

局所領域の面内/垂直磁化成分同時測定 Kerr 効果測定装置の開発

小田切 雄介、柳沢 栄二、目黒 栄、斉藤 伸* (ネオアーク株式会社、*東北大学)

MO Kerr effect sensing system for simultaneous detection of local magnetization components
along perpendicular/ in-plane to the film plane

Y. Odagiri, E. Yanagisawa, S. Meguro, S. Saito* (Neoark Corporation, **Tohoku University)

はじめに 軟磁性ナノドットおよび細線は、現在精力的に研究が進められている MRAM¹⁾ やスピントロニクス素子に代表される次世代磁気デバイスを構成する主要材料である。これらのデバイスは磁性材料の形状異方性を考慮して設計がなされるが、成膜時の誘導磁気異方性や加工プロセスの不完全性等により、面内・垂直磁化過程に予期せぬ磁気履歴が生じ、所望の特性を導出できない場合があるため、簡便かつ高感度に面内/垂直方向の磁化成分を分離できる局所磁気履歴曲線評価装置に対する需要が高まっていた。可視光レーザによる磁気光学効果を用いる測定は、原理的には波長程度の空間分解能を実現できると考えられ、またその検出原理により試料の非破壊性、評価の簡便性、高速性を併せ持つことから前記需要に相応するものである。我々はこれまで、レーザ特有の雑音に対する対策すなわち、発振モードの安定化およびコヒーレンシーの低下等を実現する装置設計指針ならびに極微量の磁気光学信号を高感度・高速に検出する装置設計について確立してきたが、面内/垂直磁化成分を分離する評価技術については取り組んでいなかった。本講演では、顕微鏡対物レンズを用いて Kerr 効果検出の空間高分解能化と検出高感度化とを両立した装置を用い、斜光入射磁気光学効果測定に縦カー効果と極カー効果が重畳することを利用してこれらを分離して計測可能な磁気履歴曲線評価装置 (μ -MOKE, μ -SMOKE) を開発したので報告する。

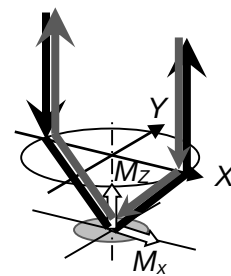


Fig. 1 Schematics of magnetization direction detection.

測定原理 Fig. 1 に今回検討した斜光入射光学系の対物レンズと試料周りの光軸の概略図を示す。同一入射面で正・逆両方向からレーザ光を入射させる場合、面内成分に起因する磁気光学信号は逆相となる一方、垂直磁化成分に起因する信号は同相となる。したがってこれらの信号を加算/減算処理することにより、垂直方向および面内方向成分の磁気履歴曲線を同時に、かつ分離測定可能となる¹⁻²⁾。

実験結果 Fig. 2 に本手法で計測した GdFeCo 薄膜の磁気履歴曲線を示す。垂直磁化成分に起因する信号が得られている一方で面内磁化成分の信号は検出されておらず、本試料が垂直磁化膜であることがわかる。FeTaN 薄膜の磁気履歴曲線では (Fig. 3) 面内磁化成分に起因する信号のみが検出されており、この試料が面内磁化膜であることがわかる。これらに対し Fig. 4 に示す FeCoTaZr 薄膜では、面内磁化成分の他に垂直磁化成分も検出されており、本試料では成膜時に何らかの垂直磁気異方性が発現したことが示唆される。

謝辞 本研究の一部は平成 26 年度補正ものづくり・商業・サービス革新補助金を受けて実施された。

参考文献 1) T. Nagai et al., *IEEE Trans. Magn.*, **39**, (2003). 2) S. Meguro et al., *Ann. Conf. Magn. Soc. Jpn.*, 7aF-10 (2010).

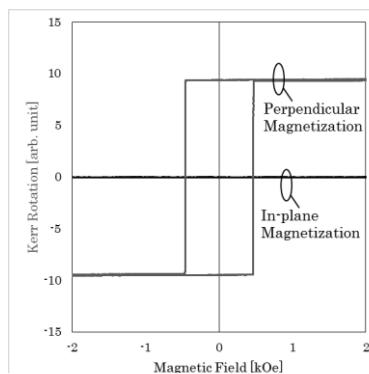


Fig. 2 Hysteresises for a GdFeCo film with applying field along perpendicular to the film plane.

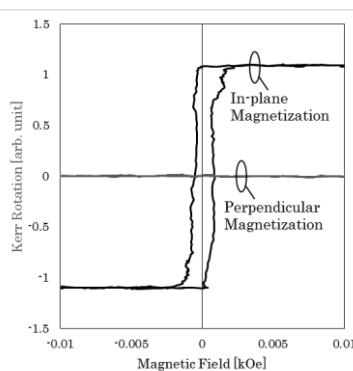


Fig. 3 Hysteresises for a FeTaN film with applying field parallel to the film plane.

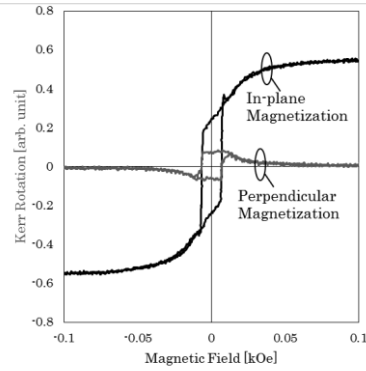


Fig. 4 Hysteresises for a FeCoTaZr film with applying field parallel to the film plane.

交番磁気力顕微鏡の高分解能化に向けた磁場中熱処理による高感度 FeCoSiB 系非晶質ソフト磁性探針の開発

赤石悠輔, K. Srinivasa Rao, 江川元太, 吉村哲, 齊藤準

(秋田大学)

Development of high-sensitive amorphous FeCoSiB soft magnetic tip by magnetic field annealing for high resolution alternating magnetic force microscopy

Y. Akaishi, K. Srinivasa Rao, G. Egawa, S. Yoshimura, H. Saito

(Akita Univ.)

はじめに 近年、磁気力顕微鏡においては高密度磁気記録媒体等の進展により空間分解能の向上が強く求められている。我々は分解能の向上に有効となる試料表面近傍での磁場検出が可能な、交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscope; A-MFM) を開発し、昨年、良好なソフト磁気特性と高い飽和磁化を有する FeCoSiB 系非晶質ソフト磁性探針の先鋭化を図ることで、垂直磁気記録媒体の磁区観察において、5nm 以下の分解能が安定して得られることを報告した。ここで探針の先鋭化には、先鋭な Si 探針母材を回転させながら、スパッタリング法を用いて磁性膜を探針の側面方向から成膜することが有効であった。一方、FeCoSiB 系非晶質合金は Co 系非晶質合金と異なり、磁歪を組成調整によりゼロにできないので、ソフト磁気特性向上の観点から歪取り熱処理が有効と考えられる。また熱処理中の磁場印加により誘導磁気異方性の付与が可能であるので、探針先端の磁化状態を制御できる可能性がある。本研究では、FeCoSiB 系非晶質合金探針について磁場中熱処理を行い、磁場中熱処理の効果を A-MFM 観察により検討した結果を報告する。

方法 FeCoSiB 非晶質ソフト磁性探針を、先端がピラミッド形状の Si 探針にターゲット組成が $\text{Fe}_{56}\text{Co}_{24}\text{Si}_{10}\text{B}_{10}$ の磁性膜を種々の膜厚でスパッタリング法を用いて成膜した後に、磁場中熱処理を施して作製した。熱処理温度は 150~250 °C の範囲で変化させた。磁場は探針のピラミッド形状先端の長手方向 (探針を磁気力顕微鏡にセットしたときに観察面に垂直方向に対応) に印加し、その最大値は 2 kOe である。A-MFM は市販の走査型プローブ顕微鏡 (L-Trace II, 日立ハイテクサイエンス製) に、小型フェライトコア (交流磁場源)、PLL (周波数復調器)、ロックインアンプを加えて構成した。観察試料には CoCrPt-SiO₂ 垂直磁気記録媒体を用い、探針試料間距離を 2~3 nm にして直流磁場観察を行った。探針に印加した交流磁場の周波数は 89 Hz とし、振幅は 50~200 Oe の範囲で変化させた。

結果 磁場中熱処理を施した FeCoSiB 非晶質探針を用いて 500 kfcu の磁気記録ビットを A-MFM 観察した。ここで磁場中熱処理条件は、印加磁場 2 kOe, 保持温度 200°C, 保持時間 2 h である。Fig.1 に磁性膜厚が 15, 25, 30 nm, 交流磁場振幅が 50, 200 Oe のときの直流磁場像を一例として示す。これまで試作したソフト磁性探針 (ゼロ磁歪のパーマロイ探針や CoZrNb 系非晶質探針) では磁性膜厚や交流磁場の増加に伴い信号強度が増加するのに対して、磁場中冷却した FeCoSiB 非晶質探針では磁性膜厚が増加すると記録ビットが不鮮明になり計測感度が減少していることがわかる。図で最も計測感度が高い磁性膜厚 15nm では、図(a)に見るように 50 Oe においても記録ビットが観察できており、観察に要する交流磁場値を低減できることがわかる。これらの挙動の原因として、磁性探針先端の磁性膜の磁化状態が磁場中熱処理や磁歪効果による誘導磁気異方性の影響で変化していることを考えている。講演では、空間分解能向上の可能性を探るために、さらに磁性膜厚の小さな探針を含めて、磁場中熱処理条件が磁性探針の感度と分解能に及ぼす影響の詳細を報告するとともに、低磁性膜厚で計測感度が向上した原因を考察する。

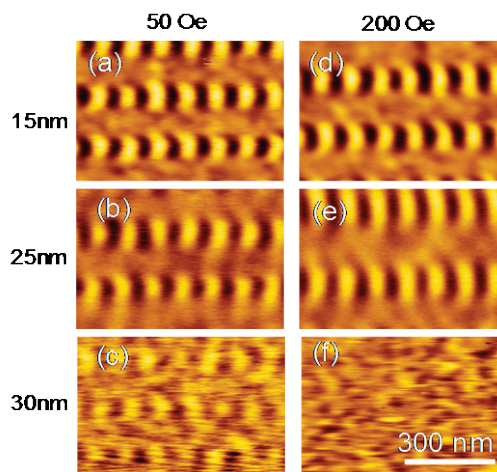


Fig. 1 A-MFM images measured by magnetic field annealed FeCoSiB tips with magnetic film thickness of 15, 25, 30 nm at AC magnetic field of 50 and 200 Oe, respectively.

参考文献 1) K. S. Rao 他, 第 39 回日本磁気学会学術講演概要集, 8pD-3 (2015).

超常磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡による永久磁石の破断面の磁気イメージング手法の開発

曹永澤, 江川元太, 吉村哲, 齊藤準
(秋田大学)

Development of magnetic imaging for fractured surface of permanent magnets
by alternating magnetic force microscopy with superparamagnetic tip

Y. Cao, G. Egawa, S. Yoshimura, H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに 現在、磁区観察に広く用いられている磁気力顕微鏡の観察対象である磁性材料については、従来の表面平滑な磁性薄膜の他に、近年、バルク材料である永久磁石において、機械研磨を施さずに粒界で破断させた面（破断面）での磁区観察が求められている。その背景として、希土類磁石の磁区観察において、機械研磨した面では、内部の結晶粒と比較して磁化反転が弱い磁場で起こるのに対して、破断面では磁化反転がバルク体と同等の磁場で起こることが、放射光を用いた走査型軟X線 MCD 顕微鏡の観察¹⁾により報告されていることがある。本発表では、永久磁石の破断面等の表面凹凸の大きな試料における磁区観察を、磁気力顕微鏡により実現することを目的として、我々が開発を進めている超常磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡（Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM）を用いて、フェライト磁石の破断面の観察を行った結果を報告する。

方法 A-MFM は機械的に励振させた磁性探針に対して、交流磁場印加により探針磁化を周期的に変化させることで発生する探針試料間の交番磁気力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用して、探針振動信号を周波数復調後にロックイン検出して試料からの直流磁場を計測する。

A-MFM では超常磁性探針を用いることで、計測磁場方向を交流磁場の印加方向に一致させた直流磁場の計測を行うことができる。本研究では A-MFM を市販のプロブ顕微鏡（日立ハイテクサイエンス製、L-trace II）の試料ステージの下に交流電磁石を設置して構成し、交流磁場を試料ステージに垂直方向に印加して、直上の超常磁性探針（ $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-FeCo}$ 等）を励磁し、Sr フェライト異方性焼結磁石（結晶粒径：約 $1\mu\text{m}$ 、保磁力：約 3.0 kOe ）の破断面を大気雰囲気中で観察した。

結果 Fig. 1 に消磁状態の c 面（磁化方向が面に垂直）の破断面において超常磁性探針を用いた A-MFM により観察した、(a)表面形状像、計測磁場方向が紙面に垂直方向の(b)垂直磁場像およびそのラインプロファイル[(d)], (c)磁場極性像およびそのラインプロファイル[(e)]を示す。表面の凹凸は約 $1.5\mu\text{m}$ であり、通常の磁気力顕微鏡では磁区の識別が困難であったが、A-MFM では表面の結晶粒の形状を反映した明瞭な磁区構造が垂直磁場像で観察され、磁場極性像では垂直磁場の上向き/下向き（表面磁極の極性）が明瞭に識別できる。これらのラインプロファイルに見るように、垂直磁場の強度がゼロになる垂直磁場の上向き/下向きの境界で、位相が 180° 変化しており、表面凹凸が大きいにもかかわらず、磁区構造が明瞭に観察できることがわかる。破断面で磁区観察ができるのは、超常磁性探針が磁場の計測方向である探針の真下からの垂直磁場を主に捉えているためと推察される。講演では、試料からの直流磁場計測の詳細に加えて、試料の磁化が交流磁場で可逆的に変化する箇所が発生する交番磁気力を利用した、試料からの交流磁場のイメージング結果についても報告する。測定試料は日立金属(株)様からご提供いただきました。

参考文献 1) 中村哲也, 小谷佳範, 広沢哲, 第 39 回日本磁気学会学術講演概要集 10pA-1, 2015.

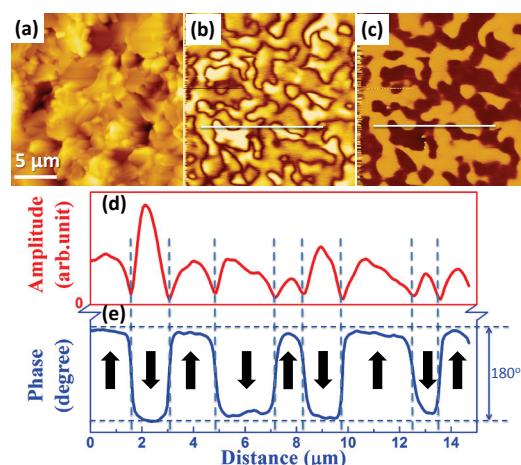


Fig.1 (a) topographic image, (b) perpendicular magnetic field image, (c) polarity image of magnetic field for fractured surface of sintered Sr ferrite magnet. (d) and (e) are the line profile of (b) and (c), respectively.

磁場分布のカラーイメージング用

磁気光学イメージングプレートの開発

長久保洋介, 劉琦, 婁庚健, 石橋隆幸
(長岡技科大)

Development of MO imaging plate for colour imaging.

Y. Nagakubo, Q. Liu, G. Lou, and T. Ishibashi
(Nagaoka Univ. of Tech.)

1. はじめに

磁気光学イメージングプレートを用いた磁気光学イメージングは、磁場分布をリアルタイムで可視化可能な優れた磁気イメージング技術である。しかし、磁場分布は光の強度分布として計測されるため、画像を見ただけで磁場の方向およびその大きさを知ることは困難であった。そこで本研究では、磁場分布をカラーでイメージングすることにより、色によって磁場の値を識別する技術を開発した。本発表では、高濃度 Bi 置換磁性ガーネットを用いた磁気光学イメージングプレートの性能指数の評価と磁気光学イメージングの磁場分布のカラー表示およびその定量化について報告する。

2. 実験方法

Bi 置換 Nd 系磁性ガーネット膜は、有機金属分解法(MOD法)を用いて作製した。ガラス基板上に下地層として $\text{Nd}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$ (膜厚:90 nm) を作製し、その上に $\text{NdBi}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (膜厚:470 nm) の薄膜を作製した^{1,2)}。 $\text{NdBi}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜は、下地層と同様に、塗布から仮焼成までを 5 回繰り返した後に本焼成(600-700°C, 3 hour)を行うプロセスを 3 回繰り返した。最後に、反射膜として銀薄膜をガーネット膜の上に堆積させた。カラーイメージングでは、5W の白色パワーLED と偏光子および検光子(駿河精機:S342-D-550)を用いた。また、検光子を透過した光のスペクトルを光学分光器(Ocean Optics:USB2000+)を用いて測定した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に本焼成温度の異なる試料の性能指数 $Q = \theta_K \cdot T$ [deg.] を波長に対してプロットしたグラフを Fig. 1 に示す。ここで、 θ_K は反射膜をつけた後のカー回転角、 T は透過率である。本焼成温度が 640~660°C の場合に 600 nm 付近で高い性能指数が得られた。磁気イメージングプレートと白色 LED 光源を用いて、市販のフェライト磁石の磁場分布を計測した結果を Fig.2 に示す。あらかじめ磁場と色の関係を校正しておいたカラーバー(Fig. 2)との比較により磁場の大きさも識別できることがわかる。

参考文献

- 1) 劉琦他, 第 39 回日本磁気学会学術講演会, 08pB-2
- 2) G. Lou et al., J. Appl. Phys., **117**, 17A749 (2015).

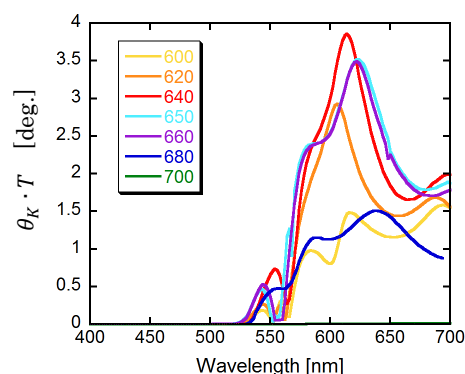


Fig. 1 Figure of merit of MO imaging plates using NdBiFeO films annealed at 600-700°C.

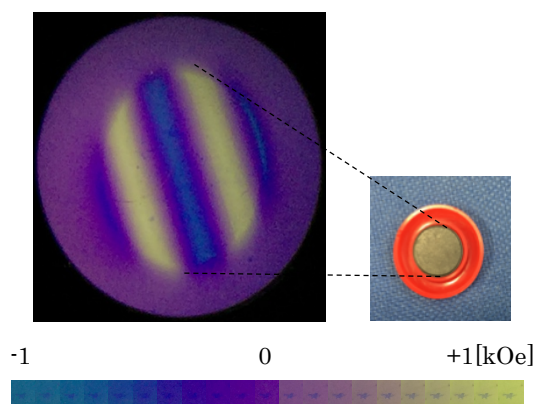


Fig. 2 An MO image of a ferrite magnet and colour bar indicating magnetic field.

走査型透過 X 線顕微鏡による永久磁石材料の XMCD 顕微分光

上野哲朗^{1,2,3}, 橋本愛², 武市泰男², 小野寛太^{2,3}
(¹物材機構, ²KEK, ³ESICMM)

XMCD micro-spectroscopy of a permanent magnet using a scanning transmission X-ray microscope
Tetsuro Ueno^{1,2,3}, Ai Hashimoto², Yasuo Takeichi², and Kanta Ono^{2,3}
(¹NIMS, ²KEK, ³ESICMM)

はじめに

永久磁石材料の開発、高機能化において磁気モーメントや希土類イオンの価数などの電子状態の情報は重要であると考えられる。しかしながら、永久磁石材料は $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁石のように実用材料としては多結晶体であること、また $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ のように粉末試料しか得られないということがある。そのため単結晶試料を用いた精密な電子状態評価実験が困難である。本研究では、微細加工法による単結晶試料の抽出と、集光した放射光 X 線を用いて局所的な X 線スペクトルが測定可能な装置である走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) を組み合わせて、実用永久磁石材料の電子状態評価を行った。

実験方法

試料には市販の 1-5 系サマリウムコバルト磁石を用いた。化学組成は $\text{Sm}_{0.5}\text{Pr}_{0.4}\text{Gd}_{0.1}\text{Co}_5$ であった。1000°C で熱消磁した後、収束イオンビーム加工装置による微細加工によって単結晶試料を切り出した。XMCD 顕微分光実験は高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設(PF) BL-13A に設置された走査型透過 X 線顕微鏡(STXM) [1]を用いて行った。Sm、Pr、Gd の各 $M_{4,5}$ 吸収端、Co $L_{2,3}$ 吸収端において X 線エネルギーをスキャンしながら STXM 像を取得し、X 線吸収スペクトルおよび XMCD スペクトルを得た。

実験結果

Fig. 1 に円偏光 X 線を用いて Co L_3 吸収端で測定した STXM 像を示す。迷路状磁区がコントラストとして現れることがわかる。

Fig. 2 に STXM 像の X 線エネルギースキャンにより取得した Sm $M_{4,5}$ XAS 及び XMCD スペクトルを示す。各 XAS スペクトル (μ_+ と μ_-) は STXM 像で逆向きに磁化しているピクセルでの強度をエネルギー毎に積算することで得た。これらの差分から XMCD スペクトル ($\mu_+ - \mu_-$) を得た。XMCD スペクトルに磁気光学総和則を適用して軌道磁気モーメント L とスピン磁気モーメント S の比を求めたところ $L/S \sim 2$ となり、フント則から導かれる 3 価 Sm イオン Sm^{3+} の軌道・スピン比 $L/S = 2$ とほぼ一致することがわかった。

参考文献

[1] Y. Takeichi *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 013704 (2016).

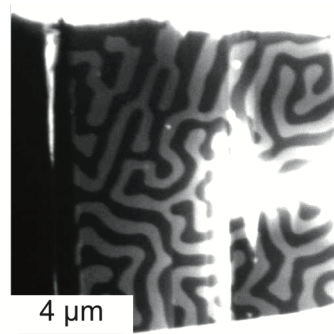


Fig. 1. STXM image at the Co L_3 edge.

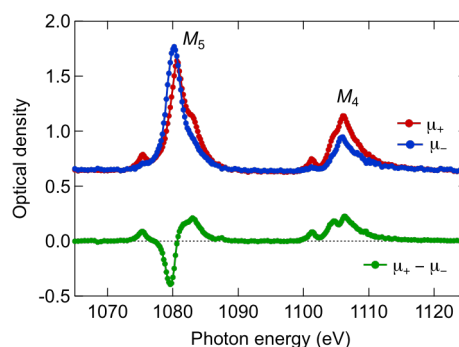


Fig. 2. Sm $M_{4,5}$ XAS (μ_+ and μ_-) and XMCD ($\mu_+ - \mu_-$) spectra.

Surface segregation of Pt in L1₀-FePt nano-grains

H. Sepehri-Amin¹, H. Iwama², T. Shima², and K. Hono¹

¹National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan

²Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University, Tagajo 985-8537, Japan

Heat assisted magnetic recording (HAMR) is the most promising candidate for the next generation high-density hard disk drives (HDDs). To increase the areal density to higher than 2 Tbit/in², L1₀-FePt granular media with a grain size of 4-6 nm is needed. However, the reduction of FePt grain size results in the reduction of the degree of L1₀ order [1], which causes the distribution of K_u in the FePt-C granular media with 4-6 nm grain size. This has been attributed to the existence of surface segregation of Pt, which deviates the stoichiometry composition of core region of L1₀-FePt grains [2,3]. A question raises here whether or not the chemical compositions of films can influence the surface segregation of L1₀-FePt grains. In this work, we have studied the influence of Fe concentration of L1₀-FePt grains to the surface segregation and the degree of L1₀ order.

FePt films with thickness of 8 nm was DC magnetron sputtered on single-crystalline MgO (001) substrate at the substrate temperature of 725°C. The input power for Pt target was kept constant at 16 W while the input powder of Fe target was varied from 30 W to 32 W to fabricate samples with Fe-lean, stoichiometric, and Fe-rich compositions. The magnetic properties of the samples were measured using a SQUID-VSM and the microstructures were characterized using an aberration corrected TEM (Titan G2 80-200)).

The Fe-lean sample showed a coercivity of 5.9 T while the Fe-rich sample showed slightly lower coercivity of 5.6 T. Figure 1 (a) and (b) show high resolution STEM-HAADF images obtained from the L1₀-FePt grains of the films with Fe-lean and Fe-rich compositions. In the STEM-HAADF images, the atomic columns with a brighter contrast correspond to Pt rich columns. Figure 1 (c) and (d) show STEM-EDS maps of Fe (green) and Pt (red) obtained from the surface of FePt grains for the Fe-rich and Fe-lean samples. The composition profiles obtained from line scans from the surface to the center of the grains are shown in Fig. 1 (e) and (f). STEM-EDS results show that Pt atoms enriches at the surface of L1₀-FePt grains which is due to surface segregation of Pt regardless of the composition of the film. The segregation of Pt to the surface region is to reduce the surface energy of the grains. How to suppress the surface segregation of Pt will be addressed.

[1] Y. K. Takahashi *et al.* J. Appl. Phys. 95 (2004) 2690.

[2] B. Yang *et al.* Scripta Mater. 53 (2005) 417. [3] T. Seki *et al.* Appl. Phys. Letters 82 (2003) 2461.

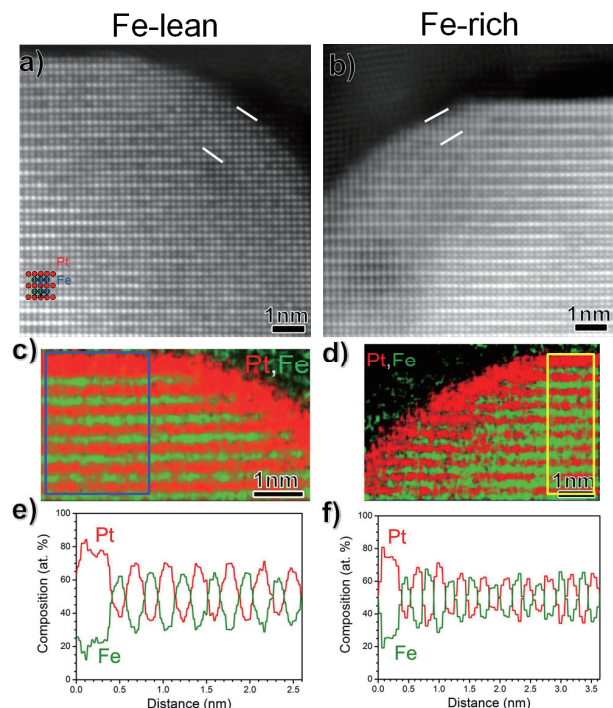


Fig. 1. (a) and (b) STEM-HAADF image, (c) and (d) STEM-EDS maps of Fe (green) and Pt (red), (e) and (f) EDS line profile calculated from selected lines shown in (c) and (d) obtained from the L1₀-FePt grains with Fe-lean and Fe-rich comp

ナノ構造下地上への高密度 $L1_0$ -FePt 孤立磁性微粒子群形成 における下地ナノシリカ粒子径分散依存性

牧野哲也¹⁾, 平賀俊光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⁾

Silica particle diameter deviation dependency of high density
isolated $L1_0$ -FePt grains on nano structured under layer

Tetsuya Makino¹⁾, Toshimitsu Hiraga, Arata Tsukamoto²⁾

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

1. はじめに

超高密度磁気記録媒体等への応用を想定し、我々は熱酸化 Si 基板上へ製膜した Pt / Fe 薄膜への急速昇降温熱処理による孤立 $L1_0$ -FePt ナノ磁性微粒子群の形成¹⁾を報告している。また、FePt 粒子数密度の向上、平均粒径の減少の方法としてシリカ粒子(平均粒径約 18 nm)の自己集積化現象を利用し作製したナノ凹凸基板 (Self-Assembled Silica Particle: SASP)を用いる手法²⁾を提案している。更なる高密度化を目的とし、大量化学合成により作製された平均粒径約 10 nm の典型的シリカ粒子からなる SASP 基板利用において粒径分散を評価した結果約 2.4 nm と比較的大きく FePt 粒子形成過程への影響が懸念された。本報告では SASP 構造の不均一性に注目しシリカ粒径分散を意図的に変え形成した FePt 粒子群の評価からシリカ粒径分散の寄与を検討した。

2. 実験内容

SASP 基板は粒径 10 nm シリカ粒子(粒径分散約 2.4 nm)のみ用いた基板 (I) と、シリカ粒径分散による寄与を検討するため粒径 10 nm シリカに粒径 4.5 nm シリカ粒子を混合(質量比 1 : 1, 想定粒径分散約 4.1 nm)させた基板 (II) をディップコート法により作製した。これらの SASP 基板上へ DC マグネトロンスパッタリング法により、Pt₆₂(0.83 nm) / Fe₃₈(1.05 nm) / sub. にて成膜した。これらの薄膜に対し、昇温速度約 20 °C/sec, 目標到達温度 600 °C の熱処理を行い、その後窒素導入による急速冷却を行った。作製した FePt 粒子の形状観察に走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM), 結晶構造解析に X 線回折装置(X-Ray Diffraction: XRD), 磁気特性評価に超伝導量子干渉素子型磁束計(Superconducting Quantum Interference Device Vibrating Sample Magnetometer: SQUID VSM)を用いた。基板 (I), (II), 表面平坦熱酸化 Si 基板上³⁾の FePt 粒子群における XRD プロファイルを Fig.1 に、膜面垂直方向の磁化特性および保磁力(H_C)を Fig.2 に、粒子数密度(N_p), 平均粒径(D_a), 粒径偏差(StD)を Table 1 に、示す。Fig. 1 より (I) のみ 24° 付近の $L1_0$ 構造由来の超格子ピークを観察し、Fig.2 より、(I), (II) 共に保磁力が 20 kOe であるため、主として高保磁力特性を有する FePt 微粒子群の形成を確認した。Table 1 より熱酸化 Si 基板に対して SASP 基板 (I), (II) 上ではいずれも N_p 向上, D_a 減少を確認し、(II) に対しシリカ粒径分散の少ない (I) では N_p 向上, D_a 減少を確認した。よって、SASP 基板に用いるシリカ粒子径を低分散化することで高粒子数密度かつ高保磁力の $L1_0$ -FePt 磁性微粒子群の作製が期待できる。

3. 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研究基盤形成支援事業(S1311020)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, A. Tsukamoto, J. Magn. Soc. Jpn., 33, 507 (2009)
- 3) M. Imazato, A. Ogasawara, A. Tsukamoto, "Book of Abstract -20th ICM.", p. 1493(2015)

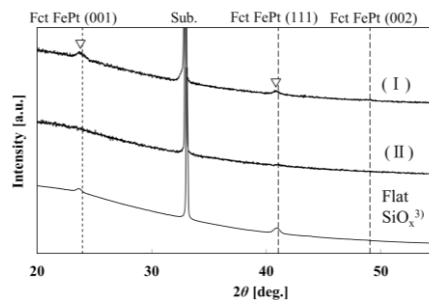


Fig.1 XRD profiles for FePt grains with (I), (II), and Flat SiO_x.

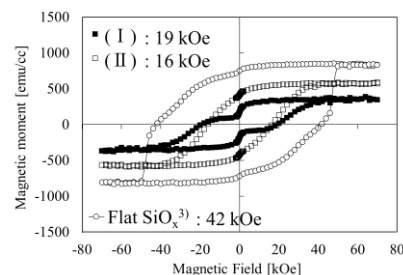


Fig.2 Magnetization curves FePt grains with (I), (II), and Flat SiO_x, measured by SQUID VSM at room-temperature.

Table 1 Average FePt grain diameter (D_a), areal density of grains (N_p), standard deviation of D_a (StD) on (I), (II), and Flat SiO_x.

	N_p (T bpsi)	D_a (nm)	StD (nm)
(I)	0.40	14.1	2.5
(II)	0.29	17.3	2.5
Flat SiO _x ³⁾	0.22	18.4	3.0

ランプ加熱高速 FeCuPt 微粒子形成における Si 基板の加熱寄与

田中万裕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⁾

The role of heating of Si substrate in rapid fabrication FeCuPt nano grains by lamp annealing

Masahiro Tanaka¹⁾, Arata Tsukamoto²⁾Graduate School of Science and Technology Nihon University, Japan¹⁾College of Science and Technology, Nihon University, Japan²⁾

はじめに

高密度磁気記録媒体の作製には磁性粒子の微細化と高密度化が重要である。我々はこれまで、数 nm 厚の Pt/Fe, Pt/Cu/Fe 多層薄膜にハロゲンランプ光を用いた急速昇降温熱処理(Rapid Thermal Annealing & Rapid Cooling Process :RTA)のみによる孤立ナノ微粒子の形成につき報告してきた^{1,2)}。初期積層膜厚の減少(1~4nm)により、微粒子化は可能であるが粒子形成と RTA 条件の相関が大きく変化することが課題であった。微粒子化に寄与する加熱要素として金属薄膜自身の加熱および熱酸化 Si 基板の光吸収による熱効果が考えられる。本報告では、これらの熱寄与度の膜厚依存性に注目し、総積層膜厚 1.88nm の FeCuPt 薄膜を成膜した熱酸化 Si 基板に対し、熱処理面のみを変えて FeCuPt 微粒子群形成における RTA プロセス依存性の検討を行った。

実験方法

DC マグネトロンスパッタ法を用いて、14 mm 四方の熱酸化 Si 基板上に Cu(0.41 nm), Fe(0.67 nm), Pt(0.87 nm)の順で成膜を行った。高真空チャンバー中で集光したハロゲンランプ光により、500°C 以上まで約 120°C/sec.にて昇温し、直後窒素導入にて急速冷却を行った。複数の熱酸化片面研磨 Si 基板に対し、研磨面側に成膜を行い、Fig. 1 に示すように(a)成膜面側に RTA, (b)基板背面から RTA を施した[以後、条件(a),(b)とする]。作製した FeCuPt 微粒子の観察には走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope : SEM)を用いた。結晶構造解析に X 線回折装置(X-Ray diffraction : XRD)を用いた。

結果

Fig. 2(a)~(b-1,2)に形成した微粒子の表面 SEM 像を示す。いずれの熱処理条件においても FeCuPt 微粒子群の形成を確認した[Fig. 2 (a),(b-1)]。条件(b)の基板では端部より約 2 mm の領域で粒子が結合した様相も確認した[Fig. 2 (b-2)]。Table 1 に SEM 像より得られた基板中央付近における形成粒子の平均粒径(D_a)、形成粒子数密度(N_p)、粒形分散(S_tD)を示す。(a),(b)の基板においても、平均粒形 20nm 以下の孤立したナノ微粒子群の形成を確認した。Fig. 3 に XRD プロファイルを示す。いずれの熱処理面においても $L1_0$ -FePt(111)ピークが観測された。上記の結果より、Si 基板の光吸収による熱効果のみによる(b)の加熱条件でも(a)条件と同様な微粒子群の作製および規則合金化が可能であることを示している。また、光照射時の背面温度測定より(a),(b)はほぼ同等の加熱プロファイルであった。ハロゲンランプ光を用いた熱処理において、本実験に用いた膜構成(1.88 nm 厚)では、Si 基板の光吸収による熱効果が主加熱要因であることを明らかとした。当日は金属膜厚を変化して同様の実験を行った結果の報告も行う。

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ものである。

参考文献

- 1) Y. Itoh, T. Aoyagi, A. Tsukamoto, K. Nakagawa, A. Itoh and T. Katayama: Jpn. J. Appl. Phys., 43, 8040-8043 (2004).
- 2) J. Tsukioka, T. Ubana, A. Tsukamoto, and A. Itoh: J. Magn. Soc. Jpn., 38, 143-146 (2014).

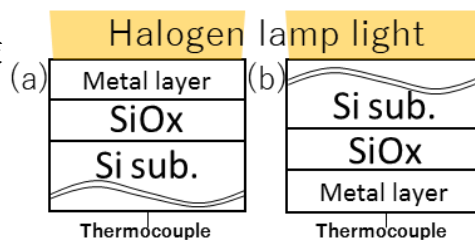


Fig.1 RTA conditions.

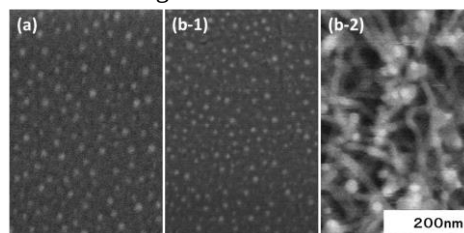


Fig.2 SEM planer view of FeCuPt grains on SiOx/Si substrate.

Table 1 Average grain diameter(D_a), Standard deviation of diameter(S_tD), areal density of grains(N_p) for isolated FeCuPt grains.

	D_a (nm)	S_tD (nm)	N_p (T particle /inch ²)
Condition (a)	19.5	2.4	0.38
Condition (b)	13.1	1.9	0.66

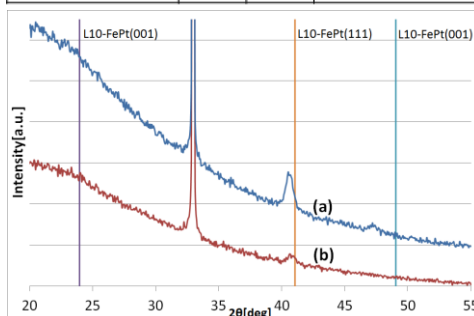


Fig.3 XRD Profile for isolated FeCuPt grains with condition (a) and (b).

単結晶基板上に形成した FePt 合金膜の構造に及ぼすキャップ層の影響

中村将大¹・落合亮真¹・大竹充^{1,2}・二本正昭¹・桐野文良³・稲葉信幸⁴

(¹中央大, ²工学院大, ³東京藝大, ⁴山形大)

Influence of Cap-Layer on the Structure of FePt Alloy Thin Films Formed on Single-Crystal Substrates

Masahiro Nakamura¹, Ryoma Ochiai¹, Mitsuru Ohtake^{1,2}, Masaaki Futamoto¹,

Fumiyoshi Kirino³, and Nobuyuki Inaba⁴

(¹Chuo Univ., ²Kogakuin Univ., ³Tokyo Univ. Arts, ⁴Yamagata Univ.)

はじめに $L1_0$ 構造を持つ FePt 規則合金は 6.6×10^7 erg/cm³ の K_u を持つため、この薄膜は磁気記録媒体や MRAM などの応用に向けて研究されている。薄膜応用では磁化容易軸である c 軸を膜面垂直方向に制御する必要がある。FePt 膜より大きな格子定数を持つ(001)基板との格子不整合により生ずる面内方向の引張応力を利用することが有効であると考えられている¹⁻³。これまで、我々は MgO(001)基板との格子不整合による応力に加え、MgO キャップ層を導入して界面で発生する応力を重畳させて FePt 膜の結晶配向制御を試みてきた³。本研究では、格子定数の異なる複数種の単結晶基板上に FePt 膜を形成し、MgO キャップ層の有無が $L1_0$ -FePt 合金膜の結晶配向と規則度に及ぼす影響を調べた。

実験方法 膜形成には、超高真空 RF マグネトロンスパッタリング装置を用いた。基板として、MgO, MgAl₂O₄, SrTiO₃(001)単結晶を用いた。基板温度 200 °C で 10 nm 厚の FePt 膜を堆積させ、不規則構造 (A1) の FePt(001)単結晶膜を形成した。このとき、各基板格子に対する Al-FePt(001)の不整合は、それぞれ、-9.8%, -5.5%, -2.0%となる。Al-FePt 膜上に基板温度 200 °C で 2 nm 厚の MgO キャップ層をヘテロエピタキシャル成長させ、その後、 $L1_0$ 相への規則化促進のため、600 °C での熱処理を施した。また、同様な方法で、キャップ層無しの試料も作製した。構造評価には RHEED, XRD, AFM, 磁気特性評価には VSM を用いた。

実験結果 MgO, MgAl₂O₄, SrTiO₃基板上に形成したキャップ層が無い FePt 膜の面外および面内 XRD パターンを Fig. 1(a)-(c) に示す。いずれの膜に対しても、面外パターンでは、FePt 膜からの基本反射に加え、FePt(001)超格子反射が観察されており、 $L1_0$ 相へ規則化していることが分かる。また、面内パターンにおいても、低強度ではあるが FePt(001)超格子反射が現れており、膜中に c 軸が面内に向いた $L1_0(100)$ および (010) バリエントが僅かに混在していることが分かる。Fig. 1(d)-(f) にキャップ層有りの試料の XRD パターンを示す。格子不整合が最大の MgO 基板の場合、面内 FePt(001) 反射が観察されておらず、 c 軸が面内に向いた $L1_0(001)$ 結晶のみになるような配向制御が実現されている。また、MgAl₂O₄ および SrTiO₃ 基板の場合、面内 FePt(001) 反射が現れているが、キャップ層無しの試料に比べ、反射強度が低下しており、面内バリエントの体積比率が減少していることが分かる。Fig. 2 に格子定数比 c/a および規則度 S の格子不整合依存性を示す。不整合の絶対値の増加に伴い、正方晶の c/a が減少傾向になり、規則化も促進されていることが分かる。また、キャップ層の導入により、不整合の効果がより顕著になっていることが分かる。

参考文献

- 1) K. F. Dong, H. H. Li, and J. S. Chen: *J. Appl. Phys.*, **113**, 233904 (2013).
- 2) A. Hotta, T. Ono, M. Hatayama, K. Tsumura, N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, and T. Shimatsu: *J. Appl. Phys.*, **115**, 17B712 (2014).
- 3) M. Ohtake, A. Itabashi, M. Futamoto, F. Kirino, and N. Inaba: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **39**, 167 (2015).

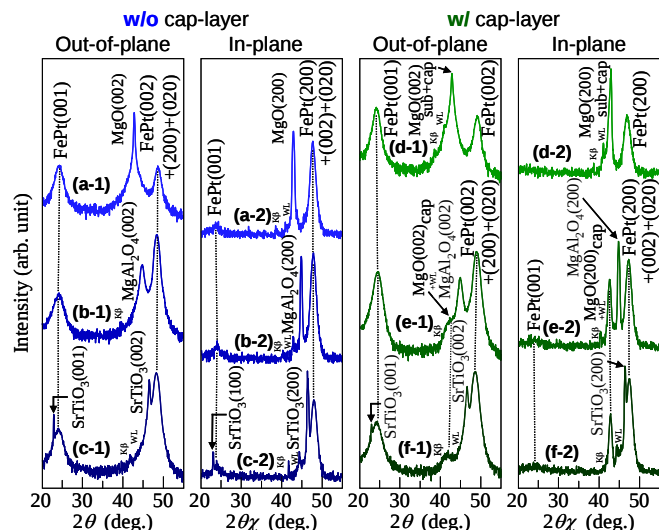


Fig. 1 (a-1)–(f-1) Out-of-plane and (a-2)–(f-2) in-plane XRD patterns of FePt films (a)–(c) without and (d)–(f) with MgO cap-layers deposited on [(a), (d)] MgO, [(b), (e)] MgAl₂O₄, and [(c), (f)] SrTiO₃ substrates.

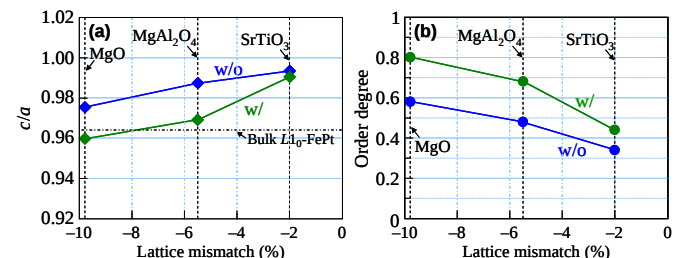


Fig. 2 Effects of lattice mismatch on (a) c/a and (b) order degree of FePt film with and without MgO cap-layer.

FePd 合金薄膜の構造に及ぼす基板との格子不整合の影響

中村将大¹・落合亮真¹・大竹充^{1,2}・二本正昭¹・桐野文良³・稲葉信幸⁴
(¹中央大, ²工学院大, ³東京藝大, ⁴山形大)

Influence of Lattice Mismatch with Substrate on the Structure of FePd Alloy Thin Film

Masahiro Nakamura¹, Ryoma Ochiai¹, Mitsuru Ohtake^{1,2}, Masaaki Futamoto¹,
Fumiyoshi Kirino³, and Nobuyuki Inaba⁴
(¹Chuo Univ., ²Kogakuin Univ., ³Tokyo Univ. Arts, ⁴Yamagata Univ.)

はじめに FePt や FePd 合金は立方晶 ($A1$) および正方晶 ($L1_0$) 構造をとり, $L1_0$ 構造の状態では 10^7 erg/cm³ オーダーの K_u を示す. そのため, 膜面垂直に磁化容易軸 ($[001]$ 方位) が向くように規則化させた合金膜は磁気記録媒体や MRAM などへの応用に向けて研究されている. 立方晶(001)基板に対する $L1_0$ (001)膜の格子不整合 (ミスマッチ) は $[(a_{L1_0} - a_{\text{sub}}) / a_{\text{sub}}] \times 100$ で表される. 負のミスマッチを持つ基板の上にエピタキシャル薄膜成長すると, 膜には面内方向に引張応力が働き, その結果, 面内格子が膨張し, 正方晶膜が形成されやすくなることが推察される. 最近, MgO, MgAl₂O₄, SrTiO₃(001)基板を用いることにより, 格子不整合が FePt 膜の構造や磁気特性に及ぼす影響が報告されつつある¹⁻³⁾. 本研究では, 種々の立方晶(001)単結晶基板の上に FePd 膜を形成し, 格子不整合が膜構造に及ぼす影響について調べた.

実験方法 膜形成には超高真空 RF マグネトロンスパッタリング装置を用いた. 基板材料として, MgO, MgAl₂O₄, SrTiO₃, (LaAlO₃)_{0.3}(Sr₂AlTaO₃)_{0.7}, LaAlO₃を用い, それぞれの基板に対する $L1_0$ -FePd(001)格子のミスマッチは, -9.1%, -4.9%, -1.4%, -0.4%, +1.6%である. 基板の上に RT~600 °C の基板温度で 10 nm 厚の FePd 膜を形成した. 構造評価には RHEED, XRD, AFM, 磁気特性評価には VSM を用いた.

実験結果 Fig. 1に一連の基板の上に600 °Cで形成した FePd膜のRHEEDパターンを示す. 全ての基板で, ストリーク状の回折パターンが観察されており, FePd膜がエピタキシャル成長していることが分かる. 面外XRDパターンにおけるFePd(001)超格子とFePd(002)基本反射の強度比から算出した規則度と格子不整合の関係をFig. 2に示す. 格子不整合が増大するほどFePd膜の規則度が増大する傾向がある. 負のミスマッチの値が最も大きなMgO (-9.1%)で規則度0.53となっており, 飽和傾向も認められる. 以上のことから, 負の格子不整合により $L1_0$ 相への規則化が促進されていることが分かる.

参考文献

- 1) K. F. Dong, H. H. Li, and J. S. Chen: *J. Appl. Phys.*, **113**, 233904 (2013).
- 2) A. Hotta, T. Ono, M. Hatayama, K. Tsumura, N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, and T. Shimatsu: *J. Appl. Phys.*, **115**, 17B712 (2014).
- 3) M. Nakamura, R. Ochiai, M. Ohtake, M. Futamoto, F. Kirino, and N. Inaba: 8th Joint European Magnetism Symposium (JEMS 2016).

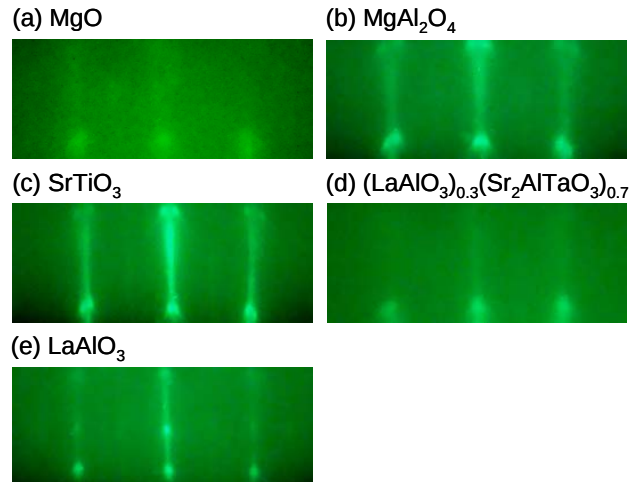


Fig. 1 RHEED patterns observed for FePd films deposited on (a) MgO, (b) MgAl₂O₄, (c) SrTiO₃, (d) (LaAlO₃)_{0.3}(Sr₂AlTaO₃)_{0.7}, and (e) LaAlO₃ substrates at 600 °C.

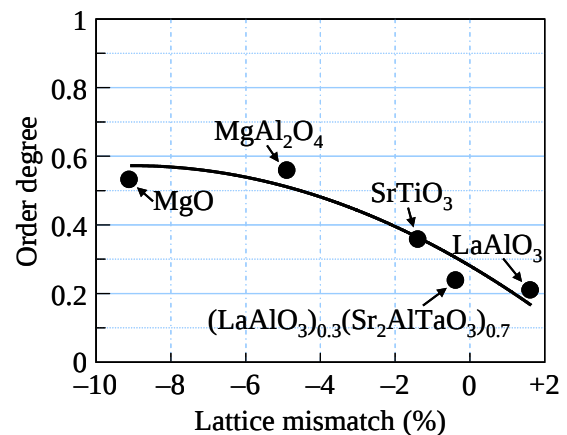


Fig. 2 Lattice mismatch dependence of order degree of FePd film.

Effect of CrB insertion on the (001) texture of MgO seed layer and magnetic properties of FePt-C HAMR media

J. Wang¹, Y.K. Takahashi¹, K. Yakushiji², H. Sepehri-Amin¹, H. Kubota², K. Hono¹

¹ National Institute for Materials Science, 1-2-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan

² National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

L1₀-ordered FePt-C granular films are considered to be the most promising candidates for heat-assisted magnetic recording (HAMR) media for the recording density higher than 1.5 Tbit/in². For practical applications as HAMR media, the FePt-C granular structure has to be optimized with excellent alignment of the c-axis normal to the film plane on polycrystalline MgO seed layer. Therefore it is essential to have a strong (001)-texture in the MgO seed layer with a smooth surface. In our previous work¹⁾, we demonstrated well-isolated FePt-C granular films with high $\mu_0 H_c$ on polycrystalline MgO underlayers. However, poor (001)-textures of polycrystalline MgO seed layers result in serious mis-orientations of FePt grains, causing large in-plane components in the magnetization curve, which will lead poor SNR²⁾. Here, we show that with the insertion of a 2-nm-thick CrB layer between a heat sink and a MgO seed layer, the texture and the surface roughness of the MgO seed layer are significantly improved, thereby reducing the in-plane component in a subsequently deposited FePt-C granular layer.

6-nm-thick FePt-28vol.% C films were deposited by DC co-sputtering using FePt and C targets at 600°C under 0.48Pa Ar on a MgO (100) substrate (Sample A), glass/ NiTa (100 nm)/ MgO (10 nm) seed layer (Sample B), and glass/ NiTa (100 nm)/ CrB (2 nm)/MgO (10 nm) seed layer with a CrB insertion (Sample C). The MgO seed layers were RF sputter deposited under an Ar pressure of 5.2 Pa at room temperature (RT) using a MgO target.

Figure 1 shows the MgO (002) rocking curves of sample B and C. The insertion of a CrB layer obviously improved the (001)-texture of the MgO layer, which is indicated by the smaller FWHM value of the MgO (002) rocking curve (5.6° to 3.9°). The insertion of a CrB layer improves the roughness of the MgO seed layer from R_a value of 0.28 to 0.14 nm. The MH curves of the FePt-C layers grown on these two kinds of seed layers are shown in Fig. 2. Without the CrB layer (Fig. 2 a), the loops show small kink at zero field, and an open in-plane loop, indicating large in-plane components. In our previous work²⁾, such large in-plane components were due to significant mis-orientation of FePt grains originated from mis-aligned MgO grains in a seed layer. With much improved (001)-texture and surface roughness of the MgO seed layer by the insertion of the CrB layer, sample C (Fig. 2 b) presents loops without kink, narrowed in-plane loop and reduced remanence ratio ($M_{r\parallel} / M_{r\perp}$) which are critical for signal-to-noise ratio of magnetic recording. In summary, the insertion of a thin CrB buffer layer on amorphous NiTa heat sink layer improves the (001)-texture and roughness of the MgO seed layer, which lead to the reduction in the in-plane component of the FePt-C recording layer.

Reference

- 1) A. Perumal, Y. K. Takahashi, and K. Hono, Appl. Phys. Express 1, (2008) 101301.
- 2) J. Wang, S. Hata, Y.K. Takahashi, H. Sepehri-Amin, B. Varaprasad, T. Schrefl, K. Hono, Acta Mat., 91 (2015) 41

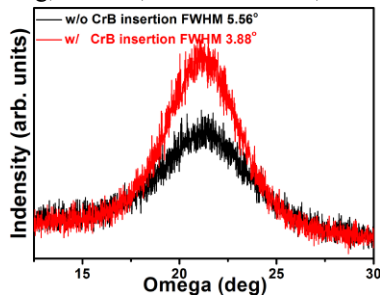


Fig. 1 MgO (002) rocking curves of films with (B) and without (C) CrB insertion layer.

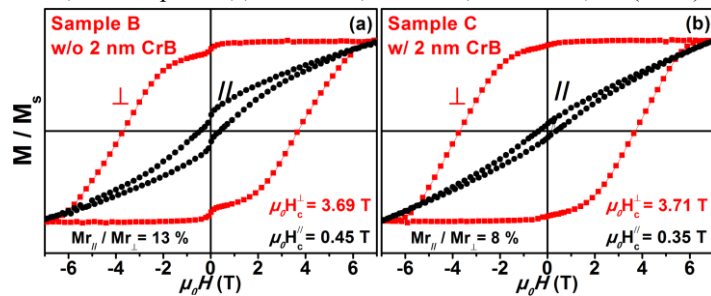


Fig. 2 M-H curves of sample B without 2 nm CrB (a) and sample C with 2 nm CrB insertion layer (b).

スピントルク発振素子と記録媒体の共鳴的相互作用： 磁気共鳴を用いた読み出し方法

金尾太郎、首藤浩文、工藤究、永澤鶴美、山岸道長、水島公一、佐藤利江
(東芝研究開発センター)

Resonant interaction between spin-torque oscillator and recording media:

Micromagnetic study of readout method using magnetic resonance

T. Kanao, H. Suto, K. Kudo, T. Nagasawa, M. Yamagishi, K. Mizushima, and R. Sato

(Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation)

はじめに

多層の記録層をもつ三次元磁気記録^{1,2)}のための読み出し方法として、スピントルク発振素子(spin-torque oscillator, 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³⁾。共鳴読み出しでは、STO から発生した高周波磁場が記録層に加えられる。この高周波磁場の周波数が記録層の共鳴周波数に近いとき記録層に磁化振動が励起される。その影響を受け STO の発振が変化することを利用して記録層の磁化方向を読み出す。本研究ではマイクロマグネティックシミュレーションを用いて共鳴読み出しのための STO と記録層の構成を検討した。

共鳴読み出し用 STO と記録層

Figure 1 に今回シミュレーションをおこなった STO と記録層(recording layer, RL)の形状と磁化および磁場の配置を示す。STO は垂直自由層・面内固定層からなるとした。この型の STO では面外発振により振幅の大きな高周波磁場が発生する。また、この型の STO では大きな電氣的信号出力が得られるため⁴⁾、再生に有利になる。STO には面直方向に電流 I と外部磁場 H_x が加えられている。記録層は垂直磁気異方性をもち、反強磁性的に結合したソフト層とハード層からなるとした。この構造により漏れ磁場を小さく抑えることができる。ソフト層は STO の発振周波数と近い共鳴周波数を持ち、STO と相互作用する。ハード層は十分高い共鳴周波数を持ち、熱安定性を保つ。記録層のとり 2 つの磁化配置“down”, “up” (Fig. 1 右図)の共鳴周波数が異なるように z 方向に磁場 $H_z = 0.2$ kOeを加えている。 H_z は STO にも加わるとした。

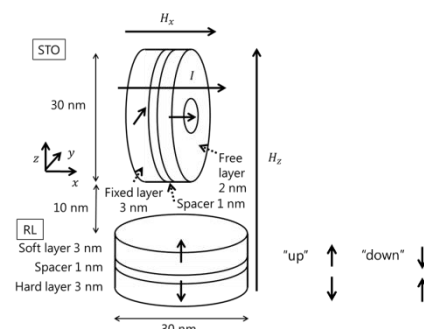


Fig. 1. STO and recording layer (RL).

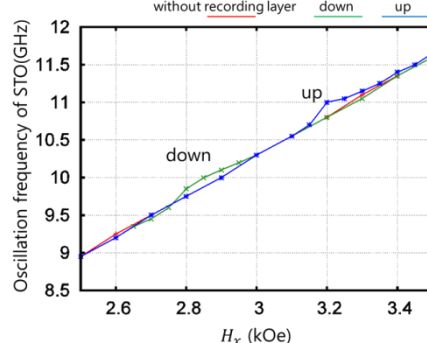


Fig. 2. Oscillation frequency of STO plotted against H_x .

結果

Figure 2 に STO の発振周波数の外部磁場 H_x 依存性を、記録層なしの場合、および down または up の磁化配置の記録層がある場合について示す。記録層のないとき STO の発振周波数は H_x を大きくするに従って単調に増加する。down または up の磁化配置の記録層がある場合には、それぞれ異なる H_x で、記録層なしの場合から発振周波数がシフトする。これは STO と記録層がそれぞれの磁化配置に対して選択的に共鳴したことを示している³⁾。以上からこの構成により記録層の磁化方向が共鳴読み出しによって判別できることを確認した。講演では磁化振動波形やその過渡応答についても報告する。

参考文献

- 1) S. Okamoto et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **48**, 353001 (2015).
 - 2) H. Suto et al., Phys. Rev. Appl. **5**, 014003 (2016).
 - 3) H. Suto et al., Nanotechnology **25**, 245501 (2014).
 - 4) H. Kubota et al., Appl. Phys. Express **6**, 103003 (2013).
- 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。

マイクロ波磁界中における垂直磁化 ECC ナノドットの磁化振動励起と磁化反転：ダイオード効果を用いた解析

首藤 浩文, 永澤 鶴美, 工藤 究, 金尾 太郎, 水島 公一, 佐藤 利江
(東芝研究開発センター)

Magnetization Excitation and Switching of a Perpendicularly Magnetized ECC Nanodot in a Microwave Magnetic Field: Analysis Using Diode Effect

H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, T. Kanao, K. Mizushima, and R. Sato
(Corporate Research & Development Center, Toshiba Corp.)

はじめに

マイクロ波磁界を印加し磁化振動を励起することにより磁化反転をアシストするマイクロ波アシスト磁化反転が、次世代の高密度磁気記録における書き込み技術として注目されている[1-3]. 本研究では, MR 素子にマイクロ波信号を印加することによって直流電圧が現れるダイオード効果[4]を利用して, マイクロ波磁界中の垂直磁化ナノドットの磁化振動の解析を行った. マイクロ波磁界の周波数 (f_{rf}) と FMR 周波数が一致する条件において, 磁化振動のコーン角にピークが現れた. マイクロ波磁界強度を上げるにつれ, このピークは大きくなるとともに, 非線形性によりピーク位置がシフトした. また, 磁化振動が励起され磁化反転に至るアシスト磁化反転の挙動を観察した.

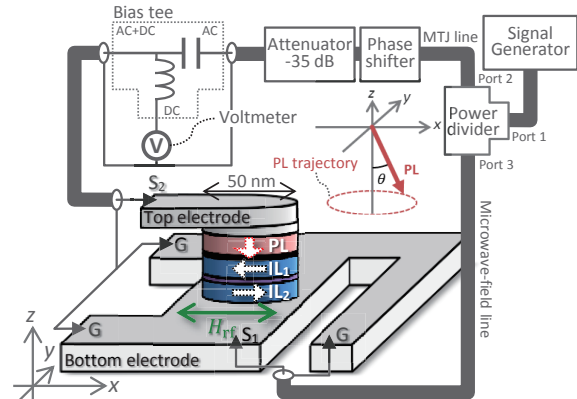


Fig. 1. Sample configuration and experimental setup.

ダイオード測定の手法と結果

Fig. 1 に, 素子構造と実験セットアップを示す. 解析対象の垂直磁化膜 (図中 PL) の磁化振動は, 面内磁化膜 (図中 IL₁, IL₂) との MgO トンネルバリアを介した MR 効果を通して, 素子抵抗を変化させる. 信号発生器からのマイクロ波信号は 2 つに分岐され, 一方は電流磁界によるマイクロ波磁界を発生させるために用いられ, もう一方は素子に印加される. 磁化振動励起による素子抵抗の変化と印加マイクロ波信号とが同期することにより, ダイオード電圧が発生する. PL は, 垂直磁化膜である Co/Pt 多層膜と, 面内磁化膜である CoFeB とを積層し, 磁氣的に結合させた exchange-coupled composite (ECC) 構造になっており, PL 全体としては垂直磁化膜になっている. Fig. 2(a)に, $f_{rf} = 12.95$ GHz における, ダイオード効果から見積もった PL 磁化振動のコーン角 (図中 θ) の垂直方向磁界 (H_z) 依存性を示す. $H_z = +500$ Oe 付近において FMR ピークが現れた. コーン角は, 励起マイクロ波磁界の強度を上げるにつれ, 大きくなると共に, そのピーク位置が $+H_z$ 方向にシフトした. このシフトは, 垂直磁気異方性を持つシングルスピンモデルから予想される向きとは逆であり, PL の ECC 構造を反映したモデルを用いたシミュレーションによって, 再現された[Fig. 2(b)]. この解析結果は, マイクロ波磁界印加によって PL 内の磁化がねじれ, 面内磁化膜部分の磁化振動が優先的に励起されることを示唆しており, 面内磁化膜部分の磁化振動が優先的に励起される結果, 面内磁化膜に特有の挙動 (FMR ピークの $+H_z$ 方向へのシフト) が現れる. $f_{rf} = 8.95$ GHz における測定では, コーン角が広がり磁化反転に至る様子が観察された[Fig. 2(c)].

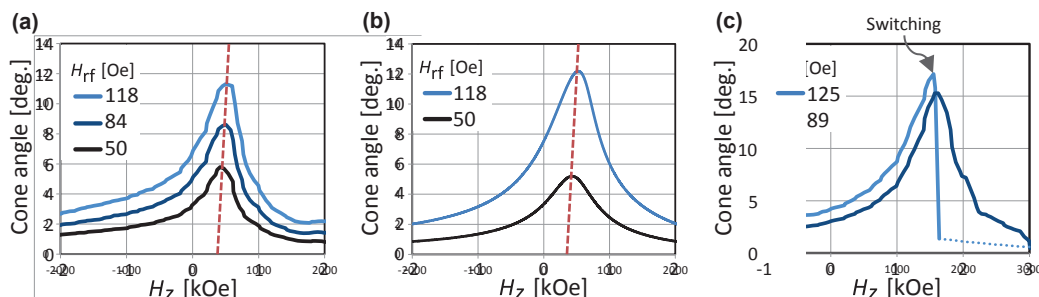


Fig. 2. (a) Experimental results showing the cone angle [deg.] vs. H_z [kOe] for $f_{rf} = 12.95$ GHz. (b) Corresponding simulation results. Broken lines are eye-guides showing the shift of the peak positions. (c) H_z dependence of the PL cone angle for $f_{rf} = 8.95$ GHz. The abrupt decrease at $H_z = 1600$ Oe reflects magnetization switching of PL.

参考文献 [1] J.-G. Zhu, et al., IEEE Trans. Magn. **44**, 125 (2008). [2] S. Okamoto, et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 237209 (2012). [3] H. Suto, et al., Phys. Rev. Applied **5**, 014003 (2016). [4] A. A. Tulpurkar, et al., Nature **438**, 339 (2005).

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.

Magnetization switching of a ferrimagnetic amorphous Gd-Fe-Co single dot under an assistance of rf field

Y. M. Lu, S. Okamoto, N. Kikuchi, B. Lao, Y. Kusanagi, and O. Kitakami

Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

Microwave assisted magnetic recording (MAMR) [1], which consists of microwave assisted magnetization switching (MAS) and an rf field generator of spin torque oscillator (STO), is one of the prospective ultra-high density recording technologies. Based on MAMR technology, a multilevel recording scheme and an antiferromagnetically coupled (AFC) media has been proposed to further enhance the recording density [2-4]. For these technologies, it is very important to control the dipole interaction between adjacent bits and the interlayer antiferromagnetic coupling. A ferrimagnetic alloy such as amorphous Gd-Fe-Co is a possible candidate material due to its very low saturation magnetization and very good controllability of magnetic properties by changing the composition of Gd and (Fe-Co). Moreover, AFC media is easily obtained by simply stacking Gd-rich and (Fe-Co)-rich layers. But so far, there has been no report on MAS experiment using a ferrimagnetic material. In this work, we have examined the MAS behaviors of a Gd-Fe-Co single dot with the diameter down to sub-micro scale. The sample structure is MgO sub./Pt(25 nm)/Ta(1 nm)/Gd-Fe-Co(10 nm)/Ta(3 nm). The Pt/Ta underlayer is used as an electrode for anomalous Hall effect (AHE) measurement. Gd-Fe-Co layer is patterned into a dot, and Au stripline is fabricated just above the dot with an insertion of an insulating layer.

Figure 1 shows representative AHE curves of the Gd-Fe-Co dot with the diameter of 1 μm . The AHE curve exhibits that the switching field H_{sw} in the absence of the rf field is around 310 Oe, which is much smaller than the effective anisotropy field of 1 kOe. Under the assistance of rf fields with the amplitude of 130 Oe, H_{sw} significantly decreases without changing the shape of AHE curve. Figure 2 shows the frequency dependence of H_{sw} . H_{sw} monotonically decreases with the rf frequency f and takes a minimum of 110 Oe at $f = 3.5$ GHz, indicating 61% of switching field reduction.

Reference

[1] J-G. Zhu *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **44**, 125 (2008). [2] S. Okamoto *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 353001 (2015). [3] T. Yang *et al.*, *J. Appl. Phys.* **114**, 213901 (2013). [4] H. Suto *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **5**, 014003 (2016).

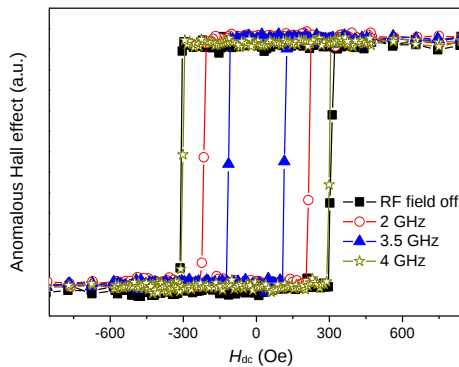


FIG. 1. Normalized AHE curves with and without the rf field application for a perpendicularly magnetized Gd-Fe-Co single dot.

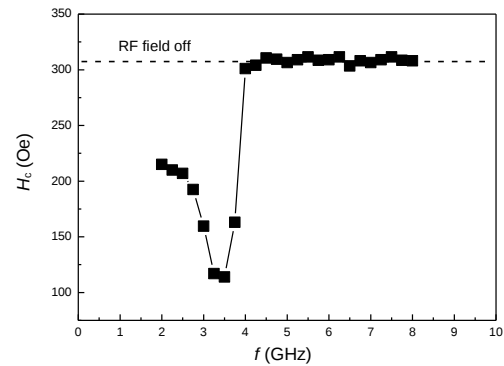


FIG. 2. The switching field of Gd-Fe-Co dot as a function of rf frequency.

MAMR 用 SIL-FGL-SIL 3 層構造 STO のマイクロマグ解析

金井靖、板垣諒、吉田和悦¹、Simon J. Greaves²、村岡裕明²
(新潟工科大、¹工学院大、²東北大)

Micromagnetic analysis of tri-layered STO comprising SIL-FGL-SIL for MAMR

Y. Kanai, R. Itagaki, K. Yoshida¹, S. J. Greaves², H. Muraoka²
(Niigata Inst. of Tech.,¹Kogakuin Univ.,²Tohoku 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からの記録磁界に重畳し、高異方性媒体への記録を容易にする¹⁾。STOはMAMRにおいて最も重要な構成要素であり、安定した発振と強い発振磁界のほかに、発振を誘起する最適な注入電流密度(J_{opt})が低いことも求められる。ここでは、 J_{opt} の低減を目的として高周波発振層 (FGL)の両側をスピン注入層 (SIL)ではさんだ3層構造²⁾のSTOのマイクロマグネティック解析を行ったので報告する。

計算モデルと計算条件

Fig.1に示すようにFGLの両側をSILではさんだ3層構造STOを考える。SIL1は反射のスピントルクを、SIL2は透過のスピントルクをFGLに加える。Table 1にSTOの諸元を示す。マイクロマグネティック解析には富士通製 EXAMAG v. 2.1 を用いた。

計算結果

外部磁界(H_{apl})を1 GHz、20 kOe_{pp}としたとき、3層構造STOの発振の様子をFig.2に示す。発振が持続する最低の注入電流密度(J_{sus})は 1.0×10^8 A/cm²、FGLが膜面内で回転する最適な電流(J_{opt})は 2.5×10^8 A/cm²であった。SIL1は H_k が高くて発振したが、SIL2は H_k が高いと発振しなかった。また、SIL1、SIL2ともに高い飽和磁化($4\pi M_s$)の材料は好ましくなかった。従来の2層構造STOは高い H_k のSIL1による反射のスピントルクのみを利用しており、 $H_k = 20$ kOeのとき $J_{sus} = 1.0 \times 10^8$ A/cm²、 $J_{opt} = 3.0 \times 10^8$ A/cm²であった。2層構造STOのSIL1が軟磁性材料³⁾のとき $J_{sus} = 1.0 \times 10^8$ A/cm²であったが、FGLは膜面内で安定に回転しなかった。一方、透過のスピントルクのみを利用する2層構造STOでは $J_{sus} = 1.0 \times 10^8$ A/cm²、 $J_{opt} = 3.0 \times 10^8$ A/cm²であった。

謝辞 本研究の一部は科学技術振興会科学研究費補助金(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, Japan)の補助金によった。

参考文献

- 1) J.-G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang: *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 125- 131 (2008).
- 2) J.-G. Zhu: *MMM-Intermag Joint Conf.*, AB-11(2016).
- 3) J.-G. Zhu: *MMM Conf.*, AC-13(2014).

Fig. 2 Oscillation state of tri-layered STO. (Top) FGL, (middle) SIL1, and (bottom) SIL2. $J = 1.0 \times 10^8$ A/cm².

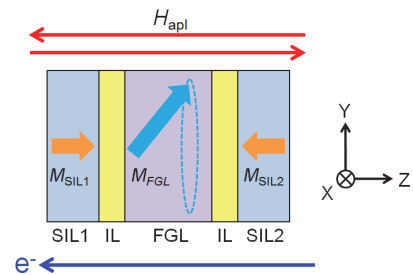


Fig.1 Arrangement of tri-layered STO.

Table1 Calculation specifications of FGL and SILs.

	FGL	SIL1	SIL2
$4\pi M_s$	20 kG	8 kG	8kG
H_k	31.4 Oe	31.4 Oe	31.4 Oe
α	0.02	0.02	0.02
Exchange, A	2.5×10^{-6} erg/cm	1.0×10^{-6} erg/cm	1.0×10^{-6} erg/cm
Thickness	10 nm	2 nm	2 nm
$P_o = 0.5$, Width $\times$ height = 30 nm $\times$ 30 nm, Inter layer thickness = 2 nm each			

