

急速熱処理 $L1_0$ -FePt 形成における窒化膜下地の Fe dead 層低減効果

三吉啓介¹⁾, 田中万裕¹⁾, 二川康宏¹⁾, 塚本新²⁾

日本大学大学院理工学研究科¹⁾, 日本大学理工学部²⁾

Reduction of Fe dead layer with nitrided under layer in formation of $L1_0$ -FePt fabricated by Rapid Thermal Annealing

K. Miyoshi¹⁾, M. Tanaka¹⁾, Y. Futakawa¹⁾, and A. Tsukamoto²⁾

Graduate School of Science and Technology Nihon Univ.¹⁾, College of Science and Technology, Nihon Univ.²⁾

はじめに

高密度磁気記録媒体作製に向けて、我々は平坦な熱酸化 Si 基板上 Pt/Fe 多層薄膜に対し、急速昇降温熱処理 (Rapid Thermal Annealing: RTA, Rapid Cooling Process: RCP) のみを施すことより $L1_0$ -FePt ナノ磁性微粒子群の形成を報告している¹⁾。また初期積層膜厚 1.88 nm, 積層組成比 $Fe_{62}Pt_{38}$ にて形成した微粒子群は基板面垂直方向に 40 kOe 以上の高い保持力 H_c を示しており, Fe-熱酸化 Si 界面における磁性に寄与しない Fe dead 層の存在により Fe の実効的組成が減少方向へシフトしたことが考えられる²⁾。そこで Fe dead 層の低減を図り, 酸素を含まず, かつ RTA 過程での熱的条件への影響の少ない材料として, 窒化物であり比熱, 熱伝導率等の熱物性が SiO_2 とほぼ同等である SiN 下地層を選択した。形成する FePt 粒子の形態及び磁気特性から Fe dead 層の低減についての検討を報告する。

実験方法

平坦な熱酸化 Si 基板上に DC・RF マグネトロンスパッタ法により積層組成比 $Fe_{50}Pt_{50}$ として Pt (1.06 nm) / Fe (0.82 nm) / SiN (t nm) / sub. ((a) $t = 0$, (b) 5, (c) 60, (d) 120) の膜構成で積層した。これらの薄膜に対し, 真空炉にて赤外線ランプ照射による目標到達温度約 700 °C まで約 180 °C/sec の RTA, 直後 N_2 ガス流入による RCP を施した。作製した試料の観察に透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope: TEM), 磁化曲線の測定に振動試料型磁力計を用いた。

実験結果

形成した粒子の形態には大きな下地依存性が見られた。Fig. 1 に (a) - (d) の条件にて作製した各試料の面内明視野 TEM 像と平均粒径 D_a , 粒子数密度 N_p を示す。(a), (b) にて孤立ナノ微粒子群の形成を確認した。(c), (d) にて粒子同士が結合した形態, (d) においては網目状構造を確認した。Fig. 2 に (a) - (d) で作製した各試料の室温における基板面垂直方向への磁場印加条件の磁化曲線, Fig. 3 に得られた磁化曲線の飽和磁化 M_s , 保磁力 H_c を示す。Fig. 2, 3 から, SiN 下地を用いることにより FePt の M_s が増大する傾向を示した。よって Fe-熱酸化 Si 界面における Fe dead 層が SiN 下地を用いることで減少し, 低減効果の存在が示唆された。また SiN 下地の導入により, 表面モルフォロジーに大きな変化を生じた。これは界面状態の変化を示唆するものと考えられる。一方, いずれの試料においても $L1_0$ -FePt に起因し発現したと考えられる高い H_c を示したが, (d) は相対的に著しく減少した。(d) は粒子結合した網目状構造であり, 磁壁移動を含む磁化反転モードに変化し H_c が減少したものと考えられる。

謝辞

本研究の一部は情報ストレージ研究推進機構の助成および文部科学省私立大学戦略的研究基盤支援事業 (S1311020) の助成により行った。

参考文献

- 1) A. Itoh, A. Tsukamoto, S. Okame and K. Mizusawa: *J. Magn. Soc. Jpn.* 36, 62-65(2012).
- 2) Masayuki Imazato, Aki Ogasaara, and Arata Tsukamoto: MORIS2015, Penang, Malaysia, Tu-P-12, (2015).

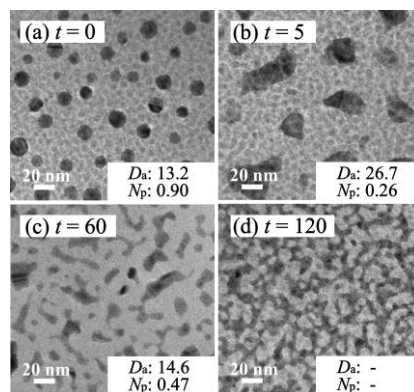


Fig. 1 TEM planer view images of FePt (a) on SiO_x , (b) - (d) on $SiN(t = 5, 60, 120$ nm), average FePt grain diameter D_a nm, and areal density of grains N_p T particles / inch².

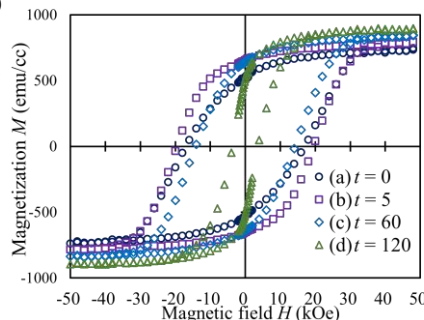


Fig. 2 M-H loops of FePt (a) on SiO_x , (b) - (d) on $SiN(t = 5, 60, 120$ nm) at 300 K.

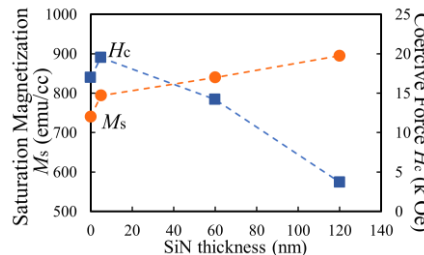


Fig. 3 Saturation Magnetization M_s and Coercive Force H_c of FePt (a) on SiO_x , (b) - (d) on $SiN(t = 5, 60, 120$ nm).

ナノ凹部基板を用いた多段階粒子形成による FePt 表面被覆率増大

田中万裕¹⁾, 三吉啓介¹⁾, 塚本新²⁾

日本大学大学院理工学研究科¹⁾, 日本大学理工学部²⁾

Increase of FePt particles surface coverage by multiple particles nucleation with nano-template substrate

Masahiro Tanaka¹⁾, Keisuke Miyoshi¹⁾ and Arata Tsukamoto²⁾

(Graduate School of Science and Technology Nihon Univ.,¹⁾ College of Science and Technology, Nihon Univ.,²⁾)

はじめに 高密度磁気記録媒体の作製に高い熱安定性を有する FePt 材料での粒子群形成が多く研究されている。我々はこれまで数 nm 厚の Pt/Fe 薄膜に対してランプ光照射による急速昇温熱処理 (RTA: Rapid Thermal Annealing) および目標温度到達後に窒素流入による急速降温を行うことで高い磁気異方性を有する $L1_0$ -FePt ナノ磁性微粒子群の作製を報告している^{1),2)}。但し, 本手法における課題点として, 1 度のプロセスのみでは FePt 微粒子群の粒子数密度 N_p [particles/inch²] および粒子の基板表面被覆率 C_s [%] は初期の Pt/Fe 積層膜に対し異なる依存性を有するため²⁾, 同時に高い値を達成することは難しい (Fig.1. I)。この課題に対して多段階の粒子形成を経ることで, 高粒子数密度を保ちつつ表面被覆率の向上が期待されることを報告している³⁾。本報告では一回目に Pt のみの高密度粒子形成を行う多段階粒子形成法および自己組織化現象を利用し形成した孔径~7 nm の凹部が周期配列した構造を有する基板を用いることで FePt 粒子群の N_p とともに C_s 向上の検討を行った (Fig.1. II)。

実験方法 Fig.1 (II)の手順にて FePt 粒子群形成を行う。1.0 nm の Pt 薄膜を DC マグネトロンスパッタ法にて表面熱酸化 Si 基板, ナノ凹部構造を有する基板上に成膜を行う。作製した Pt 薄膜を $<2.0 \times 10^{-3}$ Pa の真空チャンバー中で昇温速度 160 °C/sec., 最高到達温度~600°C の RTA を行い Pt 粒子群を作製した。次に, 作製した Pt 粒子群上に Pt (1.0 nm)/Fe (1.0 nm) の連続多層薄膜を追加成膜し, 再度同様の RTA を行った。作製した試料の観察には走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) を用いて観察を行った。

結果・考察 Fig.2 に作製した Pt 微粒子群の表面 SEM 像を示す (b: SiO₂/Si sub. c: nano-template sub.)。いずれの基板でも粒子の C_s は 30% 程度, N_p は 3 T particles/inch² 近い密度を得た。Fig.3 に追加成膜, RTA 処理後の表面 SEM 像を示す。これまで 1 回の RTA プロセスで作製した FePt 粒子群 (Fig.1: a) の C_s は ~20% であったのに対し, 多段階で粒子形成を行うことで C_s は 40% 以上, N_p は ~2.3 T particles/inch² と大幅に増大した。さらにナノ凹部基板を利用することで N_p , C_s ともに増大が可能であることを示した。以上の結果より, 多段階の粒子形成に加えナノ凹部を有する基板を用いることで粒子結合を抑制しつつ FePt 粒子群の C_s の増大が可能であることを示した。

謝辞: 本研究の一部は情報ストレージ研究推進機構, 文部科学省私立大学戦略的研究基盤支援事業 (S1311020) の助成により行ったものである。

参考文献

- 1) Y. Itoh, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43, 8040-8043 (2004).
- 2) J. Tsukioka, T. Ubana, A. Tsukamoto and A. Itoh., *J. Magn. Soc. Jpn.* Vol.38, No.3-2, pp.143-146 (2014).
- 3) A. Ogasawara, J. Tsukioka, M. kato and A. Tsukamoto., *J. Magn. Soc.* Vol 38, 2pA-8, (2014).
- 4) M. Imazato, A. Ogasawara and A. Tsukamoto. *ICM*, p. 1493(2015).

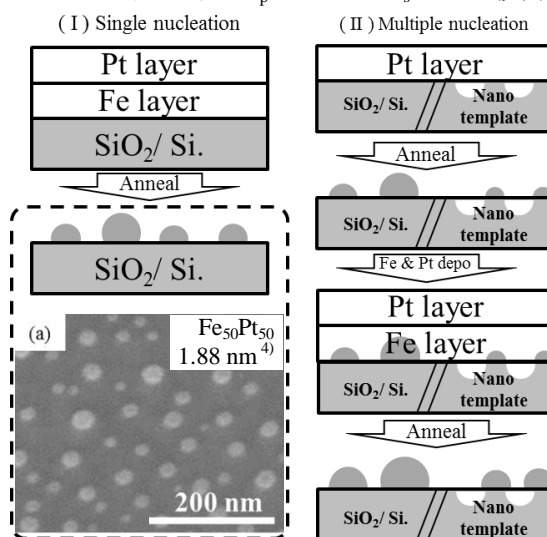


Fig.1 FePt formation procedure.

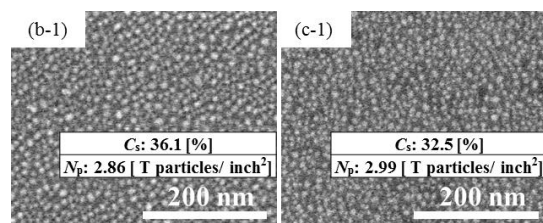


Fig.2 SEM planer view images of Pt particles of each samples.

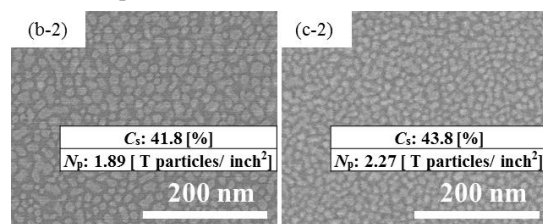


Fig.3 SEM planer view images of FePt particles of each samples.

急速昇降温熱処理法によるナノシリカ凹凸基板上的での FePt 孤立微粒子群形成密度および保磁力の組成比依存性

牧野哲也¹⁾, 二川康宏¹⁾, 塚本新²⁾

日本大学大学院理工学研究科¹⁾, 日本大学理工学部²⁾

Compositional dependency of areal density of grains and coercivity for isolated $L1_0$ -FePt grains
on nano silica particle structured substrate with Rapid thermal annealing method

Tetsuya Makino¹⁾, Yasuhiro Futakawa¹⁾, Arata Tsukamoto²⁾

Graduate School of Science and Technology Nihon Univ.¹⁾, College of Science and Technology, Nihon Univ.²⁾

研究背景 高密度磁気記録媒体を目指し、我々は熱酸化 Si 基板上に Pt / Fe 薄膜を数 nm 積層し急速昇降温熱処理(Rapid Thermal Annealing: RTA)を行うことによる $L1_0$ -FePt 孤立磁性微粒子群の形成を報告している¹⁾。当手法にて積層金属層の組成比を数 at. % 変化させることで磁気特性と粒子形態が大きく変化²⁾することも報告している。しかし、磁気特性と粒子数密度で異なる組成依存性を示すため $L1_0$ 結晶化による膜面垂直方向磁場印加時の高い保磁力と粒子群の高密度形成を共に実現することが課題となった。そこで新たに高密度化要素を導入するため、自己集積化現象を利用したナノシリカ粒子凹凸構造(Self-Assembled Silica Particle: SASP)基板を用いた FePt 粒子群形成³⁾に着目した。本報告では SASP 基板を FePt 粒子形成下地に用い、FePt 粒子群を高密度に形成すると共に、高い垂直磁気異方性由来の保磁力発現を試みたので報告する。

実験方法 SASP 基板は平均粒径 10 nm のシリカ粒子を用い、熱酸化 Si 基板に対してディップコート法により作製した。その後 DC マグネトロンスパッタリング法により、 $Pt_{100-x}/Fe_x/Sub.$ ($x=50, 57, 62, 64$ at. %) 総積層金属膜厚 1.88 nm にて成膜した。種々の試料に対し真空炉にて昇温速度約 $20\text{ }^\circ\text{C}/\text{sec.}$ 、最高到達温度 $600\text{ }^\circ\text{C}$ のランプ加熱処理、その後窒素ガス導入による急速降温を行い、FePt 微粒子群を形成した。FePt 粒子群の形態観察に走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM), 膜面垂直方向の保磁力評価に試料振動型磁力計を用いた。

実験結果 種々の組成(Fe_xPt_{100-x})にて形成した SASP 下地上 FePt 粒子群の面内 SEM 像を Fig. 1 に示す。Fe 過多($x=64$)の組成比においては下地構造の変形と粒結合による FePt 粒子径の増大を確認した。また、熱酸化 Si 基板上および SASP 基板上へ形成した FePt の粒子数密度を Fig. 2 示す。SASP 基板上へ作製した試料ではいずれの組成においても平坦な熱酸化 Si 基板上へ形成した試料に比べ高い粒子数密度を示し、 $x=50$ at. % において最も高い約 $1.5\text{ T particles}/\text{inch}^2$ の粒子数密度を確認した。Fig. 3 に各組成における FePt 粒子群の室温での膜面垂直方向磁場印加時の保磁力を示す。最も粒子数密度の高い $x=50$ at. % においても約 10 [kOe] の高い保磁力を示した。ただし、Fe 過多の組成にて熱酸化 Si 上 FePt と比較すると保磁力が減少しており、粒子径増大により FePt 粒子が磁壁移動型の磁化反転も生じ、保磁力が減少したと考えられる。以上より、本検討において $x=50$ の組成が高密度かつ高保磁力を発現する組成であることが考えられる。

謝辞

本研究の一部は情報ストレージ研究推進機構及び文部科学省私立大学戦略的基盤形成支援事業(S1311020)の助成により行った。

参考文献

- 1) A. Itoh, A. Tsukamoto, S. Okame and K. Mizusawa, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 36, 62-65(2012)
- 2) M. Imazato, A. Ogasawara, A. Tsukamoto, "Book of Abstract -20th ICM.", p. 1493(2015)
- 3) K. Mizusawa, A. Tsukamoto, A. Itoh, *J. Mater. Res.*, Vol. 26, No. 2, (2011).

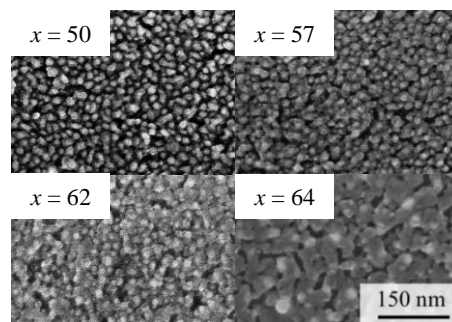


Fig. 1 SEM planer view of Fe_xPt_{100-x} grains on SASP substrate.

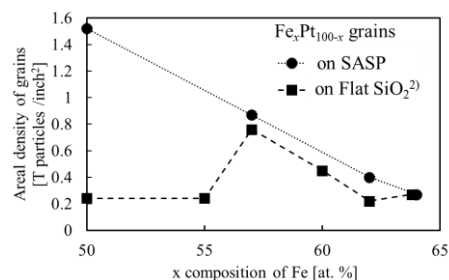


Fig. 2 Compositional dependency of areal density of grains for isolated Fe_xPt_{100-x} grains.

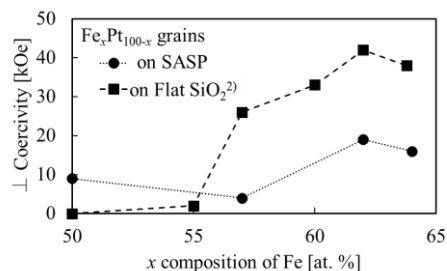


Fig. 3 Compositional dependency of Out of plane coercivity for Fe_xPt_{100-x} grains at room temperature.

単分散 FePt ドット周期構造の急速昇降温熱処理による 高保磁力微粒子の配列パターン形成

苗木俊樹¹⁾, 田中万裕¹⁾, 牧野哲也¹⁾, 吉川大貴¹⁾, 塚本新²⁾
 日本大学大学院理工学研究科¹⁾, 日本大学理工学部²⁾

Formation of high coercivity particle array by Rapid Thermal Annealing of monodisperse FePt periodic structure
 Toshiki Naeki¹⁾, Masahiro Tanaka¹⁾, Tetsuya Makino¹⁾, Hiroki Yoshikawa¹⁾, and Arata Tsukamoto²⁾
 Graduate School of Science and Technology Nihon Univ.¹⁾ College of Science and Technology, Nihon Univ.²⁾

はじめに 我々は高密度磁気記録用媒体の実現に向け、基板面垂直方向に高い磁気異方性を有し規則的に配列した均一なナノ磁性体の作製を検討している。これまでに熱酸化 Si 基板上に成膜した Pt/Fe 二層薄膜に数秒間の急速昇降温熱処理(Rapid Thermal Annealing: RTA)を施すことで $L1_0$ 規則合金化、膜面垂直方向に(001)優先配向した FePt 微粒子群の作製を報告している¹⁾。Fig. 1 に FePt 微粒子群の一例を平均粒径 D_a 、粒径標準偏差 StD と共に示す。粒子が不均一に形成するため粒子体積の単分散化、並びに規則配列化が RTA の課題である。そこで電子線リソグラフィ法を利用し Pt/Fe 二層構成ドットの周期パターンを作製し、RTA を施すことで各粒子体積が等しく、規則配列した FePt 粒子の形成及び $L1_0$ 規則合金化を試みた。本報告では熱処理時間も考慮し、リフトオフ法により作製した FePt ドットに (a)長時間熱処理(Long Time Annealing: LTA), または (b)数秒間の RTA を施し、それぞれの粒子形成配置及び粒子群の保磁力評価を行った。

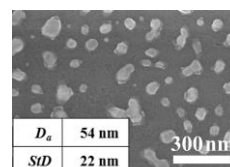


Fig. 1 SEM planer view of FePt particles fabricated by RTA.

実験方法 熱酸化 Si 基板上にレジスト剤 ZEP520A を塗布し、電子線描画・現像によりマスクパターンを作製した後、DC マグネトロンスパッタ法により Pt(2.8 nm)/Fe(2.2 nm)を積層した。その後、剥離液に浸すことでレジストを除去し Pt/Fe ドットを作製した。真空炉にて赤外線照射により(a)昇温速度 100 °C/h.で昇温し 600 °Cで 1 時間保持する熱処理と、(b)昇温速度 180 °C/sec.で急速昇温、600 °Cで N₂ ガス流入による急速降温を施した。作製した FePt ドット観察は走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM)を用いた。また、振動試料型磁力計により高磁場まで応答する粒子群の保磁力評価を行った。

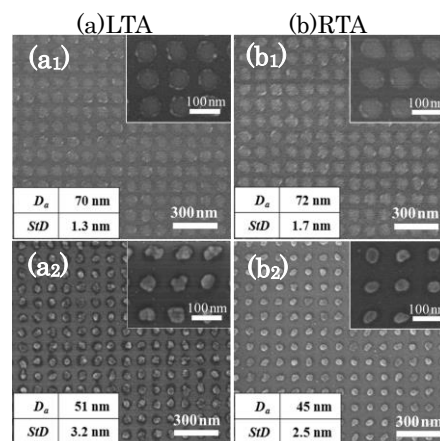


Fig. 2 SEM planer view of FePt pattern (a1), (b1) Lift off, (a2) heating rate: 100 °C/h. (b2) heating rate: 180 °C/sec.

実験結果 Fig. 2に FePt ドットの熱処理前(a1, b1), 熱処理後(a2, b2)の表面 SEM 像を示す。いずれも各粒子の粒面積が約半分まで減少する形状変化が生じたが、粒子同士の結合は生じず、配置の保持を確認した。またリフトオフ後の標準偏差値より、熱処理前後において FePt の体積が保存されていると仮定すると、Fig. 1 の粒子体積分散に比べ 1 桁以上低減したものと考えられる。Fig. 3 に各熱処理を施した試料(a2), (b2)に対し基板面垂直方向へ磁場印加を行い計測した磁化曲線を示す。いずれの試料も硬磁気特性を示し 10 kOe 以上の磁場で応答する粒子も存在することから、 $L1_0$ 規則合金に起因する高保磁力微粒子の形成が示唆される。以上より、電子線描画を用いて作製した Pt/Fe ドットに数秒間の RTA を施すことで、規則配列した高保磁力の FePt 微粒子群が作製可能であることを明らかとした。

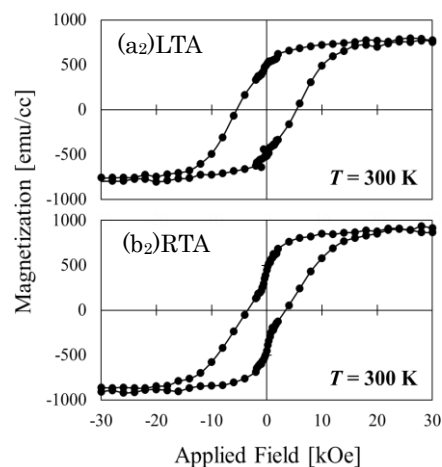


Fig. 3 M-H curves for FePt particles in out-of-plane. (a2) heating rate: 100 °C/h. and (b2) heating rate: 180 °C/sec.

謝辞 本研究の一部は情報ストレージ研究推進機構、文部科学省私立大学戦略的研究基盤支援事業(S1311020)の助成により行った。

参考文献

1) A. Itoh, A. Tsukamoto, S. Okame and K. Mizusawa: *J. Magn. Soc. Jpn.* **36**, 62-65(2012).

L1₀ FePt-酸化物グラニューラ媒体のコラム状成長促進のための 配向制御凹凸下地層の作製

○清水 章弘, 日向 慎太郎, 岡田 翼, 斉藤 伸 (東北大学)

Bumpy underlayer for controlling orientation and promoting columnar growth
of L1₀ FePt-based granular media

Akihiro Shimizu, Shintaro Hinata, Tsubasa Okada, and Shin Saito (Tohoku Univ.)

はじめに 磁気記録媒体の記録密度は2022年までに4 Tbit/in²もの高密度化が求められており¹⁾、これを実現する次世代の磁気記録方式として熱アシスト磁気記録方式 (Heat Assisted Magnetic Recording, HAMR) が注目されている²⁾。再生信号の出力を確保し、かつ信号/雑音比が高く熱擾乱耐性を有するHAMR媒体の実現には、 2×10^7 erg/cm³ 台の高い一軸結晶磁気異方性エネルギー (K_u) の磁性結晶粒がコラム状に成長したグラニューラ組織を実現させる必要がある。しかしながら現状最も実用化検討が進んでいるFePt-C媒体ではFePt磁性結晶粒が球状に析出してしまい、コラム状組織が実現できていないのが実状である。本研究では、高 K_u 磁性結晶粒とコラム状組織とを両立する媒体の開発をこれまでの媒体 (面内/垂直磁気記録) の材料知見を踏襲して目指した。

コラム状グラニューラ組織の形成指針 高 K_u 磁性結晶粒の実現には、*c* 面配向したL1₀ FePt合金を下地層上にヘテロエピタキシャル成長させること、コラム状グラニューラ組織の実現には、金属-酸化物磁性層と凹凸を有する下地層を使用することが有用である³⁾。これらを実現するために、Fig. 1に示す構造を提案する。すなわち、*c* 面配向したL1₀ FePtのヘテロエピタキシャル成長のためには、下地層の配向をbcc (002)、hcp (11.0) とし⁴⁾、またコラム状グラニューラ組織の実現のためには、磁性層としてFePt-酸化物、凹凸下地層として高Arガス圧で作製されたRu (Ru^H) 層³⁾を適用することで、高 K_u 磁性結晶粒がコラム状成長したグラニューラ媒体の実現を目指す。本発表ではRu^H層の配向および表面形態について評価したので報告する。

実験結果 試料の層構成は α -Ni₆₀Ta₄₀ (20 nm) / Cr (5 nm) / Cr₈₀Mo₂₀ (20 nm) / Co₆₀Cr₂₄Pt₁₂B₄ (CCPB, 10 nm) / Ru (8.0 Pa, 20 nm) とした。bcc CrMo層およびhcp CCPB層はbcc Cr-hcp Ru層間の格子緩和のために設けた。本試料は、Out-of-plane XRD測定によりCCPB層およびRu層がhcp (11.0) 配向していることを確認している。Fig. 2にはRu^H層の(a)原子間力顕微鏡 (AFM) 像および(b)高倍率透過電子顕微鏡 (TEM) 像を示す。(a)よりRu^H層は直径約8 nmの結晶粒が3~4個直線状に連なった構造体 (以下、構造体) で構成されていることがわかる。この構造体表面の高低差は短軸方向で約1.4 nm、長軸方向で0.6 nmであった。現行媒体のRu下地層における表面粗さは約1.5 nmであるため、短軸方向の凹凸はほぼ同程度である。(b)より同一の構造体中 (白枠内) では格子縞の方位が同一であることから、構造体を構成する結晶粒の結晶方位が揃っていることがわかる。短軸方向の格子縞の間隔を評価したところRu (00.2)の面間隔と対応した。このことはRuの*c*軸は構造体の短軸方向を向いていることを示唆している。講演では構造体の形状が定まるメカニズムについて断面TEMの観察結果なども交えて述べる。

参考文献 1) Roadmap of Advanced storage technology consortium (2016). 2) D. Weller, O. Mosendz, G. Parker, S. Pisana, and T. Santos, *Phys. Status. Solidi.*, **210**, 1245 (2013). 3) T. Oikawa, M. Nakamura, H. Uwazumi, T. Shimatsu, H. Muraoka, and Y. Nakamura, *IEEE. Trans. Magn.*, **38**, 1976 (2002). 4) K. Hono, B. Wong, D.E. Laughlin, *J. Appl. Phys.*, **68**, 4834 (1990).

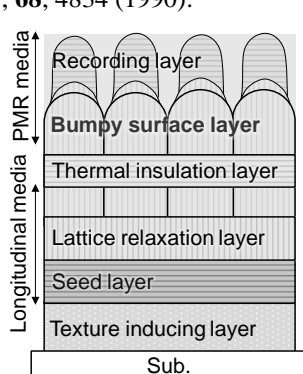


Fig. 1 Schematic of proposed structure for FePt granular media with columnar structure.

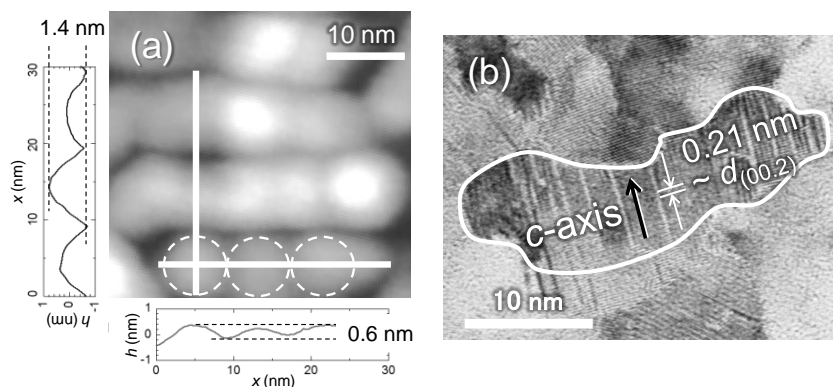


Fig. 2 (a) Plane-view TEM image (b) AFM surface topography image for (11.0) oriented Ru^H film.

$L1_0$ 規則構造を持つFePt合金系エピタキシャル薄膜の成長機構

二本正昭・清水智貴・中村将大・大竹充
(中央大)

Growth Mechanism of $L1_0$ -ordered FePt Epitaxial Magnetic Thin Films
Masaaki Futamoto, Tomoki Shimizu, Masahiro Nakamura, and Mitsuru Ohtake
(Chuo University)

はじめに $L1_0$ 規則構造を持つ合金(FePt, FePd, CoPt)は 10^7 erg/cm³以上の大きな K_u を持つ磁性材料で、記録媒体やMRAMなどへの応用が検討されている。この材料はA1不規則構造から $L1_0$ 規則構造への相変態を伴い、規則相とするためには高温での熱処理が必要となる。磁性デバイス応用では、(1) c 軸の垂直配向、(2)高い規則度、(3)平滑な表面、を実現することが求められる。 c 軸配向させるため、MgO(001)などの基板や下地層上に磁性膜をエピタキシャル成長させる技術が活用される。しかし、高基板温度で膜形成を行うと高規則度は得られるが結晶ファセット成長が起こって膜表面の起伏が増大し、さらには膜厚に依存して c 軸が膜面内を向いたバリエーション結晶が混在するという問題点も存在する。我々は、磁性膜形成する基板や下地材料との格子不整合、表面エネルギー (J)、膜形成および熱処理温度と相変態現象に着目して、上記3項目を同時達成するための条件検討を行っている¹⁻³⁾。本研究では、RHEED, XRD, AFM, TEMを用いて薄膜の構造測定を行った結果を参照して、 $L1_0$ エピタキシャル薄膜の成長機構を検討した。

結果と考察 Fig.1 にMgO(001)($a = 0.4212$ nm, $J = 1.4$ J/m²)およびVN(001)($a = 0.4136$ nm, $J = 2.5$ J/m²)下地上に形成した平均膜厚 2 nmの $L1_0$ -FePt膜($a = 0.3842$, $c = 0.3702$ nm, $J = 2.1$ J/m²)のAFM像を示す。FePt膜はいずれも c 軸が垂直配向しているが、MgO上では孤立粒子状、VN下地上では超平滑($R_a = 0.1$ nm)な連続膜が得られている。 $L1_0$ 結晶成長過程でファセット成長を抑制するには表面エネルギー大で $L1_0$ -FePt結晶格子定数より大きくてしかもエピタキシャル成長し得る下地層の活用が有効であることが確認された。Fig.2 はMgO(001)下地層上に形成した $L1_0$ -Fe(Pt,Pd)膜の高分解能TEM像例であり、下地界面付近にミスフィット転位やバリエーション境界などが観察されている。不規則A1構造から $L1_0$ 規則構造への相変態では、下地との格子不整合で誘発された格子歪が $L1_0$ 結晶の核生成と成長に大きな影響を及ぼしていることが分かった。核生成密度は合金材料の融点が増大すると増大する傾向がある。 $L1_0$ 結晶の成長機構を考慮することにより、超平滑で規則化した極薄(< 10 nm)の c 軸垂直配向膜を得ることは十分可能であると思われる。

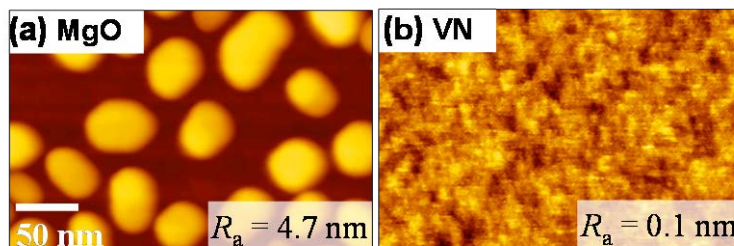


Fig. 1 AFM images of $L1_0$ -ordered FePt films of 2-nm average thickness formed on (a) MgO and (b) VN layers.

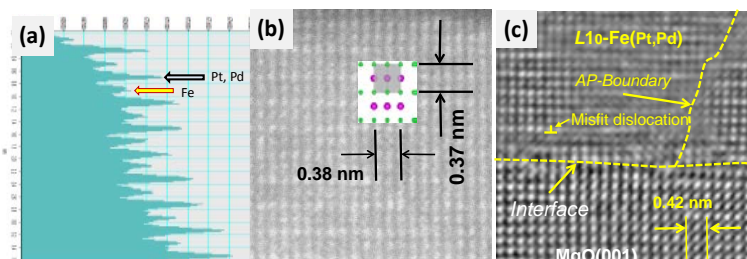


Fig. 2 TEM images of $L1_0$ -Fe(Pt,Pd) film grown on MgO(001). (a) Lattice line contrast, (b) TEM image corresponding to (a), and (c) atomic structure around the interface.

参考文献

- 1) M. Futamoto, M. Nakamura, M. Ohtake, N. Inaba, and T. Shimotsu, AIP Adv., **6**, 085302 (2016).
- 2) 中村, 落合, 大竹, 二本, 桐野, 稲葉, 信学技報 **116**, MR2016-14, pp. 13-18 (2016).
- 3) 清水, 中村, 落合, 大竹, 二本, 桐野, 稲葉, 信学技報 **116**, MR2016-40, pp. 63-67 (2016).

熱アシスト磁気記録媒体用 Co-Y 合金薄膜の構造と磁気特性

°日向 慎太郎, 林下斐, 斉藤 伸 (東北大学)

Crystal structure and magnetic properties for Co-Y film for heat assisted magnetic recording

°Shintaro Hinata, Kai Hayashishita, and Shin Saito (Tohoku University)

はじめに 垂直磁気記録媒体は年々高密度化が要求されており、近年では 4 Tbit/inch² もの高記録密度が目標とされており¹⁾、この実現のためには熱アシスト磁気記録 (heat assisted magnetic recording, HAMR) 方式が提案されている。この記録方式では、磁性結晶粒として、微細化による熱擾乱に抗する 10^7 erg/cm³ 台の高い一軸結晶磁気異方性 (K_u) を有する材料が適用される。現在盛んに研究されている HAMR 媒体用材料は L1₀ FePt 合金結晶粒であるが、対称性の高い立方晶系に近いためバリエーションが発生しやすく、異方性を有効に発現しにくい問題点がある。本研究では、 K_u が L1₀ FePt とほぼ同等であり対称性の低い六方晶系の D2_d 構造を有する Co₅Y₁ (1:5 相) 合金²⁾ に注目し、その HAMR 媒体への適用について検討した。本発表では、Co への Y 添加量を変化させた試料について 1:5 相の形成条件について検討し、その構造と磁気特性について調査したので報告する。

実験結果 Co_{100-x}Y_x 薄膜の成膜は Co と Y ターゲットのコスパッタ法によって、成膜温度 $T_{\text{sub}} = 500^\circ\text{C}$ に実施した。層構成は Ni₆₀Ta₄₀ (40 nm)/ Cu (20 nm)/ Co_{100-x}Y_x (20 nm) とした。全ての組成に置いて、Co-Y 磁性結晶粒は c 面配向していることを out-of-plane XRD によって確認した。

Figure 1 には Co_{100-x}Y_x 薄膜の In-plane XRD プロファイルを種々の Y 濃度 x について示す。参考のため上部には CoY 1:5 相および 2:17 相の粉末パターンを示した。プロファイルの相対位置は x に対応している。 $x = 0-7.5$ at% においては Co および CoY 2:17 相起因の回折線、 $x = 10.5-20$ at% においては CoY 2:17 相および 1:5 相の回折線が観測された。この結果は、CoY 1:5 相の化学量論組成である $x = 16.7\%$ の試料において 1:5 相のみは形成されず、1:5 相と 2:17 相との混相が形成されることを示している。別途化学量論組成周りの試料について構造を評価したところ、 $x = 23$ at% においてはほぼ 1:5 相のみが観測されることが明らかとなっている。また、 $x = 40-60$ at% においては CoY 1:5 相の回折線のみが観察された。この結果は Co に対する約 20 at% 以上の Y が Co と結晶質の金属間化合物を形成しないことを示唆している。

Figure 2 には (a) $x = 16.7$ at.% および (b) 23at.% 試料の外部磁界 25 kOe におけるトルク曲線を示している。実線および破線はそれぞれ正転および逆転時のトルク曲線に対応し、記号// および ⊥ はその θ において印可磁界が基板に対して面内、垂直であることを意味している。(a) においては、試料面内/面直近辺で立ち上がる振幅の異なる曲線が存在している。これは試料内において垂直及び面内磁気異方性を示す結晶粒が混在していることを示唆している。(b) においては振幅約 5.5 dyne·cm の試料面内近辺で立ち上がるトルク曲線が得られた。また、試料面内角度付近で正/逆転トルク曲線間にヒステリシス損失が生じた。この結果は $x = 23$ at.% の試料では面内磁気違法性を示す結晶粒がほとんど存在せず、かつ実効的な垂直磁気異方性磁界が印可磁界 25 kOe より巨大であることを示唆している。また、この試料についてヒステリシス損失の消失磁界 (異方性磁界に対応) を $H = 25-17$ kOe のトルク曲線の直線外挿により導出したところ、過大見積もりとはなるが、約 658 kOe もの巨大な値を示した。以上の結果から、Co_{100-x}Y_x 合金を HAMR 媒体において活用するには、CoY 2:17 相が存在せず、かつ垂直磁気異方性のみを示す $x = 23$ at.% 以上の組成が有効であることが示唆される。講演では Co-Y 膜と下地 Cu との相互拡散の関係についても断面組成分布の評価結果を交えて述べる。

参考文献 1) Roadmap of Advanced storage technology consortium (2016). 2) M. Yamada, Y. Hotta, T. Yanagawa, M. Ohtake, F. Kirino, and M. Futamoto, *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 2101604 (2013).

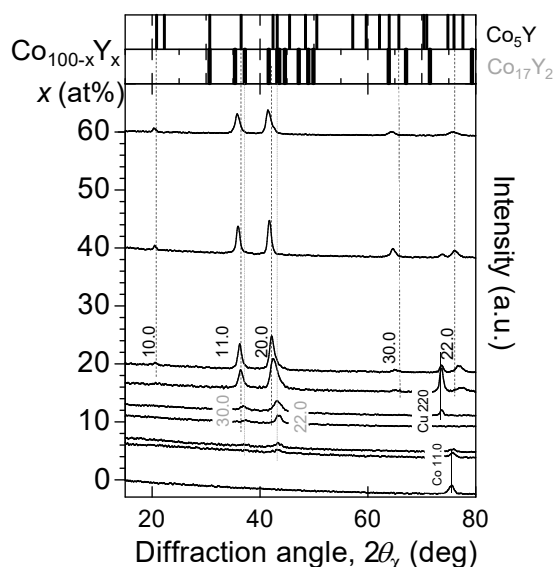


Fig. 1 In-plane XRD profiles for NiTa/Cu/Co_{100-x}Y_x films deposited at substrate temperature of 500°C.

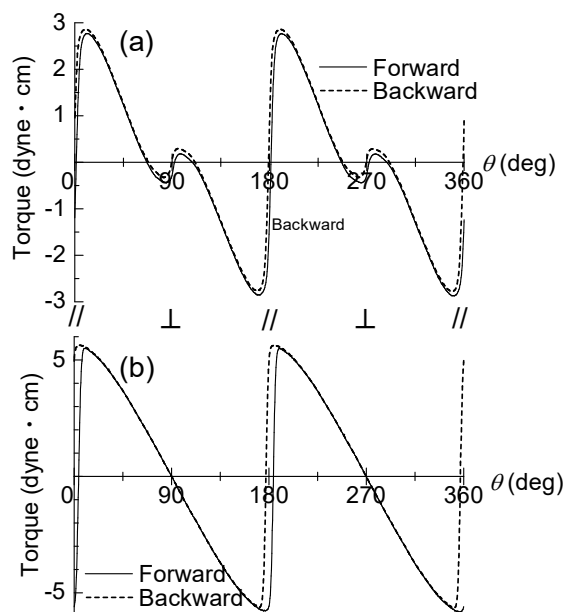


Fig. 2 Magnetic torque curves with external field of 25 kOe for (a) Co_{82.4}Y_{16.7} and (b) Co₇₇Y₂₃ films.

CoPt-B₂O₃ グラニューラ媒体の磁気特性と微細組織におよぼす異種酸化物の混合効果°タム キム コング^{a)}, 榎引 了輔^{a)}, 日向 慎太郎^{b)}, 斉藤 伸^{b)}^(a)田中貴金属工業株式会社, ^(b)東北大学Effect of mixing different oxides on magnetic properties and microstructure of CoPt-B₂O₃ granular media°Kim Kong Tham^{a)}, Ryosuke Kushibiki^{a)}, Shintaro Hinata^{b)}, and Shin Saito^{b)}^(a)TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K., ^(b)Tohoku University)

はじめに 現行の垂直磁気記録媒体の磁性層として CoPt 合金-酸化物薄膜 (グラニューラ媒体) が広く用いられている。グラニューラ媒体の記録密度をさらに伸ばすためには、コラム状結晶粒の一軸結晶磁気異方性エネルギー (K_u) を 1.0×10^7 erg/cm³ 以上に増大すると共に、結晶粒径と結晶粒ピッチとを低減させることが必須である。高 K_u を有するコラム状結晶粒を実現するためには CoPt 合金結晶相と酸化物アモルファス相との相分離を促進することが肝要であり、そのためには低融点 (低 T_m) 酸化物を用いることが有効である¹⁾。一方で、CoPt 磁性結晶粒の微細化のためには高 T_m 酸化物が有効であることも知られている²⁾。このように、単一酸化物ではグラニューラ媒体の高 K_u 化と粒径微細化との両立が困難である。今回我々は、低融点の B₂O₃ (T_m : 450°C) を基本酸化物として用いた CoPt-B₂O₃ グラニューラ媒体に異種酸化物を混合し、媒体の磁気特性と組織について調べることで、上記課題の両立について指針を得たので報告する。

実験結果 CoPt 基グラニューラ媒体としては、Co₈₀Pt₂₀-15 vol% B₂O₃-15 vol% oxide (oxide: B₂O₃, SiO₂, TiO₂, Cr₂O₃, ZrO₂) (16 nm) 選定し、室温で作製した。各酸化物の T_m はそれぞれ 450, 1600, 1843, 2435, 2700°C である。下地層は Ru (20 nm) / Ni₉₀W₁₀ (6 nm) / Ta (5 nm) / glass sub. とした。Fig. 1 には、種々の T_m を有する第 2 酸化物を添加した CoPt-B₂O₃-oxide グラニューラ媒体の平面 TEM 像を示す。像中には X 線回折で評価した各グラニューラ媒体の結晶粒径 (GD) も示している。 GD は、第 2 酸化物として T_m : 1600°C の SiO₂ を添加した場合、30 vol% B₂O₃ とほぼ同等の 5.8 nm となり、1840°C 以上の T_m を有する酸化物を添加すると、4.8 nm 以下に微細化されることがわかった。組織に注目すると、30 vol% B₂O₃ では、CoPt 結晶粒を示す灰色や黒色の部位が酸化物の析出を示す白色を呈する粒界相に囲まれている様子が見受けられる。添加酸化物の T_m の高温化につれ、磁性結晶粒内に明瞭に筋状の薄い酸化物析出相が形成されている (破線の丸部)。これは単一酸化物媒体の組成には見られなかった特徴である。Fig. 2 には、高 T_m 第 2 酸化物を添加した一例として (a) CoPt-B₂O₃-TiO₂ と、参照のための (b) CoPt-B₂O₃ グラニューラ媒体の断面 TEM 像を示す。両 TEM 像では、磁性層中の厚い酸化物粒界が下地 Ru 結晶粒の凹部と一致しており、CoPt 磁性結晶粒が Ru 結晶粒の凸部上にヘテロエピタキシャル成長していることが示唆される。特に (a) では、一つの Ru 結晶粒の上に初期部から薄い粒界相を介して複数の磁性結晶粒が成長している。尚、(a) の媒体中の磁性結晶粒の K_u は 1.1×10^7 erg/cm³ であり、Co₈₀Pt₂₀ 不規則合金膜とほぼ同程度であった。この結果は、複数の酸化物を混合添加した場合、酸化物がそれぞれの T_m で析出する可能性を示唆している。上述の粒界厚の均一化を図ることができれば、混合酸化物媒体は今後の高記録密度化に適合する材料として有望であり、その粒界に合致した下地層の開発が待たれる。

講演では混合酸化物媒体の磁気特性を併せて紹介し、粒径微細化と高 K_u 化との両立について系統的に議論する。

参考文献 1) K. K. Tham et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 07MC06 (2016). 2) R. Kushibiki et al., *IEEE Trans. Magn.*, (2017) (in press).

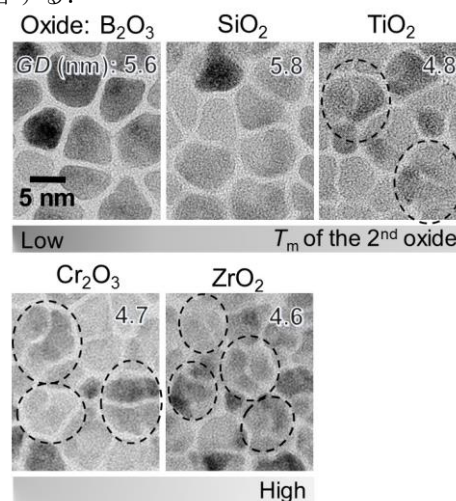


Fig. 1 In-plane-view TEM of CoPt-B₂O₃-oxide granular media. Grain size (GD) evaluated by XRD is shown in each image.

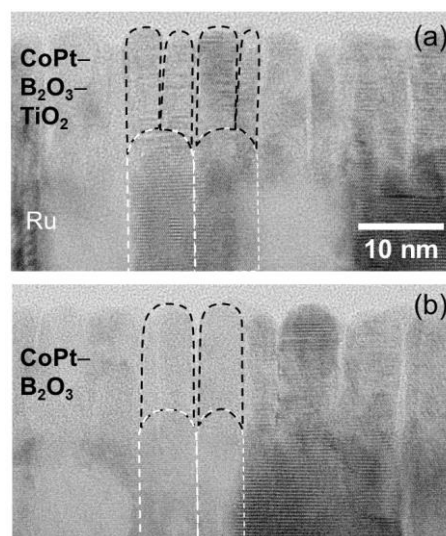


Fig. 2 Cross-section-view TEM of (a) CoPt-B₂O₃-TiO₂ and (b) CoPt-B₂O₃ granular media.

イオン照射により作製した MnGa ビットパターン膜の FORC 解析

大島 大輝, 加藤 剛志, 岩田 聡

(名古屋大学)

FORC analysis of MnGa bit patterned film fabricated by ion irradiation

D. Oshima, T. Kato, S. Iwata

(Nagoya University)

はじめに

我々はこれまでに MnGa 膜を用いたイオン照射型のビットパターン媒体の作製に取り組んできた^{1,2)}. ビットパターン媒体においては, 反転磁界分布 (SFD) を抑えることが重要となる. そこで, 本研究では, SFD の評価手法として FORC (First Order Reversal Curve) 法に着目し, FORC 解析により MnGa ビットパターン膜の SFD のビットサイズ依存性を調べた.

実験方法

RF マグネトロンスパッタ法により単結晶 MgO (001) 基板の上に Cr (2 nm) / MnGa (15 nm) / Cr (20 nm) / MgO (001) の膜構成で成膜した. Cr 層は基板温度 400 °C で成膜し, 600 °C で 60 min のポストアニールを行った. MnGa 層は基板温度 300 °C で成膜し, 400 °C で 60 min のポストアニールを行った. パターニングは電子線リソグラフィによりレジストマスクを形成した後, イオン注入装置を用い 30 keV の Kr イオンを 1×10^{14} ions/cm² 照射することで行った. 作製したサンプルの FORC 測定は交番磁界勾配型磁力計により行った.

実験結果

Fig. 1 にビットサイズが(a) 520 nm と(b) 90 nm の MnGa ビットパターン膜の FORC ダイアグラムを示す. H_c および H_b は局所的な保磁力とバイアス磁界を示している. Fig. 1 からビットサイズが 520 nm の場合には, H_c と H_b の分布は Gaussian では表すことはできないが, ビットサイズが 90 nm の場合には分布は Gaussian に近づいている. この分布形状と磁区構造には対応関係があり, Fig. 1 (a) のような分布の場合にはビット内は多磁区構造, Fig. 1 (b) のような分布の場合には単磁区構造となっていることを磁気力顕微鏡により確認している. $H_b = 0$ における H_c の分布から, 平均反転磁界 H_{sw} および標準偏差 ΔH_{sw} を見積もった. Fig. 2 に H_{sw} および SFD ($\Delta H_{sw}/H_{sw}$) のビットサイズ依存性を示す. ビットサイズが小さくなるにつれて, H_{sw} が増加しており, イオン照射によるパターン作製において, ビット周囲のダメージの影響は少ないものと考えられる. しかしながら, ビットサイズの減少に伴い SFD も増大している. この SFD の増大の原因は, ビットサイズが小さくなるとレジストパターン形状のばらつきの影響が大きくなり, 加工後のビットサイズのばらつきが大きくなるためと考えられる.

参考文献

- 1) D. Oshima et al., *IEEE Trans. Magn.*, **49**, 3608 (2013).
- 2) D. Oshima et al., *IEEE Trans. Magn.*, **52**, 3201804 (2016).

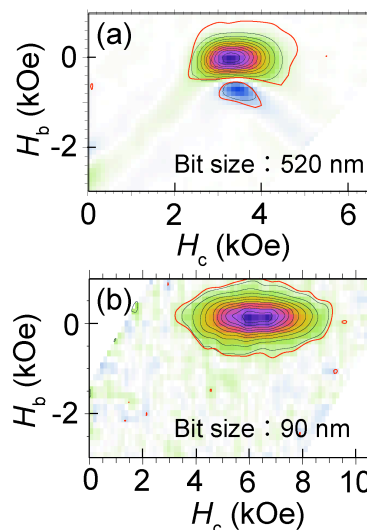


Fig. 1 FORC diagrams of ion beam patterned MnGa films with bit sizes of (a) 520 nm and (b) 90 nm.

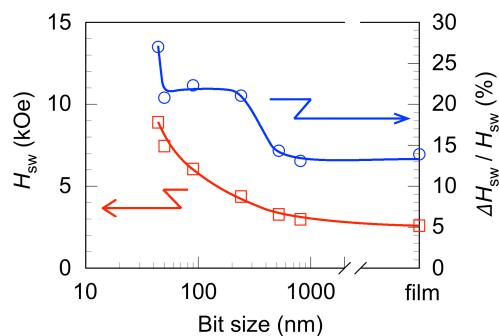


Fig. 2 Bit size dependences of average switching field H_{sw} and switching field distribution $\Delta H_{sw}/H_{sw}$ of MnGa bit patterned film.

走査型 XMCD 顕微鏡によるイオン照射型 L1₀-MnGa ビットパターン膜の局所的磁気状態の評価

石川 徹, 福田 憲吾, 大島 大輝, 加藤 剛志, 中村 哲也*, 小谷 佳範*,
豊木 研太郎*, 岩田 聡 (名古屋大学, *JASRI/Spring-8)

Local magnetic state of ion-irradiation L1₀-MnGa bit patterned films probed by
scanning X-ray magnetic circular dichroism microscope

T. Ishikawa, K. Fukuta, D. Oshima, T. Kato, T. Nakamura*, Y. Kotani*, K. Toyoki*, S. Iwata
(Nagoya Univ., *JASRI/Spring-8)

概要

我々はこれまで、大きな垂直磁気異方性を持つ L1₀-MnGa 規則合金薄膜を用いて、イオン照射型ビットパターンの作製を行い、イオン照射による磁気パターン作製法が、平坦、高密度、ビット端ダメージの少ないパターン構造の作製に有効と考えられることを示してきた^{1),2)}。今回、我々は SPring-8 BL-25SU において、スポット径 100 nm のナノビーム X 線を用いた走査型 X 線磁気円二色性 (XMCD) 顕微鏡を用いて、MgO (001) 単結晶基板上に作製した MnGa 磁気パターンのビットごとの反転磁界と 1 つのビットパターン内の XMCD スペクトルを測定することにより、MnGa パターン膜の局所的な磁気状態の評価を試みたので報告する。

実験方法

L1₀-MnGa(001)膜は、マグネトロンスパッタリング装置を用いて作製し、膜構成は Cr (2 nm) / MnGa (15 nm) / Cr (20 nm) / MgO(001) sub. とした。MgO 基板の表面をフラッシュするために 600°C で 10 分間熱処理後、基板温度 400°C で Cr バッファ層を成膜した。Cr 層成膜後、600°C で 60 分間熱処理した。その後、基板温度 300°C で MnGa 膜を成膜し、MnGa 層の規則化のため、成膜後 400°C で 60 分間熱処理した。電子ビーム露光装置によるレジストパターン作製とイオン注入装置による 30 keV の Kr イオン照射により、MnGa 磁気パターン構造を作製した。Spring-8 BL-25SU の走査型 XMCD 顕微鏡により、パターン内のビット反転磁界と XMCD スペクトルを測定した。

実験結果

Fig. 1 は、作製した MnGa 磁気パターン膜 (500 nm ピッチ) の走査型 XMCD 顕微鏡像を示している。入射 X 線のエネルギーは Mn の L₃ 吸収端である 639 eV とし、スキャン範囲は 12 μm × 12 μm である。まず +2 T の磁界を加えて XMCD 像を取得し、全てのビットが飽和していることを確認した。Fig. 1 は磁気飽和した後に、(a) -0.2 T, (b) -0.3 T の磁界を加えた状態での XMCD 顕微鏡像である。-0.2 T の時点ではほとんどのビットが反転していないが、-0.3 T の磁界を加えた時点ではおよそ半分のビットが反転しており、反転しやすいビットとそうでないビットがあることが分かる。さらに負方向に磁気飽和後、正方向の磁界で磁化反転をしても、この反転しやすいビットから反転することが確認された。また、ビットピッチ 10 μm の MnGa パターン膜の 1 つのビットに X 線を集光した条件で XMCD スペクトルの測定を行ったところ、639 eV と 650 eV 付近でそれぞれ負と正の XMCD ピークを示した。磁気光学総和則により軌道モーメントとスピンモーメントの比 $\langle L_z \rangle / 2 \langle S_z \rangle$ を求めると 0.02 という小さな値が得られた。これらの結果は未加工の MnGa 膜の XMCD スペクトル²⁾とよく一致した。

参考文献

- 1) D. Oshima et. al., IEEE Trans. Magn., **49**, 3608 (2013).
- 2) D. Oshima et. al., IEEE Trans. Magn., **52**, 3201804 (2016).

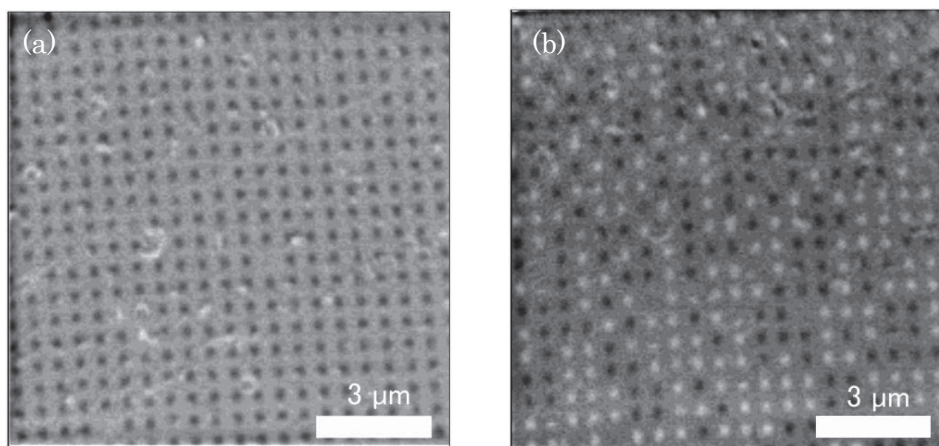


Fig. 1 Scanning XMCD images of bit patterned MnGa with a pitch size of 500 nm. Before taking the images, the sample was saturated by applying a field of +2 T, then negative fields (a) -0.2 T and (b) -0.3 T were applied for taking the images.

CoCrPt グラニューラ垂直磁気記録媒体における マイクロ波アシスト効果

島田恭平, 島津武仁, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修
(東北大)

Microwave assisted switching effect for CoCrPt granular perpendicular media
K. Shimada, T. Shimatsu, N. Kikuchi, S. Okamoto, and O. Kitakami
(Tohoku University)

はじめに 磁性体にマイクロ波を印加することで反転磁場が減少するマイクロ波アシスト磁化反転(microwave-assisted magnetization switching, MAS)^{1,2)}は将来の高密度磁気記録に用いられる技術の一つとして有望である. これまでに CoCrPt-TiO₂ グラニューラ単層垂直記録媒体の MAS を解析した結果, 高周波磁場を印加することで, 熱擾乱を補正した保磁力低減は最大低下率 50 % 程度になることが報告されている³⁾. しかし, マイクロ波周波数に対する依存性は単磁区ドットの MAS に比較して緩慢である⁴⁾. その原因の一つとして媒体に十分な高周波磁場が印加されていないことが考えられる. そこで本研究では, 下地膜に直接マイクロ波を印加する構造の試料を用いることで, 大きな高周波磁場を印加した状態での MAS の解析を目指した.

実験方法 試料の膜構成は Pt(2 nm)/CoCrPt-TiO₂(15 nm)/Ru(10 nm)/[Pt(5 nm)/Ta(2 nm)]×13/MgO sub. とした. 膜厚を含む下地層の構成は磁気特性と高周波の透過特性に加え, 磁気信号の検出に用いた異常ホール効果の信号強度の観点から決定した. 試料は DC マグネトロンスパッタ法により成膜した. Fig.1 の光学顕微鏡像に示すように試料を十字型電極に微細加工し, 下地膜に高周波電流を伝送することで膜面内方向に高周波磁場が印加される. なお, 図中の点線部分以外の磁性体は除去した.

実験結果 Fig.2 に作製した試料の高周波の透過特性を示す. 実験に用いる $f_{rf}=2\sim 26$ GHz の範囲において損失は 2 dB 以下に抑えられている. Fig.3 に高周波を印加していない場合と, $f_{rf}=11$ GHz の高周波を印加した場合の異常ホール効果磁化曲線を示す. 高周波を印加した状態でも高い S/N 比で異常ホール効果による磁化曲線の測定が可能であった. 一方で, 高周波を印加することでみられる保磁力の低下はジュール熱による試料の温度上昇による影響も大きいため, MAS の解析が難しい. 当日は発熱を抑えた試料での MAS について詳細に議論する予定である.

参考文献

- 1) Z.Z.Sun and X.R.Wang, *Phys.Rev.B*, **74**, 13240(2006)
- 2) Y.Nozaki and K.Matsuyama, *J.Appl.Phys.*, **100**, 053911(2006)
- 3) S.Okamoto, N.Kikuchi, A.Hotta, M.Furuta, O.Kitakami and T. Shimatsu, *Appl. Phys.Lett.*, **103**, 202405 (2013).
- 4) M.Furuta, S.Okamoto, N.Kikuchi, O.Kitakami, and T.Shimatsu, *Appl. Phys.Express.*, **6**, 053006 (2013)

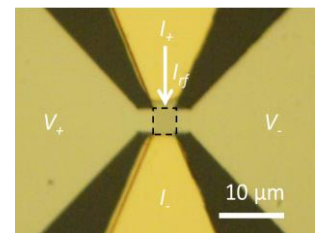


Fig.1 Optical microscope image of the sample

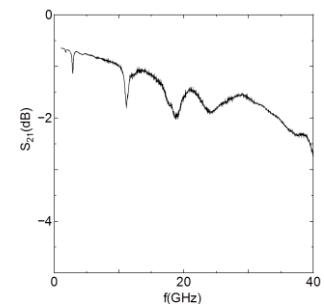


Fig.2 Transmission property of the fabricated sample

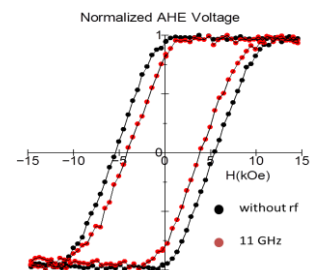


Fig.3 Magnetization curves without and with rf field ($f_{rf}=11$ GHz)

積層磁性ドットによるマイクロ波アシスト磁化反転

金原 大樹, 岡本 聡, 菊池 伸明, 北上 修, 島津 武仁
(東北大)

Magnetization switching of layer structured magnetic dots under the assistance of microwave fields

D. Kanahara, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu
(Tohoku University)

はじめに

マイクロ波アシスト磁化反転 (MAS: Microwave Assisted magnetization Switching) は次世代超高密度磁気記録技術の有力候補として注目を集めている。GHz 帯域の大振幅交流磁場を印加し、磁気モーメントに大角歳差運動を誘起することで、反転磁場を大幅に低減することが可能となる。これまでの研究において、ドット内にスピン波励起が生じると、MAS 効果が著しく増大することが報告されている¹⁾。このように励起モードと MAS 効果には強い相関があり、励起モードの制御が重要であることが分かる。本研究では、励起モード制御手法として層間結合を有する積層磁性体ドットに着目した。層間結合は中間層の材料や厚みを変えることで、符号や強度の制御が可能である。今回は、交換結合は無視できる双極子相互作用が支配的な場合についての検討を行った。

実験方法と結果

実験に用いた膜構成は、MgO sub./Ta(2)/Pt(5)/Ru(20)/[Pt(0.5)/Co(0.6)]₅/Pt(10)/[Co(1)/Pt(0.5)]₃/Ru(10), 単位(nm)とした。[Pt(0.5)/Co(0.6)]₅ (有効異方性磁場 $H_k^{\text{eff}} = 9.3$ kOe) を Hard 層, [Co(1)/Pt(0.5)]₃ ($H_k^{\text{eff}} = 3.5$ kOe) を Soft 層とする。成膜には DC マグネトロンスパッタを用いた。この多層膜を電子線リソグラフィと Ar イオンエッチングにより加工し、同一基板上に様々な直径 D の磁性ドットを形成した。 $D = 100 \sim 2000$ nm の範囲で変化させた。異常 Hall 効果 (AHE) 測定用の電極およびマイクロ波交流磁場印加用の Au 線路もあわせて形成した。MAS 測定では、dc 磁場 H_{dc} を膜面に垂直に $-10 \sim 10$ kOe の範囲で印加し、Au 線路に高周波電流を印加し交流磁場 $h_{\text{rf}} = 500$ Oe を膜面内に印加した。一例として Fig. 1 に交流磁場を印加していない場合の AHE によって測定した $D = 2000$ nm のドットの磁化曲線を示す。Hard 層, Soft 層それぞれの異方性の大小に対応したステップ状の磁化曲線が得られた。Fig. 2 に MAS 実験より得られた $D = 2000$ nm のドットにおける反転磁場 H_{sw} を交流磁場周波数 f_{rf} の関数として示す。赤線が Hard 層, 青線が Soft 層の H_{sw} を示している。Hard 層の H_{sw} は f_{rf} の増加に伴い $f_{\text{rf}} = 20$ GHz までほぼ線形に減少しており、60% の H_{sw} 低減が確認された。一方 Soft 層の H_{sw} は非線形的に減少し、特に低周波領域で大きな H_{sw} 減少を示し、95% の H_{sw} 低減が確認された。講演時には、より微小な D での MAS 実験の結果についても報告する予定である。

参考文献

- 1) M. Furuta *et. al.*, *J. Appl. Phys.* **115**, 113914 (2014).

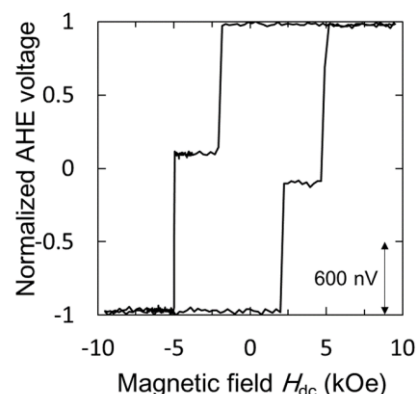


Fig. 1 Magnetization curve for the layer structured nanodot ($D = 2000$ nm)

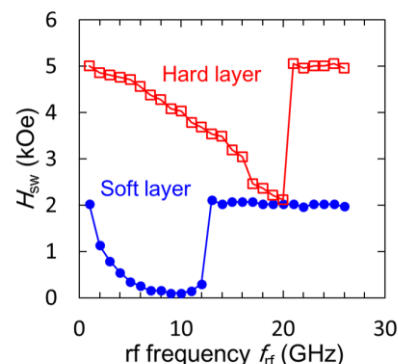


Fig. 2 Switching field H_{sw} of each layer of layer structured dot as a function of rf frequency

マイクロマグ解析による MAMR 用 STO に加わる外部磁界の検討

板垣諒、金井靖、Simon J. Greaves¹、村岡裕明¹
 (新潟工科大、¹東北大)

Micromagnetic analysis of the effect of external field rise time on STO oscillation for MAMR

R. Itagaki, Y. Kanai, S. J. Greaves¹, H. Muraoka¹
 (Niigata Inst. of Tech., ¹Tohoku Univ.)

はじめに

高周波アシスト磁気記録(MAMR)方式は、高周波発振素子(STO)から発生する高周波磁界を主磁極(MP)からの記録磁界に重畳し、高異方性媒体への記録を可能にする¹⁾。STOはMAMRで最も重要な構成要素であり、安定した強い高周波磁界を発生すること、低い注入電流密度(J)で発振すること、媒体のFMRを誘起する周波数の磁界を発生することが求められる。我々は記録ヘッドギャップ中にSTOを挿入したモデル(統合STO)は、STO単独のモデル(孤立STO)に比べSTOが安定に発振し難いことを示した²⁾。つまり、ヘッドからSTOに印加される磁界(in-gap field)を単に強くしてもSTOは安定に発振しない。ここではSTOの安定な発振を目的として、孤立STOのマイクロマグネティック解析を行った。記録ヘッドのin-gap fieldを想定してrise timeを変えた高周波磁界を加えたところ、STOの発振に顕著な差異がみられたので報告する。

解析モデルとソフトウェア

Fig. 1に示すように、高周波発振層(FGL)とスピン注入層(SIL)からなるSTOを考える。SILは透過のスピンをFGLに注入する。STOの諸元をTable 1に示す。STO素子に加える外部磁界は、面直(z 方向)成分のみを持ち、かつ均一であると仮定した。解析には富士通製のEXAMAG V2.1を用いた。

計算結果

STOに1 GHz、20 kOe_{pp}、rise time (0 to +90%)の異なる2種類の外部磁界(H_{apl})を加えた。 J は 3.0×10^8 A/cm²とした。Fig. 2にSTOの発振を示す。同図の横軸は時刻であり初期状態より表示している。縦軸はFGL磁化の面内成分(M_y)と面直成分(M_z)をFGL全体で平均し、飽和磁化で規格化して表示した。 $M_y/M_s = 1$ のとき、FGLの磁化が完全に面内で回転していることを示す。同図より、rise timeが短い(0.083 nsec)場合はSTOが安定に発振するが、rise timeが長い(0.283 nsec)場合は、回転が不安定である。つまり、 M_y/M_s の絶対値が小さく、かつ変動し、発振周波数も低い。 J を 2.0×10^8 A/cm²および 4.0×10^8 A/cm²と変えた場合も同様の傾向が見られた。

小さな記録ヘッド素子を用いるとrise timeが短くなり、安定したSTOの発振を得ることが可能³⁾だが、単なる素子の微小化は記録磁界強度が低下する懸念がある²⁾。講演では安定なSTOの発振を得るための条件を述べる。

本研究の一部はJSPS 科研費(基盤研究(c)課題番号 16K06321)および情報ストレージ研究推進機構(ASRC)の補助金による。

参考文献

- 1) J.-G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang: *IEEE Trans. on Magn.*, 44(1), 125, 2008.
- 2) 金井, 板垣, S. Greaves, 村岡: 信学会研資 MR2017-9, 2017.
- 3) T. Katayama, et al., *Journal of App. Phys.*, 117, 17C503, 2015.

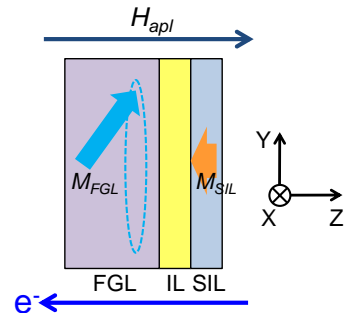


Fig. 1 Schematic of STO.

Table 1 Major parameters of STO.

	FGL	SIL
Thickness	10 nm	2 nm
$4\pi M_s$	20 kG	8 kG
H_k in z direction	31.4 Oe	31.4 Oe
Exchange, A	2.5×10^{-6} erg/cm	1.0×10^{-6} erg/cm
α	0.02	0.02

Non-magnetic interlayer (IL) thickness = 2 nm, $P_o = 0.5$,
 Width (x) x height (y) = 30 nm x 30 nm

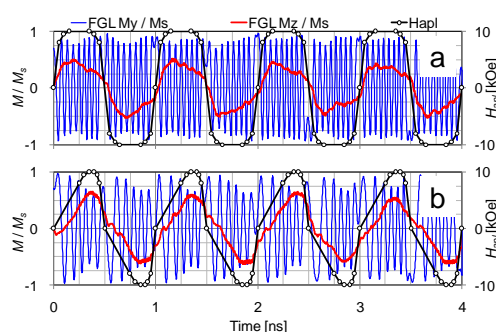


Fig. 2 Volume-averaged FGL oscillation vs. time. $J = 3.0 \times 10^8$ A/cm², AC external field = 1 GHz, 20 kOe_{pp}.

MAMR を用いた二層記録における

上層と下層の間の交換結合の影響について

Effect of Exchange Coupling between Top & Bottom Layers for Dual Layer in Microwave Assisted Magnetic Recording

菊地 忠裕
Tadahiro Kikuchi

Simon Greaves
Simon Greaves

村岡 裕明
Hiroaki Muraoka

東北大学電気通信研究所
RIEC, Tohoku University

1. まえがき

ハードディスクの大容量化に伴い、新しい記録方式が研究されている。その一つにマイクロ波アシスト磁気記録(MAMR)を用いた二層記録という方法があり、スピントルク発振機(STO)の高周波磁界の周波数を変化させることで、二つの層から一つの層を選択して磁化反転させることが可能となる[1]。ここでは、ECC媒体の反転特性を上層と下層の間の交換結合を変化させて計算する。

2. 計算方法

本研究では LLG 方程式によるシミュレーション[2]を行った。表 1 に計算条件を示した。図 1(1a)のモデルのように ECC 媒体の上層は、ヘッドに近い側から 3nm が軟磁性層、残りの 2nm が硬磁性層の積層構造となっている。軟磁性層と硬磁性層の間には交換結合が働き、大きさは 6.0 erg/cm^2 である。下層は非磁性層 2nm を挟んで、4nm が軟磁性層、残りの 3nm が硬磁性層、交換結合は 4.0 erg/cm^2 である。

シミュレーションでは粒子に対してヘッドが下向きに磁界を印加しながら 10m/s で動く。STO の高周波磁界の周波数は $0\sim 60\text{GHz}$ の範囲を取り、その周波数それぞれにおいて反転可能な上層の硬磁性層の異方性磁界(H_k)を、上層と下層の間の交換結合を変化させて調べた。

3. 結果と考察

図 1(1b)、図 2(2a)、図 2(2b)はそれぞれ上層と下層の交換結合が $0, 0.5, -0.5 \text{ erg/cm}^2$ のときの上層における周波数と反転可能な H_k の関係である。(1b)では下層の磁化が上向き(赤)よりも下向き(黄)の方が、上層の反転可能な H_k が大きくなった。これは下層の磁化から発生する磁界が、上層の磁化の反転を助けたためであると考えられる。

(2a)と(2b)を見ると交換結合が負のとき、周波数が $40\sim 50\text{GHz}$ において反転可能な H_k の差が小さくなっているのが分かった。これは負の交換結合が下層の磁化の影響を相殺したためである。下層の磁化の向きによる影響が小さくなれば、反転の信頼性が高くなると考えられる。

4. 参考文献

[1]H.Suto,T.Nagasawa,K.Kudo,T.Kanao,K.Mizushima,R.Sato, Phys. Rev.Applied 5 014003 Published 12 January 2016
[2]S.Greaves, High Performance Computing on Vector Systems 2007, pp.229-244, Springer Berlin Heidelberg ISBN 978-3-540-74383-5

表 1 計算条件

粒子のサイズ(上層)	7nm×7nm×5nm
粒子のサイズ(下層)	7nm×7nm×7nm
飽和磁化	750 emu/cm ³
印加磁界	約 10 kOe
温度	4.2 K
異方性定数(Top Soft Layer)	$5.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$
異方性定数(Bottom Soft Layer)	$3.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$
異方性定数(Hard Layer)	Variable
ダンピング定数	0.03
STO のサイズ	40nm×40nm×15nm

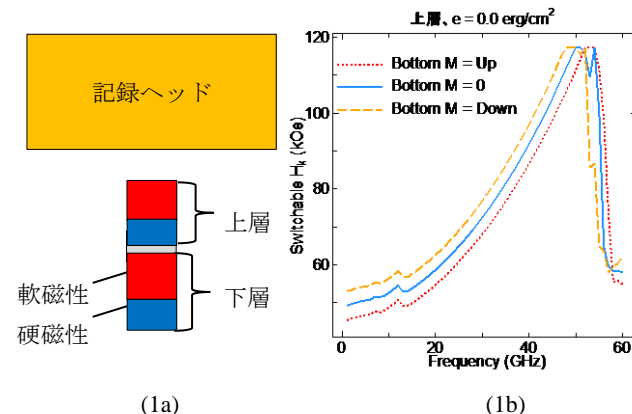


図 1.上層と下層の交換結合が 0 erg/cm^2 のとき

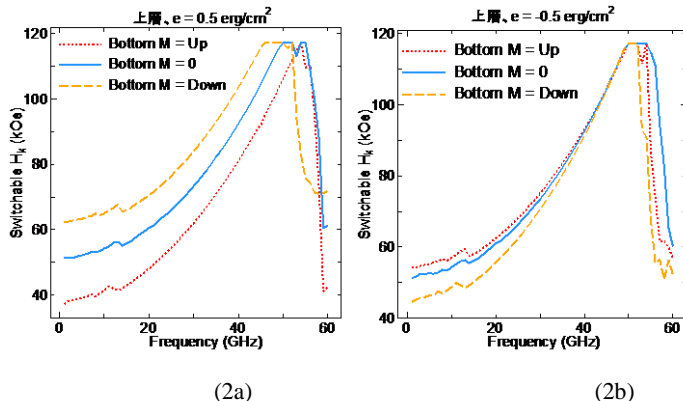


図 2.上層と下層の交換結合が $\pm 0.5 \text{ erg/cm}^2$ のとき

スーパーコンピュータ FX10 を用いたマイクロマグネティックシミュレータの高速化

新井眞大, 赤城文字, 吉田和悦

(工学院大学大学院 工学科電気・電子専攻)

Speed-Up of STO Micromagnetic Simulator Using Supercomputer FX10

Masahiro Arai, Fumiko Akagi, Kazuetsu Yoshida

(Graduate School of Electrical Engineering and Electronics, Kogakuin University)

1. まえがき

近年, 磁性材料を用いた様々な技術の設計手段には, 磁性体の複雑な磁化挙動を解析するマイクロマグネティックシミュレーションが用いられている. 中でも, 磁気ディスク装置(Hard Disk Drive: HDD)のヘッドや媒体それぞれの解析には非常に多く用いられている. 一方, 高記録密度化の手段として期待されているマイクロ波アシスト磁気記録方式(Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR) [1]は, 磁気ヘッドと媒体を同時に解析することが重要である. しかし, 要素数が 900 万個以上必要であり, 高々4ビット計算するにも通常のワークステーションでは数日を要する.

本研究では計算時間を短縮することを目的に, 東京大学のスーパーコンピュータ FX10 を使用して並列化の手法を検討した. 並列化手法として, メッセージ交換ライブラリに MPI(Message Passing Interface)を用いることで複数の CPU 間で並列処理を行う手法[2], OpenMP を用いたマルチスレッドによる並列処理を行う手法[3], そして上記二つの方法を合わせた Hybrid 並列化手法をシミュレータに導入して比較した.

2. 計算モデル及び計算方法

高速化の検討のモデルは, MAMR のスピントルクオシレータ(STO)のみとした. STO は電流密度低減のためにスピン注入層を 2 層用いた構造とし, クロストラック方向と高さは 30 nm, STO 全体の膜厚は 25nm とした. 1つの要素は 2.5 nm の立方体であり, 要素数は 229376 個である.

本シミュレータでは, 磁化挙動を(1)式に示す Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式を解くことで求めた.

$$(1 + \alpha^2) \frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times (\vec{H}_{eff} - \alpha \vec{H}_{st}) - \frac{\gamma}{M_s} \vec{M} \times \{ \vec{M} \times (\alpha \vec{H}_{eff} + \vec{H}_{st}) \} \quad (1)$$

\vec{M} は磁化ベクトル, γ はジャイロ磁気定数, α はダンピング定数, M_s は飽和磁化, \vec{H}_{eff} は実効磁界ベクトルとする. \vec{H}_{st} は STO へ電流を流す事で各層に印加される偏極スピンによる磁界(スピントルク磁界)である. また, 実効磁界の一つである静磁界の計算に最も多くの計算時間を要するため, 高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)を用いているが, 計算時間の 70% は静磁界の計算である.

計算に用いた東京大学のスーパーコンピュータ FX10 のスペックを Table.1 に示す.

Table.1 Specification of FX 10

Processor	1.848 GHz, 16core × 1
Theoretical peak performance	236.5 Gigaflops
Memory capacity	32 GB
HDD/SSD	1.1 PB+2.1PB

3. プログラムの並列化

MPI の場合, 反復処理の分割や通信命令をプログラミングしなくてはならない. まず, MPI 関数を用いて実行 CPU ノード数とランクを取得する. 取得したノード数とランクを利用して処理範囲を各ノードに均等に割り当てるように分割することで反復処理の並列化を行う. その後, 通信関数により各ノードの計算結果を統合することで, 計算結果に矛盾が生じないようにする. 通信関数には MPI_Allreduce() または MPI_Allgather() を用い, その性能を比較する.

OpenMP の場合は #pragma から始まる指示文を挿入するだけで並列化を行える. 並列化を適用する for ループの直前に #omp parallel for schedule(static) private() を挿入することで処理範囲が均等に分割され, 反復処理の並列化を行う.

Hybrid 並列化では MPI と OpenMP のそれぞれで並列化に必要な処理をプログラムに組み込み, 並列化を行う.

また並列化は計算時間の大半を占める静磁界, 磁化の FFT を行う計算部に対して行った.

4. 計算結果

Fig.1 に OpenMP におけるスレッド数, MPI におけるプロセス数, 及び hybrid 並列化におけるスレッド数 (プロセス数は 7 に固定) と計算時間の関係を並列化の種類で比較した結果を示す. OpenMP は約 10.2 倍, MPI_Allreduce() は約 8.4 倍, MPI_Allgather() は約 11.8 倍, MPI_Allgather() を使用した hybrid 並列化は約 22 倍の高速化に成功した. このことから MPI と OpenMP の両方を利用した Hybrid 並列化が一番効果が得られることがわかった. また, MPI_Allreduce() では計算結果の統合の際に加算を行うため, その分通信時間がかかってしまったと考えられる. これより, 演算を必要としないデータの統合を行う場合は MPI_Allgather() を用いた方が計算時間が短いことがわかった.

5. まとめ

本研究は東京大学のスーパーコンピュータ FX10 を用いてマイクロマグネティックシミュレータの並列化による高速化の検討を行った.

静磁界の計算部に MPI_Allgather() を用いた Hybrid 並列化を適用することで計算時間を短縮できた.

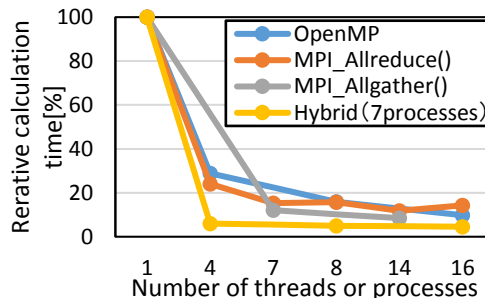


Fig.1 Relationship between number of threads or processes and calculation time for different types of parallelization

謝辞 本研究の一部は, 情報ストレージ研究推進機構(ASRC)の助成を受けて行った.

参考文献

- [1] Y. Tang, and J. G. Zhu, IEEE Trans. Magn. Vol. 44, no. 11, pp. 3376-3379, (2008).
 [2] P. Pacheco, 秋葉博: MPI 並列プログラミング, p. 43-56, 培風館, 東京, (2001)
 [3] 牛島省: OpenMP による並列プログラミングと数値計算法, p. 11-73, 丸善, 東京, (2007)

垂直磁気記録用書き込みヘッドの性能改善

中村 慶久 板垣 諒* 金井 靖*
(東北大学電気通信研究所、*新潟工科大学工学部)

Improvement of write head for PMR
Y. Nakamura, *R. Itagaki, *Y. Kanai
(RIEC Tohoku Uni., Niigata Institute of Tech.*)

1 はじめに

垂直磁化方式による HDD が 2005 年に世に出て、面記録密度が一時期進展したが、近年は足踏み状態が続いている。これは垂直磁気記録 (PMR) の高密度化に対する trilemma のためである。この状況を打破するため、磁性層の保磁力を低下させて書き込むエネルギーアシスト方式が提案されているが、熱アシスト方式でも書き込み磁界の強いことが望ましいことは、Intermag 2017 でも報告されている [1]。

筆者らは、垂直磁化方式の実験を進めていた経験から、現状の PMR 用書き込みヘッドには改善の余地があると考え、検討を進めている [2]。本報告では、できるだけ小さなインダクタンスで、高速でも強い書き込み磁界を生じる PMR 用書き込みヘッドの可能性を、FEM 解析によって調べた結果を報告する。

2 解析法

渦電流を考慮した 3 次元非線形過渡磁界解析プログラム (JSOL 製 JMAG) [3] を使用して、磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} と電気スカラーポテンシャル ϕ を用いた $\mathbf{A} - \phi$ 法でヘッド磁界を解析した。インダクタンス L は、コイルを鎖交する磁束 Φ とコイル電流 i とから $L = d\Phi/di$ で求めた。ヘッド材料の非直線性は考慮したが、磁気共鳴、磁気異方性、ヒステリシス、変位電流などは無視した。

3 ヘッドのモデル化

Fig.1 は、現用書き込みヘッド [4] をモデル化したものの断面図である。また Fig.2 は筆者らが依然提案した主磁極先端励磁型ヘッド [5] をモデル化したものである。その他、Fig.2 を基本に様々なヘッド構造を想定して解析し、磁界強度や磁力線分布、磁極内の磁化状態、インダクタンスなどを比較した。

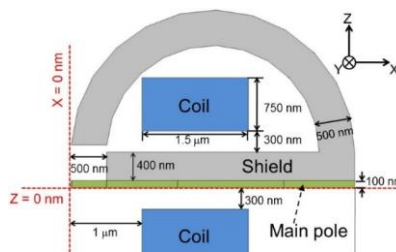


Fig. 1 モデル化した現用ヘッド

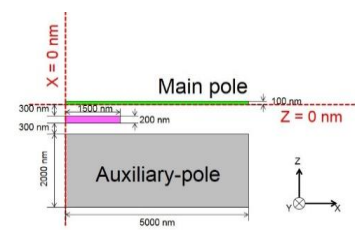


Fig. 2 主磁極先端励磁型ヘッド

4 結果

Fig.3 は、現用ヘッドのモデルを Current、主磁極先端型の基本モデルを Model-2、この主磁極と補助磁極をリターンヨークで結んだものを Model-2R として、起磁力に対する記録媒体中心層に生じる磁界強度をプロットしたものである。これらのインダクタンスは、Current が 68.43 pH であるのに対して、Model-2 が 17.6 pH、Model-2R が 19.9 pH であった。

この結果から、現用ヘッドは書き込み磁界強度とインダクタンスのいずれもが主磁極先端型より劣っていることが判る。さらに詳細に調査し、その結果を報告する。

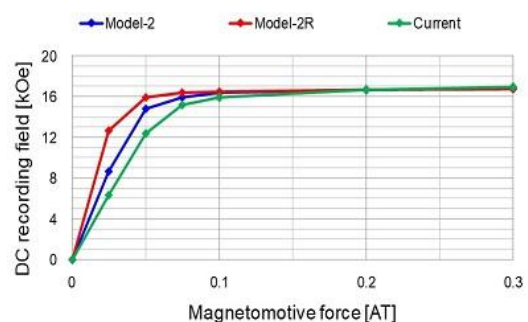


Fig. 3 起磁力に対する書き込み磁界強度

[参考文献]

- [1] S. Bance, et al, Digest of Intermag 2017, FE-05, April 2017. [2] 中村他、信学技報、MR2016-37、pp.45、Dec. 2016.
[3] <https://www.jmag-international.com/index.html> [4] H. Naka et al, Toshiba Review, 70, 30, pp.25, 2015
[5] H. Muraoka, et al, IEEE Trans. on Magn., 35, 2, pp.643, 1999.

積層二層磁気記録媒体の再生分解能の補正

Readback resolution of dual-layer recording

齋藤仁 村岡裕明

Jin Saito Hiroaki Muraoka

東北大学 電気通信研究所

RIEC, Tohoku University

1. はじめに

近年ハードディスク装置(HDD)の記録容量と記録密度の向上が求められている。マイクロ波磁界を用いることにより積層記録層に層別に記録再生して大容量化する方法が提案されている[1]。ここでは積層2層媒体の直接再生から両層の信号を分離して復号することを目的に再生過程の計算を通じて検討しその再生特性を検討した。

2. 計算方法

2層再生を行うときにスペーシングロスの差により1層目と2層目の出力特性に大きな差があると復号時に振幅が検出できないため、両者のロールオフ特性の違いが問題になる。ヘッドに近い1層目の膜厚を薄くすることで相対的に2層目の出力を大きくして振幅を補正できるが、今度はスペーシングロスのため両者の記録密度特性に差異が生じる。今回提案するモデルは2層目の下に1層目と同じ記録がされている層を補助層として設けて出力とロールオフを調節する。1層目と補助層の出力を合わせることで1層目を薄くしても出力を大きくできる。2次元の再生感度関数[2]と磁化分布を用いて相反定理によりこのときの再生波形を計算した。

ここで2層同時読み取りを行う際、1層目の記録磁化が上向きで2層目が下向きの場合と1層目下向きで2層目が上向きの場合いずれも出力が打ち消す方向なので判別が困難となる。2層目を1層目より半ビットずらして設置し、1層目の最初のビットを既知とするとその後のビットも帰納法的に判別することができる。

3. 結果

層1が3nm, 層2が8nm, 補助層が5nmのモデルで計算を行った。図1は補助層を用いた時のロールオフを示している。補助層を用いることにより補助層と上層の合成出力と下層の出力を近づけることができた。図2は各ビットの中心点をサンプリングしたヒストグラムを示している。補助層を用いない場合では出力差が生じることで3通り

参考文献

- 1) H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, T. Kanao, K. Mizushima, and R. Sato "Layer-Selective Switching of a Double-Layer Perpendicular Magnetic Nanodot Using Microwave Assistance" Phys. Rev. Applied 5, 014003 – Published 12 January 2016.
- 2) H. Muraoka, Y. Sugita and Y. Nakamura "Simplified Expression of Shielded MR Head Response for Double-Layer Perpendicular Medium" IEEE Trans. Magn. 35,5,2235, SEP 1999.

の判別ができないが、補助層を用いた場合ノイズおよび符号間干渉によりヒストグラムに幅が生じているが、上述の3通りの上下層の磁化の組み合わせについてそれぞれの判別が可能である。より現実的な復号を目指すためにPRML方式を用いることを検討する必要がある。

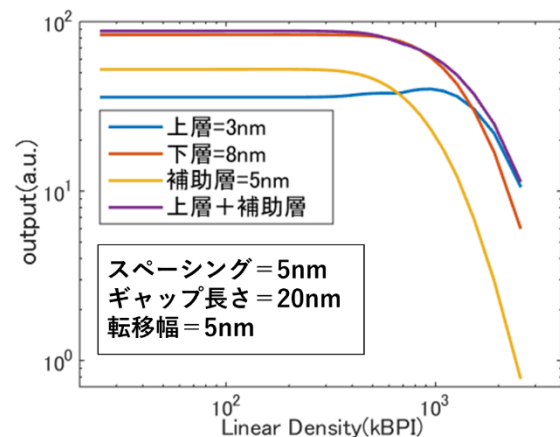


図1 ノイズ付加時の二層同時再生波形

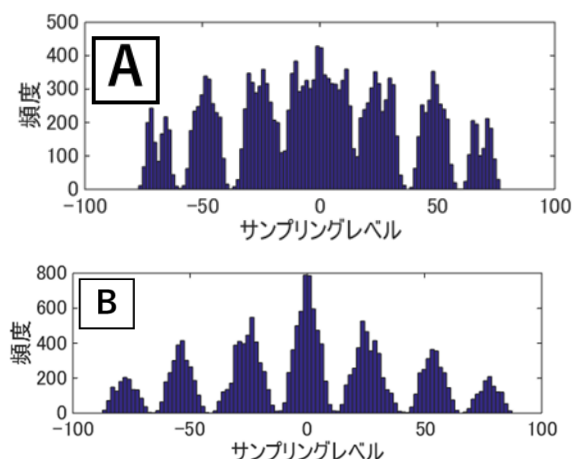


図2 A 2層, B 補助層を用いた時のクロック点での振幅レベルのヒストグラム。SN比は-28dBである

スピントルク発振素子を用いた2層の反強磁性結合記録磁化の 選択的共鳴読み出し：マイクロマグネティックシミュレーション

金尾太郎、首藤浩文、永澤鶴美、水島公一、佐藤利江
(東芝研究開発センター)

Micromagnetic simulation of selective resonant readout of two-layer antiferromagnetically-coupled recording magnetization using a spin-torque oscillator

Taro Kanao, Hirofumi Suto, Tazumi Nagasawa, Koichi Mizushima, and Rie Sato
(Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation)

はじめに

複数の記録層をもつ3次元磁気記録¹⁾における読み出し方法として、スピントルク発振素子(STO)と記録層の共鳴を利用した共鳴読み出しが提案されている²⁾。この方法では記録層の共鳴周波数にSTOの発振周波数を近づけることにより層を選択するため、各記録層に選択的にアクセスできる。これまでにSTOを用いた共鳴読み出しが可能なことを、記録磁化が1層の場合に実験²⁾とマイクロマグネティックシミュレーション³⁾により示してきた。今回は2層の場合に選択的共鳴読み出しが可能であることをマイクロマグネティックシミュレーションにより示す。

シミュレーションの設定

Fig. 1に、STOと2層の記録磁化(RM)の設定を示す。STOとして、磁気抵抗効果により大きな出力信号が得られる面外発振自由層・面内固定層のものを用いた。また、記録磁化の各記録層は反強磁性結合した2層の磁性層(AFC層)からなっている。それらはSTOの発振周波数と近い共鳴周波数を持ち読み出しに用いられるソフト層と、十分高い共鳴周波数を持ち情報を保持するハード層からなる。各磁化はソフト層の共鳴周波数への漏れ磁場の影響を打ち消すように配置されている。AFC層の磁化の向きにより共鳴周波数が異なるようにするために、記録磁化には読み出し磁場 $H_z^{RM} = 0.2$ kOeをz方向に加えている。

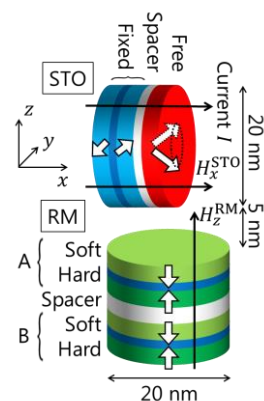


Fig. 1. STO and recording magnetization (RM).

結果

Fig. 2に、4通りのAFC磁化配置に対してSTOの発振周波数(a)(b)および発振パワー(c)(d)の、STOに加えるx方向磁場 H_x^{STO} 依存性を示す。(a)(b)のように、 H_x^{STO} に対してほぼ線形に発振周波数が増加していく。(a)(b)にはそれぞれソフト層BとAの磁化配置”Down”, ”Up”での共鳴周波数をプロットした。対応する磁化配置のとき、発振周波数がそれらの共鳴周波数に近づくと(c)(d)のように発振パワーにディップが現れる。これはSTOとソフト層磁化が共鳴的に同期振動し、STOに対する実効的な緩和が増加したためである。この発振の変化を用いて磁化方向を判別することができる。さらに、(c)(d)では共鳴に寄与しないもう一方のAFC層の磁化の向きによる影響がほとんど表れていない。したがって、STOの発振周波数を変化させることで各AFC層に選択的にアクセスし読み出すことができる。

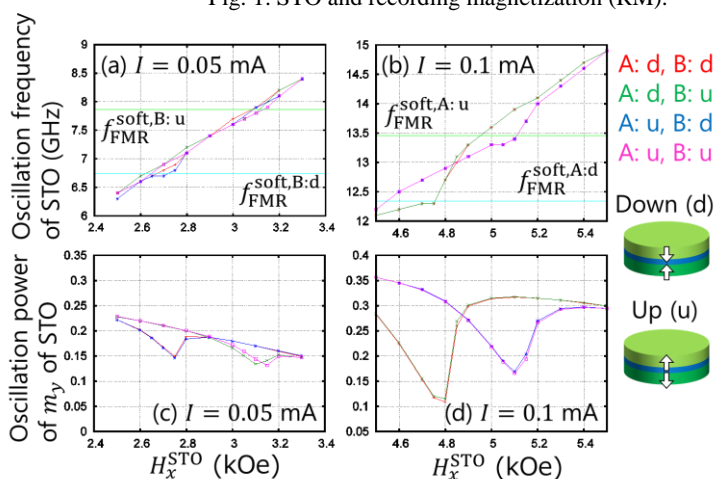


Fig. 2. Oscillation frequency and power of STO as a function of H_x^{STO} .

参考文献: 1) H. Suto et al., Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 07MA01 (2016). 2) H. Suto et al., Nanotechnology **25**, 245501 (2014). 3) T.

Kanao et al., MMM2016, GH-05, New Orleans. 本研究は科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によっておこなわれた。

磁性層の実効的光吸収率増大による全光型磁化反転の高効率化

飯坂岳¹, 吉川大貴¹, 二川康宏¹, 塚本新²

(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

High efficiency excitation of All-Optical magnetization Switching with increasing of effective optical absorption in magnetic layer

Takeshi Iisaka¹, Hiroki Yoshikawa¹, Yasuhiro Futakawa¹, Arata Tsukamoto²

(¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ., ² College of Science and Technology, Nihon Univ.,)

はじめに:フェムト秒パルスレーザーによる極短時間の光をフェリ磁性 GdFeCo 薄膜に照射することのみで、全光型磁化反転現象 (All-Optical magnetization Switching : AOS) を誘起することができる¹。AOSは従来の外部磁場による磁化反転トルクを利用する磁気記録原理とは異なり、極短時間の作用時間で磁化反転可能であることから、磁気記録の飛躍の高速化への新たな手法として期待されている。磁性層に吸収される照射光エネルギー密度に強く依存しており、その閾値によって反転可否が決まる²。磁性層の実効的光吸収率を光学多層膜化により増大し、反転効率増加を図る。酸化防止保護膜でもある SiN 誘電体膜厚の異なるフェリ磁性 GdFeCo 薄膜の試料群に対し、連続光吸収スペクトル計測と超短パルス光照射による形成磁区の大きさの照射光強度依存性を評価することで、連続光での実効的光吸収特性と、超短パルス光での AOS 応答の相関についての検討を行う。

実験方法: 測定試料には、DC, RF マグネトロンスパッタ法により作製した。SiN (t nm) / Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4} (20 nm) / SiN (5 nm) / glass sub. ($t = 20, 40, 60, 80, 100$)を用いる。本試料群において、紫外可視近赤外分光計を用いて、光を膜面垂直方向に入射し、反射率・透過率スペクトルの計測を行い、磁性層の実効的吸収率を見積もる。さらに、試料に中心波長 800 nm パルス幅 90 fs (半値全幅) の単一パルスレーザーを照射し、室温にて AOS を誘起し、偏光顕微鏡を用いて形成磁区を磁気光学像に観察する。

実験結果: Fig.1 (a)に分光計によって測定した反射率・透過率スペクトルから見積もった波長 800 nm の光に対する磁性層実効的吸収率 SiN 膜厚 t 依存性を示す。Fig. 1 (b)に上記単一超短パルス光を各試料に照射し磁区サイズを各照射光強度毎に示す。SiN 膜厚が 20, 40, 60, 80 nm の順で磁性層の実効的吸収率が大きくなり、それとともに、反転エネルギー密度閾値が減少する。結果より Fig. 2 の様に反転エネルギー閾値と連続光での実効的吸収率は強い相関を持つことから、超短パルス光においても、光学干渉効果による実効的吸収率の増大を生じたものと示唆される。

謝辞: 本研究は平成 25~29 年度文部科学省私立大学戦略的基盤形成支援事業(S1311020) および平成 26~30 年度文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型) ナノスピントランズフォーム科学(Grant No. 26103004)の助成を受けて行った。

参考文献

- 1) C.D.Stanciu, F.Hansteen, A. V.Kimel, A.Kirilyuk, A.Tsukamoto, A.Itoh, and Th.Rasing : *Phys.Rev.Lett.* 99, 047601 (2007)
- 2) H. Yoshikawa, S. Kogure, T. Sato, A. Tsukamoto, and A. Itoh: *J. Magn. Soc. Jpn.* 38, 139 (2014).

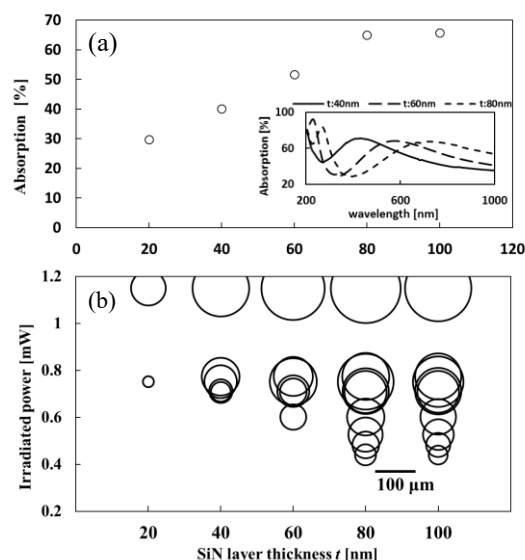


Fig. 1
(a) SiN layer thickness dependence of absorption (Inserted figure : Absorption spectrum)
(b) SiN layer thickness dependence of created domains size by AOS in the film SiN (t nm) / Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4} (20 nm) / SiN (5 nm) / glass sub. ($t = 20, 40, 60, 80, 100$)

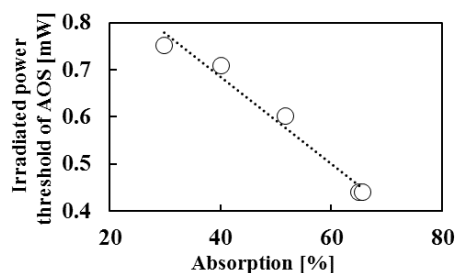


Fig. 2 The correlation between irradiated power threshold of AOS and absorption

Pt 下地層による GdFeCo 全光型磁化反転閾値の低減効果

吉川大貴¹, Souliman El Moussaoui², 笠谷雄一², 二川康宏¹, 塚本新²(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

Reduction effect of All Optical magnetization Switching threshold in GdFeCo stacked on Pt

Hiroki Yoshikawa¹, Souliman El Moussaoui², Yuichi Kasatani², Yasuhiro Futakawa¹, Arata Tsukamoto²(¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ., ² College of Science and Technology, Nihon Univ.,)

はじめに: 外部磁場を要せず数十フェムト秒の超短パルス光をフェリ磁性薄膜に照射することで全光型磁化反転現象(All - Optical magnetization Switching: AOS)を誘起することができる。磁性金属薄膜では、超短パルス光吸収後 fs ~ 数十 ps で電子・スピン・格子の各系・系間の非断熱的エネルギー散逸過程が顕在化する。これまでに試料層構成、電子比熱の異なる金属を隣接した試料群における検討から、この時間領域において AOS ではサブ ps での電子系の膜厚方向へのエネルギー散逸が重要であることを示唆した¹⁾²⁾。さらに、GdFeCo 薄膜に Pt 層を隣接することにより、超短パルス光照射により逆スピンホール効果を経由し、電流が誘起されることを THz 分光計測から報告している³⁾。本稿では更に極短時間の電子系エネルギー散逸および界面ヘテロ構造と AOS の相関を検討するために、異なる金属を隣接した試料群に対し、同様に AOS 磁区サイズの照射光強度依存性を評価し、AOS と電子系内での空間的エネルギー散逸に関する検討を行った。

実験方法: Magnetron Sputtering 方式により作製した SiN(60 nm) / Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4} (10 nm) / {(a)Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4}, (b)Al₉₀Ti₁₀, (c)Cu, (d)Pt} (5 nm) / SiN (5 nm) / glass sub. 薄膜に中心波長 800 nm パルス幅 90 fs(半値全幅)のガウシアンレーザー光を膜面側より照射することにより室温にて磁化反転を誘起し、形成磁区を偏光顕微鏡の磁気光学像にて観察する。

実験結果: Fig.1 に上記超短単一パルス光を各試料(横軸)に照射し形成される磁区サイズ(円面積)を各照射光強度毎(縦軸)に示す。いずれの試料でも AOS 形成磁区サイズは照射光強度に一意に対応し、GdFeCo (10 nm)の試料の隣接層(5 nm)が(a),GdFeCo (b)AlTi, (c)Cu, (d)Pt の順に AOS 誘起光強度閾値が小さくなる。主に光入射側の GdFeCo 層にて吸収された光エネルギーはサブ ps という極短時間において主に電子系でのエネルギー散逸が想定され、隣接金属層も含み各層の電子比熱に準じ Fig. 2 の様な分配が予想される²⁾。Fe, Co, Al, Ti, Cu, Pt の電子比熱係数はそれぞれ 5, 4.7, 1.35, 3.5, 0.688, 6.8 mJ / mol K²である⁴⁾。(c)が最も大きい磁区を形成し、次いで (b), (a), ととなり Pt の試料(d)が最も小さく、(a), (b), (c)は電子比熱に基づくエネルギー分配にて予想した傾向を示した。一方 Pt 隣接試料(d)は上記エネルギー分配モデルでは説明できず、特異な結果を示すことが明らかとなった。

謝辞: 本研究は平成 25~29 年度文部科学省私立大学戦略的基盤形成支援事業(S1311020) および平成 26~30 年度文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型) ナノスピン変換科学(Grant No. 26103004)、また日本学術振興会特別研究員奨励費(16J01232)の助成を受けて行った。

参考文献

- 1) H. Yoshikawa, S. El. Moussaoui, S. Terashita, R. Ueda, and A. Tsukamoto: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 7S3 (2016)
- 2) 吉川大貴, Souliman El Moussaoui, 寺下進之佑, 塚本新: マグネティクス研究会, MAG-17-029 (2017)
- 3) T. J. Huisman, C. Ciccarelli, A. Tsukamoto, R. V. Mikhaylovskiy, Th. Rasing, and A. V. Kimel: *Appl. Phys. Lett.* **110**, 072402 (2017)
- 4) 日本金属学会編: “改訂 4 版 金属データブック”, (丸善出版, Japan, 2004) p 17.

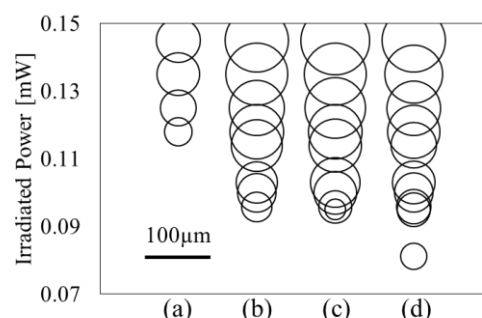


Fig. 1 The layer dependence of created domains sizes by AOS in the films SiN(60 nm) / Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4} (10 nm) / {(a)Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4}, (b)Al₉₀Ti₁₀, (c)Cu, (d)Pt} (5 nm) / SiN (5 nm) / glass sub.

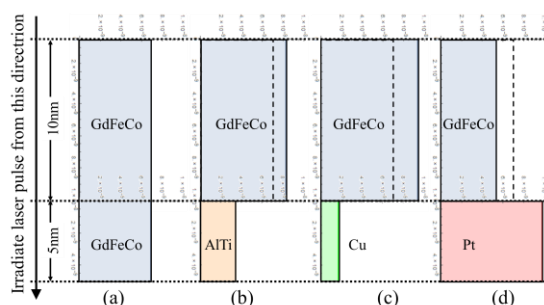


Fig. 2 The estimation of the energy distribution at reaching temporal equilibrium electron temperature with electronic specific heat