

構造不均一性を考慮した FePt グラニューラ薄膜の規則度ならびに垂直磁気異方性エネルギーの膜厚依存性の解析

○齊藤 節¹, タム キム コング², 櫛引 了輔², 小川 智之¹, 齊藤 伸¹

(1. 東北大学, 2. 田中貴金属工業)

Analysis of film thickness dependence of degree of order and perpendicular magnetic anisotropy energy for FePt granular film with structural inhomogeneity

○Takashi Saito¹, Kim Kong Tham², Ryosuke Kushibiki², Tomoyuki Ogawa¹, and Shin Saito¹

(1. Tohoku Univ., 2. TANAKA KIKINZOKU KOGYO K. K.)

はじめに 熱アシスト磁気記録媒体の記録層では、室温で高い垂直磁気異方性エネルギーを有する L1₀ 型 FePt グラニューラ磁性層が有力な材料候補である。この FePt グラニューラ磁性層に関する先行研究では、FePt 結晶粒表面での Pt の偏析¹⁾、結晶軸のランダムな配向²⁾、L1₂ 相³⁾、もしくは双晶⁴⁾の形成による構造不均一性が生じることが報告されている。しかしながら、このような構造不均一性を考慮して、FePt グラニューラ薄膜の規則度 (S_{in}) や垂直磁気異方性エネルギー ($K_{u\perp}$) を解析した報告は見当たらない。そこで、我々は種々の粒界材 (grain boundary material, GBM) を有する FePt グラニューラ薄膜の回折 X 線と垂直トルク曲線を膜厚ごとに評価し、膜厚方向の構造不均一性を考慮して規則度や $K_{u\perp}$ を解析したので報告する。

実験結果 試料の層構成は FePt-30vol.%GBM (5 nm)/ MgO(5 nm)/ a-Co₆₀W₄₀(80 nm)/ Sub. とした。GBM は B₂O₃、SnO、WO₃、Nb₂O₅、TiO₂、MnO、MgO、C (カーボン) である。磁性層は L1₀ 型への規則化のため、基板温度を 550 °C とし成膜した。XRD 測定により試料中には c 軸配向した FePt 結晶粒が存在していることがわかった。Fig. 1 には一例として GBM が (a) SnO、(b) C の FePt グラニューラ薄膜の L1₀ 相の (110)、(220) 面からの回折線の積分強度 (I_{110} , I_{220}) の膜厚 (d_{mag}) 依存性を示す。SnO グラニューラ薄膜では、 I_{110} と I_{220} は 5 nm までは d_{mag} に比例して線形に増加し、5 nm 以降では飽和した。一方、C グラニューラ薄膜では、 I_{110} と I_{220} は d_{mag} が 2 nm から 10 nm まで直線的に増加した。また、線形部分の傾きは、GBM に依存している。外挿直線に注目すると、いずれの試料でも I_{110} は d_{mag} 軸と交わり、 I_{220} は原点座標と交わっていた。これらの結果から、グラニューラ薄膜には不規則、規則、非エピタキシャル部分が共存していることが示唆される。Fig. 2 には GBM が (a) SnO、(b) C のグラニューラ薄膜の規則度の FePt 結晶粒径 (GD) に対する変化を示した。ここで、 GD はシェラーの式を用いて評価したため、FePt 結晶粒の面内方向の並進性を表す。ここで、 S_{in}^{film} は薄膜の平均的な規則度であり、 S_{in}^{grad} (Order) は構造不均一性を考慮して算出した規則部分の規則度である。 S_{in}^{film} は GD の増大に伴い増加し、やがて S_{in}^{grad} (Order) に漸近したように評価されるが、膜厚依存性から評価された S_{in}^{grad} (Order) は GD に対して一定である。このことから、薄膜平均で規則度を評価することが規則度の GD 依存性をもたらす要因であることがわかった。講演では、構造不均一性が $K_{u\perp}$ に及ぼす効果や GBM と構造不均一性との相関についても議論する。

参考文献 1) H. Sepehri-Amin et al., *Scripta Materialia*, **135**, 88 (2017). 2) B. Varaprasad et al., *IEEE Trans. Magn.*, **51**, 3200904 (2015). 3) S. Wicht et al., *J. Appl. Phys.*, **119**, 115301 (2016). 4) B. C. Lim et al., *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 3017 (2006).

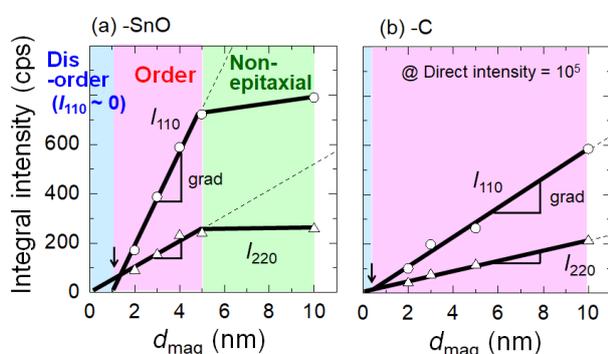


Fig. 1 Integral intensity of L1₀ FePt phase derived from in-plane XRD plotted against d_{mag} for the typical granular film with (a) SnO and (b) C GBMs.

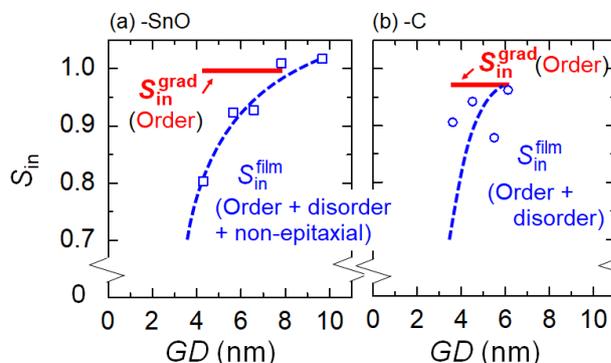


Fig. 2 Degree of order (S_{in}) plotted against GD for the typical granular films with (a) SnO and (b) C GBMs.

c 軸面内配向結晶粒を含む FePt グラニューラ薄膜における FePt 結晶粒の一軸結晶磁気異方性エネルギーの評価

○齊藤 節¹, タム キム コング², 櫛引 了輔², 小川 智之¹, 齊藤 伸¹

(1. 東北大学, 2. 田中貴金属工業)

Evaluation of magnetocrystalline anisotropy energy of FePt grains in FePt granular film including FePt grains with c-axes parallel to the film plane

○Takashi Saito¹, Kim Kong Tham², Ryosuke Kushibiki², Tomoyuki Ogawa¹, and Shin Saito¹

(1. Tohoku Univ., 2. TANAKA KIKINZOKU KOGYO K. K.)

はじめに 熱アシスト磁気記録媒体の記録層では、室温で高い一軸結晶磁気異方性エネルギー (K_u^{grain}) を有し、c 軸配向した $L1_0$ 型 FePt 結晶粒で構成されるグラニューラ磁性層が有力な材料候補である。この FePt グラニューラ磁性層に関する先行研究において、組織制御のため添加される粒界材料 (grain boundary material, GBM) 種によっては、c 軸が膜面垂直を向いた c 軸配向結晶粒に、膜面内を向いた c 軸面内配向結晶粒が一部混ざってしまうことが報告されている¹⁻³⁾。しかしながら、FePt 結晶粒の c 軸配向の決定要因について、GBM の効果に着目して議論された報告は見当たらない。さらに、このような面内結晶粒の影響を鑑みて K_u^{grain} を算出した報告も見当たらない。そこで、我々は種々の粒界材を有する FePt グラニューラ薄膜中の c 軸面内配向結晶粒の体積割合を算出し、 K_u^{grain} を評価したので報告する。

実験結果 試料の層構成は FePt-30vol.%GBM (5 nm)/ MgO (5 nm)/ a- $Co_{60}W_{40}$ (80 nm)/ Sub.とした。GBM は B_2O_3 , SnO, WO_3 , Nb_2O_5 , TiO_2 , MnO, MgO, C である。磁性層は $L1_0$ 型 FePt 相の規則化のため、基板温度を 550 °C として成膜した。Out-of-plane 並びに In-plane XRD の結果から、c 軸配向結晶粒と面内配向結晶粒は同様の格子定数と規則度を有することが推測される。c 軸面内配向結晶粒の体積割合 ($R_{parallel}$) は In-plane XRD 測定から得られる $L1_0$ 型 FePt 相の (200) と (002) 面からの回折線の積分強度の比によって、算出した。Fig. 1 には種々の粒界材料を有するグラニューラ薄膜の $R_{parallel}$ と、構造不均一性を考慮して算出した規則部分の規則度 (S_{in}^{grad} (Order)) との相関を示した。 $R_{parallel}$ は S_{in}^{grad} (Order) と負の相関を有することがわかった。これは FePt 結晶粒の規則度が GBM 種に依存しており、規則化するにつれ、格子がより面内方向に伸びた構造 (面心正方晶、fct 構造) となることで、面内配向結晶粒の成長が抑制されることを示唆している。Fig. 2 には、FePt グラニューラ薄膜中の全結晶粒が c 軸配向した ($R_{parallel} = 0$) と仮定し算出した薄膜の垂直磁気異方性エネルギー ($K_{u\perp}^{normal}$) ならびに K_u^{grain} と S_{in}^{grad} (Order) との相関を示した。なお、 K_u^{grain} は体積割合比を考慮したグラニューラ薄膜中の FePt 結晶粒の一軸結晶磁気異方性エネルギーである。 $K_{u\perp}^{normal}$ ならびに K_u^{grain} は S_{in}^{grad} (Order) と正相関を有することがわかった。以上の結果より、 S_{in}^{grad} (Order) = 1.0 のとき、 $K_u^{grain} = 3.4 (\times 10^7 \text{ erg/cm}^3)$ であることがわかった。

参考文献 1) T. Saito et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**, 045501 (2020). 2) T. Shiroyama et al., *IEEE Trans. Magn.*, **49**, 3616 (2013). 3) J. Wang et al., *Acta Materialia*, **166**, 413 (2019).

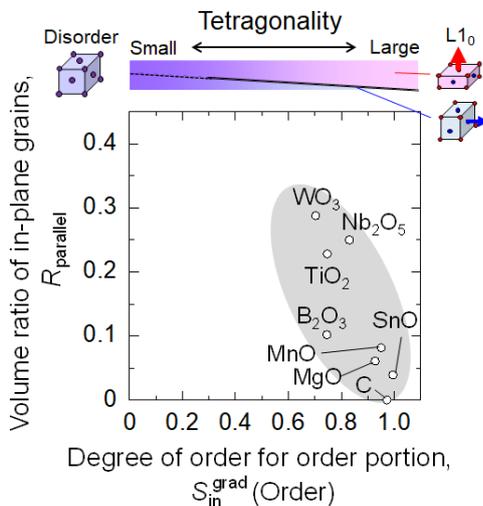


Fig. 1 $R_{parallel}$ plotted against S_{in}^{grad} (Order) in the granular films.

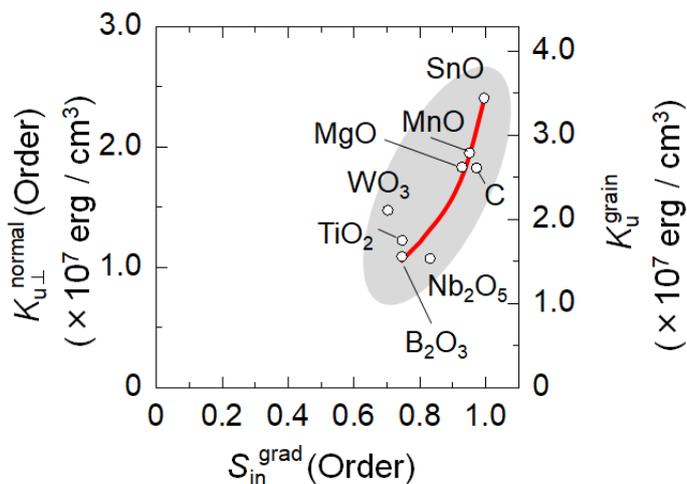


Fig. 2 $K_{u\perp}^{normal}$ and K_u^{grain} plotted against S_{in}^{grad} (Order).

FePt-C / FePt-oxide 積層型グラニューラ媒体の c 軸配向と垂直磁気異方性エネルギーに及ぼす FePt-C 核形成層の効果

°タム キム コング^{a)}, 齊藤 節^{b)}, 櫛引 了輔^{a)}, 齊藤 伸^{b)}
(^{a)}田中貴金属工業株式会社, ^{b)}東北大学)

Effect of FePt-C nucleation layer on c -axes orientation and perpendicular magnetic anisotropy energy for FePt-C / FePt-oxide stacked granular media

°Kim Kong Tham^{a)}, Takashi Saito^{b)}, Ryosuke Kushibiki^{a)}, and Shin Saito^{b)}
(^{a)}TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K., ^{b)}Tohoku University)

はじめに $L1_0$ FePt 薄膜は、室温で $\sim 5 \times 10^7$ erg/cm³ の高い磁気異方性エネルギーを備えているため、次世代磁気記録媒体として注目を集めている。製品化するためには、グラニューラ構造、垂直配向の c 軸、高規則度を有する微細なコラム状磁性粒子の実現が必須である。これらの要件を達成するために、 $C^{1,2)}$, $TiO_2^{3)}$, $SiO_2^{4)}$ などの様々な粒界材 (GBM) を FePt 薄膜へ添加し、結晶粒の分離の促進による磁気交換結合の低減に関する研究が盛んに行われてきた。また、コラム状の結晶粒を形成するためには結晶粒が分離している FePt-C 核形成層 (NL) を用いる検討が広く研究されている⁵⁾。FePt-GBM グラニューラ膜を直接 MgO 下地膜の上に積層させると、(001)面内配向成分が発生することが報告された⁶⁾。面内配向成分を低減する一つの方法として、MgO 下地膜と FePt-GBM グラニューラ膜との間に NL を導入することが挙げられる。しかしながら、NL が FePt-GBM の磁気特性、特に磁気異方性エネルギーに及ぼす影響は明らかになっていない。本講演では、FePt-C NL 上に積層した FePt-GBM グラニューラ膜の結晶粒径、規則度、ヘテロエピタクシヤル成長を調べたので報告する。

実験結果 媒体の膜構成は Sub./Co₆₀W₄₀(80 nm)/MgO(5 nm)/FePt-30vol% C(2 nm)/FePt-30vol% GBM(0-8 nm)/C(7 nm) とした。FePt-C と FePt-GBM は 550°C の温度で成膜した。GBM は B₂O₃, SnO, GeO₂, WO₃, Nb₂O₅, SiO₂, TiO₂, MnO, Y₂O₃, ZrO₂ である。

図 1 には、(a)飽和磁化 (M_s^{ave}), (b)垂直磁気異方性エネルギー ($K_{u\perp}^{film}$), (c)トータル膜厚が 5 nm 媒体の保磁力 (H_c) の GBM の融点 (T_m) の依存性を示す。NL を積層しない媒体では、FePt-oxide グラニューラ媒体 (GBM の $T_m < 3500^\circ\text{C}$) が FePt-C グラニューラ媒体 (GBM の $T_m: 3500^\circ\text{C}$) より高い M_s^{ave} を示している⁷⁾。FePt-C グラニューラ媒体の M_s^{ave} が低いのは、FePt 粒子に C が固溶したためと考えられる⁸⁾。 T_m を $3500^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ に変化させると、NL を積層した媒体の M_s^{ave} は $500 \sim 600$ emu/cm³ に変化している。一方、NL を積層しない媒体の M_s^{ave} は $500 \sim 750$ emu/cm³ になっている。NL を積層した媒体の M_s^{ave} における減少は、積層型媒体の M_s^{ave} が FePt-C NL および FePt-GBM の M_s^{ave} の体積平均であることを示唆している。 M_s^{ave} は、GBM の T_m に対して直線的に変化しており、NL を積層しない媒体と同じ傾向を示している⁷⁾。これは、FePt 粒子と GBM との間の相分離の度合いが GBM の T_m に依存することを示している。NL を積層した媒体の $K_{u\perp}^{film}$ と H_c は、 T_m を $3500^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ に変化させると、 $K_{u\perp}^{film}$ と H_c はそれぞれ $0.9 \sim 2.1 \times 10^7$ erg/cm³ と $9 \sim 35$ kOe に変化する。NL を積層しない媒体と同様に、 $K_{u\perp}^{film}$ と H_c は、GBM の T_m と強い相関関係が見られない。

図 2 (a) に、典型的な FePt-GBM として、FePt-C (2 nm) NL の上に積層した FePt-SnO (0-8 nm) の面内 XRD プロファイルを示している。面内 XRD プロファイルでは、約 33° と 69° の回折角度で、それぞれ FePt(110) と FePt(220) の回折線が観察され、FePt 結晶粒が c 面配向していることを示している。また、約 24° の回折角度で FePt(001) 回折線が観察され、(001)面内配向している結晶粒が存在していることがわかる。NL を積層したグラニューラ媒体の FePt(001) 回折線の積分強度を膜厚に対してプロットした結果は図 2 (b) に示す。参考として、NL を積層しない FePt-SnO グラニューラ媒体の FePt(001) 回折線の積分強度も図中に示している。NL を積層した FePt-SnO グラニューラ媒体の FePt(001) 回折線の積分強度は、膜厚に対して直線的に変化し、NL を積層しない媒体よりも傾きが小さくなっている。これは、NL の積層により(001)面内成分が低減されることを示唆している。

参考文献 1) J. S. Chen et al., *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 132506 (2007). 2) A. Perumal et al., *J. Appl. Phys.*, **105**, 07B732 (2009). 3) Y. F. Ding et al., *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 032506 (2008). 4) E. Yang et al., *J. Appl. Phys.*, **104**, 023904 (2008). 5) B. S. D. Ch. S. Varaprasad et al., *IEEE Trans. Magn.*, **49**, 718 (2013). 6) J. Wang et al., *Acta Mater.*, **91**, 41 (2015). 7) T. Saito et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**, 045501 (2020).

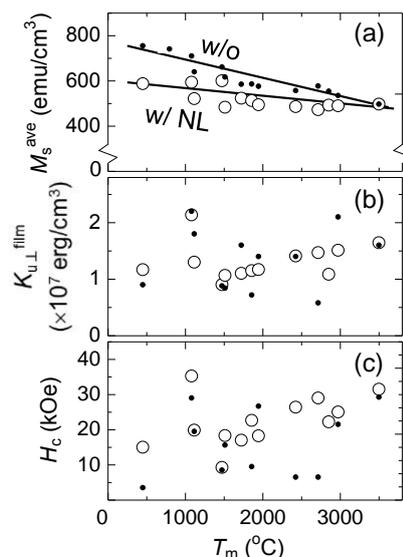


Fig. 1 Dependence of (a) M_s^{ave} , (b) $K_{u\perp}^{film}$, and (c) H_c for media with and without NL on melting point (T_m) of the GBM. Total thickness all samples were fixed at 5 nm.

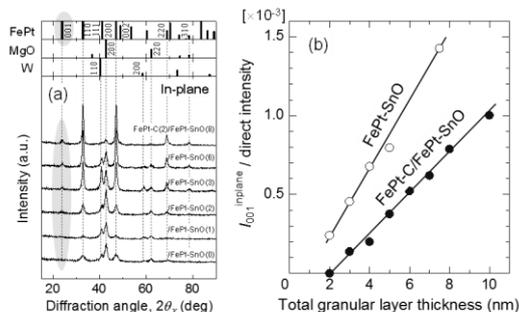


Fig. 2 (a) In-plane XRD profile for Sub./CoW(80 nm)/MgO(5 nm)/FePt-C(2 nm)/FePt-SnO(0-8 nm)/C(7 nm) and (b) dependence of FePt(001) diffraction integral intensity of the films on the film thickness.

X線2次元検出器を用いた 磁気記録媒体用薄膜の結晶軸配向の集積性の評価

○宮崎 大輝, 小川 智之, 田河 育也*, 斉藤 伸
(東北大学, 東北工業大学*)

Evaluation of crystalline texture for thin film magnetic recording media
utilizing two-dimensional X-ray Detector

°Daiki Miyazaki, Tomoyuki Ogawa, Ikuya Tagawa*, Shin Saito
(Tohoku Univ., Tohoku Inst. of Tech.*)

はじめに トリレンマ課題を解決する磁気記録媒体として、結晶配向軸を傾けた傾斜配向 Co/Pt 膜¹⁾や Heat Assisted Magnetic Recording (HAMR) 用 FePt グラニューラ媒体が検討されている。これらの媒体では磁化容易軸を空間の特定方向に揃える必要があり、*c* 軸の方向やその集積性の制御が極めて重要である。これまで X 線回折法による結晶軸の方向や配向分散の評価法としては、In-plane、Out-of-plane、Rocking curve のプロファイルの計測が行われてきた。しかしながら、試料組織の結晶配向の状態によっては軸合わせが困難であり、上記3種のプロファイルを取得するのに時間を要する。そこで今回、平面内に微小ピクセルを多数配置しピクセル毎に独立に回折 X 線を計数できる2次元検出器を用いて極点計測を高速・高分解能で行い、結晶軸の方向や配向分散を評価したので報告する。

実験方法 X線回折装置には9kWロータフレックス線源のSmartLab(リガク社製)を用いた。2次元検出器は有効検出面積が77.5×38.5mm、検出ピクセル数775×385=298,375ピクセルのHypix-3000(リガク社製)を用いた。この検出器は受光部面積を制限することにより0次元検出器として用いることも可能である。光学系は2次元検出器の場合は微小部光学系、0次元検出器として用いる場合は平行ビーム光学系とした。測定試料には傾斜配向Co/Pt膜¹⁾を用いた。Fig.1にPt下地層上に作製したCo/Pt膜の柱状組織と原子稠密面の模式図を示す。(a)はPtとCo/Ptを膜面垂直方向に成長させた試料であり原子稠密面は基板面と平行である。一方(b)はPtを傾斜成長させた試料であり、PtとCo/Ptの原子稠密面は基板面とは平行になっていない。

実験結果 一例としてFig.2には、Fig.1で紹介した試料に関して0Dあるいは2D検出器で計測したPt(111)面(ブラッグ角39.70°)の極点図を示す。図中上段に示す試料(a)では0Dと2Dともに90°で回折線強度が最大であり、等価面のリングも同軸状に観測されていることから、Pt層は(111)面配向していることがわかる。一方、図中下段に示す試料(b)ではPt(111)面の極点が基板法線方向から8°程度傾斜しており等価面からの回折リングも中心が極点部分にずれている。111方向が基板法線方向から傾斜していることが明らかである。測定に要した時間は、0Dでは7.5時間かかるのに対し、2Dではわずか1.5時間であった。このように、極点測定は媒体試料の結晶配向軸の解析に非常に有用である。当日はHAMR用FePtグラニューラ媒体の評価結果も報告予定である。

参考文献

- 1) D. Miyazaki, et al., *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **6**, (2021), in press.

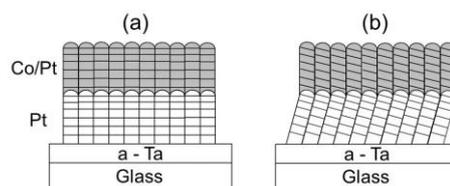


Fig. 1 Schematics of the measured sample of (a) vertical deposition of both Pt and Co/Pt layers and (b) inclined deposition of a Pt layer and vertical deposition of a Co/Pt layer, respectively.

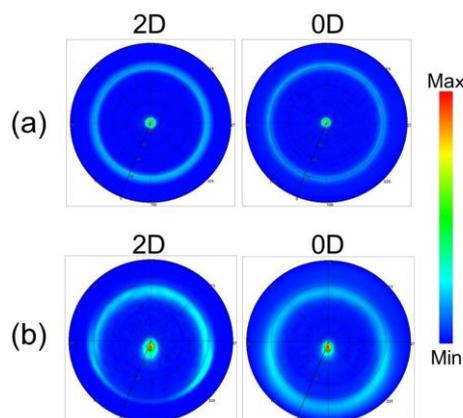


Fig. 2 Polar coordinate map of (a) vertical deposition of Pt (b) inclined deposition of Pt.

Si 酸化物および Si 窒化物隣接 Fe 超薄膜における 急速昇降温熱処理生成ナノ微粒子の磁気特性

小松田恭祐¹, 吉川大貴², 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)

Magnetic properties of nanoparticles produced by RTA
from an ultra - thin Fe film sandwiched between SiO_x and SiN

K. Komatsuda¹, H. Yoshikawa², A. Tsukamoto²

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

² College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに 次世代の超高密度磁気記録媒体の材料として L1₀-FePt 孤立微粒子群が注目されている。我々は、熱酸化 Si 基板/Fe/Pt (Fe/Pt 総厚 < 5 nm) 二層膜を初期構造とし、赤外線照射型急速昇温熱処理 (RTA: Rapid Thermal Annealing) を行うことによる FePt 合金ナノ磁性微粒子群作製の可能性と手法自体の検討を報告してきた¹⁾²⁾。また近年本微粒子作製プロセスにおいて、真空成膜段階での SiN 下地層導入により FePt 規則合金相生成収率大を報告しているが³⁾、RTA 過程で隣接 SiN が Fe 元素に及ぼす化学的影響は未知であった。本研究では、Si 系透明絶縁体に挟まれた Fe 薄膜に RTA を行い、Fe 微粒子形成前後の磁気特性から検討する。

実験方法 Fe 層の成膜には DC マグネトロンスパッタ法、SiN の成膜には RF マグネトロンスパッタ法を用いた。大気下で形成した熱酸化 Si 基板表面を成膜段階でプラズマアッシング処理した後、連続して Si sub./Fe (1.18 nm)/SiN (3 nm) の順に積層した後、約 2 年経過した試料を (i) とする。この試料に対し、到達真空度 < 1.0 × 10⁻³ Pa の雰囲気下で昇温速度約 70°C/sec., 目標到達温度 700°C の急速昇温後、窒素導入により降温速度 -90°C/sec. で急速降温処理を行ったものを試料 (ii) とする。試料 (ii) に対し走査型電子顕微鏡 (SEM) により表面形状像を、試料 (i) (ii) に対して超電導量子干渉素子式振動試料型磁力計 (SQUID - VSM) により磁化特性をそれぞれ測定し、形状と磁性の観点から評価する。

実験結果 Fig.1 に示す試料 (ii) における表面 SEM 像から、RTA による孤立・微粒子化が確認された。次に SiO_x および SiN 隣接構造を出発構造とし、急速昇温・高温加熱および大きな原子移動を伴う微粒子化前後において、Fe 化合物形成等に起因し磁気特性 (磁気モーメント量等) 変化が生じ得るか検証するため、試料 (i) (ii) に対し室温 (300K) で基板面内方向への磁場印加条件にて磁化曲線を測定した結果を比較した。Fig.2 に示す通り飽和磁化 M_s 値はそれぞれ (i) 300 emu/cc, (ii) 330 emu/cc であり同水準の値を維持した。このことより、Fe 薄膜は Si 窒化物及び Si 酸化物いずれの元素に隣接した初期構造に対しても、高温急速加熱および大きな原子移動を伴う過程を経ても、磁気モーメント量が大きく減少するような Fe 化合物形成は生じず、原材料の Fe 元素から収率高く微粒子を得られるものと考えられる。

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により行った。

参考文献

- 1) Y. Itoh, T. Aoyagi, A. Tsukamoto, K. Nakagawa, A. Itoh and T. Katayama : Jpn. J. Appl. Phys., 43, 12, 8040(2004).
- 2) A. Itoh, et al : J. Magn. Soc. Jpn., 36, 62- 65 (2012).
- 3) K. Miyoshi, et al : IEEEJapan, Mag - 18 - 6 (2018).

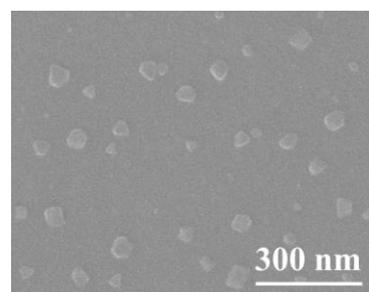


Fig.1 SEM image of sample (ii).

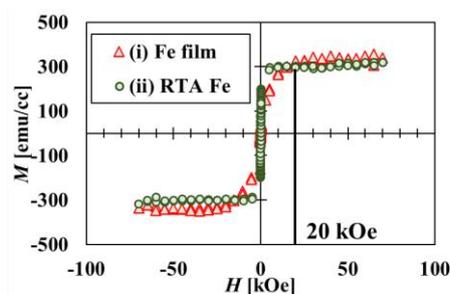


Fig.2 M - H Curve of sample (i) (ii).

Co/Pt 多層膜ナノドットのマイクロ波アシスト磁化反転における熱活性

水谷聡志、菊池伸明、畑山正寿、島津武仁、岡本聡
(東北大)

Thermal activation on microwave assisted magnetization switching in Co/Pt nanodot arrays

S. Mizutani, N. Kikuchi, M. Hatayama, T. Shimatsu, S. Okamoto
(Tohoku Univ.)

はじめに

マイクロ波アシスト磁化反転 (Microwave assisted magnetization switching : MAS) では, GHz 帯のマイクロ波磁場により磁化の歳差運動を励起し, 反転に必要な直流磁場を低減させる. MAS においてマイクロ波磁場の周波数と印加する磁場によって実効的なエネルギー障壁が複雑に変化することが報告されている¹⁾. 本研究では, 形状, サイズによるエネルギー障壁の制御が容易なナノドットを用い, また, マイクロ波磁場の印加時間を幅広く変化させて MAS 実験を行って熱活性の影響を調べた.

実験方法

エネルギー障壁を実験的に調べるためには, 磁場の印加時間を幅広く変化させる必要がある. そこで, 本研究では熱伝導率の高い 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²⁾, 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 多層膜ナノドットアレイを作製した. Fig.1 に試料の模式図を示す. ドット直径は $d = 40 \sim 200$ 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, 異常ホール効果を検出することで測定した.

実験結果

Fig.2 に直径 $d = 70, 200$ nm のドットアレイの保磁力の実効時間依存性を示す. マイクロ波磁場周波数は $f_{rf} = 4, 8$ GHz である. マイクロ波磁場は幅 $t_{pulse} = 20$ ns のパルス波として印加した. 実効印加時間 t_{eff} はパルス周期 t_{period} として $t_{eff} = 10 \times (t_{pulse}/t_{period})$ と定義し, $t_{eff} = 10^{-6} \sim 10^1$ の幅広い範囲で変化させた. いずれの試料でも, 実効時間の増加に伴い保磁力が低下し, 体積の大きなナノドットの MAS においても熱活性の影響が表れている. また, $d = 70$ nm の方がその傾きが大きく, より熱活性の影響が顕著である. しかしながら, いずれのドット直径も 20 nm と見積もられる交換結合長よりは十分に大きく, ドットの一部からの反転が起きていると予想される³⁾. そのため, この違いについて一斉回転を仮定し, 直径によるドットの体積変化で説明することは難しい. 今後, ドット内部での有効場の分布による励起状態の違いや, 微細加工時のダメージなどの影響も含めて検討を行う.

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. J. Appl. Phys., **126**, 083908 (2019).
- 3) H. Suto et al. Sci. Rep., **7**, 13804 (2017).

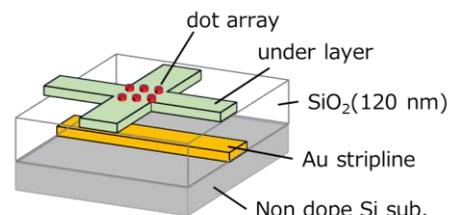


Fig.1 Schematic illustration of the sample structure.

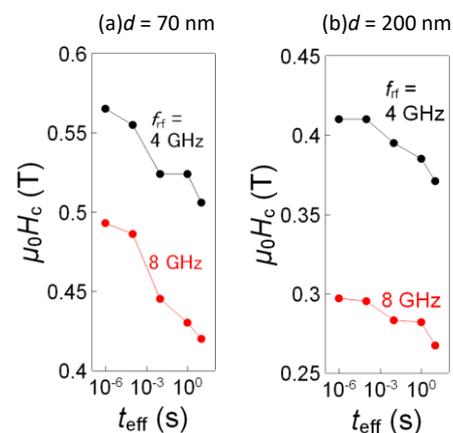


Fig.2 Effective time t_{eff} dependence of coercivity for Co/Pt nanodot array (a) $d = 70$ nm, (b) $d = 200$ nm.

ビットパターンドメディアを用いた3次元熱アシスト磁気記録において 記録ドットの体積が記録に及ぼす影響

Effect of Dot Volume on Recording Performance in 3D HAMR Bit Patterned Media

山根輝, Simon John Greaves, 田中陽一郎
東北大学電気通信研究所

Hikaru Yamane, Simon John Greaves and Yoichiro Tanaka
RIEC, Tohoku University

はじめに

磁気記録の更なる記録密度の向上のため、熱アシスト磁気記録 (HAMR) 技術が期待されている。本研究では、高い記録密度の実現のため、キュリー温度 (T_c) の異なる2つの記録層をもった3次元 HAMR ビットパターンドメディア (BPM) を、マイクロ磁気シミュレーションを用いて検討を行い、記録層の体積変化が記録に及ぼす影響を調査した。

シミュレーションモデル

シリンダー型ドットが Down-track 上に 10nm 間隔で並べられた BPM を想定し、メディアの磁化を Landau-Lifshitz-Bloch (LLB) 方程式に基づいたマイクロ磁気モデルを用いて計算した。モデルの構成は、ドットの直径を d nm、深さ方向には下層から軟磁性層/非磁性層 (5nm)/記録層 1 (RL1) (h_1 nm)/非磁性層 (2nm)/記録層 2 (RL2) (h_2 nm) で、メディア上面とヘッドの間隔は 3 nm とした。各記録層の磁性パラメータには同じ飽和磁化 $M_s = 1138 \text{ emu/cm}^3$ 、異方性エネルギー定数 $K_u = 6.6 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ 、ダンピング定数 $\alpha = 0.1$ と設定し、キュリー温度はそれぞれ T_{c1}, T_{c2} とした。ここで、 $(T_c, d, h) = (460 \text{ K}, 5 \text{ nm}, 5 \text{ nm}), (460 \text{ K}, 6 \text{ nm}, 7 \text{ nm})$ の場合について、保磁力の温度依存性を調べた結果を図 1 に示す。保磁力が 10 kOe 以下になるには、それぞれ 410.3 K, 420.2 K まで加熱される必要があり、10K ほどの差があった。これは記録する際、記録層の体積が小さいと、書き込んだ後メディアが熱安定性を持つまで冷却するために、より長い時間を要することを意味する。

ヘッドは 10m/s でメディア表面上を動き、ビット長 10 nm で 3 ビット分磁界を印加し、上向きに磁化したターゲット層を下向きに反転させるよう設定した。Down-track 上で 8nm の記録窓を定義し、この範囲内で反転確率の平均が最大となるときの平均値を実効反転確率として評価した。 $d=6$ nm, $h_1=h_2=5$ nm として、 T_{c1}, T_{c2} をそれぞれ 450K~600K, 450K~750K の範囲で 10K ずつ変化させ、反転確率が高くなる組み合わせを調査した結果、 $(T_{c1}, T_{c2}) = (530 \text{ K}, 460 \text{ K}), (460 \text{ K}, 550 \text{ K})$ を中心に高い領域が得られた [1]。本研究ではこの2つの組み合わせに関して、ドットの直径や各記録層の高さを変化させて、その変化が記録に及ぼす影響を調査した。

結果

$(T_{c1}, T_{c2}) = (530 \text{ K}, 460 \text{ K}), (460 \text{ K}, 550 \text{ K})$ の組み合わせに関して、記録層の高さを $h_1=h_2=5$ nm のままドット径 d を 5 nm および 7 nm に、 $d=6$ nm のまま (h_1, h_2) を (6nm, 4nm) および (7nm, 3nm) にそれぞれ変化させて、記録および記録密度に与える影響を調べた。ドット径を変化させた結果、体積が小さくなると最小のトラックピッチが大きくなり、反転確率が小さくなった。特に $d=5$ nm では実効的な反転確率が 0.95 程度と十分な反転確率が得られなかった。2層合わせた記録密度は、 $d=7$ nm のとき、8.5 Tbit/in² を超える非常に大きい値が得られた。記録層の高さを変化させた結果、RL1 の高さを大きくすると、反転確率が大きく得られた。最小トラックピッチは、(460K, 550K) では RL1 の体積増加に伴い小さくなった一方で、(530K, 460K) では RL2 の体積が小さくなるほど隣接トラックへの記録の影響を受けやすくなって、最小トラックピッチが大きくなった。記録密度は、(460K, 550K), (h_1, h_2) = (7nm, 3nm) で最大の 8.34 Tbit/in² が得られた。それぞれの条件における保磁力が印加磁場に等しくなる温度から、その温度における異方性エネルギー定数 K_u を計算し、熱安定性の指標となる $K_u V$ と各記録層をターゲットとしたときの反転確率の関係を図 2 に示す。RL2 に関してはすべての条件で高い値を保っているが、RL1 では $K_u V$ が小さいと反転確率が大きく低下することが確認できる。3D HAMR の記録には、印加磁場が小さくなる下層の RL1 の反転確率がボトルネックとなり、大きい反転確率を得るには RL1 の $K_u V$ を大きくとることが求められる。

ドット径や記録層の高さをそれぞれ変化させた結果から、最良と思われる条件で $(T_{c1}, T_{c2}) = (460 \text{ K}, 550 \text{ K}), (d, h_1, h_2) = (7 \text{ nm}, 7 \text{ nm}, 3 \text{ nm})$ としてシミュレーションした結果、今回調査した範囲で最小のトラックピッチ、最大の反転確率が得られた。記録密度は 9.0 Tbit/in² となった。

参考文献

[1] Hikaru Yamane, Simon John Greaves, Yoichiro Tanaka, "Heat-Assisted Magnetic Recording on Dual Structure Bit Patterned Media", IEEE transactions on Magnetics, Vol. 57, No. 2, February 2021

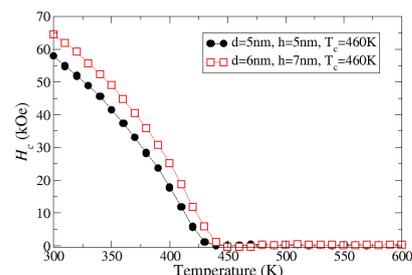


図1 $T_c=460\text{K}$ のとき、 $d=5\text{nm}, h=5\text{nm}$ と $d=6\text{nm}, h=7\text{nm}$ の場合における保磁力の温度依存性

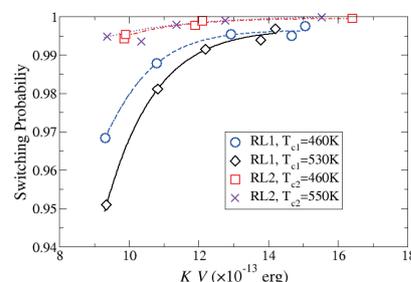


図2 反転確率と保磁力が印加磁場に等しくなる温度での各記録層の $K_u V$