

マイクロ波アシスト磁化反転における熱活性の影響

水谷聡志^{1,2}、菊池伸明²、畑山正寿^{2,3}、島津武仁³、岡本聡^{2,4}

(¹東北大工、²東北大多元研、³東北大学際研、⁴東北大 CSIS)

The effect of thermal activation on microwave assisted magnetization switching

S. Mizutani^{1,2}, N. Kikuchi², M. Hatayama^{2,3}, T. Shimatsu³, S. Okamoto^{2,4}

(¹Eng. Dept. Tohoku Univ., ²IMRAM Tohoku Univ., ³FRIS Tohoku Univ., ⁴CSIS Tohoku Univ.)

はじめに

マイクロ波アシスト磁化反転 (Microwave assisted magnetization switching : MAS) においては, GHz 帯のマイクロ波磁場により磁化の歳差運動を励起して反転磁場を低減させる. その反転磁場はマイクロ波磁場周波数に比例して低減し, 臨界周波数においてアシスト効果が消失する. MAS における実効的なエネルギー障壁高さは, 直流磁場やマイクロ波磁場の周波数・振幅によって複雑に変化する^{1,2}. 本研究では, Co/Pt 多層膜ナノドットアレイを用いて様々な条件で MAS の際の緩和時間を測定することで MAS への熱活性の影響について調べた.

実験方法

試料は, 熱伝導率の高い Si 基板上にマイクロ波磁場印加用の高周波線路を作製し³, その上に絶縁層を介して異常ホール効果測定用の電極層及び Co/Pt ドットアレイを作製した. ドット直径は $d = 70, 200$ nm とした. MAS 実験は電磁石により膜面垂直方向に直流磁場, 面内方向にマイクロ波磁場を印加し, 異常ホール効果により磁化状態を検出した. マイクロ波磁場は幅 $t_{\text{pulse}} = 20$ ns, 周期 $t_{\text{period}} = 2 \times 10^{-8} - 2 \times 10^{-1}$ s のパルス波として印加した.

実験結果

Fig.1 に直径 $d = 70$ nm の Co/Pt ドットアレイの保磁力のマイクロ波周波数依存性を実効緩和時間 $t_{\text{eff}} = 10^{-6} - 10$ s について示す. マイクロ波磁場振幅は $\mu_0 h_{\text{rf}} = 38$ mT である. 実効緩和時間 t_{eff} は測定時間中にマイクロ波磁場を印加した時間とし, $t_{\text{eff}} = 10 \times (t_{\text{pulse}}/t_{\text{period}})$ と定義した. いずれの t_{eff} においても周波数の増加に伴って保磁力が低減し, 明確なアシスト効果が得られた. 周波数に対する保磁力低下の傾きには t_{eff} に対して大きな変化は見られない. 同じ周波数で比べると t_{eff} の増加に伴い保磁力は低減し, 臨界周波数は高周波側へとシフトした. Fig.2 に異方性磁場 H_k および共鳴周波数 $2\pi/|\gamma|$ で規格化した直流磁場 H_{dc} , マイクロ波磁場周波数 f_{rf} に対して計算した実効的なエネルギー障壁高さ $\Delta E/E_0$ を示す. マイクロ波磁場振幅は $H_{\text{rf}}/H_k = 1.8 \times 10^{-2}$ である. エネルギー障壁高さ $\Delta E/E_0$ と緩和時間 t_{eff} は 1 対 1 に対応する. そのため, Fig.1 中の t_{eff} を一定として測定した結果は $\Delta E/E_0$ の等高線を実験的に求めていることに相当し, t_{eff} の増加に伴う保磁力の低減と臨界周波数の高周波化は熱揺らぎによって説明できることが分かる.

謝辞 本研究の一部は ASRC の支援を受けて行われた.

参考文献

- 1) H. Suto et al., Phys. Rev. B. **91**, 094401 (2015).
- 2) N. Kikuchi et al., Phys. Rev. B **105**, 054430 (2022).
- 3) N. Kikuchi et al., J. Appl. Phys. **126**, 083908 (2019).

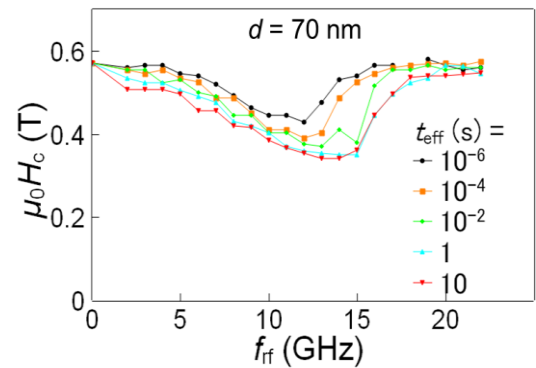


Fig. 1 Microwave field frequency f_{rf} dependence of coercivity of Co/Pt nanodot array with diameter $d = 70$ nm for $t_{\text{eff}} = 10^{-6} - 10$ s.

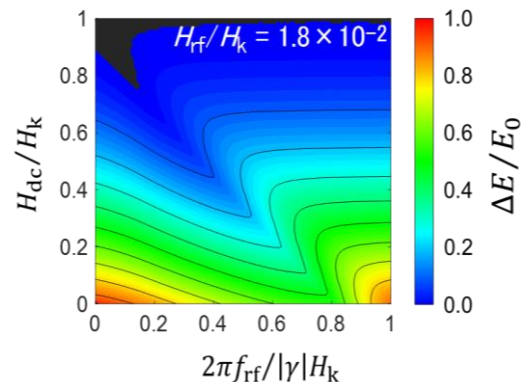


Fig. 2 The calculated effective energy barrier height $\Delta E/E_0$ as functions of microwave field frequency $2\pi f_{\text{rf}}/|\gamma|H_k$ and dc field H_{dc}/H_k for microwave field amplitude $H_{\text{rf}}/H_k = 1.8 \times 10^{-2}$.

磁性膜厚のマイクロ波アシスト磁化反転挙動への影響

菊池伸明¹、佐藤勝成¹、畑山正寿^{1,2}、島津武仁^{2,3}、岡本聡^{1,4}

(¹ 東北大多元研、² 東北大学際研、³ 東北大通研、⁴ 東北大 CSIS)

Effect of film thickness on microwave assisted switching behavior

N. Kikuchi¹, K. Sato¹, M. Hatayama^{1,2}, T. Shimatsu³, S. Okamoto^{1,4}

(¹IMRAM Tohoku Univ., ²FRIS Tohoku Univ., ³RIEC Tohoku Univ., ⁴CSIS Tohoku Univ.)

はじめに

マイクロ波アシスト磁化反転 (Microwave Assisted Switching: MAS) は超高密度磁気記録を実現する技術として期待されている。すでにドライブとしての研究も進められている一方で、特にグラニューラ媒体での実験での報告は少なく膜構造の影響などについて未解明な点も多い。我々のグループではこれまでに、膜厚 15 nm の CoCrPt-SiO₂ グラニューラ薄膜において MAS 実験を行い、そのマイクロ波磁場振幅や周波数依存性は熱揺らぎを考慮することにより説明できることを報告している[1]。今回は、膜厚の異なる試料を用いて MAS 実験を行い、熱揺らぎの影響を調べることにした。

実験方法と結果

ノンドープの Si ウェハ上幅 1 μm のマイクロ波磁場印加用 Au 線路を作製し、厚さ 100 nm の SiO_x 絶縁層を形成した。その上に下地層・保護層とともに CoCrPt-30vol.%SiO₂(*t*) グラニューラ磁性膜を製膜した。*t* は膜厚で 10 および 15 nm である。Au 線路上の磁性膜を、電子線リソグラフィおよび Ar イオンエッチングにより長さ 3 μm 、幅 0.6 μm の矩形状に加工した。その後、下地層を磁気特性評価のための異常 Hall 効果 (AHE) 測定用の電極形状に加工した。磁化曲線の測定は膜面に垂直な磁場を印加して行い、マイクロ波磁場は、Au 線路に GHz 帯の高周波電流を流すことにより膜面内に発生させた。

Fig. 1 にマイクロ波磁場を印加しない場合と、マイクロ波磁場振幅 $\mu_0 h_{\text{rf}} = 48 \text{ mT}$ 、周波数 $f_{\text{rf}} = 25 \text{ GHz}$ において測定した AHE 曲線を示す。膜厚は (a) 10 nm、(b) 15 nm であり、磁場の掃引方向が $- \rightarrow +$ の曲線だけを表示してある。マイクロ波磁場を印加しない場合の保磁力は $t = 10 \text{ nm}$ の試料で低下しているが、磁気異方性定数には大きな差がなく熱揺らぎの影響が主である。いずれの試料においても明瞭なマイクロ波によるアシスト効果が見えているが、この周波数においては、 $t = 10 \text{ nm}$ の試料の方がより大きなアシスト効果が得られ 0.2 T にも達する。Fig. 2 にこれらの試料の保磁力のマイクロ波磁場周波数依存性を示した。マイクロ波磁場振幅は $\mu_0 h_{\text{rf}} = 48 \text{ mT}$ で一定である。いずれの試料でも低周波領域ではマイクロ波磁場の周波数に伴いほぼ線形に保磁力が低下したが、その傾きは試料による差異は見られない。いずれの試料でも $f_{\text{rf}} = 20 \text{ GHz}$ 以上では周波数に対する反転磁場の低下が緩やかになるが、 $t = 10 \text{ nm}$ の試料の方がより高周波までアシスト効果が持続している。これらの挙動は、マイクロ波磁場下でのエネルギー障壁の計算結果から予測されるもので説明できる[1, 2]。

参考文献

[1] N. Kikuchi et al., Phys. Rev. B 105, 054430 (2022).

[2] H. Suto et al., Phys. Rev. B. 91, 094401 (2015).

謝辞 本研究の一部は ASRC の支援を受けて行われた。

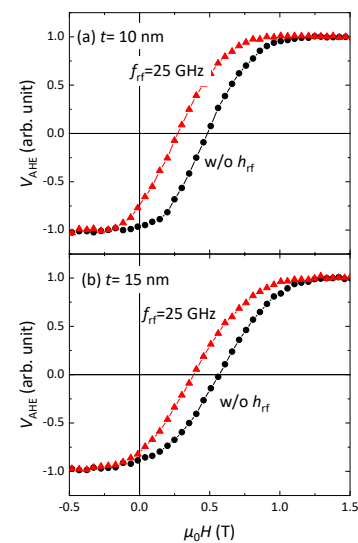


Fig. 1 AHE curves of CoCrPt-SiO₂ media measured without and with microwave field of $f_{\text{rf}} = 25 \text{ GHz}$ and $\mu_0 h_{\text{rf}} = 48 \text{ mT}$.

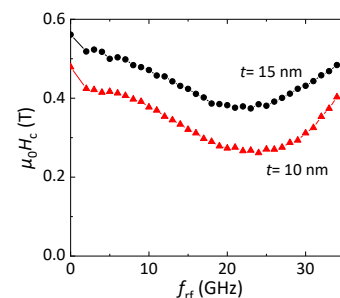


Fig. 2 Coercivity of CoCrPt-SiO₂ media as a function of microwave field frequency. ($\mu_0 h_{\text{rf}} = 48 \text{ mT}$.)

近似計算手法を用いたマイクロ波アシスト磁化反転磁界の推定

川上高輝¹, 牙暁瑞², 田中輝光¹

(¹九州大学大学院システム情報科学府, ²九州大学マス・フォア・インダストリ研究所)

Estimation of microwave-assisted magnetization switching field by energy approximation

K. Kawakami¹, X. Ya², and T. Tanaka¹

(¹ISEE Kyushu University, ²IMI Kyushu University)

はじめに

近年、磁気記録の分野において超高密度記録を実現する記録方式の一つとしてマイクロ波アシスト磁気記録(MAMR)が注目されている¹⁾。直流磁界の印加方向が磁化容易軸に反平行の場合、マイクロ波のアシスト効果は理論的に定式化されており^{2,3)}、磁化容易軸方向に大きさ $\omega/\gamma H_k$ の磁界が印加されること等価であることが知られている。一方で、直流磁界の印加方向が磁化容易軸に非平行の場合、マイクロ波アシスト磁化反転(MAS)の解析的な推定は困難であり、磁化反転閾磁界 h_{sw} のような磁化反転条件は定式化されていないためマイクロマグネティックシミュレーションを用いる必要がある。本研究では直流磁界の印加方向が磁化容易軸に非平行な場合の h_{sw} を近似的に推定した。

近似計算手法

本研究における磁化および磁界の近似モデルを Fig. 1 に示す。磁化容易軸は z 軸方向で直流磁界 h_{DC} は z 軸に対して θ の角度で印加され、円偏波交流磁界 h_{AC} は面内方向に角周波数 ω で印加されると仮定する。なお、各磁界は異方性磁界 H_k で規格されている。 φ は磁化の z 軸に対する歳差運動軸の傾き角を示し、 φ_1, φ_2 は磁化の x 成分がそれぞれ最大・最小をとるときの z 軸に対する磁化の傾き角を示す。我々の先行研究から本モデルにおける x 方向、 z 方向の各磁界成分(h_x, h_z)は Eqs. (1)で近似的に表され、 $h_{DC} = h_{sw}$ のとき、アステロイド曲線 Eq. (2)におおよそ一致する。

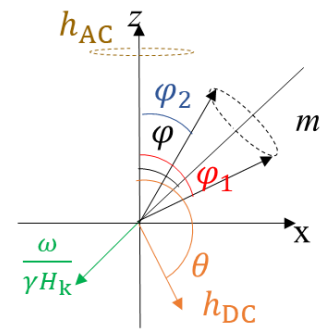


Fig. 1. Schematic of the equivalent field

$$h_x = h_{DC} \sin \theta - \frac{\omega}{H_k \gamma} \sin \varphi + h_{AC}, h_z = h_{DC} \cos \theta - \frac{\omega}{H_k \gamma} \cos \varphi \quad \text{Eqs. (1)}$$

$$h_x^2 + h_z^2 = 1 \quad \text{Eq. (2)}$$

上式を用いて h_{sw} を近似的に求めた。 φ は φ_1 と φ_2 の平均値として近似的に取り扱った。なお、 φ_1 および φ_2 は実効磁界を考慮したエネルギー平衡条件($\partial E/\partial \varphi_{1,2}=0$)から推定される。なお E は $\omega/\gamma H_k$ を考慮したゼーマンエネルギーと異方性エネルギーの和を示す。

近似計算手法

本近似手法とマイクロマグネティックシミュレーションそれぞれから得られる h_{sw} のマイクロ波周波数依存性を Fig. 2 に示す。 h_{AC} は $h_{AC} = 0.05$ とした。このときの近似計算値とマイクロマグネティックシミュレーションの結果との差は最大で約 2%程である。

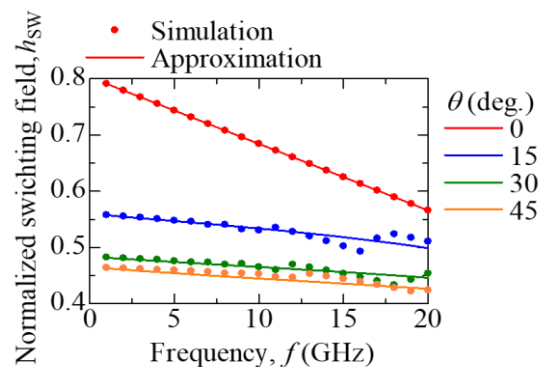


Fig. 2 Comparison between approximation and micromagnetic simulations.

参考文献

- 1) Jian-Gang Zhu, et al., IEEE Trans. Magn., Vol. 44, pp.125-131 (2008).
- 2) G. Bertotti, et al., Phys. Rev. Lett., Vol. 86-4, pp. 724-727 (2001).
- 3) S. Okamoto, et al., J. Appl. Phys., Vol. 107, 123914 (2010).

3次元熱アシスト磁気記録方式における記録層の膜厚と層間のスペーシングの検討

前田航弥、赤城文字

(工学院大学 大学院 工学研究科 電気・電子工学専攻)

Study of thicknesses of recording layers and spacing between them for 3D heat-assisted magnetic recording

K. Maeda, and F. Akagi

(Graduate School of Electrical Engineering and Electronics, Kogakuin Univ.)

はじめに

近年、磁気ディスク装置では、テラビット級の高記録密度化のために、熱アシスト磁気記録 (heat assisted magnetic recording: HAMR)方式の研究・開発が進んでいる。また、HAMR とビットパターン媒体 (bit-patterned media : BPM)を組み合わせた heated-dot magnetic recording : HDMRが 5-10 Tb/in²の記録密度を達成できるとして提案されている。しかし、ドットサイズの超常磁性限界を考慮すると新たな記録方法が必要になる。本研究では、記録層を二層に増やした 3次元熱アシスト磁気記録 (3D HAMR)方式の検討を行っている[1]。本報告では、記録層の膜厚、及び記録層間のスペーシングと記録特性との関係について記録層間に働く静磁界に着目して検討を行った。

計算方法及び計算モデル

3D HAMR の記録過程は、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式を解いて求めた。媒体モデルは、ドット径 8 nm の円柱の磁性ドットが、ドット間隔 16 nm で規則的に並んでいると仮定した。上層ドットの膜厚は 4 nm、下層ドットの膜厚は 3 nm とした。上層のキュリー温度を 550 K、下層のキュリー温度を 650 K とした。記録は、DC イレーズ後まず下層に 1,0 の記録を行い、その後上層に 0,1 の記録を行った。記録の評価はビットエラーレート (BER) (記録トラックエラードット数 / 記録トラックの総ドット数) × 100 % を用いた。

計算結果

図 1 は、スペーシング 3 nm において、下層を上昇温度 250 K で記録した後、上層の記録を行った時の BER である。これより、上層の BER は上昇温度 170 から 175 K で 0% となったが、下層は 150 K を超えると温度上昇とともに増大した。図 2 は、下層の熱揺らぎのみを除去して上層の記録を行った結果である。これより、下層の BER は全ての条件で 0% となったことから、下層 BER はキュリー温度より低温でも熱揺らぎの影響を受けることがわかった。上下層間の静磁界との関係については発表当日報告する。

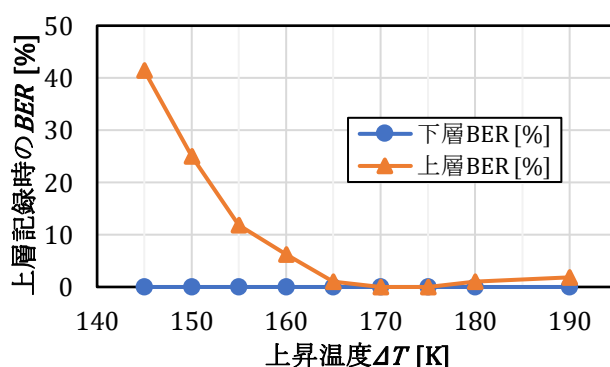
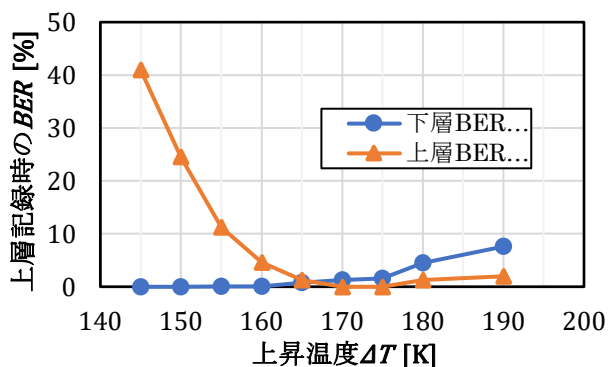


図 1. 上層記録後の BER の上昇温度依存性

図 2. 下層の熱揺らぎを除去した時の BER の上昇温度依存性

謝辞：本研究で用いたプログラムは(株)日立製作所から貸与されております。

参考文献

- 1) F. Akagi, Y. Sakamoto, and N. Matsushima, 2021 IEEE International Magnetic Conference, (2021) pp. 1-5.