が示された。

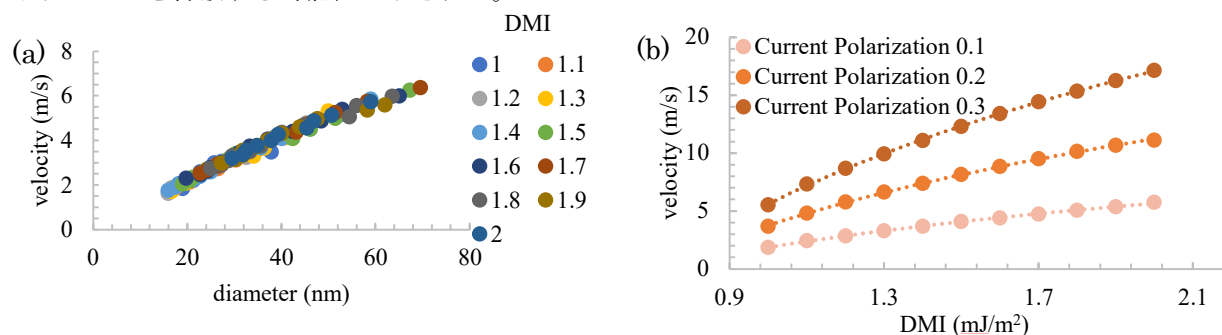


Fig. 1 (a)Skyrmion transport velocity dependence on diameter. (b)Skyrmion transport velocity dependence on DMI magnitude.

参考文献

[1]T.H.R. Skyrme, *Nucl. Phys.*, 31, 556, 1962. [2] S. Li, *et al, Mater. Horiz.* 8, 854, 2021. [3] X. Jia, *et al. Europhys. Lett.* 96, 17005, 2011. [4]A. Vansteenkiste, *et al. AIP Adv.*, 4, 107133, 2014.

スキルミオン間の情報の流れの評価

江本紘汰¹、森弘樹¹、石川諒²、三木颯馬^{1,3,4}、後藤穰^{1,3,4}、野村光^{1,3,4}、田村英一^{1,3,4}、鈴木義茂^{1,3,4}
 (大阪大学¹、アルバック協働研²、大阪大学 OTRI³、大阪大学 CSRN⁴)

Evaluation of information current between skyrmions

K. Emoto¹, H. Mori¹, R. Ishikawa², S. Miki^{1,3,4}, M. Goto^{1,3,4}, H. Nomura^{1,3,4}, E. Tamura^{1,3,4}, and Y. Suzuki^{1,3,4}

(Osaka Univ.¹, ULVAC, Inc.², OTRI-Osaka³, CSRN-Osaka⁴)

はじめに

磁気スキルミオンとは固体中かつ室温で観察できるトポロジカルに安定な渦状のスピンの配向を示す準粒子である。スキルミオンは斥力相互作用¹⁾を利用することで、低電力消費で動作する演算素子への応用が期待されている。しかしスキルミオン同士の情報の流れはその確率的な振る舞いから不明確とされている。スキルミオンの情報の流れの評価は素子の性能評価において極めて重要であり、我々はその評価のためにスキルミオン間の相互情報量²⁾に注目した。相互情報量とは二つの確率的なデータの相互依存を表す量である。本研究では、スキルミオンのブラウン運動の観測からスキルミオン同士の情報の流れを評価した。

実験・解析方法

本研究ではセルオートマトン型素子を作製した。熱酸化シリコン基板上にマグネトロンスパッタリング法により Ta (5.0 nm)|Co₁₆Fe₆₄B₂₀(1.2 nm)|Ta(0.22 nm)|MgO(2.0 nm)|SiO₂(3.0 nm)からなるスキルミオン膜を成膜し、その表面にリフトオフ法で正方形の SiO₂(0.083 nm)膜を追加成膜した。このような試料では追加成膜した領域内にスキルミオンを閉じ込めることができる

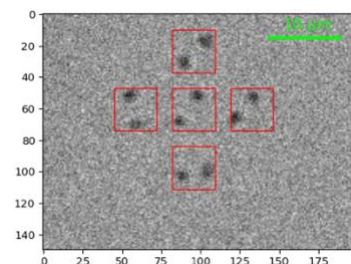


Fig.1 Skyrmions confined in the pattern

箱内に2つのスキルミオンを閉じ込め、斥力相互作用によってスキルミオンの取りうる対角配置を2状態として取り扱う。スキルミオンのブラウン運動の軌跡を確率的なデータとして扱い、箱間のスキルミオン同士の相互情報量を求める。箱間の情報伝達の可能性は示されており¹⁾、本素子の中央の箱の状態が周囲の箱の状態の多数決によって決められる設計である。Fig.1は作製した素子の磁気光学カー効果顕微鏡観察像であり、5つの箱に2つずつスキルミオンが閉じ込められている。

結果

素子観測は磁気光学カー効果顕微鏡で26.5°Cで行い、125fpsで撮影を行なった。Fig.2は1000フレーム分の5つの箱に閉じ込めた2つのスキルミオンのブラウン運動をトラッキングした結果の図である。今回16000フレーム分のデータを取得することに成功した。当日はスキルミオン同士の相互作用の定量評価の結果についての議論を行う。本研究はJSPS 科研費JP20H05666、23K13660及びJST、CREST、JPMJCR20C1の助成を受けた物である。

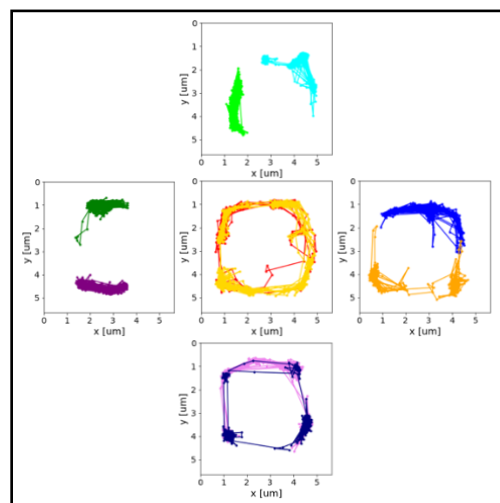


Fig.2 Trajectory of Skyrmions

参考文献

- 1) R. Ishikawa, et al., Appl. Phys. Lett. 119, 072402 (2021)
- 2) T. Sagawa and M. Ueda, New J. Phys. 15, 125012 (2013)
- 3) Y. Jibiki, et al., Appl. Phys. Lett. 117, 082402 (2020)

磁気スキルミオンのブラウン運動を用いた Merge, Fork 素子のシミュレーションによる提案

今西弘人¹、三木颯馬¹⁻³、後藤穰¹⁻³、田村英一¹⁻³、野村光¹⁻³、鈴木義茂¹⁻³

(¹大阪大学、²阪大 OTRI、³阪大 CSRN)

Proposal of Merge and Fork circuits using the Brownian motion of magnetic skyrmions by micromagnetic simulation

H.Imanishi¹, S.Miki¹⁻³, M. Goto¹⁻³, E. Tamura¹⁻³, H. Nomura¹⁻³, Y. Suzuki¹⁻³

(¹Osaka Univ., ²OTRI-Osaka, ³CSRN-Osaka)

はじめに

スキルミオンとは磁性薄膜中に発生するトポロジカルに守られた磁気構造の一種で、粒子としてふるまう。室温下でブラウン運動をすることや電圧による制御が可能であることから、確率計算機などへの応用が期待されている。中でも我々は、スキルミオンをトークンとしたブラウン計算機^{1,2)}への応用を目指している。ブラウン計算機を構成する回路素子のうち Hub は実証されており³⁾。Ratchet についてもスキルミオンの一方向性運動を実験にて観測した⁴⁾。しかし、回路のリセットを必要としない Conservative-join (C-join) は実証が難しい。そこでリセットを用いる素子である 2 つの入力に対し 1 つの出力を行う Merge 素子、1 つの入力に対し 2 つの出力を行う Fork 素子によって C-join を代替することができることから²⁾、実証をより簡単に行えるのではないかと考えた。本研究では、Merge, Fork 素子の実証に向けたマイクロマグネティックシミュレーションによる Merge, Fork 素子の動作確認を目的とする。

シミュレーション方法

本研究では、室温 (300K) を想定する。磁気異方性エネルギー障壁によって設計した回路中にスキルミオンを閉じ込める。昨年の講演にて報告⁵⁾した C-join の形状に倣い、Merge では、2 つの入力ポケットで出力ポケットを囲み、出力方向に向けて反発力が働くように設計した。Fork では、2 つの出力ポケットを囲む必要があるため、入力ポケットを引き伸ばして囲み、それぞれのポケットの出力方向に反発するように設計した。

シミュレーション結果

Fig. 1(a) は 0ns での Merge における初期状態を示す。入力されるスキルミオンがブラウン運動により入力ポケットに入り、膨張する。その後待機しているスキルミオンが入力スキルミオンとの反発相互作用によりエネルギーポケットから押し出される。Fig. 1(b) は 106ns 経過後の結果であり、回路が機能したことが分かる。また、Fork についても回路が機能することを確認した本講演では回路のエネルギーおよびその計算から見積もられる計算時間についても議論する。本研究は JSPS 科研費基盤研究 S(JP20H05666)、特別研究員奨励費(23KJ1477)及び CREST (JPMJCR20C1)、次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業(JPJ011438)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) F. Peper, *et al. J. Emerg. Technol. Comput. Syst.* **9**(1), 1 (2013)
- 2) L. J. Fei, *et al. Physica D* **428**, 133052 (2021)
- 3) Y. Jibiki, *et al. Appl. Phys. Lett.* **117**, 082402 (2020)
- 4) S. Miki *et al.* MMM conference, EOC-06, Minneapolis (2022), R. Ishikawa *et al.*, JSAP Spring meeting, 6a-D419-10, Tokyo (2023)
- 5) S. Miki *et al.* MSJ meeting, 06aB-8 Nagano (2022)

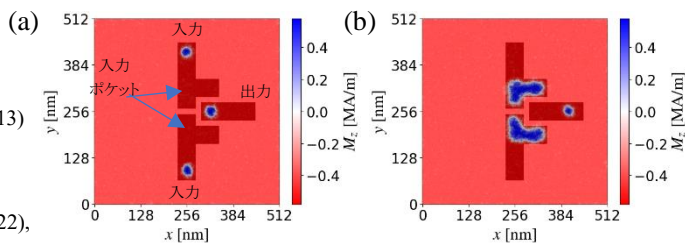


Fig. 1 simulation results at (a) 0 ns (b) 106 ns.

Dark areas indicate circuit drawn by the anisotropy energy

スキルミオンによる情報入力素子の作製

石川諒、後藤穰*、野村光*、鈴木義茂*

(アルバック協働研、*阪大基礎工、*阪大 CSRN、*阪大 OTRI)

Fabrication of information input device by skyrmion

R. Ishikawa, *M. Goto, *H. Nomura, *Y. Suzuki

(ULVAC Inc., *Osaka Univ., *CSRN-Osaka, *OTRI-Osaka)

研究背景

スキルミオンはトポロジカルに保護された磁極粒子であり、固体中に安定に存在する^{1,2)}。スキルミオンは次世代の情報担体としての応用が期待されており、スキルミオンを利用したレーストラックメモリ³⁾やロジック⁴⁾が提案されている。これらの応用とは別に、スキルミオンが固体中でブラウン運動する性質を利用した確率的計算や省エネルギー計算といった応用も提案されている。我々のグループでは磁性連続膜上でスキルミオンを任意の位置に閉じ込める回路⁵⁾やブラウン運動するスキルミオン間の反発的な相互作用を利用したセルラーオートマトン型素子⁶⁾などをこれまでに開発してきた。ブラウン運動するスキルミオンを利用した計算機において、情報の入力部分にはスキルミオンの運動を外部から制御する方法が必要である。本研究では、スキルミオンを外部制御し、セルラーオートマトン型素子に情報を入力する手法を実験的に検討した。

実験方法

本研究では、マグネトロンスパッタリング法により Ta/Co₄₀Fe₄₀B₂₀/Ta/MgO/SiO₂ 接合を作製した。その上に SiO₂ と Ta の 2 層構造を部分的に成膜することでスキルミオン回路を形成した。さらに、傾斜した磁気的なポテンシャルを誘起するために、追加で SiO₂ を 50nm 成膜し、その上に電極を形成した。Fig.1 (a) に示すように電極は 100nm の厚い Ta 層と 2nm の薄い Ta 層から成る。この上部電極に電流を流すとき、二つの電極間には電位差が生じている。この電位差により、面直方向には傾斜した磁気的なポテンシャルが形成される⁷⁾。この傾斜したポテンシャルは電圧の極性により任意の方向に傾けることができ、スキルミオンの位置を自由に操るために利用可能である。Fig.1(b) は作製した素子のスキルミオン回路の部分のみを示したものである。スキルミオンのペアにより情報を表現するセルラーオートマトン型素子の多数決回路の 1 つの入力を外部から制御できるようにデザインされている。Fig. 1(a) に示しているように、電極の下に配置されたスキルミオン回路は長方形の中央をくびれさせた形状をしている。これはブラウン運動では超えられない障壁をスキルミオン回路に実装するためであり、外部から電圧をかけたときのみブラウン運動+電圧によるエネルギーでスキルミオンが障壁を超え、状態 (回路の右側にいるか左側にいるか) が変化することを狙っている。この方法により、より省電力な入力素子の実現が期待できる。

実験結果

Fig. 1 (c) は作製した素子を MOKE 顕微鏡により観察した像である。任意の場所にスキルミオンを閉じ込めることが可能であり、デザイン通りに電極を配置することに成功した。しかし、スキルミオンの個数がセルラーオートマトン型素子に必要な各セルに 2 つずつとなっていない。試料作製条件の最適化および電圧による外部制御等を含めて講演当日は報告する。

本研究は、JSPS 科研費 20H05666、23K13660 及び JST、CREST、JPMJCR20C1 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) T. H. R. Skyrme, Nucl. Phys. **31**, 556 (1962)
- 2) U. K. Röbler, *et al.*, Nature **442**, 797 (2006)
- 3) A. Fert, *et al.*, Nat. Nanotechnol. **8**(3), 152 (2013).
- 4) X. Zhang, *et al.*, Sci. Rep. **5**, 9400 (2015).
- 5) Y. Jibiki, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **117**, 082402 (2020)
- 6) R. Ishikawa, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **119**, 072402 (2021)
- 7) Kakizakai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **56** 050305 (2017)

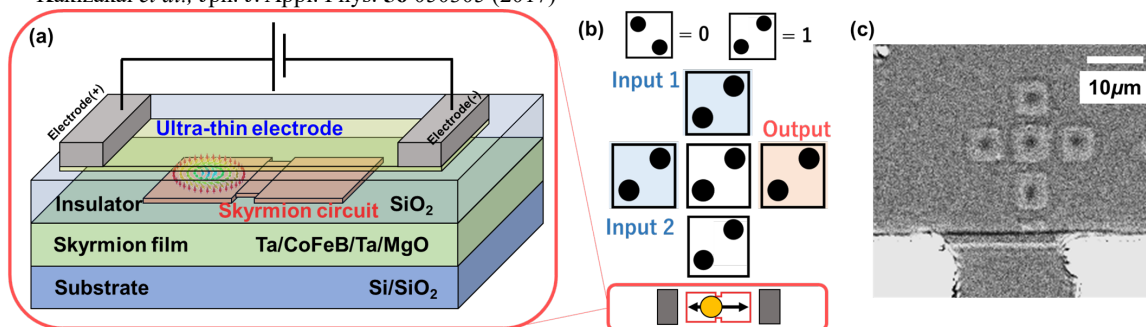


Fig. 1(a) Schematic of the input device configuration (b) Skyrmion cellular automaton with controllable input proposed in this research (c) MOKE microscope image of the device.

LiNbO₃(0001)基板上での Cr₂O₃(0001)エピタキシャル薄膜の作製

中村圭伸¹, 豊木研太郎^{1,2,3}, 中谷亮一^{1,2,3}, 白土 優^{1,2,3}
(阪大工¹, 阪大先導的学際研究機構(OTRI)², 阪大 CSRN³)

Fabrication of epitaxial Cr₂O₃(0001) thin film on LiNbO₃(0001)

Yoshinobu Nakamura¹, Kentaro Toyoki^{1,2,3}, Ryoichi Nakatani^{1,2,3}, and Yu Shiratsuchi^{1,2,3}
(Dept. Mater. Sci. & Eng., Osaka Univ.¹, OTRI, Osaka Univ.², CSRN, Osaka Univ.³)

はじめに 反強磁性 Cr₂O₃ 薄膜は電気磁気効果を利用することで、ネールベクトルの電界反転が可能であり¹⁾、また、電気磁気効果と界面電場に起因する表面磁化によりネールベクトルを電氣的に検出することが可能な材料である。一方、ネール温度はバルクにおいて 307 K であり、薄膜化によって低下する²⁾ことから、ネール温度の上昇が課題とされている。Cr₂O₃ 薄膜においては、下地層とのエピタキシャル歪み (*c/a*) によって、ネール温度が変化することが示されているが^{2,3)}、*c/a* とネール温度の相関については統一見解が得られていない。我々は、これらの課題に対して、圧電基板上に Cr₂O₃ 薄膜をエピタキシャル成長させることで、ネール温度を外場によって変調することを試みている。本研究では、圧電材料である LiNbO₃(0001)基板上に Cr₂O₃(0001)エピタキシャル薄膜を作製し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。試料構成は、Pt(2 nm)/Cr₂O₃(8 nm)/LiNbO₃(0001)-subs.とした。基板の熱処理条件は大気中 1000 °Cとし、Cr₂O₃の製膜温度は 300~500 °Cとした。構造評価には、高速電子回折法(RHEED)、および X 線回折法(XRD)を用いた。

実験結果 Fig. 1 および Fig. 2 に、400 °Cで製膜した Cr₂O₃ 薄膜の RHEED 像 (電子線入射方向 // [1120]) と XRD プロファイル(*q* // *c*-axis)を示す。RHEED 像には、Cr₂O₃のコランダム構造を示す 3 倍周期の回折像が観察された。また、XRD プロファイルには、Pt-cap 層、Cr₂O₃層、および両層界面の干渉効果に起因する Laue フリンジが観察され、良好な結晶性かつ平坦な界面を持つ薄膜が作製されたものと考えられる。LiNbO₃は、真空中・高温条件では、Li 欠損により LiNb₃O₈が生成し、回折ピークや表面構造の乱れが生じると報告されているが⁴⁾、本研究での薄膜作製条件ではこうした劣化は観察されず、いずれの製膜温度においても Cr₂O₃薄膜のエピタキシャル成長が確認された。500°Cまでの製膜温度条件では基板への影響は軽微であることが示唆される。講演では、試料のネール温度や他の基板上への製膜試料の測定結果を加えての報告を予定している。

参考文献

1) X. Wang, Y. Shiratsuchi *et al.*, AIP Advances 12, 035216 (2021). 2) X. Wang, Y. Shiratsuchi *et al.*, Appl.Phys.Lett. 121, 182402(2022). 3) P. Makushko *et al.*, Nature Comm. 13, 6745 (2022). 4) V. Polewczyk *et al.*, J. Magn. Magn. Mater, 515, 167257(2020).

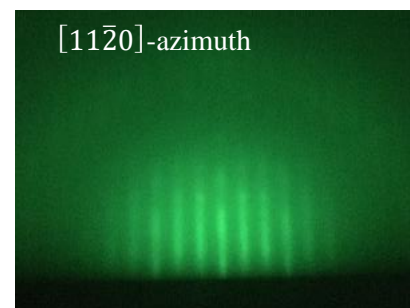


Fig.1 LiNbO₃ 基板上に製膜した Cr₂O₃ 薄膜の RHEED 像

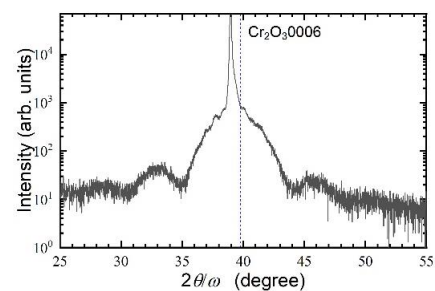


Fig.2 Cr₂O₃ 製膜温度 400°Cの試料の XRD プロファイル(*q* // *c*-axis)

層間反強磁性 Mn(001)超薄膜を用いた原子層磁石の開発

関温杜¹, 柏木知弥¹, 山田豊和^{1,2}
(1.千葉大院工 2. 千葉大キラル研)

Growth of layered magnet prepared on ultrathin Mn(001) films
H. Seki¹, T. Kashiwagi¹ and T. K. Yamada^{1,2}
(1&2. Chiba Univ)

はじめに

原子層磁石は単原子層の厚さの剥離できる二次元磁石である。Fe, Cr, Mn のような 3d 遷移金属単原子膜の上下をカルコゲン元素やハロゲン元素でコーティングした構造である。しかし、非常に薄いため、原子磁気モーメントが熱揺らぎにより不安定化する。Fe₃GeTe₂, CrBr₃ などの原子層強磁性磁石のキュリー温度は 100 K 以下である。本研究ではキュリー温度が室温よりはるかに高い Mn/Fe(001)系を用いることにより、室温でも機能する原子層磁石の開発を目指す。

本研究では、Mn 単層膜を S でコーティングし、Mn 原子層磁石を開発する。超高真空環境下のその場にて、スピン偏極走査トンネル顕微鏡 (spin-polarized STM)を用いて磁気構造を探る。カルコゲン元素として S, Se, Te があるが、Se と Te は強い毒性を有するため本研究では硫黄 S を用いた。

Fe(001)ウイスカ上の bct-Mn(001)超薄膜を用いた。Mn スピンは単層膜内で強磁性結合し、層間で反強磁性 180°結合している¹⁾。Fe と Mn の界面では合金化が起きやすく、Mn 膜の磁気構造に影響を与える。Mn 膜中の Fe 濃度は膜厚が大きいほど小さくなる¹⁾。本研究では Fe 濃度が小さい 3 ML 以上の Mn 超薄膜を使用した。

実験手法

本研究は全て室温・超高真空 STM装置(5×10^{-8} Pa) で実施した。Fe(001)ウイスカの清浄化と平坦化は、準備槽での Ar⁺スパッタと基板温度 560 °C加熱を約 200 時間行い実現した。Fe(001)ウイスカの清浄化、平坦化の後に、Mn (純度 99.999%) を蒸着して多層膜を製膜した(1 Å/min)。試料の局所電子状態密度 (LDOS)は走査トンネル電子分光法 (STS) を用いた。Mn(001)膜表面への S コーティングは FeS₂ (純度 99.9%) を用いて行った。FeS₂ 粉をアルミナ坩堝に入れ超高真空内で加熱した(坩堝温度 553 K)。S 昇華を質量分析器で確認した(S peak 位置 mass 32)。スピン偏極 STM を実施するために磁性探針を超高真空内で作製した。非磁性 W 探針先端の曲率半径を大きくし酸化膜を除去するため、W 探針を 40 W(= 0.5 kV × 80 mA)でフラッシングした。この清浄 W 探針先端に Fe を 5 nm 蒸着した (0.83Å/min×60 min)。

結果

清浄な Fe(001)原子テラス(40 - 80 nm)上に、5 monolayers (MLs) Mn 蒸着した(8Å)。Mn 超薄膜表面では層成長した。Mn(001)表面はスピン偏極 LDOS ピークをフェルミ準位上+0.7 eV 近傍に持つことを確認した。一方、SP-STS 像は、層間磁気コントラストを+0.2 V に示した。この Mn 超薄膜上に S をコーティングして Mn 単原子層を製膜することで原子層磁石の開発を目指す。また、現在並行して行っている角度分解スピン偏極 STM の開発についても報告する。

参考文献

- 1) T. K. Yamada, et al., Microscopy Research and Technique, 66:93-104 (2005)
- 2) T. K. Yamada, et al., Surface Science, 516 (2002) 179-190

コンケーブ型 Fe₃O₄ ナノ粒子の磁気 1 次反転曲線特性

LI HUI, 松尾咲琴, 小林悟, 川村遼
(岩手大学理工)

Magnetic first-order reversal curves for concave Fe₃O₄ nanoparticles

S. Matsuo, H. Li, S. Kobayashi, R Kawamura
(Iwate Univ.)

はじめに

近年、磁気ハイパーサーミアにおいて高い発熱効率を実現するために磁性ナノ粒子の形状効果を考慮した研究が注目されている¹⁾。特に、 $\langle 111 \rangle$ 方向に異方的に粒子成長したコンケーブ型ナノ粒子では、球状及びキューブ型粒子と異なる磁化反転過程が観測²⁾されており、より高い発熱特性が期待される。本研究では、粒子サイズを 25~51nm まで系統的に変えたコンケーブ型 Fe₃O₄ ナノ粒子について、磁気一次反転曲線(FORC)特性の温度変化及び粒子サイズ依存性を通し、磁化過程の異方的形状効果を詳しく調査したので報告する。

実験方法

Fe 前駆体であるオレイン酸鉄、オレイン酸ナトリウム、オレイン酸、トリオクチルアミンを用いて約 340°C で加熱・保持し粒子サイズ(d)の異なるコンケーブ型 Fe₃O₄ ナノ粒子を合成した。合成した $d=25$ から 51nm までのコンケーブ型ナノ粒子を 4 試料、 $d=23$ nm のキューブ型粒子を 1 試料について、TEM による形態評価、X 線回折による結晶構造解析、SQUID 磁束計による FORC 測定 ($T=10\sim 300$ K、最大磁場 $H=5$ kOe、反転磁場及び磁場ステップ $\Delta H_r = \Delta H = 20\sim 250$ Oe) を行った。

実験結果

Fig.1(a), 1(b)にそれぞれ、 $d=51\pm 7$ nm(cc-51)と $d=25\pm 6$ nm(cc-25)のコンケーブ型ナノ粒子の TEM 像と $T=10$ K における FORC 図を示す。両試料において、2 つの FORC 分布ピークが低温で現れること、特に cc-25 では FORC 分布ピークの一つが原点付近に位置していることを見出した。また、cc-25 とほぼ同サイズの $d=23\pm 3$ nm(cb-23)のキューブ型ナノ粒子では、 $T=10$ K において FORC 分布ピークは 1 つのみ観測された。このことから、2 つの FORC 分布ピークの発現はコンケーブ型ナノ粒子特有のものだと考えられる。OOMMF を用いたマイクロマグネティック計算から、形状による FORC 図の違いは、磁気エネルギーが安定な方向がコンケーブ型は $\langle 111 \rangle$ 、キューブ型は $\langle 100 \rangle$ 方向であることに起因すると解釈できる。従って、コンケーブ型粒子では、 $\langle 111 \rangle$ 方向に段階的に磁化配向することで、FORC 分布ピークが複数観測されたと考える。また、 $T=10$ K から温度を上昇すると、2 つの FORC 分布ピークは原点側にシフトし、やがて単一ピークとなるが、粒子サイズが小さいコンケーブ型ナノ粒子では、 $T=50$ K 程度の高い温度まで 2 ピークが観測された。この結果は、小さな粒子の方がより異方的形状効果の寄与が大きいことを示す。

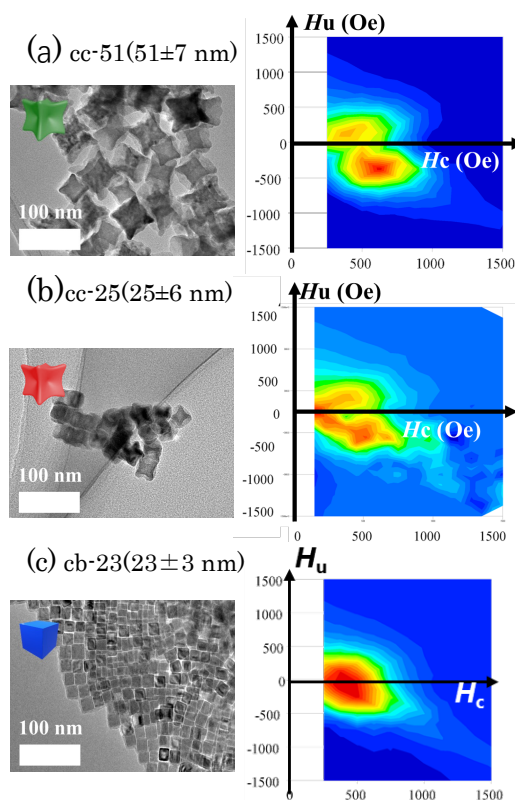


Fig.1 TEM image and FORC diagram at $T=10$ K for (a) cc-51, (b) cc-25, (c) cb-23.

参考文献

- 1) Z. Nemati et al., *J. Phys. Chem. C*, 120 (15), 8370–8379 (2016)
- 2) S.Matsuo, S.Kobayashi, 第 46 回磁気学会概要集.07aPS-14 (2022)

hcp 及び fcc-CoO ナノ粒子の磁気特性と表面効果

立花聡音、堀田侑里、高橋和也、野田千晶、小林悟
(岩手大学)

Magnetic properties and surface effects of hcp and fcc-CoO nanoparticles

T. Tachibana, Y. Hotta, K. Takahashi, C. Noda, S. Kobayashi

(Iwate Univ.)

はじめに

磁気冷凍技術は、磁場を利用して磁性体が発熱・吸熱する（磁気熱量効果、以降 MCE と呼ぶ）ことで、従来の冷凍技術と比較して理論的にエネルギー効率が高いとされている。さらに、冷媒ガスやコンプレッサーが不要であるため、環境に優しいという特性から注目を集めている。特に、磁性体がナノ粒子の形状をしている場合、デバイスへの組み込みや複合材料への加工といった多様な応用が可能である。表面磁気異方性が大きい Co を含むナノ粒子では、表面スピン凍結による大きな MCE が報告されている。本研究では、六角錐状 hcp 及びナノフラワー状 fcc-CoO 粒子に焦点を当て、結晶相及び形態が磁気特性とその表面効果に与える効果について調査したので報告する。

実験方法

前駆体としてコバルト(III)アセチルアセトナートとオレイルアミンを用いた。Ar 雰囲気中で 135°C で 5 時間加熱後、250°C まで急昇温・3 時間保持し自然冷却させた²⁾。試薬のモル比、反応時間を調整することで、粒子サイズを制御した。SQUID 磁化測定装置を用いて M-T 曲線、M-H 曲線を測定した。XRD を用いて、結晶相の同定と粒子ドメインサイズの評価を行った。

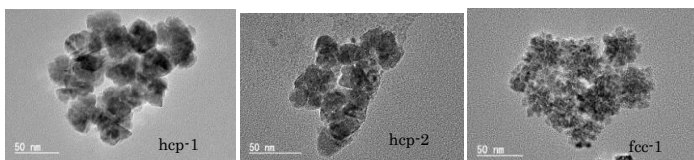


Fig.1: TEM image of hcp-CoO, fcc-CoO sample.

結果及び考察

Fig1 に合成した 3 試料(hcp-1, hcp-2, fcc-1)の TEM 像を示す。hcp-1 は六角錐状、hcp-2 はより細かな六角錐形状を有している。XRD より六角錐状試料は hcp-CoO、フラワー型試料は fcc-CoO であることを確認した。Fig2 に hcp-1 及び fcc-1 のゼロ磁場冷却(ZFC)、磁場中冷却(FC)条件下における M-T 曲線を示す。ZFC 及び FC 条件の M-T 曲線が広温度範囲で一致しないこと、 $T=10\text{K}$ 以下で磁化が急激に増大することが分かった。また、 $T=2\text{K}$ において磁気ヒステリシスを両試料で確認した(Fig.2 挿入図)。この結果は、反強磁性 CoO コア表面における非補償スピンによる強磁性の発現を示唆している。更に、磁化曲線の詳細な温度依存性から磁気エントロピー変化($-\Delta S$)を見積もったところ、fcc-1 では $-\Delta S$ は $T=6\text{K}$ で極大値 0.05J/K/kg を示すのに対して、hcp-1, hcp-2 では両試料とも $T=10\text{K}$ 近傍でピークを示し、その最大値はそれぞれ約 0.13J/K/kg , 2.2J/K/kg であった。この結果は、粒子表面のスピン凍結に伴う磁気エントロピー変化が試料形態に強く依存することを示唆している。

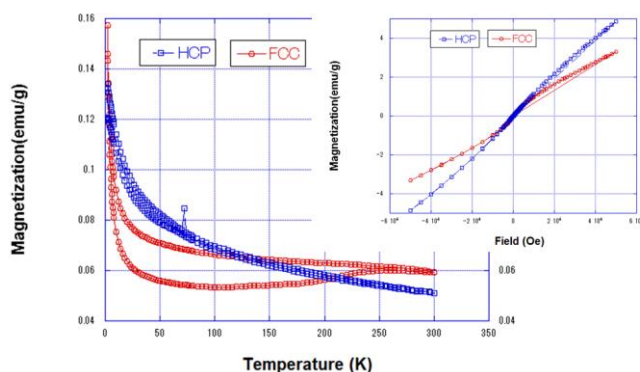


Fig. 2: M-T curve at $H=1000\text{ Oe}$ for hcp-1 and fcc-1 samples. The inset shows M-H curves.

Reference

- 1) P. Podder et al., J. Phys. Chem. C, vol.111, 14060 (2007).
- 2) K. M. Nam et al., Angew. Chem. Int. Ed., vol.47, 9504 (2008).

磁気渦構造を持つ中空構造 Fe₃O₄ 粒子の磁気加熱特性

秋山 遥¹, Ton That Loi¹, 桑波田 晃弘¹, 藪上 信¹, 小林 悟² (¹東北大学, ²岩手大学)

Magnetic heating properties of hollow Fe₃O₄ particles with magnetic vortex structure

Haruka Akiyama¹, Ton That Loi¹, Akihiro Kuwahata¹, Shin Yabukami¹, Satoru Kobayashi²

(¹Tohoku University, ²Iwate University)

1. はじめに

磁気ハイパーサーミアに用いる磁性粒子である Fe₃O₄ 粒子は、形状や粒径等の形態を変化させることで磁性体の加熱効率が向上すると報告されている^[1]。特に、中空構造を持つ球状の粒子は、磁気渦構造の安定^[2]により粒子の凝集による加熱効率の低下が抑制されるため、高い加熱効率が期待できる。本研究では、粒子の外径を系統的に変化させた中空構造を持つ Fe₃O₄ 粒子の加熱効率を測定し、加熱効率の高い粒子の形態について報告する。

2. 実験方法

本実験では、塩化鉄六水和物、酢酸アンモニウム及びエチレングリコールを用いてソルボサーマル法にて試料を作製した^[2]。XRD の解析結果から得られた試料が Fe₃O₄ であると同日し、SEM と TEM を用いた測定により中空構造を持つことを確認した後、粒子の外径と内径、粒度などの形態を計測した。また、SQUID VSM を用いて試料の磁気特性を測定した。

次に、磁界印加実験^[3]により、各試料の加熱効率を測定した。本実験系は、加熱器具 Easy Heat、加熱用コイル、光ファイバ温度計で構成される。まず、親水化処理を施した Fe₃O₄ 粒子を水に分散させた 1 mg/mL の濃度の溶液を用意した。その溶液を 2 mL のマイクロチューブにそれぞれ 1 mL ずつ入れ、加熱用コイルの中心に設置した。加熱用コイルは内径 30 mm、外径 42 mm、ピッチ 32 mm の 4 回巻きである。それぞれの試料が 45°C に達するまで 300 A で 322.1 Oe、270 kHz の磁界を印加し、光ファイバ温度計で温度変化を計測することで、内径がほぼ等しく外径の異なる 3 種類の磁性粒子 (外径: 400 nm, 530 nm, 720 nm) を以後 H400, H530, H720 とする) の加熱効率を比較した。

3. 実験結果

Fig.1 に磁界を印加したときの磁性粒子の温度変化応答を示す。磁界を 300 秒間印加した時の磁性微粒子の温度は、H400, H530, H720 についてそれぞれ 13.5 °C, 9.3 °C, 7.0 °C 上昇した。また、温度変化は線形的であり、外径が小さい粒子ほど傾きは大きくなった。

また、SQUID VSM で測定した磁気特性を用いて求めた直流の磁気ヒステリシス損失は 300 Oe において、H400, H520, H720 についてそれぞれ 1551.70 emu Oe/g, 924.72 emu Oe/g, 640.79 emu Oe/g だった。

SAR は磁界印加後 60 秒後までの温度変化の値を用いて計算すると、それぞれ 274.5 W/g, 206.7 W/g, 159.8 W/g となった。Fig. 2 は SAR とヒステリシス損を粒子の外形サイズに対して示したものである。磁

気ヒステリシス損失と SAR は粒子サイズの増大により減少し、明瞭な相関関係が見られた。磁性粒子の粒径が大きくなるにつれて加熱効率は低下した。

4. まとめ

中空構造を持つ外径の異なる 3 種類の Fe₃O₄ 粒子に磁界を印加し、磁気加熱の実験を行うことで、空洞の径が等しい場合、粒径が小さい粒子ほど加熱効率は高くなった。今後は、医療応用を見据え、さらに粒径の小さな粒子の加熱効率を測定し、磁気ハイパーサーミアに適した粒子の形態を検討する。

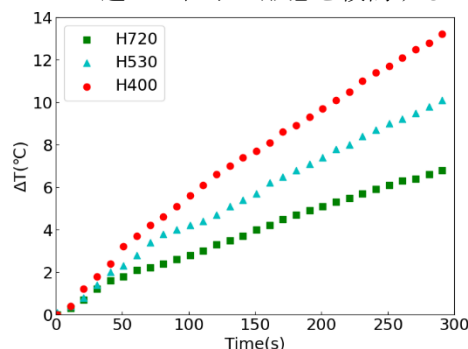


Fig.1 Temperature rise of different size hollow nanoparticles under $H=322.1$ Oe, $f=270$ kHz.

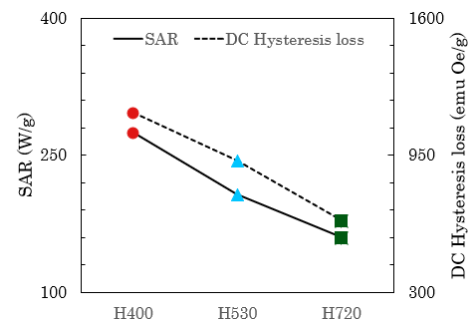


Fig.2 SAR value and magnetic hysteresis loss depending on hollow nanoparticle size.

参考文献

- [1] E. A. Périgo, et al., Applied Physics Reviews 2, 041302 (2015)
- [2] M. Chiba, et al., J. Mag. Mag. Mater. vol. 512 (2020) 167012
- [3] A. Shikano, et al., T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues), 6, 100-104 (2022)

謝辞

本研究は、JST ASTEP (JPMJTM22AB)、テルモ財団 (受付番号 22-II 1011)、科研費基盤 C の成果である。

面直方向に濃度勾配を持つ GdFe 薄膜の特性評価

水野淳平、栗野博之、田辺賢士 (豊田工業大学)

Characterization of GdFe thin films with a concentration gradient in the perpendicular direction

J. Mizuno, H. Awano and K. Tanabe (Toyota Technological Institute)

はじめに

近年のスピン트로ニクス分野において、磁性超薄膜に対する非対称な多層膜構造が注目されている。これは非対称交換相互作用であるジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) が、人工的に制御できるためである。ごく最近新しい研究の流れとして、非対称な多層膜構造ではなく、面直方向に濃度勾配を持つ薄膜が注目されている。このような薄膜の場合、磁性超薄膜を使うことなしに、DMI[1-2]やスピンホール角[3]を制御できる可能性がある。しかしこれらの研究報告は極めて少なく、濃度勾配の制御方法の確立や濃度勾配と磁気特性の関係など、多くの課題が残っている。そこで本研究では、様々な濃度勾配の作製を見越して、コスパッタ法のカソードパワーを成膜中にリアルタイムで制御する手法を確立し、本手法で作製された GdFe 合金薄膜の特性評価を行った。

実験方法と結果

Fig. 1 に示すように、SiO₂を持つ熱酸化 Si 基板上に Pt (5 nm)/ g-GdFe(20 nm)/SiN (5 nm)の構造を持つ試料を、マグネトロンスパッタ装置で作製した。g-GdFe は面直方向に濃度勾配 (gradient) を持つ GdFe を表す。①22.1 から 25.4at% (②25.4 から 22.1at%) まで濃度勾配をつけた。g-GdFe 膜は、カソードパワーをリモート制御したコスパッタ法を用いた (Fig. 2)。作製した薄膜に対して、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 (EDX) を用いて薄膜全体の Gd の濃度を、Kerr 効果測定装置を用いて薄膜の保磁力を測定した。測定された組成、保磁力の関係を Fig. 3 に示す。EDX によって計測された濃度はサンプル①②で大きな違いはなく、①23.4at% と②23.9at%で、濃度勾配の平均値程度であり、うまく成膜できていることが分かる。また保磁力についても、どちらも 80 Oe 程度の大きさになった。この結果を、一様な組成膜 (22.1, 23.8, 24.9, 25.4at%) と比較すると、勾配膜は一様膜と大きな違いがないことが明らかになった。このことは、Pt 界面を変調しながら、同程度の保磁力を持つ材料でデバイス作製が可能になることを意味している。

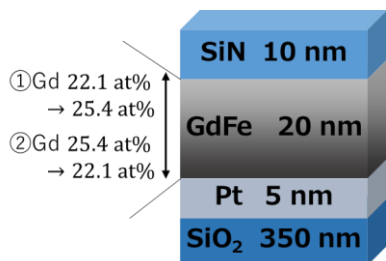


Fig. 1 試料構造

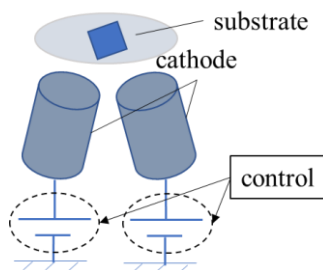


Fig. 2 リモート制御のイメージ

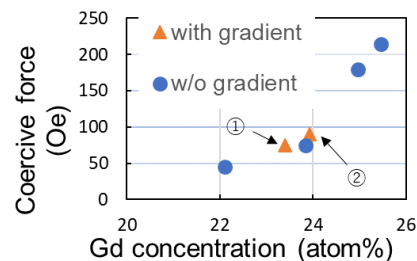


Fig. 3 Gdの組成と保磁力の関係

参考文献

- [1] D. H. Kim et al., Nature Materials **18**, 685 (2019).
- [2] Z. Zheng et al., Nature Communications **12**, 4555 (2021).
- [3] D. Céspedes-Berrocal et al., Advanced Materials **33**, 2007 (2021).

強磁性ハイエントロピー合金薄膜の作製と磁気伝導特性の評価

鈴木 和也^{*,**}, 高梨 弘毅^{*,**}

(*原子力機構 先端基礎研究センター, **東北大 材料科学高等研究所)

Fabrication of ferromagnetic high-entropy alloys thin films and evaluation of magneto-transport properties

Kazuya Suzuki^{*,**}, Koki Takanashi^{*,**}

(¹JAEA ASRC, ²Tohoku University AIMR)

はじめに

ハイエントロピー合金 (HEA) は、優れた力学特性、耐熱性、耐食性、耐照射性などから大きな注目を集めているが、そのほとんどは構造材料としての応用を指向した研究である。HEA は空間対称性が局所的に破れた系の集合体であり、スピン軌道相互作用が顕在化し、従来合金には見られない特異な磁気伝導特性が生じる可能性を有している。特にスピントロニクス分野が得意とするナノスケールで高度に構造制御されたナノ積層薄膜の作製方法を適用することにより HEA 材料の研究に新たな展開が期待される。本研究では、室温よりも高いキュリー温度を示す FeNiCoCuPd 合金¹⁾に着目し、スパッタリング法による薄膜作製とその薄膜の結晶構造、磁気特性、磁気伝導特性について報告する。

実験方法

薄膜の作製は、8 元カソードを備える超高真空スパッタリング装置 (到達圧力 $\sim 10^{-7}$ Pa) を用いた。熱酸化膜付シリコン基板上に Fe₅₀Co₅₀、Ni、Cu、Pd ターゲットを膜組成が均等になるように出力制御しながら同時にスパッタすることにより Fe₃₃Ni₃₄Co₃₃、Fe₂₅Ni₂₅Co₂₅Cu₂₅、Fe₂₀Ni₂₀Co₂₀Cu₂₀Pd₂₀ 合金薄膜 (30 nm) を作製した。このとき、成膜温度は室温である。試料は、X 線回折による構造評価、VSM による磁気特性評価を行った。

実験結果

Figure 1 に Fe₃₃Ni₃₄Co₃₃、Fe₂₅Ni₂₅Co₂₅Cu₂₅、Fe₂₀Ni₂₀Co₂₀Cu₂₀Pd₂₀ (30 nm) 試料の X 線回折法による θ - 2θ スキャンのプロファイルを示す。基板由来のピークを除くとすべての試料において fcc 相 (111) および fcc 相 (002) のピークが得られていることから (111) 方位に優先配向した fcc 単相膜が得られていると考えられる。また、FeNiCo に Cu と Pd を添加しても左右対称な (111) ピークと明瞭なピークシフトを示していることから、FeNiCo 合金に Cu および Pd を添加しても顕著な相分離は生じておらず、Fe₂₀Ni₂₀Co₂₀Cu₂₀Pd₂₀ 薄膜は均一な HEA 状態となっていると考えられる。そして、FeNiCo のモル比を固定し、Cu と Pd のモル比率を変えた Fe₂₀Ni₂₀Co₂₀Cu_{40-x}Pd_x (0<x<40) 薄膜を作製したところ、等モル比資料と同様に fcc 相単相が得られた。講演では詳細に加えて、これらの試料における異方性磁気抵抗効果や異常ホール効果などの基本的なスピン依存伝導特性についても報告する。

参考文献

1) Primoz Kozelj et al. Adv. Eng. Mater. 2019, 21, 1801055

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 21K18180 の助成を受けたものです。

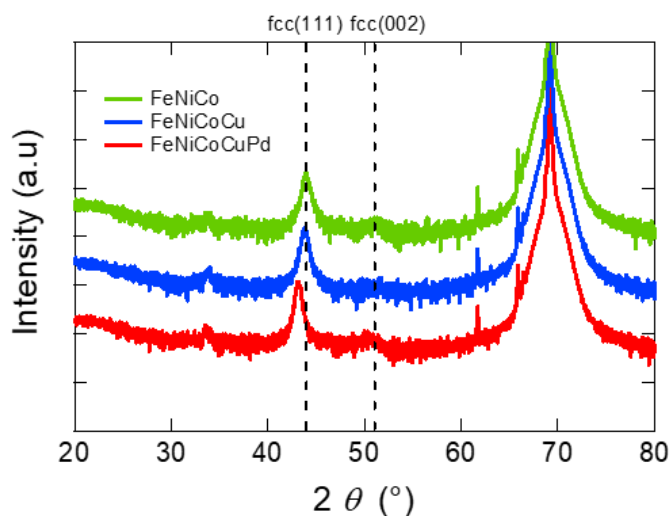


Figure 1 The XRD profiles of FeNiCo, FeNiCoCu, FeNiCoCuPd(30 nm) thin films.

垂直型強磁性トンネル接合のためのエピタキシャル MgAl₂O₄/L₁₀-FePt(001)構造の作製

金澤 朋希^{1,2}、T. Scheike¹、埋橋 淳¹、大久保 忠勝¹、介川 裕章¹、三谷 誠司^{1,2}、柳原 英人²
(¹物質・材料研究機構、²筑波大学)

Fabrication of epitaxial MgAl₂O₄/L₁₀-FePt(001) stacks for perpendicular magnetic tunnel junctions

T. Kanazawa^{1,2}, T. Scheike¹, J. Uzuhashi¹, T. Ohkubo¹, H. Sukegawa¹, S. Mitani¹, H. Yanagihara²
(National Institute for Materials Science¹, Univ. of Tsukuba²)

背景

強磁性トンネル接合 (MTJ) はハードディスクの磁気ヘッドや、不揮発性磁気メモリ (MRAM) の記憶素子として利用されている。今後、MRAM の高密度化による半導体メモリの一部置き換えを実現するためには、nm スケールへ MTJ 微細化が必要である。現在 MRAM 用の垂直磁化 MTJ (p-MTJ) では、CoFeB/MgO 界面に誘起される垂直磁気異方性 (PMA) が利用されているが、MTJ 微細化により十分な熱安定性を確保することが困難になっている。この問題の解決のため、極めて高い磁気異方性 (~70 Merg/cm³) を示す L₁₀ 型 FePt(001) が p-MTJ の磁性層として有望である[1,2]。しかし、FePt と MgO バリアとの 10% 近い大きな格子不整合があることから高品位な MTJ の作製が困難である。本研究では、高品位 FePt 系 MTJ の実現のため、MgO よりも格子整合性がよいスピネル (MgAl₂O₄ 系材料) をバリアとして用い、その上に Fe と Pt の交互原子積層により垂直磁化を持つ FePt(001)エピタキシャル層を 400 度以下のプロセスで実現した。

実験方法

超高真空マグネトロンスパッタリングを用い MgO(001)基板//Cr 下地(60)/Mg (0.2)/Mg₆₇Al₃₃ (0.7)/酸化/Fe (1)/Pt (0.65)/[Fe (0.35)/Pt(0.65)]_{x4}/Ru(2) (単位: nm) 積層を作製した。エピタキシャル Mg-Al-O (MAO) バリア作製には Mg/MgAl 積層の自然酸化を用いた[3]。FePt 層作製には Fe と Pt は交互積層と加熱・冷却プロセスを組み合わせ、MTJ 積層に適した平坦な垂直磁化膜の実現を目指した。磁化測定に振動試料型磁力計 (VSM) 及び超電導量子干渉素子 (SQUID)、結晶構造評価に X 線回折 (XRD) 及び環状暗視野走査透過型顕微鏡 (ADF-STEM) を用いた。平坦性評価には原子力顕微鏡 (AFM) を用いた。

実験結果

Fe/Pt 多層膜成膜時の加熱・冷却プロセスの最適化により比較的平坦な FePt(001)層の成長を確認した。Fig. 1 に Cr/MAO/FePt 近傍の断面 ADF-STEM 像を示した。Cr と MAO はほぼ完全に格子整合しており、MAO の上下界面は極めて平坦である。その上にエピタキシャル成長した FePt(001)層が確認できる。FePt は部分的に規則化し Fe と Pt が交互に原子配列した L₁₀ 構造が得られていることがわかる。作製に比較的低い温度 (400 度以下) を用いたことから L₁₀ 規則度は 0.2 程度と低いものの、高い角型比を持つ垂直磁化膜が得られた。保磁力は約 800 Oe、異方性エネルギーは 9~10 Merg/cm³ と見積もられ、p-MTJ のフリー層に適した特性を有していることがわかった。FePt と格子整合性が比較的良好な MAO バリアを導入することで、L₁₀ 合金を用いた高性能 p-MTJ への展開が期待される。本研究の一部分は JSPS 科研費 21H01750 及び 22H04966 により行われた。

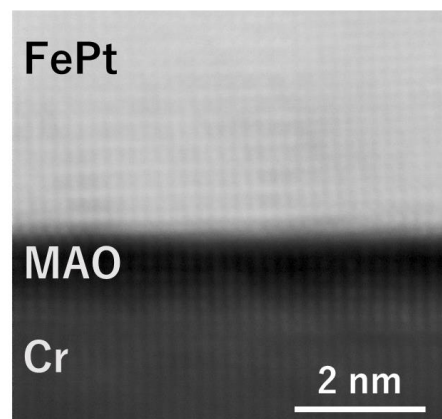


Fig1. Cross-sectional ADF-STEM images of epitaxial Cr/MAO/FePt(001).

参考文献 [1] M. Yoshikawa *et al.*, IEEE Trans. Magn. **44**, 2573 (2008). [2] Y. Taniguchi *et al.*, IEEE Trans. Magn. **44**, 2585 (2008). [3] H. Sukegawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 142409 (2013).

[Co/Ni] 多層膜/Pt/Fe ヘテロ構造における磁気ダンピング異常

泉統真*, 久田優一*, 小森祥央*, 井村敬一郎***, 谷山智康*

(* 名大理, ** 名大教養)

Anomalous ferromagnetic damping in [Co/Ni] multilayer/Pt/Fe heterostructures

T. Izumi*, Y. Hisada*, S. Komori*, K. Imura***, T. Taniyama*

(*Dept. Phys., Nagoya Univ., **ILAS, Nagoya Univ.)

1 はじめに

近年、強磁性体の磁化の歳差運動が空間を動的に伝播するスピン波の低消費電力スピントロニクスデバイス応用が脚光を浴びている。スピン波をスピントロニクスデバイスにおいて利用するためにはスピン波の長距離伝播が必要とされ、その実現には磁気ダンピングの小さい材料をいかに作製するかが重要な課題となる。磁化の歳差運動を記述する方程式として、Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式がよく知られており、磁気ダンピングは Gilbert ダンピング定数により特徴づけられる。強磁性共鳴 (FMR) は、共鳴線幅 ΔH と共鳴周波数 f_{res} の線形関係から、強磁性体の Gilbert ダンピング定数を推定する強力なツールとして広く利用されており、垂直磁気異方性 (PMA) を持つ $[Co_{90}Fe_{10}/Ni]$ 多層膜において、面内磁場印加時に ΔH と f_{res} の非線形関係などの興味深い物性が見出されている¹⁾。今回我々は、 $[Co/Ni]$ 多層膜/Pt/Fe ヘテロ構造において、 $[Co/Ni]$ 多層膜の PMA の強さに依存した ΔH と f_{res} の異常な負の相関を見出したので報告する。

2 結果および考察

Pt(3)/[Co(*t*)/Ni(0.6)]₈/Pt(10)/Fe(30) 多層膜を分子線エピタキシー法により MgO(111) 上に成長した。ここで、括弧内の数字は nm 単位の膜厚を表す。Fig. 1 に Co 層膜厚 $t = 0.4$ 及び $t = 0.8$ に対する磁化の面直 (OP) 磁場依存性を示す。 $t \leq 0.4$ のヘテロ構造では、低磁場領域で $[Co(t)/Ni(0.6)]$ 多層膜の PMA による明確な角型のヒステリシスが見られるのに対して、 $t > 0.4$ のヘテロ構造では、膜厚とともに PMA が減少する傾向が見られる。

これらの Co 層の厚さの異なるヘテロ構造に対して、coplanar waveguide とベクトルネットワークアナライザを用いて FMR 測定を行い、 ΔH を算出した。 $t = 0.4$ 及び $t = 0.8$ の Co 膜厚のヘテロ構造に対する ΔH と f_{res} との関係を図 2 に示す。PMA が弱い $t = 0.8$ の試料では、 ΔH は f_{res} の増加とともに線形に増加する。一方で、PMA が強いヘテロ構造 ($t = 0.4$) では、 f_{res} の増加とともに ΔH が線形に減少する。一般に、磁性体の FMR 線幅 ΔH は、 $\Delta H = 2\pi(2mc/ge)\alpha f_{res} + \Delta H_0$ の関係に従うことが知られている²⁾。ここで α は Gilbert ダンピング定数、 ΔH_0 は磁気的不均一性などに起因する線幅の広がりを表す。この関係に基づいて、 α を算出すると、 $t = 0.8$ のヘテロ構造において、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-2}$ が得られる。一方で、強い PMA を持つヘテロ構造 ($t = 0.4$) では、 ΔH と f_{res} との関係が負の傾きを持つ異常な振る舞いを示し、結果として負の Gilbert ダンピング定数を持つことが示唆される。この負の Gilbert ダンピング定数の異常な挙動の物理起源については、現時点で十分に理解がなされていないが、Fe 層の磁化の歳差運動が、Fe モーメントと垂直磁化多層膜 $[Co/Ni]$ との間に生じる磁気的相互作用を介してアンチダンピングされている可能性が示唆される。当日は負のダンピングパラメータの物理起源について、より詳細に議論する。

本研究の一部は日本学術振興会科研費 (21H04614)、JST CREST (JPMJCR18J1)、JST FOREST (JPMJFR212V) の助成を受けて行われています。

References

- 1) J. M. Shaw et al.: *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 062406 (2014).
- 2) T. Usami et al.: *AIP Adv.*, **11**, 045302 (2021).

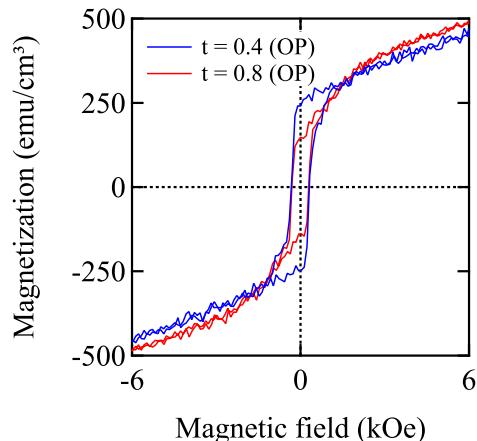


Fig. 1 MH curves for $t = 0.4$ with large PMA and $t = 0.8$ with small PMA.

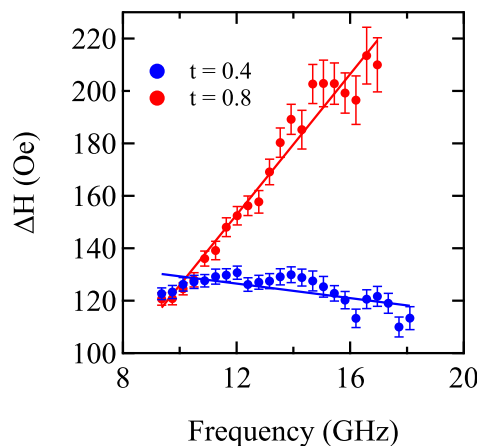


Fig. 2 ΔH vs. f_{res} for $t = 0.4$ and 0.8 .

磁性ナノワイヤを用いたリザーバにおけるノード状態取得法の検討

前田貴大¹, K. Hon¹, 久保田均², 後藤穰^{1,3,4}, 鈴木義茂^{1,3,4}, 野村光^{1,3,4,5}

(¹阪大基礎工, ²産総研, ³阪大 CSRN, ⁴阪大 OTRI, ⁵東北大 SRIS)

Node-state detection method for magnetic nanowire reservoir

T. Maeda¹, K. Hon¹, H. Kubota², M. Goto^{1,3,4}, Y. Suzuki^{1,3,4}, and H. Nomura^{1,3,4,5}

(¹Osaka Univ., ²AIST, ³CSRN Osaka, ⁴OTRI -Osaka, ⁵Tohoku Univ.)

近年、様々な系を用いた物理リザーバが提案されている。その中で我々は、ナノ磁性細線を用いたリザーバに注目している。本リザーバは磁化の向きをノード状態に用い、回転磁場によりノード状態を更新する。これまでに、マイクロマグネティック・シミュレーションを用いて STMC (Short Term Memory Capacity)、PCC (Parity Check Capacity) がそれぞれ 5 程度の値を得られることが予測されている¹。本リザーバを実験的に実装する際、ノード状態の読み取り手法が問題となる。先行研究ではノード状態は特定の領域の磁化を平均かした値を用いていた。しかしながら、カー効果顕微鏡等を用いた実際の計測では、磁化状態は、磁化の空間分布に対して重み付け平均をかけた結果として得られる。この様な値をノード状態に用いた際、リザーバの STMC、PCC が低下するか否かは不明である。そこで本研究では、マイクロマグネティック・シミュレーションにより得られた磁化状態に対してガウシアンフィルタをかけ、より計測結果に近いノード状態を用いた場合に STMC、PCC がどのように変化するかを検討した。

図 1(a)に磁性ナノワイヤを用いたリザーバの磁化状態の一例を示す。ここでは磁化の x 成分のみを可視化している。図 1(b)には、半値幅 400 nm のガウシアンフィルタを適用後の磁化状態の一例を示す。ガウシアンフィルタをかけることで、磁壁等の細部が確認できなくなっている。ガウシアンフィルタを適用した磁化の向きをノード状態に用い、学習・評価をした結果を図 2 に示す。これらの結果から、STMC、PCC はそれぞれ約 5 と 3 となった。従って、非線形演算能力が低下するものの、カー効果顕微鏡像を用いることで磁性ナノワイヤを用いたリザーバのノード状態を読みとることが可能であることが確認できた。本研究は JSPS KAKENHI 20H05655 の助成を受けて行われました。

参考文献

- 1) K. Hon, et al., Appl. Phys. Lett. 120, 022404 (2022).

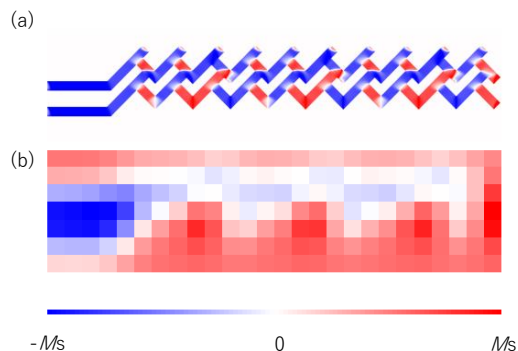


Fig. 1 (a) typical image of x component of magnetization of magnetic nano-wire reservoir and (b) blurred image with Gaussian filter.

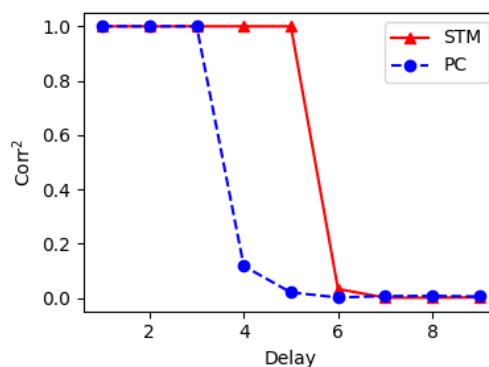


Fig. 2 Correlation between teacher data and predicted data with STM task (red) and PC task (blue) with different delay.

レーザー光を用いた 500 m/s 高速磁壁移動リアルタイム検出

鈴木紀行、和井内琴理、野村航平、Mojtaba Mohammadi、鷺見聡、田辺賢士、栗野博之
(豊田工業大学)

Real-time detection of 500 m/s high-speed domain wall motion using laser

N. Suzuki, K. Wainai, K. Nomura, M. Mohammadi, S. Sumi, K. Tanabe and H. Awano
(Toyota Technological Institute)

はじめに

レーストラックメモリは既存メモリに比べ記録速度の大幅向上およびビットコストの大幅低減が期待されている。この実現に向け、記録磁区の極小化や磁壁移動の高速化が目指されている[1]。しかし磁壁移動の報告は多数あるが、記録信号検出の報告はほとんどない。一般的に信号検出には TMR ヘッドが考えられているが、製作が大変で配線も問題となる。一方簡易な手法として配線不要のレーザー光が考えられるが、従来の光磁気記録の再生速度は最速 50 m/s であり 500 m/s で信号検出した報告がない。そこでレーストラックメモリの光による磁壁移動のリアルタイム検出に挑戦した。

実験方法

本実験では Figure 1 の通り偏光顕微鏡を用いて試料の磁化状態を確認するとともに、同じ対物レンズを通して波長 780 nm のレーザーを細線試料上に集光する。この反射を検光子およびアバランシェフォトダイオード (APD) を通して信号検出することで、電流誘起による磁壁移動を観測した。なお測定には熱酸化膜付き Si 基板上に Pt (5 nm) / Gd₂₂Fe₇₈ (20 nm) / SiN (10 nm) を積層した幅 3 μm、長さ 120 μm の細線試料を用いた。

実験結果

Figure 2 に電流密度 3.44×10^{11} A/m²、パルス幅 10 ns のパルス電流印加における磁壁移動の検出信号波形を示す。レーザーのスポット径が 1.42 μm であることからスポット径内の有効信号を抽出し磁壁移動を算出した結果、移動前後の磁壁位置からの算出結果と概ね一致し、約 500 m/s の磁壁移動のリアルタイム検出が可能になった。

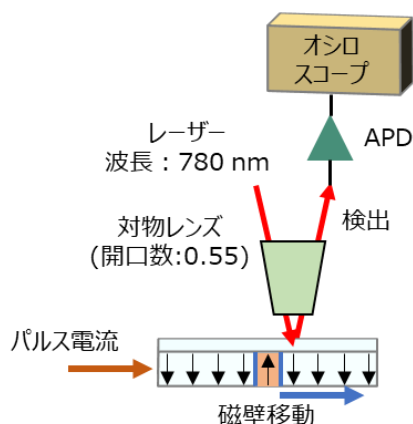


Figure 1 レーザー光による磁壁移動検出法

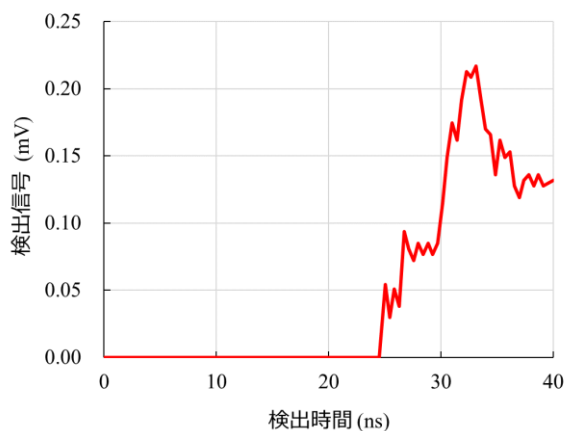


Figure 2 レーザー光による磁壁移動リアルタイム検出信号

参考文献

[1] S. Ranjbar et al., Materials Advances 3, 7028-7036, 2022.

LIFT 法による磁性膜の作製

福田樹*, 東倅主, 田原楽飛, 山下昂洋, 柳井武志, 福永博俊, 中野正基 (長崎大学)

Preparation of magnetic films by LIFT technique

I. Fukuda*, H. Kosuke, G. Tahara, A. Yamashita, T. Yanai, H. Fukunaga, and M. Nakano (Nagasaki Univ.)

はじめに

希土類系磁石膜は、主にスパッタリング法や PLD 法等により作製されてきた[1][2]。しかし、いずれの方法においても、硬磁気特性を得るには、基板加熱やポストアニーリングによる高温での熱処理が必要である。将来的に、有機材料を用いた MEMS への希土類系磁石膜の利用を鑑みると、磁石膜の低温創製が望まれる。本研究では、上記の動機以外にデバイスの製造工程の簡略化を鑑み、室温での磁石膜創製とパターン転写を実現することを目標として、LIFT(Laser Induced Forward Transfer)法での磁石膜の成膜を試みた[3]。本稿では、磁石膜と共に Fe 膜を用い、転写におけるレーザ照射条件の最適化を中心に検討したので報告する。

実験方法

最初に LIFT 法のターゲットを作製した。PLD 法を用い、約 6.5 rpm で回転させた Fe ならびに Nd_{2.4}Fe₁₄B 合金に波長 355 nm の Nd : YAG レーザを照射し、成膜時間 40 min, 高真空中(10⁻⁴ Pa 程度)にて、松浪ガラス (S1111)を 10 mm 角に切り出した基板の上に、①Fe 膜と②Nd-Fe-B 系磁石膜を成膜した。②の試料のみ成膜後に熱処理を施した。次に、LIFT 法の手順として、上記 2 種類のターゲットのガラス基板側から上述のレーザを照射し、各ターゲットに対向する Ta 基板(40 μm 厚)に堆積させた。その際、レーザの行路を制御するため、ガルバノミラーを用い、約 10 Pa の真空中、ターゲットと基板間の距離 : 0.1 mm にて成膜した。

実験結果と考察

レーザーパワーを 0.3W に固定し、Fe 膜による LIFT 法の実験を最初に検討した。Fig. 1 に堆積した Fe 膜の面積とターゲット厚さの関係を示す。いずれの試料 (Fe film No.1, No.2) も、ターゲット厚さの増加に従い堆積される面積が低下し、10 μm 厚を超えた領域で堆積が困難となる。レーザの照射条件は異なるものの、佐野らの報告では、1 μm 以下の Ni 膜をターゲットにした結果であったのに対し、本実験では 10 μm までの厚膜でも LIFT 法により堆積できることがわかった。

Fig. 1 の結果を下に、レーザーパワーを 0.3~0.7 W まで増加させながら、約 15 μm 厚の Nd-Fe-B 系磁石膜をターゲットとし、LIFT 法を試みた。成膜後の写真(一部 : SEM 写真) を Fig.2 に示す。レーザーパワー : 約 0.7 W では連続的に、約 0.4 W ではドット状に堆積される。更に、各試料の Nd と Fe の比率がターゲットの値と近く、組成転写性が良いことを確認した。今後、磁気特性の評価や結晶構造の観察を進める予定である。

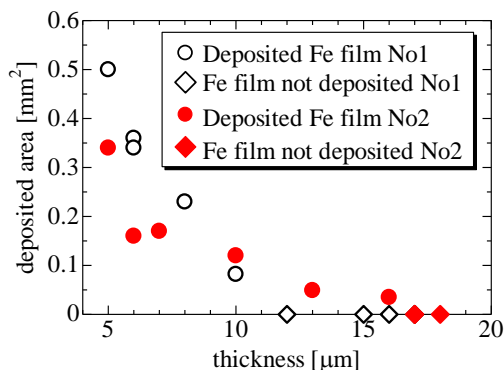


Fig. 1 Deposition area as a function of the thickness of targets (Fe films) in LIFT technique.

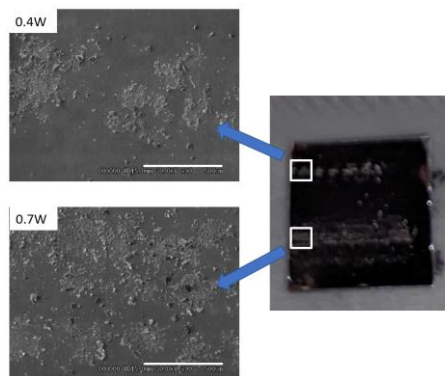


Fig. 2 Photos (Left :SEM images) of samples prepared by LIFT technique using Nd-Fe-B films.

参考文献

- [1] R. Fujiwara, T. Shinshi, and E. Kazawa, Sens. Actuators A, vol. 220, pp. 298-304, 2014.
- [2] M. Nakano, K. Higuchi, H. Yamaguchi, I. Fukuda, A. Yamashita, T. Yanai, T. Shinshi, and H. Fukunaga, AIP Adv., vol. 13, pp. #025131, 2023.
- [3] 佐野 智一, 廣瀬 明夫, J-STAGE スマートプロセス学会誌 2013 年 2 巻 4 号 pp. 192-196, 2013.

機械学習を用いた磁区画像からの TbCo 合金薄膜の磁気異方性の推定

渡辺章斗、久野栞、栗野博之、田辺賢士 (豊田工業大学)

Estimation of magnetic anisotropy from a magnetic domain image in TbCo alloy films
using machine learning

A. Watanabe, S. Kuno, H. Awano, and K. Tanabe (Toyota Technological Institute)

はじめに

磁性分野の研究開発では、成膜した薄膜の磁気特性を評価するために、磁気パラメータの測定実験が初めに行われる。それらの中には、ジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) 定数のような測定が難しかったり、計測に時間が掛かったりするパラメータも存在する。そこで、我々はより簡便なパラメータ測定法を確立するために、薄膜に現れる迷路状の磁区構造に注目した[1]。磁区構造は全磁気エネルギーが極小となるように決定されるため、磁区画像には磁気パラメータに関する情報が含まれていることが予想される。これまでの先行研究では、強磁性体薄膜における DMI 定数や飽和磁化などのパラメータ推定が報告されている[1-3](図 1)。昨年度の応用物理学会において、我々はフェリ磁性体である TbCo を用いて、組成推定が可能であることを報告した[4]。しかし、補償点を越えた RE-rich 組成は、うまく推定できないことも明らかになっている。そこで本研究では、組成ではなく、より磁区画像に影響を与える可能性がある保磁力の推定を行った。

実験方法および結果

スパッタリング法によって $\text{Si}_3\text{N}_4(5 \text{ nm})/\text{Tb}_x\text{Co}_{1-x}(t)/\text{Si}_3\text{N}_4(5 \text{ nm})$ の多層膜を Si 基板上に作製した。TbCo 組成比は垂直磁化膜になる条件を選択し、11 種類の組成比の異なる薄膜を用意した。Kerr 効果測定を行い、保磁力を評価した。MOKE 顕微鏡を用いて 1 つの薄膜につき 100 枚の磁区画像を撮影し、機械学習を行った。その結果、測定値と機械学習によって推定された値との間におおよそ比例関係がみられた (図 2)。この結果は、MOKE 顕微鏡で撮影した磁区画像には、フェリ磁性体であっても磁気異方性、特に保磁力に関する情報が含まれていることを明らかにしている。

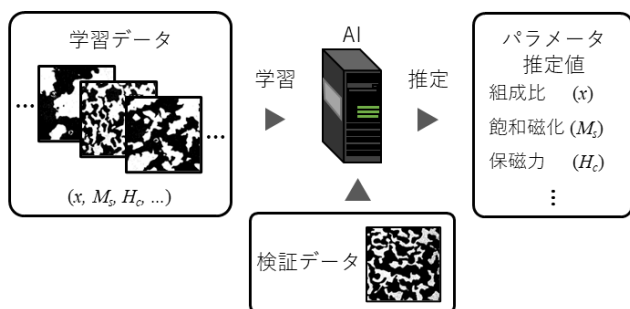


図 1. 研究の概念図

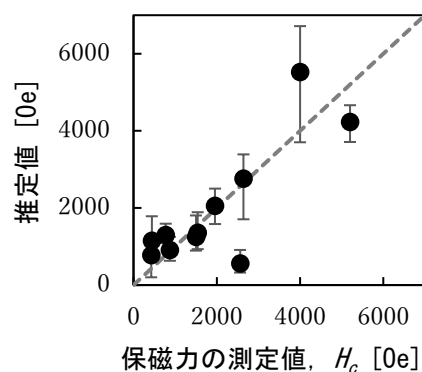


図 2. 保磁力の測定値と推定値の関係

参考文献

- [1] M. Kawaguchi et al., npj Computational Materials 7, 20 (2021).
- [2] D. Wang et al., Advanced Science 7, 2000566 (2020).
- [3] H. Y. Kwon et al., Science Advances 6, eabb0872 (2020).
- [4] 久野ら、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 2022 年 9 月