

確率的磁気トンネル接合のマイクロ磁気モデリング

遠藤聡, Simon John Greaves
(東北大学)

Micromagnetic modelling of stochastic magnetic tunnel junctions

So Endo, Simon John Greaves
(Tohoku University)

はじめに

現代で用いられているバイナリコンピュータ (BN) は認識, 複雑さ, 曖昧さを伴うタスクでは非常に非効率である. この欠点に対処できる一つの手法として確率的コンピュータ (SC) が挙げられる. この SC で用いられるランダムビットを生成するために, 熱揺らぎの影響を大きく受けるという磁気トンネル接合 (MTJ) の特性を利用することにより調整可能な乱数を生成する方法は, ハードウェアコストの観点や設計のしやすさからも期待されている. 本研究では, 垂直磁化, 水平磁化の MTJ について電流密度を変化させたときの磁化反転について, ランダムビットへの活用を目的として考察した.

実験方法

磁化のシミュレーションには LLG 方程式に基づいたマイクロマグネティックモデリング, スピントルクの計算は Slonczewski の方法を用いた. MTJ のモデルは直径 10 nm であり, 厚さは z 軸方向に厚さ 1 nm の磁性ピン層, 1 nm の非磁性層, 2 nm の磁性フリー層で構成した. このとき, 飽和磁化 M_s は 600 emu/cm^3 , 交換結合定数 A は $8.4 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ であり, ピン層の磁気異方性エネルギー K_u は $1.6 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$, フリー層 K_u は $2.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ でおこなった. またダンピング定数 α は 0.02, スピン偏極 η は 0.6, 温度 T は 300 K でおこなった. シミュレーションの試行時間は $1 \mu\text{s}$ である. 電流密度は $-2.0 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ の範囲で変化させながら z 軸方向に印加して行った.

実験結果

Fig. 1 に垂直磁化と水平磁化の容易軸方向の磁化が, -0.5 と 0.5 を通る回数をカウントしたものを示す. 形状異方性エネルギーにより垂直磁化のほうの反転回数が多くなった. Fig.2 に試行時間の中で磁化が正方向を向いている合計時間を示す. 垂直磁化, 水平磁化ともにシグモイド関数で近似できた. また電流が 0 のときに着目すると, 垂直磁化は正方向, 水平磁化は負方向に多く向いていることが確認できた. これはピン層からの磁界の影響であると推察される. さらに Fig.3 に磁化が -0.5 と 0.5 の間の反転にかかる時間の平均を示す. 垂直磁化より水平磁化のほうの反転が速かった.これは水平磁化のほうがノイズが少なく, 直線的に反転しているためと推察される. 講演ではこれらの結果による SC への応用に向けた影響もふまえて報告する.

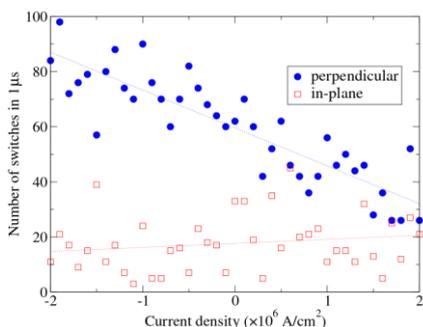


Fig.1 Number of switches

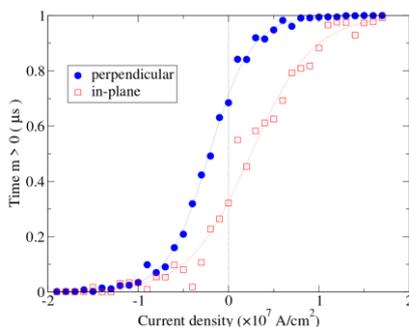


Fig.2 Time $m > 0$

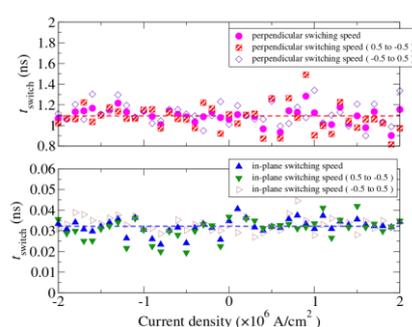


Fig.3 Switching speed (-0.5 to 0.5)

参考文献

- 1) Brandon R et al., IEEE Journal, vol.8, no2, pp173-184, Dec.2022

アンチスキルミオンを用いた XOR 回路のシミュレーション

筑後志宣¹, 山田啓介², 廣畑貴文³, 仲谷栄伸¹

(¹ 電通大, ² 岐阜大, ³ 東北大)

Simulation of antiskyrmion XOR circuit for logic devices

Y. Chikugo¹, K. Yamada², A. Hirohata³ and Y. Nakatani¹

(¹Univ.of Electro-Comm., ²Gifu University, ³Tohoku University)

はじめに

近年、異方的な DMI を持つ材料上にて、スキルミオンの一種であるアンチスキルミオンと呼ばれる磁化構造の出現が確認され、メモリや論理回路への応用が期待されている^{1,2)}。本研究では、論理回路の一種として、アンチスキルミオンを用いた XOR 回路を提案し、その有効性をマイクロマグネティックシミュレーションを用いて確かめた。

シミュレーション概要

450 nm × 600 nm、膜厚が 2.5 nm の長方形薄膜を想定し、格子幅 3.0 nm で離散化したマイクロマグネティックモデルを用いて 2 次元シミュレーションを行った。材料定数は、飽和磁化 $M_s = 580 \text{ emu/cm}^3$ 、交換スティッフネス定数 $A = 1.5 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ 、異方性定数 $K_u = 4.0 \text{ Merg/cm}^3$ 、DMI 定数 $D = 2.0 \text{ erg/cm}^2$ 、損失定数 $\alpha = 0.5$ 、非断熱項 $\beta = 0.5$ 、磁気回転比 $\gamma = -1.76 \times 10^7 \text{ rad/(s} \cdot \text{Oe)}$ とした。

下地膜と反強磁性結合³⁾した領域によってアンチスキルミオンの移動を制限する磁区を作成し、電流速度 50 m/s の電流にてアンチスキルミオンを移動させてシミュレーションを行った。反強磁性結合領域の形状と外部磁界の強度を変えて、XOR 回路が成立する条件を調べた。

結果および考察

XOR 回路として成立する条件において、入力が 01、10、11 の場合の時間経過によるアンチスキルミオンの移動の様子を Fig. 1 に示す。入力が 01 もしくは 10 の場合、アンチスキルミオンは反強磁性結合領域に沿うように移動し、出力経路に侵入した。入力が 11 の場合、出力通路付近で接触したアンチスキルミオンは、磁壁およびお互いの反発を受けて一方は破壊、もう一方が通路から逸れることで出力通路に侵入できなかった。これにより、この回路が XOR 回路として成立することが確認できた。また、本回路にアンチスキルミオン生成器を接続し、下側のアンチスキルミオンのみの 1 入力回路に変更した場合、この回路は NOT 回路としても成立する。加えて、生成器を接続せず、反強磁性結合領域の形状を変えることで、2 入力の OR 回路や AND 回路として成立する条件の存在も確認できた。これらの結果から、以上の回路を用いた任意の論理回路を構築可能である。

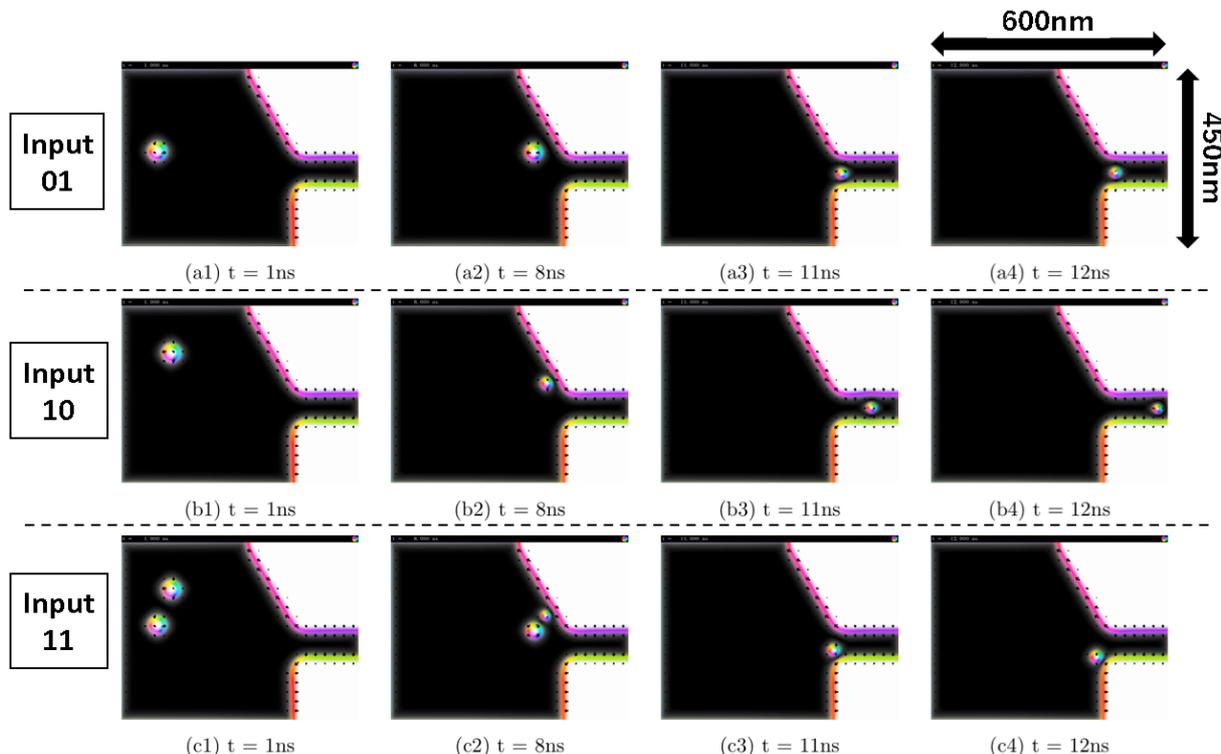


Fig. 1 Time stamps of antiskyrmion motion for the cases of (a1-4) input 01 (b1-4) input 10 (c1-4) input 11.

References

- 1) J. Jena, B. Göbel, T. Ma, *et al.*, *Nat. Commun.* **11**, 1115 (2020).
- 2) A. Mukherjee, D. S. Kathyat and S. Kumar, *Phys. Rev. B* **105**, 075102 (2022).
- 3) K. Inomata, T. Nozaki, N. Tezuka and S. Sugimoto, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 310 (2002).

カイラリティを持つスキルミオンの分割シミュレーション

山田 朔也¹、山田 啓介²、廣畑 貴文³、仲谷 栄伸¹
(¹電通大、²岐阜大、³東北大)

Simulation of Duplication of Skyrmion with Chirality
S. Yamada¹, K. Yamada², A. Hirohata³, Y. Nakatani¹

¹The University of Electro-Communications, ²Gifu University, ³Tohoku University

はじめに

近年、レーストラックメモリや論理回路の情報担体として、渦状の磁化構造を持つスキルミオンの利用が検討されている[1,2]。先行研究では、ブロッホ型スキルミオンのカイラリティの切り替え手法と、そのカイラリティを SOT により判別する手法が報告された[3, 4]。ブロッホ型スキルミオンを論理回路に用いるためには情報を複製する必要があるが、複製方法についての検討はまだなされていない。本研究では、ブロッホ型スキルミオンを電流駆動し、カイラリティを保持したまま分割する手法をシミュレーションを用いて調査した。

計算条件

シミュレーションはマイクロマグネティックモデルを用いて行った。シミュレーションで用いた材料定数は飽和磁化 $M_s = 1600 \text{ emu/cm}^3$ 、異方性定数 $K_u = 16.2 \text{ Merg/cm}^3$ 、交換スティーフネス定数 $A = 1.5 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ 、DMI 定数 $D = 0.54 \text{ erg/cm}^2$ 、磁気回転比 $\gamma = -17.6 \text{ Mrad/(s} \cdot \text{Oe)}$ とした。シミュレーション対象は $640(x) \times 768(y) \times 1.4(z) \text{ nm}^3$ 内に Y 字状に配置した磁性細線とした(Fig. 1)。図中の青色部分は高異方性定数エリアとし、磁性細線は存在するがスキルミオンは入ることができないエリアとした。高異方性定数エリアの異方性定数は $K_{uh} = 81.0 \text{ Merg/cm}^3$ とした。シミュレーションでは Y 字状領域の左端にスキルミオンを配置し、右方へ電流密度 $j = 10 \sim 400 \text{ MA/m}^2$ で電流駆動することにより、Y 字の分岐点でのスキルミオンの分割の有無を調査した。

計算結果

反時計回りのブロッホ型スキルミオンを電流駆動すると、 $j = 25 \text{ MA/m}^2$ 以下のとき高異方性定数エリアの手前で止まったが、 $j = 26 \text{ MA/m}^2$ 以上のときスキルミオンは高異方性定数エリアの分岐点で2つに分断された。このとき上方にはカイラリティを保ったスキルミオンが現れ、下方にはメロンが現れた。特定の条件下で分断されたメロンに対して面内方向の磁界を加えることで、ブロッホ型スキルミオンに復元できることを確認した。

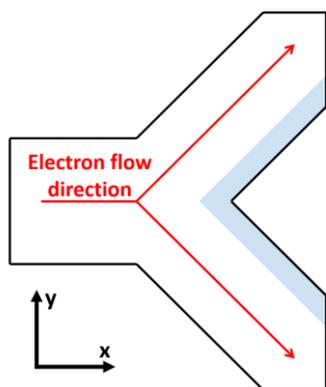


Fig. 1 Illustration of a Y-shaped nanowire with high anisotropy area

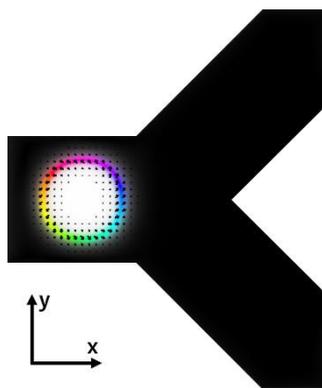


Fig. 2 Initial position of a Skyrmion

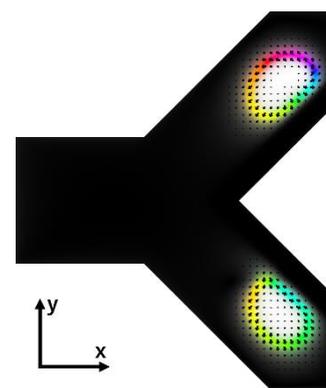


Fig. 3 Appearance of Skyrmion and meron

参考文献

- [1] T. H. R. Skyrme, *Proc. Roy. Soc. Lond.* **A31**,556(1962)
- [2] J. Sampaio, V. Cros, S. Rohart, A. Thiaville, A. Fert, *Nat. Nanotech.*, **8**,839(2013)
- [3] Y. Nakatani, K. Yamada, A. Hirohata, *Sci. Rep.*, **9**, 13475 (2019).
- [4] Y. Nakatani, K. Yamada, A. Hirohata, *Sci. Rep.*, **11**, 8415 (2021).

強磁性薄膜における水素を利用した磁気特性制御

小山知弘^{1,2,3,4}、關憲行¹、千葉大地^{1,2,3,5}

(¹阪大産研、²阪大 CSRN、³阪大 OTRI、⁴JST さきがけ、⁵東北大 SRIS)

Control of magnetic properties using hydrogen in ferromagnetic thin films

T. Koyama^{1,2,3,4}, N. Seki¹, D. Chiba^{1,2,3,5}

(¹SANKEN, Osaka Univ., ²CSRN, Osaka Univ., ³OTRI, Osaka Univ., ⁴JST PRESTO, ⁵SRIS, Tohoku Univ.)

はじめに

スピントロニクスでは一般的に強磁性薄膜が用いられる。界面磁気異方性に由来する垂直磁気異方性[1]や、構造反転対称性が破れた系における界面ラシュバ効果 [2] あるいは界面ジャロシンスキー・守谷相互作用 [3]などが精力的に研究されている。最近では、強磁性2次元材料も注目を集めている。しかし、そうした薄膜材料においては、大気暴露による酸化やプロセスダメージによって磁気特性が劣化してしまうことがしばしば指摘される [4]。この問題を解決するために、我々は積層薄膜に対して適用可能な新しいデバイスプロセスとして、水素 (H₂) アニール効果の研究を進めている。

実験方法

本研究では、Ta(2.0 nm)/Pt(2.5)/Co(1.4)/MgO(3.4)多層膜構造を熱酸化シリコン基板上にスパッタリング法で作製した。その後、Ar/H₂混合ガスを導入した真空チャンバー内で膜をアニールした。アニール温度と時間はそれぞれ 150°Cと 1 時間である。また、Co 層まで製膜した後に膜を大気暴露し酸化させ、その後金属キャップ層を積層した構造における H₂ アニール効果についても調べた。

実験結果

図 1 に単位面積あたりの磁気モーメント Mst の垂直外部磁場 H_{\perp} 依存性を示す。製膜直後の asdepo 膜では強磁性的な振る舞いが観測されないが、これは MgO 層を高いスパッタパワー (120 W) で製膜したため Co 層に過度の酸化ダメージが入り、結果として磁性が消失したためである。一方、H₂ アニールを行った膜では明瞭なヒステリシスが観測される。この結果は、Co 層が過剰に酸化ダメージを受けた Pt/Co/MgO 構造において、H₂ アニールによって強磁性状態が回復することを示している。参照実験として H₂ を導入せず真空アニールを行った膜で測定を行ったが、この場合 $Mst - H_{\perp}$ カーブに変化は見られなかった。したがって、観測された磁気特性の変化に対して H₂ が重要な役割を果たしていると考えられる。講演では、キャップ層の影響についても述べる予定である。

謝辞

本研究は科研費挑戦的研究(萌芽)、JST さきがけ、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業、スピントロニクス学術連携研究教育センターの支援を受けて行われた。

参考文献

[1] S. Ikeda *et al.*, *Nat. Mater* **9**, 721 (2010). [2] I. M. Miron *et al.*, *Nat. Mater* **9**, 230 (2010). [3] T. Koyama *et al.*, *Sci. Adv.* **4**, eaav0265 (2018). [4] H.-K. Gweon *et al.*, *Sci. Rep.* **8**, 1266 (2018).

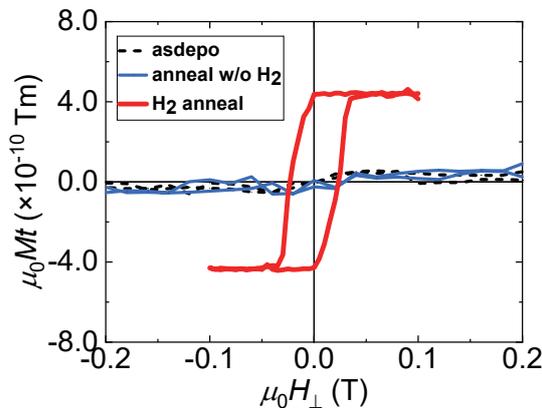


Figure 1: Magnetic moment per unit area Mt as a function of perpendicular field H_{\perp} . The results for the films annealed under different conditions (asdepo, annealed without H₂ flow, and annealed in H₂ gas) are shown.

傾斜レジスト膜とイオン照射法を利用した磁気特性変調

大島 大輝, 加藤 剛志
(名古屋大学)

Modification of magnetic properties by resist mask with graded thickness and uniform ion irradiation

Daiki Oshima, Takeshi Kato
(Nagoya Univ.)

はじめに

膜面内方向の磁気特性の変調によりスピントロニクスデバイスに新たな機能性が付与されることが報告されている^{1,2)}。局所イオン照射法は磁性薄膜の磁気特性を局所的にコントロールできる技術であるが、今回、グレースケール露光により形成した傾斜レジスト膜を通してイオン照射することにより、磁性薄膜の磁気異方性を連続的に変調する技術を提案する。

実験方法

異常ホール効果測定により局所的な磁気特性を評価するため、マグネトロンスパッタ法により作製した [Pt(0.9 nm) / Co(1.1 nm) / Ta(0.4 nm)]₃ 積層膜をフォトリソグラフィおよび Ar イオンミリングによりホールバー形状に加工した後、再度レジストを塗布し、マスクレス露光機 DL-1000 を用いてホールバーにかかるようにグレースケール露光を実施した。傾斜レジスト膜形成後の光学顕微鏡像を Fig. 1 に示す。このデバイスに Kr⁺イオン照射を一様に照射し、局所的な磁気特性の変調を試みた。なお、シミュレーションから、100 nm 程度のレジストを貫通できるエネルギーである 100 keV で照射した。

実験結果

Fig. 2 (a)に Fig. 1 の点線に沿って計測したレジストマスクの高さプロファイルを示す。横軸の原点はパターンの中央である。図では 2 つのパターンのプロファイルを示しており、1 つはレジスト膜厚に勾配を設けたもの、もう 1 つは勾配を設けていないものである。レジスト膜厚に勾配を設けた試料では場所ごとにレジスト厚が異なっており、グレースケール露光により傾斜レジスト膜が形成されたことがわかる。-20 ~ +20 μm の位置に設けたホールクロススの異常ホール効果測定の結果から見積もった実効異方性磁界 H_{keff} の値を Fig. 2 (b)に示す。Pt/Co/Ta はイオン照射量に対し単調に H_{keff} が減少することがわかっており、一様な照射に対しレジスト厚が薄いほうが Pt/Co/Ta 積層膜へのイオン照射量が多くなることが予想される。実際、 H_{keff} は照射前よりも低下しており、レジスト厚が薄くなるほど H_{keff} が低下している様子が観測される。今回作製した試料の H_{keff} の勾配は 25 Oe/ μm と見積もられ、本手法により非常に大きな面内磁気特性変調が可能であることが示された。

参考文献

- 1) G. Yu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 102411 (2014).
- 2) S. Li *et al.*, Nanotech. **28**, 31LT01 (2017).

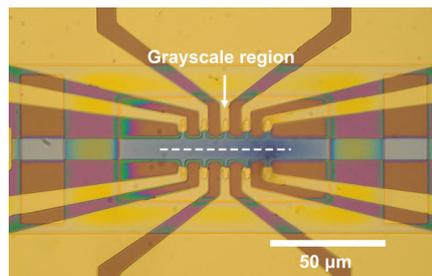


Fig. 1 Grayscale lithography over Hall-bar structures

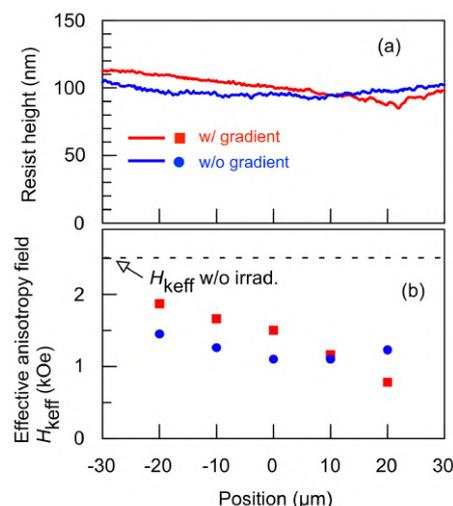


Fig. 2 (a) Line profiles of resist height in the grayscale region. (b) Position dependences of effective anisotropy field H_{keff} .

3次元磁気メモリのためのCoPt電析膜の成長過程の解析

高村陽太*, 黄童雙*, Md. M. Hasan**, 田中佑哉*, 齋藤美紀子**, 中川茂樹*
(*東京工業大学, **早稲田大学)

Analysis of deposition process of electrodeposited CoPt films for three dimensional magnetic memory
Yota Takamura*, Tongshuang Huang*, Md Mahmudul Hasan**, Yuya Tanaka*,
Mikiko Saito**, Shigeki Nakagawa*
(*Tokyo Tech, **Waseda Univ.)

磁性ナノ円柱を高密度に配置した3次元磁気メモリは次世代の情報ストレージメモリとして期待されている¹⁾。この3次元磁気メモリの磁性ナノ円柱をアスペクト比を高く作製するためには、3D NAND フラッシュのエッチング技術で形成したナノホールの中にめっき技術で磁性層を埋め込むことが有効である。これまで我々はめっき法で薄さ7 nmのCoPt薄膜を形成し、高い矩形性と垂直磁気異方性を持つことを示してきた²⁾。また、スパッタで形成したPt層からCoPtめっき膜にスピンの注入され、磁化の向きが変化したことも実証し、めっき膜に対する磁化反転技術の適用可能性を示した³⁾。また、メンブレンを用いて直径100 nm、高さ数十μmの磁性ナノピラーも形成した⁴⁾。このような背の高い磁性柱においては、電極界面から遠く離れた層の成長過程や磁化特性も重要である。本研究ではCoPt薄膜の電析において成膜時間を延ばし、数nm-数百nmまでの領域における単一組成薄膜の成長過程について考察を行った。

CoPt膜は、スパッタで形成したPt111高配向膜の上に定電流パルス法により電析した。成膜時間は数秒から120秒の間で変化させた。その他の詳細な電析条件は文献2と同じである。

Fig. 1に電析時間と単位面積あたりの飽和磁化 M_{st} の関係を示す。傾きが途中(約40 nm)で変化する線形的な増加傾向を示した。断面透過型電子顕微鏡観察から、30秒間電析した試料の膜厚は7 nmだったのに対し、60秒のものは33 nmだったことがわかった。成膜レートが成膜途中で変化したと考えられ、 M_{st} の傾きの変化は、電析速度が上がったことに対応していることで説明できる。

これらの試料に対して、XRDによる結晶構造解析を行った。Fig. 2にhcp相CoPt(002)とCoPt(101)近傍の回折パターンを示す。(002)回折は厚さ7 nmの試料において単一だったが、33 nm以上の試料では広角側にも現れた。これは、7 nmまではPt111面からの格子ひずみを引きずった結晶が成長しているが、その後格子緩和が起こり、33 nm以上ではひずみ緩和された結晶が成長していると解釈できる。また、33 nm以上の試料では(101)面の回折も現れており、緩和現象と何らかの関係があると考えられる。

本研究の一部は、JST CREST JPMJCR21C1の支援を受けた。東京工業大学オープンファシリティーセンターや文部科学省マテリアル先端リサーチインフラの技術支援を受けた。

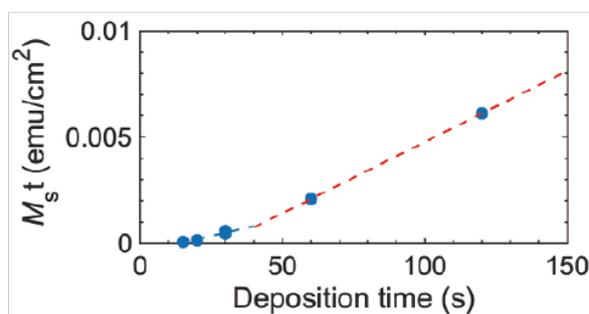


Fig. 1 Magnetization per unit area versus time.

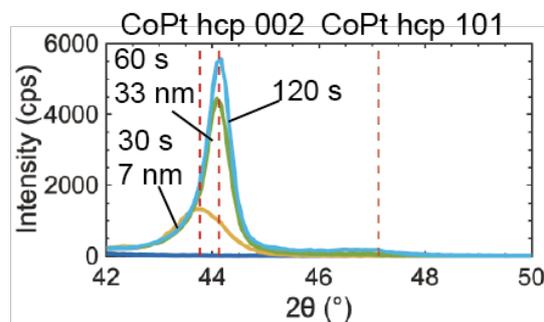


Fig. 2 XRD patterns

参考文献

- 1) Y.M. Hung, et al., J. Magn. Soc. Jpn., **45**, 6 (2021), doi: [10.3379/msjmag.2011R002](https://doi.org/10.3379/msjmag.2011R002).
- 2) T. Huang, et al., IEEE Trans. Magn. **59**, 1301005, 2023, doi: [10.1109/TMAG.2023.3298911](https://doi.org/10.1109/TMAG.2023.3298911).
- 3) T. Huang, et al., ICM, Italy, 6.02_264, 2024.
- 4) Md.M. Hasan, et al., Intermag, Sendai, Japan, 2023, 1-5, doi: [10.1109/INTERMAG50591.2023.10265078](https://doi.org/10.1109/INTERMAG50591.2023.10265078).