

Ni/Cu 多層構造の電場誘起 XMCD

岡林潤^{1*}・谷山智康²

¹東大理・²東工大

Electric-field induced XMCD in Ni/Cu multilayer

Jun Okabayashi¹ and Tomoyasu Taniyama²

¹The Univ. of Tokyo, ²Tokyo Institute of Technology

磁気異方性の電場による制御は、スピントロニクス研究において低消費電力による動作を可能にするため重要な技術となる。強磁性体と絶縁体の界面での電場による電荷変調について研究が行われている。一方、誘電体と磁性体の積層構造では、誘電体からの力学的な応力による界面磁気異方性の変調を実現できる。誘電体 BaTiO₃ への電場印加によって、ドメイン構造の変化により、格子定数の変調が可能である。また、Ni/Cu 磁性多層構造は、界面での歪みにより垂直磁気異方性が生じる。BaTiO₃ 上の Ni/Cu 多層構造では、電場により界面での歪み応力を制御でき、それにより垂直一面内の磁化容易軸が変化する[1]。しかし、電場印加による元素選択的な磁化測定やその変調の起源については、明確になっていない。そこで本研究では、電場を印加できるシステムを作製し、電場印加時の X 線磁気円二色性 (EXMCD) を行った。

[Cu (9 nm)/Ni (2 nm)]₅ の多層構造を BaTiO₃ (001) 面上に堆積した。EXMCD 測定は、KEK-PF BL-7A にて常設した ±1.2 T の電磁石を用いた XMCD 装置を改造して行った。室温にて、蛍光収量法を用いた。試料表面と裏面の間に電場を印加した。EXMCD 測定は、試料表面が光と磁場に垂直となる配置にて行った。

電場印加しない場合は垂直磁化を示し、Ni L_{2,3} 端の XMCD と L₃ 端での XMCD 磁化曲線からも確認した。一方、3 kV/cm の電場印加時には、面内磁化に変化した。電場による BaTiO₃ の格子変調は約 1 % と見積もられ、BaTiO₃ と Ni/Cu 層の界面での歪み応力の変化により磁気異方性が変化した。EXMCD のスペクトル形状にも変化が見られ、軌道磁気モーメントの変化を観測した。また、EXMCD スペクトル形状は、電圧印加に対して可逆的に変化することも確認した。さらに、Ni/Cu 層の面内格子定数を変化させた際の第一原理計算を行った。面内応力が大きくなると軌道磁気モーメントは増大する傾向にあることが判り、EXMCD の結果を説明できることが判った。

誘電体と磁性体の界面において電場により格子定数を変調させ、EXMCD 法により軌道磁気モーメントの変化を観測できた。理論解析も含めて講演において詳しく議論したい。

[1] Y. Shirahata et al, NPG Asia Materials 7, e198 (2015).

Ir-SAF 構造での GMR 効果

福島 章雄、杉原 敦、薬師寺 啓、久保田 均、湯浅 新治
(産業技術総合研究所、スピントロニクス研究センター)

GMR effect in Ir-SAF structure

A. Fukushima, A. Sugihara, K. Yakushiji, H. Kubota, S. Yuasa
(Spintronics Research Center, AIST)

はじめに

近年、高密度 STT-MRAM 用途として垂直磁化材料を用いた MgO バリア MTJ 素子の開発が盛んである。安定したメモリ動作のためには、強固な磁化参照層が必要である。それに対し、最近、Ir スペーサを用いた CoPt 多層膜の積層反強磁性層にて、MH の測定から 1T を超える反平行層間交換結合 (AF 結合) があること、微小素子 ($\sim 25\text{nm}\Phi$) に加工した後でも 0.9T の AF 結合があること [1] が報告されている。この MTJ 素子の MR カーブを子細に検討したところ、1T 近傍に Ir-SAF 構造部分の GMR 由来と考えられるわずかな抵抗変化を確認した。今回、Ir-SAF 構造を持つ GMR 素子を作成し、その磁気抵抗曲線を調べたので報告する。

実験

3 種類の GMR 素子 (1) 下フリーCu スペーサ: Sub./ Buffer/ フリー層/ Cu 6 nm (スペーサ)/ SAF 層/ Cap、(2) 下フリーIr スペーサ: Sub./ Buffer/ フリー層/ Ir 3nm (スペーサ)/ SAF 層/ Cap、(3) 上フリーIr スペーサ: Sub./ Buffer/ SAF 層/ Ir 3nm (スペーサ)/ フリー層/ Cap、フリー層は Co 0.8nm、SAF 層は [CoPt 3nm/ Ir 0.5nm/ CoPt 3nm] で共通、を作成した。直径およそ $50\text{nm}\Phi$ の接合に加工した後、超電導マグネットを用い $\pm 3\text{T}$ の範囲で MR カーブを測定した。測定は交流 2 端子法 (リード線の抵抗は 0.2Ω 程度) で行い、周波数 7.93kHz、測定電流 $10\mu\text{A}$ 、素子の抵抗値が $20\Omega \sim 40\Omega$ 程度であるので、測定時に素子にかかる電圧は 0.5mV 以下である。

測定結果

下フリーCu スペーサ素子では、 $\pm 1.1\text{T}$ で大きな磁気抵抗が現れ、その後 3T に至るまで抵抗が徐々に変化している。また、下フリーIr スペーサ素子では $\pm 1.4\text{T}$ で SAF 層の結合に起因する磁気抵抗が観測された。また、上フリーIr スペーサ素子でも同様に、SAF 結合起因の磁気抵抗が観測され、その反転磁界は下フリーIr スペーサ素子より高い磁場 ($\pm 1.7\text{T}$) であった。上フリー構造で反転磁界が高いのは、SAF 層に対して、微細加工時のダメージがより少ないためではないかと考えられる。これらの磁気抵抗は数十 $\text{m}\Omega$ 以上の変化を示すため測定しやすく、これを使って、微細加工後の SAF 結合の強さを調べることが可能である。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構 (JST) を通して委託されたものである。

参考文献

K. Yakushiji, A. Sugihara, A. Fukushima, H. Kubota, and S. Yuasa, Appl. Phys. Lett. **110**, 092406 (2017)

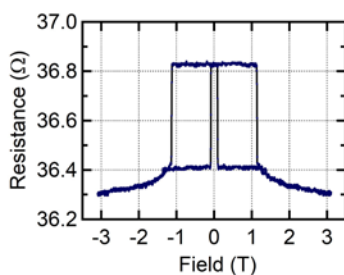


Fig. 1 下フリーCu スペーサ素子の GMR

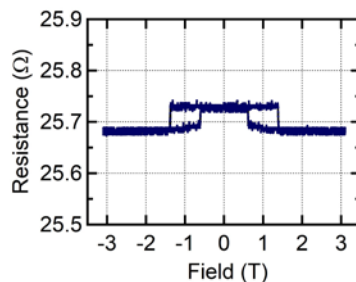


Fig. 2 下フリーIr スペーサ素子の GMR

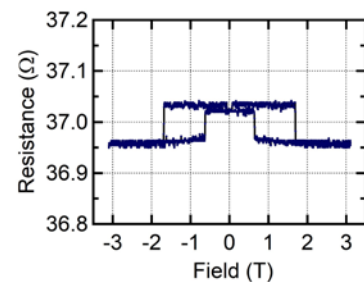


Fig. 3 上フリーIr スペーサ素子の GMR

Tb-Fe-Co/MgO/Gd-Fe MTJ 素子における電圧制御磁気異方性変化

上野鷹幸、金城秀和*、船橋信彦*、麻生慎太郎*、
加藤大典*、青島賢一*、久我淳*、本橋光也、町田賢司*
(東京電機大工、*NHK 技研)

Change of Voltage-controlled Magnetic Anisotropy for Tb-Fe-Co/MgO/Gd-Fe MTJ Devices

Takayuki Ueno, Hidekazu Kinjo, Nobuhiko Funabashi, Shintaro Aso,

Daisuke Kato, Kenichi Aoshima, Kiyoshi Kuga, Mitsuya Motohashi, Kenji Machida

(Tokyo Denki Univ., NHK STRL)

はじめに

電圧制御磁気異方性 (VCMA) 効果は、数原子層の極薄膜の磁化を制御することが可能であり、低消費電力化への期待から磁気メモリの分野で活発に研究されている¹⁾。この効果を磁気光学式空間光変調器に適用するには、磁気光学効果の得られる厚い膜での検討が必要である。これまでに、Tb-Fe-Co/MgO/Gd-Fe MTJ 素子において、MgO 絶縁層と Gd-Fe 光変調層の間に Co-Fe/Gd 層を挿入することで、厚さ 9 nm の Gd-Fe 光変調層の VCMA 効果を観測した²⁾。今回、膜構成を変えた素子を作製し、厚い膜で生じる VCMA の起源について検討した。

実験方法

表面熱酸化シリコン基板の上にイオンビームスパッタにて、Ru(3 nm)/Ag(30 nm)/Ru(3 nm)/Tb-Fe-Co(10 nm)/Co-Fe(0.5 nm)下地層、MgO(3 nm)絶縁層、Co-Fe(0.3 nm)/Gd(0.1, 0.2 nm)/Gd-Fe(9 nm)光変調層、Ru(3 nm)保護層を室温で製膜した後、電子線描画とイオンビームミリングにより 10 μm 角素子に加工し、In-Zn-O 上部透明電極を形成した。上部電極側をプラスとして DC 電圧を印加した状態で、マイクロカー効果測定装置により素子のカーヒステリシスループを取得した。測定波長は 658 nm とし、素子に対して垂直方向の磁界を印加した。

実験結果

Co-Fe/Gd 層のない素子は、角形比 1 の垂直磁化を示したが、膜厚が厚いため、VCMA 効果は観測されなかった。これに対し、図 1 に示した Co-Fe(0.3 nm)/Gd(0.2 nm)/Gd-Fe(9 nm)光変調層では、垂直磁気異方性が減少し、角形比が大幅に劣化した。この素子に、 ± 1.3 V の電圧を印加したところ、電圧印加方向に応じて面内および垂直に磁気異方性が変化した。また、界面の Gd を 0.1 nm に減らしたところ、面内磁気異方性を示したが、電圧印加によって異方性が変化していることがわかる。規格化したカーヒステリシスループから求めた VCMA 係数は、19 fJ/Vm と小さな値であったにもかかわらず、0.5 nm 以下の極薄 Co-Fe/Gd 層を挿入することで、9 nm 厚の光変調層の磁気特性が劇的に変化する VCMA 効果が観測された。Co-Fe/Gd/Gd-Fe 光変調層では、MgO 絶縁層と強磁性層との界面が光変調層全体の磁気異方性を支配することを実験的に確認している。界面の Co-Fe 層に生じた VCMA 効果が、Gd-Fe 層を含めた厚い膜の磁気異方性に影響を与えたと考えられる。

参考文献

- 1) M. Weisheit, Science, vol. 315, pp. 349-351 (2007).
- 2) N. Funabashi, IEEE Trans. Magn., DOI: 10.1109/TMG.2017.2711639 (to be published 2017).

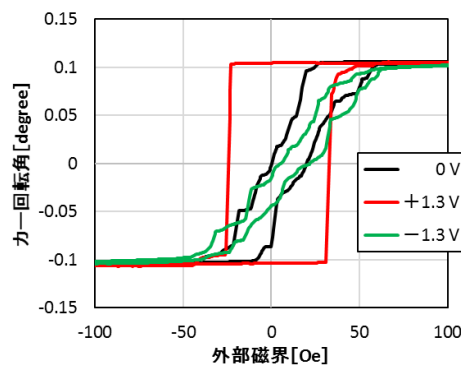


図 1 Co-Fe(0.3)/Gd(0.2)/Gd-Fe(9) 光変調層の MOKE ループ

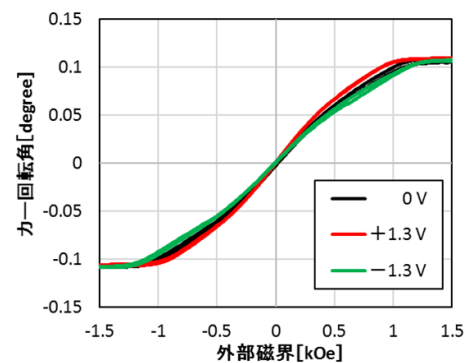


図 2 Co-Fe(0.3)/Gd(0.1)/Gd-Fe(9) 光変調層の MOKE ループ

垂直磁化 Co₂FeSi 膜を用いた磁気トンネル接合多層膜の作製

スタットラー 嘉也, 篠原 光貴, 高村 陽太, 中川 茂樹
(東京工業大学)

Fabrication of magnetic tunnel junction multilayer with perpendicularly magnetized Co₂FeSi films

Y. Stutler, K. Shinohara, Y. Takamura, S. Nakagawa
(Tokyo Institute of Technology)

はじめに

垂直磁化型磁気トンネル接合(p-MTJ)は、高密度集積化・低消費電力化の面で優れており、次世代のMRAM用メモリセルとして期待され、近年ではCoFeB/MgO/CoFeB構造でのp-MTJ素子が実現されている^{[1][2]}。本研究では、高いTMR比を持つp-MTJの実現のため、スピン分極率が100%のハーフメタル強磁性体(HMF)として期待されるフルホイスラー合金Co₂FeSi(CFS)を用いたCFS/MgO/CFS構造のp-MTJ多層膜の作製に取り組んでいる。その結果、MgO層下部に位置する下部CFSは、理想的なCFS/MgO界面の形成とCFSの結晶へ加えられる歪みが垂直磁化発現に寄与していることを見出した。またMgO層上の上部CFSは、キャップ層との界面が垂直磁化の発現に影響している可能性が高いことを見出した。これら上下のCFS層の垂直磁化の発現機構が異なるため、保磁力差による2段ステップを有する磁化特性の獲得に成功したので報告する。

実験方法

試料は、対向ターゲット式スパッタ法を用いてMgO(100)単結晶基板上に作製した。試料構造はMgO基板/Cr(40nm)/Pd(50nm)/CFS(0.6nm)/MgO(2nm)/CFS(0.6nm)/Pd(10nm)で、MgOはRFスパッタ、それ以外の膜は全てDCスパッタで成膜した。成膜温度は下部CFS層が300°C、それ以外の膜は室温とし、成膜後に300°Cでアニール処理を行った。また、下部CFSを成膜した後、室温で酸素曝露を2.0Pa、10minという条件で行った。

実験結果

Fig. 1に作製したCFS/MgO/CFS試料の磁化特性を示す。Fig. 1(a)は面内方向と垂直方向の磁化特性を示したものである。垂直方向の角型比が100%に近いことが分かり、垂直磁気異方性を有していることが確認できる。また、低磁場領域の磁化特性をFig. 1(b)に示す。明瞭な2段ステップを有する磁化特性が得られた。下部CFS層の垂直磁気異方性は、CFS/MgO界面への酸素曝露による効果^[3]とCFSに誘起された結晶歪みの効果もあるものと考えられる。上部CFS層の垂直磁気異方性は、XRD測定によりPdキャップ層が(111)配向していることが分かったため、CFS/Pd界面によるものであると考えられる^{[4][5]}。

参考文献

- [1] S. Ikeda *et al.*, *Nat. Mater.* **9**, 721 (2010)
- [2] H. Sato *et al.*, *IEEE Magn. Lett.*, vol. **3** (2012)
- [3] J. Okabayashi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **105**, 122508 (2014)
- [4] N. Matsushita *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **106**, 062403 (2015)
- [5] M. Sawada *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72**, 1161 (2003)

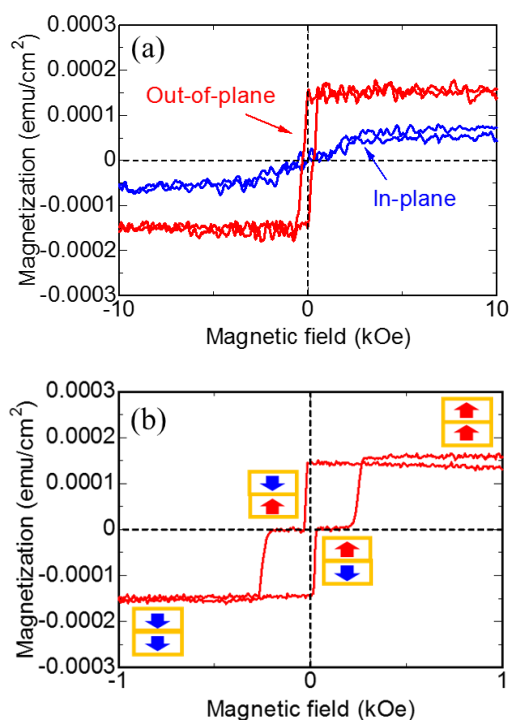


Fig. 1 : M - H loops of CFS/MgO/CFS films. (a) Comparison between out-of-plane and in-plane loops, (b) out-of-plane loop at low field region.

$D0_{22}$ - Mn_3Ge 薄膜の垂直磁気異方性の膜厚依存性

藪下 大嗣, 松下 直輝, 高村 陽太, 川戸 良昭*, 園部 義明*, 中川 茂樹
(*サムスン日本研究所, 東京工業大学)

Thickness dependence of perpendicular magnetic anisotropy of $D0_{22}$ - Mn_3Ge films
T. Yabushita, N. Matsushita, Y. Takamura, Y. Kawato*, Y. Sonobe*, and S. Nakagawa
(*Samsung R&D Institute Japan, Tokyo Institute of Technology)

はじめに

STT-MRAM に用いられる垂直磁化 MTJ 素子の強磁性層には、垂直磁気異方性定数とスピン分極率がそれぞれ高い材料が適している。 $D0_{22}$ - Mn_3Ge は正方晶構造であるため c 軸方向に大きな一軸磁気異方性を持っている。そのため、c 軸配向させることにより垂直磁気異方性が得られる。また、ハーフメタル強磁性体ほどではないが高いスピン分極率も期待できる。この $D0_{22}$ - Mn_3Ge 薄膜を MTJ 強磁性層として用いるには、薄い膜厚領域での特性制御が重要となる。極薄膜領域では成長表面構造が重要になると考えられる。本報告では下地膜により成長面構造を変化させて成膜し膜厚依存性を評価した。

実験方法

対向ターゲット式スパッタ法にて成膜を行った。作製したサンプルは $MgO(001)$ 基板上に Cr, Pd を 40nm 堆積し、その後 Mn_3Ge の膜厚を 100~3nm の間で変化させて成膜した。 Mn_3Ge 薄膜に成膜温度は 400°C である。作製したサンプルは結晶性を X 線回折法、磁化特性を SQUID にて評価した。

実験結果

Fig.1 にサンプルの X 線回折法の測定結果を示す。 Mn_3Ge 膜厚 100, 30, 10nm のサンプルにおいて明確な $Mn_3Ge(004)$ ピークが確認できた。従って、 Mn_3Ge が (001) 配向していることがわかる。また、ピーク位置は膜厚が薄くなるほど高角側へシフトしていることがわかる。これにより、 Mn_3Ge 薄膜は薄い領域で下地層である Pd の結晶格子の影響を強く受け、結晶が面直方向に収縮していることがわかる。Fig.2 に面直方向の単位面積で規格化した磁化特性評価結果を示す。 Mn_3Ge 膜厚 10nm 未満でははっきりとしたヒステリシスを確認できなかったが、10nm 以上ではヒステリシスループが確認できた。MTJ 強磁性層の膜厚は磁化反転に必要な電流密度低減のため 5nm 程度まで薄くする必要がある。10nm より薄い膜厚で Mn_3Ge 薄膜を作製するため、さらなる成膜条件最適化が求められる。

謝辞

SQUID 測定において便宜を図っていただきました日本大学の塚本新教授に感謝します。

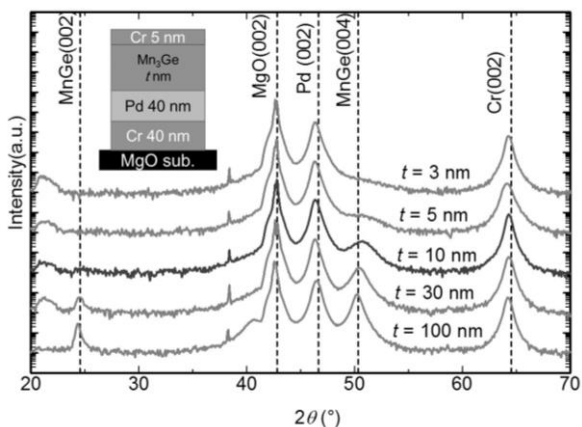


Fig.1: XRD profile of Mn_3Ge (t nm) films

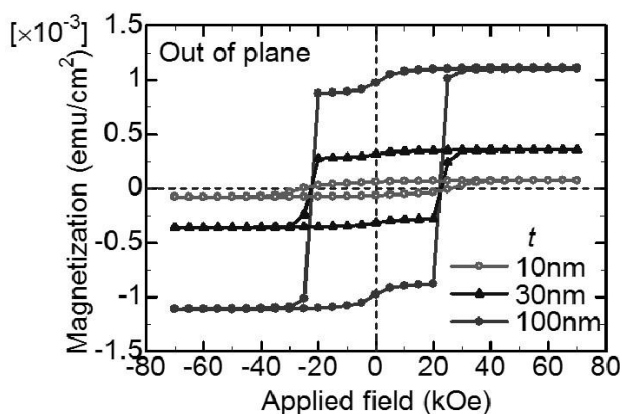


Fig.2: M-H loops of Mn_3Ge (t nm) films

講演取消

反強磁性結合した強磁性多層膜細線上の 磁区の電流駆動の挙動調査

田中雅章, 濱田浩史, 島崎夢志, 住友翔, 本多周太*, 壬生攻, 栗野博之**
(名古屋工業大学, *関西大学, **豊田工業大学)

Study of current-induced magnetic domain movement on ferromagnetic multilayer wire with
antiferromagnetic coupling

M. A. Tanaka, H. Hamada, M. Shimazaki, S. Sumitomo, S. Honda*, K. Mibu, H. Awano**
(Nagoya Institute of Technology, *Kansai University, **Toyota Technological Institute)

磁性細線上に生成した磁区は細線に電流を流すことで駆動することが出来る¹⁾。この現象を利用した新たな磁気記録が注目を集めている。垂直磁化膜の磁区の電流駆動では Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DMI)やスピントラップ効果などの物理現象が関わり、それらの効果を利用することで移動速度の高速化や低消費電力化に寄与できる可能性がある。強い反強磁性結合をした3層構造の強磁性/非磁性/強磁性細線では、磁区の電流駆動は通常とは異なる挙動を示し、単層構造の磁性細線のおよそ2倍以上の速度で移動するという報告がされている²⁾。本研究では、Rh層を介して反強磁性結合する(Tb/Co)_n/Rh/(Co/Tb)_n構造にPtキャップ層を付けた細線上の磁区の電流駆動現象を調べた。

電子線描画装置とスパッタ装置を用いたリフトオフ法で、上下のTb/Co多層膜が反強磁性結合をする(Tb/Co)₄/Rh/(Co/Tb)₄/Pt細線とRh層を含まない(Co/Tb)₇/Pt細線を作製した。細線上に膜面垂直磁場中でのレーザー加熱で磁区を生成し、パルス電流を印加した後の極化顕微鏡観察で磁区の挙動を調べた。また、細線長手方向への磁場印加中で電流駆動による磁区移動の速度を測定し、Pt層あるいはRh層と接することで生じるDMIによる有効磁場の大きさを評価した。

Fig. 1(a)に反強磁性結合をした細線の下向き磁区に対して、Fig. 1(b)に(Co/Tb)₇/Pt細線の下向き磁区に対して、それぞれ約 4×10^{11} A/m²、100 nsのパルス電流を20回印加した際の極化顕微鏡観察画像を示す。反強磁性結合をした試料では磁区は電子方向に移動しており、Rhを含まない試料では磁区が電子流とは逆方向に移動しているが分かる。また、面内方向への磁場印加下における電流による磁壁の移動速度の評価から、いずれの試料もネールライクな磁壁構造を持ち、反強磁性結合膜とRhを含まない試料ではDMIによる有効磁場の方向が逆になっており、その大きさが50~300 Oe程度であることがわかった。

以上の結果から反強磁性結合をした試料では磁壁のカイラリティーを決定するのはPt層ではなく、Rh層であると考えられる。一方で、上部のPt層のスピントラップ効果によるスピントラップが電流駆動現象に対して支配的であるため、Rh層を含まない試料では電子の逆方向に磁壁が移動し、反強磁性結合膜では電子流と同じ方向に磁壁が移動したと考えられる。

参考文献

- 1) A. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **92**, 077205 (2004).
- 2) S. -H. Yang *et al.*, Nat. Nanotechnol., **10**, 221 (2015).

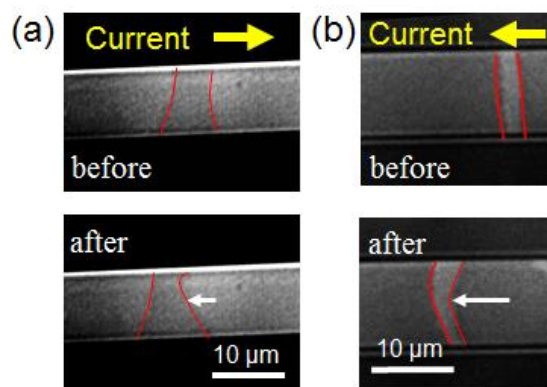


Fig.1 (a)(Tb/Co)₄/Rh/(Co/Tb)₄/Pt 構造細線と (b)(Co/Tb)₇/Pt 構造細線に生成した磁壁の電流印加による挙動。

ホイスラー合金強磁性体／反強磁性体エピタキシャル積層膜における異方性磁気抵抗効果を用いた反強磁性磁気モーメントの検出

羽尻哲也, 松下将輝, 倪遠致, 浅野秀文
(名大工)

Detecting antiferromagnetic moment in Heusler-type ferromagnet/antiferromagnet epitaxial bilayers using anisotropic magnetoresistance

T. Hajiri, M. Matsushita, Y. Z. Ni and H. Asano
(Nagoya Univ.)

はじめに

反強磁性体は THz 領域での超高速動作, 外部磁場や電荷に対する安定性, 漏洩磁場が無いなど, 強磁性体と比較すると多くの優位性を示す [1]。しかしながら, 正味の磁化がゼロであるため, 反強磁性体の磁気モーメントの検出や制御は難しいという問題がある。近年, スピン軌道トルクを用いる方法 [2] や強磁性体との積層膜におけるトンネル異方性磁気抵抗効果 (TAMR) [3] を用いる方法などにより, 反強磁性体の磁気モーメントの検出や制御が盛んに研究され始めている。本研究では, エピタキシャル成長したホイスラー合金 $\text{Fe}_2\text{CrSi}/\text{Ru}_2\text{MnGe}$ 積層膜において, 異方性磁気抵抗測定により反強磁性磁気モーメントの検出に成功し, また印加磁場方向により磁気抵抗の違いを観測した [4] ので報告する。

実験方法

ホイスラー合金 $\text{Fe}_2\text{CrSi}/\text{Ru}_2\text{MnGe}$ 積層膜は DC マグネトロンスパッタリングにより作製した。交換結合は 375 K で $H = +10$ kOe の外部磁場中で 30 分間保持した後, 外部磁場を印加したまま 4 K まで冷却する事で得た。磁気抵抗測定は直流 4 端子法により測定を行った。

実験結果

Ru_2MnGe 薄膜のネール温度以上である 375 K に加熱後, $[010]$ 方向に 10 kOe で磁場中冷却を行った積層膜における 4 K での磁気抵抗の印加磁場方向依存性を Fig. 1 に示す。印加磁場が $[110]$, $[-110]$ 方向の磁気抵抗は AMR に類似した対称的な曲線を示しているのに対して, 印加磁場が $[100]$, $[010]$ 方向の際は TAMR 研究で報告されている異方的な曲線を示すことが明らかになった。 $[100]$, $[010]$ 方向の異方的な磁気抵抗曲線は反強磁性磁気モーメントが検出されている事を示している。また Fe_2CrSi は $\langle 110 \rangle$, $\langle -110 \rangle$ 方向が磁化困難軸, $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ 方向が磁化容易軸 [5] である事から, 強磁性体 Fe_2CrSi の結晶磁気異方性が反強磁性磁気モーメントの回転に影響していることが示唆される。また磁気抵抗は最大で 5.9% が得られた。

講演では $\text{Fe}_2\text{CrSi}/\text{Ru}_2\text{MnGe}$ 積層膜における交換結合および磁気抵抗の Ru_2MnGe 膜厚依存性と温度依存性も示し, 交換結合と磁気抵抗の関係についての議論も行う。

参考文献

- 1) H. V. Gomonay and V. M. Loktev, *Low Temp. Phys.* **40**, 17 (2014).
- 2) P. Wadley *et al.*, *Science* **351**, 587 (2016).
- 3) B. G. Park *et al.*, *Nat. Mater.* **10**, 347 (2011).
- 4) T. Hajiri *et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 134413 (2017).
- 5) Miyawaki *et al.*, *J. Appl. Phys.* **114**, 073905 (2013).

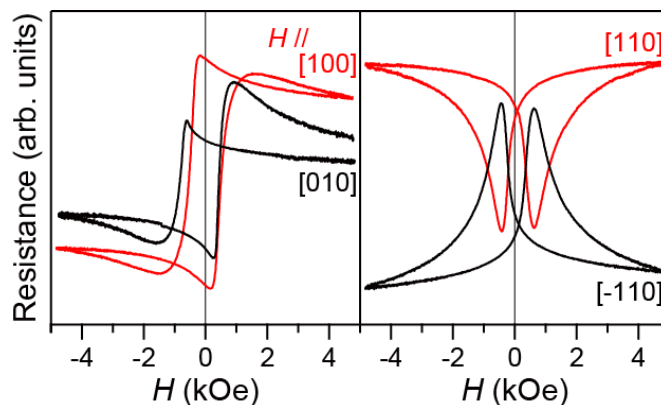


Fig. 1. Applied-field direction-dependent Magnetoresistance of Fe_2CrSi (5 nm) / Ru_2MnGe (20 nm) bilayers at $T = 4$ K.

傾斜電界印加による反強磁性体磁壁移動シミュレーション

久保田 圭祐¹、山田 啓介²、仲谷 栄伸¹¹電気通信大学 情報理工学研究科、²岐阜大学 工学部

Computer simulation of an Antiferromagnetic Domain Wall Motion by a Slope Electric Field

Keisuke Kubota¹, Keisuke Yamada², and Yoshinobu Nakatani¹¹Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications² Faculty of Engineering, Gifu University

はじめに

近年、磁壁を利用したストレージの提案をうけ、磁壁移動に関する研究が盛んに行われている[1]。磁壁移動の手法として外部磁界による手法やスピン電流を注入する手法があるが、これらの手法では消費電力の低減が課題となっている。現在、消費電力低減のための新たな手法として、電界による磁壁移動方式が提唱されており[2,3,4]、文献[4]では傾斜電界による強磁性細線での磁壁移動についての調査が行われた。しかし、強磁性体(FM)での磁壁移動では Walker Break Down(WBD)が起ると磁壁移動速度が遅くなる問題がある。一方、反強磁性体(AFM)での磁壁移動では WBD が発生しないためこの問題を解決できると期待される。本研究では AFM の磁性細線において傾斜電界による磁壁移動のマイクロマグネティックシミュレーションを行い、FM での磁壁移動に対する AFM での磁壁移動の優位性を調査した。

実験結果

計算で用いた FM と AFM の磁性細線は長さ方向 $x = 1000$ nm、膜厚方向 $z = 1.0$ nm、奥行き方向 y は無限大の薄膜とした。材料定数は飽和磁化 $10000/4\pi$ emu/cm³、異方性定数 0.2 Merg/cm³、交換スティフネス定数 0.16 μ erg/cm、反強磁性交換定数 $1/\pi$ Gerg/cm³、損失定数 0.01 とした[5]。電界効果は、異方性定数が変調する効果とした[4]。傾斜電界効果は、磁性細線長さ方向に対し異方性定数を線形に減少させることで実現し、線形減少量を ΔK_u (erg/cm⁴) と定義した。磁壁の初期位置は、細線中心 ($p = 0$ nm) とした。

図 1(a),(b)に時の FM と AFM の磁壁の時間変化を示す。図 1(a)から、AFM の方が FM より速度の立ち上がり早いことが分かった。また、図 1(b)から FM では WBD が起きた一方、AFM では WBD が発生しないことが分かった。以上より、傾斜電界により磁壁が異方性減少方向 (+x 方向) へ移動することが確認でき、AFM は FM より速度の立ち上がり早いことが分かった。図 2 に、 ΔK_u による FM と AFM の磁壁速度の変化を示す。図から、AFM では線形減少量に対し磁壁移動速度が比例して増加することが分かる。一方、FM では徐々に速度が上がらなくなり、WBD 発生後は速度が減少することがわかる。以上の結果から、AFM の方が速度の立ち上がりにおいて FM より優位性があり、また $\Delta K_u > 1.5$ Gerg/cm⁴ では、AFM の方が速度面の優位性があることが分かった。

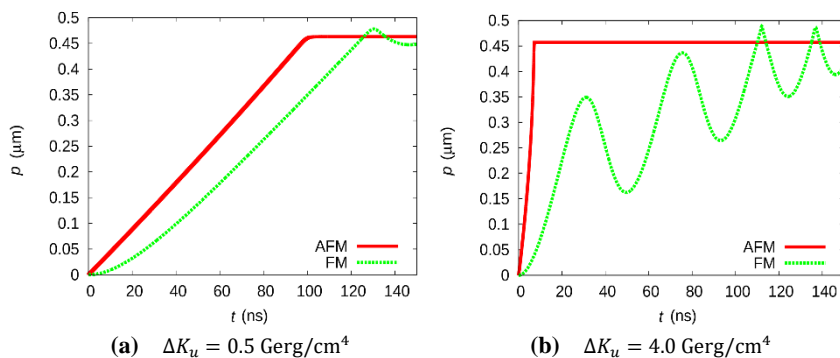


Fig. 1 Change in time of DW position by the slope electric field

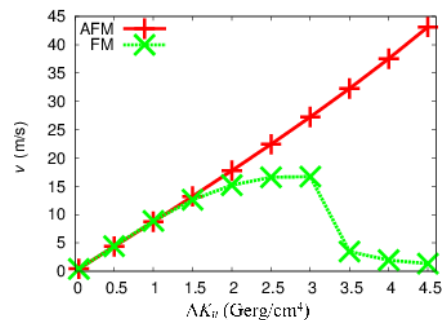


Fig. 2 Comparison of domain-wall velocity between AFM and FM

参考文献

- [1] S. S. P. Parkin, *et al.*, Science **320**, 190 (2008). [2] A. J. schellekens, *et al.*, Nat. Commun. **3**, 848 (2011). [3] D. Chiba, *et al.*, Nat. Commun. **3**, 888 (2012). [4] K. Yamada, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **108**, 202405(2016). [5] Y. Yamane, *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 180408(R) (2016).

μm スポットレーザー光による局所磁気履歴計測が可能な 磁区観察顕微鏡

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)

Magnetic domain microscope with micrometer-spot laser for measurement of local magnetization hysteresis

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

はじめに 現在、STT-MRAM に代表されるスピントロニクスデバイスの開発が鋭意進められている。これらの磁気デバイスでは試料内の局所領域の磁気特性がデバイスの性能へ顕著に影響するため、磁区構造と各所での磁気特性との対応関係を把握することが重要である。磁気光学 Kerr 効果を用いた一括撮像型の顕微鏡は磁区構造の磁界履歴を動画像として取得できるため、微細加工試料の磁気特性把握のために活用されている。Kerr 効果顕微鏡では、取得された磁区像の動画像の所望の領域に対応する画素を選択し、その輝度値を抽出することで局所領域の磁気履歴曲線を得ることが可能である [1]。しかし輝度値は撮像と画像処理の過程で様々な光量変動やノイズの影響を受けるため、信号品位の高い磁気履歴曲線を得ることが難しかった。そこで我々は、磁区観察顕微鏡にレーザー光学系を組み込むことで、高コントラストの磁区像の観察を行いつつ、高品位な磁気履歴曲線の測定を可能とする装置開発を行ったので報告する。

装置原理 磁区観察と局所磁気履歴曲線取得を両立させる鍵は、対物レンズ近傍での入射光の焦点を如何にして真円・均一強度・微小径に結ぶかにかかっている。磁区観察光学系では、ケラー照明を実現するため後側焦点位置で焦点を結ばせる (Fig. 1(a))。一方レーザー光学系では、試料表面で極力小径の焦点を結ばせる必要がある (Fig. 1(b))。これらを同時に実現すべく、磁区観察光学系とは別軸でレーザー光学系を設けることとした (Fig. 2)。レーザー光学系では、ファイバーガイドを採用しスポット径の真円化を図ると共に、コリメート光路部のレーザービーム径を 1.5 mm まで拡げ、リレーレンズを通さずにレーザー光を対物レンズに直接入射する設計とした。この結果、50 倍対物レンジ使用時に、試料面でのスポット径を 1 μm (極カー観察)、あるいは 3 μm (縦カー観察) まで縮小している。また高品位の偏光変化情報の獲得のためレーザー光には強度変調を施し、偏光差動法とロックイン法を併用して信号検出した。この結果、1 mdeg の偏光回転角でも検出できることを確認し、磁気履歴曲線は従来の輝度抽出法より 22 dB の S/N の改善が図られた。その他、無限遠光学系の光路短縮のため、検光子、フォトダイオードおよび電流-電圧変換回路を一つにまとめた小型ディテクタを採用し、観察方向切り替え機構の簡略化を行う等、工夫をしている。

観察例 Fig. 3 (a) に零磁界下の NiFe 十字パターン薄膜の磁区像を、(b) (c) にはパターン上に矢印で示した 2 点について、波長 650 nm のレーザー光で計測した局所磁気履歴曲線を示す。(b) (c) では、磁化回転と磁壁移動が重複した複雑な磁化過程が観測されており、特に (b) では印加磁界減少時に磁壁のピンニング外れることがスムーズな磁化過程を阻害していることがわかる。本装置による計測は、磁区動画像と対応させることにより、不均一磁化過程の起源究明の一助となることが大いに期待できる。

参考文献 1) S. Meguro et al., 29th Annl. Conf. Magn. Soc. Jpn., 22pB-5, (2005).

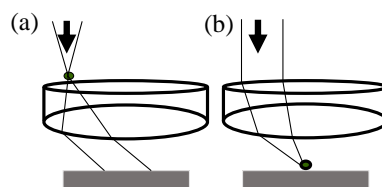


Fig. 1 Focusing for (a) magnetic domain microscope with white light and (b) optical system with a laser.

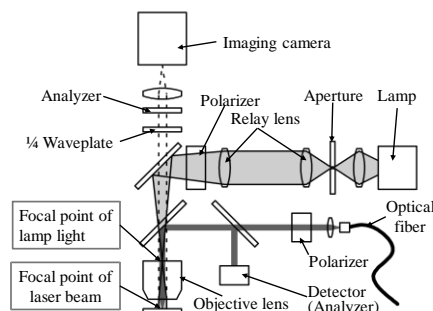


Fig. 2 Schematic of the newly developed magnetic domain microscope with micrometer-spot laser.

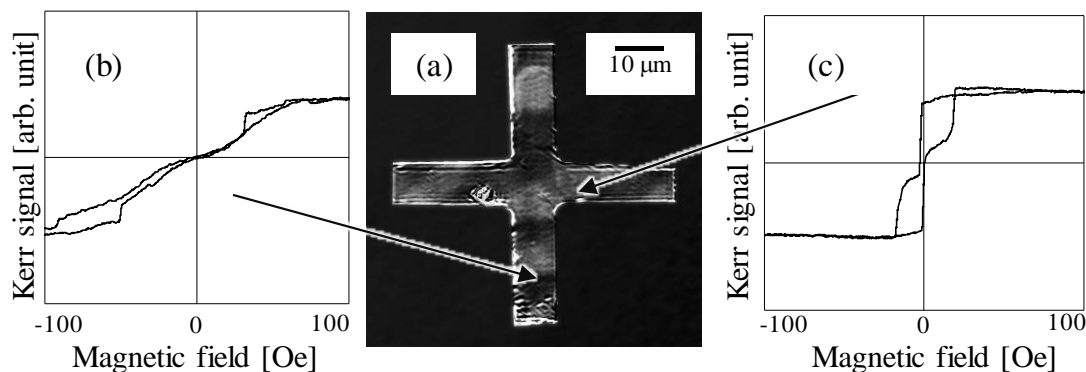


Fig. 3 (a) Magnetic domain image and (b) (c) magnetization curves of the NiFe patterned thin film.

電圧誘起ダイナミック磁化反転の書き込みエラー率低減

池浦拓朗^{1,2}, 塩田陽一¹, 山本竜也¹, 野崎隆行¹, 鈴木義茂^{1,3}, 湯浅新治¹

(¹産総研、²筑波大学、³大阪大学)

Improvement of write error rate in voltage-induced magnetization switching

T. Ikeura^{1,2}, Y. Shiota¹, T. Yamamoto¹, T. Nozaki¹, Y. Suzuki^{1,3}, and S. Yuasa¹

(¹AIST, ²Univ. Tsukuba, ³Osaka Univ.)

1 はじめに

電圧誘起磁気異方性変化¹⁾を利用した磁化反転制御は、その低消費電力性から電圧駆動型磁気メモリへの応用が期待されている²⁾。しかしながらパルス電圧誘起の歳差運動を利用する反転制御であるため反転確率はパルス時間に非常に敏感であり、実用に向けた低書き込みエラー率(WER)の実証が重要な課題となっている³⁾。WERの低減には高い垂直磁気異方性による熱安定性向上が有効であることが理論予測により明らかとなっているが³⁾、同時にその磁気異方性を打ち消すだけ十分大きな電圧効果も求められる。一方、電圧磁気異方性変化は通常印加電圧に対して線形に変化するため、磁化反転に利用される電圧とは逆符号側では垂直磁気異方性の増大、つまり熱安定性の向上を作り出すことができる。本研究では、この電圧による磁気異方性増大効果を利用して反転前の熱安定性を疑似的に向上させ、書き込みエラー率を低減する手法についてマクロスピンモデルシミュレーションにより検討した。

2 結果及び考察

図1に本アプローチで磁化反転制御に用いる(a)パルス電圧とそれにより生じる(b)垂直磁気異方性(K_{PMA})変化の模式図を示す。通常は正側のみの書き込みパルス電圧印加(時間幅 t_{sw} , 電圧強度+1V)により垂直磁気異方性を消失させ、面内方向に印加しているバイアス磁界を軸とした歳差運動を誘起することにより反転を制御する。本アプローチではそれに加えて、反転パルス印加前に逆バイアス電圧(-1 V)を印加することで疑似的に磁気異方性を増大させてから書き込みパルス電圧を印加し、WERへの影響を調べた。図1(c)に記録層の熱安定性(Δ)に対するエラー率(WER)を比較した結果を示す。電圧効果の大きさは各条件における垂直磁気異方性を打ち消すことを想定しているため、 Δ が大きな条件ほど高効率となっている。また、面内バイアス磁界による磁化の面直方向からの傾き角を一定とするため、パルス時間幅 t_{sw} に関しても Δ に依存して最適値に設定した。通常のパルスのみ(青)と比較して、逆バイアス電圧を印加した場合に明瞭な WER 低減効果が見られ、その効果は Δ が大きくなるほど有効であることが分かった。発表では低減効果の物理起源についても議論する。

本研究は総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)により、科学技術振興機構を通して委託されたものである。

- 1) T. Maruyama, *et al. Nat. Nanotech.* **4**, 158 (2009).
- 2) Y. Shiota, *et al. Nat. Mater.* **11**, 39 (2012).
- 3) Y. Shiota *et al. Appl. Phys. Express* **9**, 013001(2016).

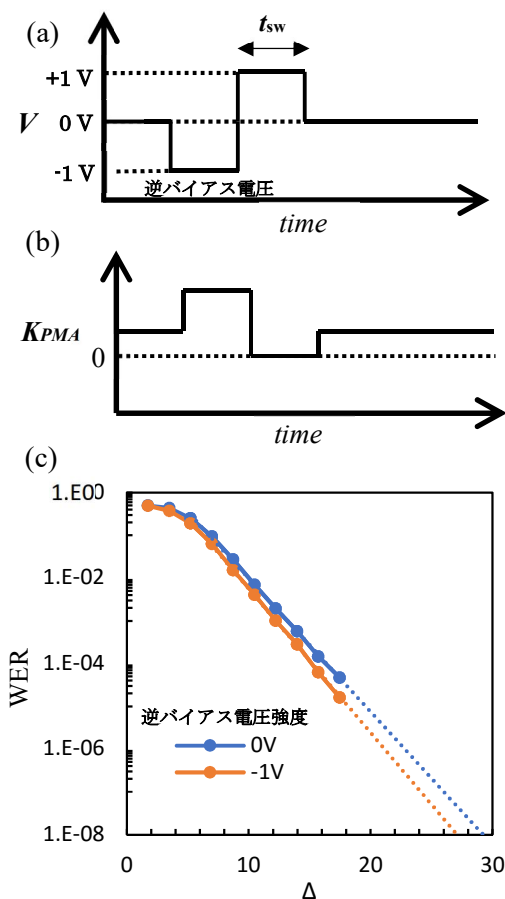


図1 (a)パルス電圧の模式図、(b)垂直磁気異方性変化の模式図、(c)エラー率(WER)に対する負電圧印加効果の熱安定性 Δ 依存性

アキシアルギャップ誘導モータの基礎特性解析に関する研究

酒井諒典, 吉田征弘, 田島克文
(秋田大学)

A Study on Analysis of Basic Property of Axial Gap Induction Motor

R.Sakai, Y.Yoshida, K.Tajima
(Akita Univ.)

はじめに

誘導モータ (IM) は堅牢で安価なモータとして広く使用されている。アキシアルギャップ誘導モータ (AGIM) はダブルロータ構造とすることで各回転子に異なる回転速度を設定することが可能であるなどの利点が報告されている¹⁾。本稿では、誘導モータの高トルク密度化を目指し、分布巻と同様の起磁力分布が得られ、かつ占積率向上が期待できる巻線方式であるトロイダル巻²⁾を用いた新構造の AGIM を提案し、有限要素解析 (FEA) にて従来のラジアルギャップ誘導モータ (RGIM) と基礎特性の比較を行ったので報告する。

アキシアルギャップ誘導モータの設計・解析

Fig.1 に比較対象である従来の RGIM の形状を示す。直径 100 mm, コア積厚が 30 mm, 固定子と回転子間のギャップは 0.35 mm である。巻線方法は分布巻, 占積率は 11 % で, コアからはみ出したコイルエンドの寸法は軸方向両側に 14 mm である。

Fig.2 に提案した AGIM の構造を示す。ギャップ長, 回転子導体の断面積は RGIM と等しく設定し, 外径はコイルエンドまで含めて 100 mm, 軸長は RGIM のコア積厚と同等の 30 mm とコイルエンドを含めた軸長と同等の 58 mm の 2 パターンを検討した。巻線方法はトロイダル巻を用い, 占積率 40 % として設計した。トロイダル巻によって固定子の両平面に回転磁界を発生させることができるため, 回転子を 2 つ配置するダブルロータ構造とした。

Fig.3 に FEA によって解析した s - T 特性を示す。RGIM, AGIM (30 mm), AGIM (58 mm) の最大トルクはそれぞれ 0.617 Nm, 0.686 Nm, 1.266 Nm であり, AGIM (58 mm) は RGIM と同等の体格で最大トルクが約 2 倍であった。Table 1 にトルク密度の比較を示す。AGIM (30 mm) は RGIM とほぼ同等の最大トルクであるが, コイルエンド分体積が小さくなり, トルク密度は 2 倍以上の値となった。

本検討により, 提案した AGIM がトルク密度向上に有用であることが解析によって示された。

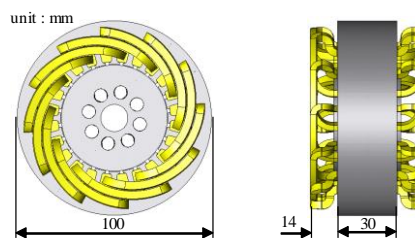
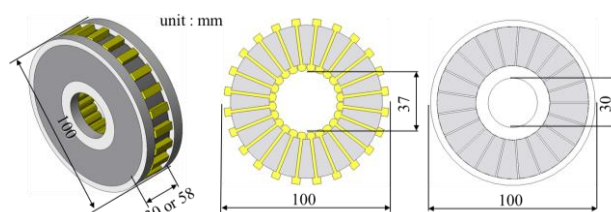


Fig.1 Shape and specification of RGIM to be compared.



(a) Overview (b) Stator (c) Rotor

Fig.2 Construction of proposed AGIM.

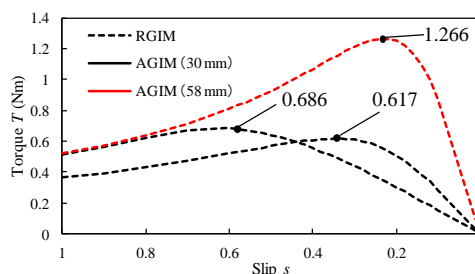


Fig.3 Comparison of Torque-Slip characteristics.

Table 1 Comparison of torque density.

	RGIM	AGIM (30 mm)	AGIM (58 mm)
Torque density (Nm/L)	1.470	3.159	3.015
Torque density ratio	1	2.149	2.050

参考文献

- 1) Durgesh Kumar Banchhor *et al.*, 2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE), DOI: 10.1109/EPETSG.2015.7510124
- 2) 岩井優樹, 吉田征弘, 田島克文, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-15-117 (2015)

三次元磁石配置による高効率レアアースフリーモータの開発

齊藤秀和, 吉田征弘, 田島克文
(秋田大学)

Development of a High Efficiency Rare Earth Free Motor by Three Dimensional Magnet Arrangement

H.Saito, Y.Yoshida, K.Tajima
(Akita Univ.)

はじめに

現在, 広く普及している永久磁石モータには希土類磁石が使用されているが, 希土類磁石は価格や供給の面で問題が顕在化しているため, 希土類磁石を使用しない高性能レアアースフリーモータの研究が進められている¹⁾. 過去の研究では固定子巻線に着目し, トロイダル巻線方式によりフェライト磁石モータの損失低減を実現した²⁾. 本研究では回転子に着目し, 磁石配置を三次元的に考えることで, モータ性能の更なる向上を検討した.

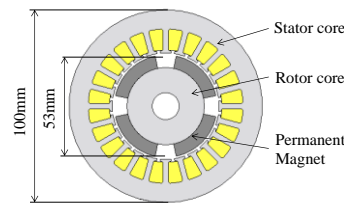
三次元磁石配置モデルの検討

Fig.1に比較対象のSPMモータの形状と諸元を示す. 固定子巻線は分布巻であり, 比較検討のため, 永久磁石はフェライト磁石とネオジウム焼結磁石を用いた. Fig.2(a)に提案モデルの固定子を示す. 固定子の外径と積厚は SPM モータと等しく, 巻線方法はトロイダル巻を用いた. 同図(b)に提案モデルの回転子形を示す. 三次元方向(軸方向)に磁石6mm, ヨーク厚3mmのユニットを配置することで磁石表面積が増加し, フェライト磁石のみでもトルクの向上が可能となる.

Fig.3(a)に $N-T$ 特性を示す. SPMモータ(Ferrite), SPMモータ(Neodymium), 提案モデルの最大トルクはそれぞれ 0.52Nm, 1.52Nm, 0.93Nmであった. また, 提案モデルが出力可能な動作点 A, B, Cにおける損失の比較を Fig.3に示す. 提案モデルは SPMモータ(Ferrite)に比べ銅損を大幅に低減できていることがわかる. SPMモータ(Neodymium)と比べても同程度の銅損であり, 鉄損が小さいため, 提案モデルは各動作点で効率が比較対象の SPMモータよりも向上することが明らかになった. この結果から, 提案モデルは希土類磁石を使用せずに希土類磁石を使用したモータと同等以上の高効率を達成可能であることが示された.

参考文献

- 1) 真田雅之, 井上征則, 森本茂雄:「フェライト磁石を用いた高性能 PMASynRM の構造と特性」電学論 D, Vol.131 No.12 PP.1401-1407
- 2) 岩井優樹, 吉田征弘, 田島克文:「トロイダル巻線を用いたフェライト磁石モータの高効率化に関する考察」, MAG-15-117 (2015)



Stack length	30mm
Permanent magnet material	SSR-420 or NEOMAX-42
Core material	50JN1300
Number of slots	24
Number of poles	4
Winding method	distributed
Number of winding turns / slot	40 turns

Fig.1 Shape and specification of SPM motor

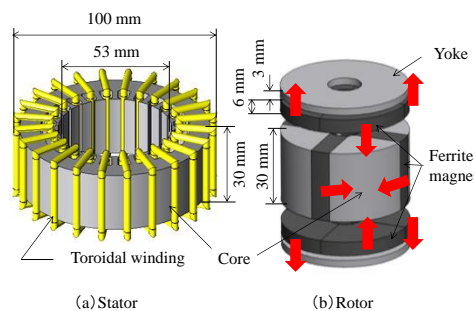
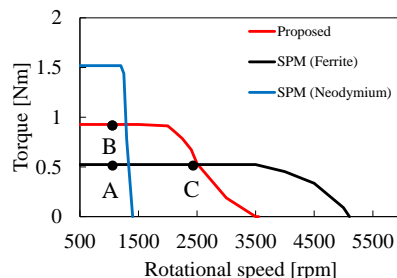
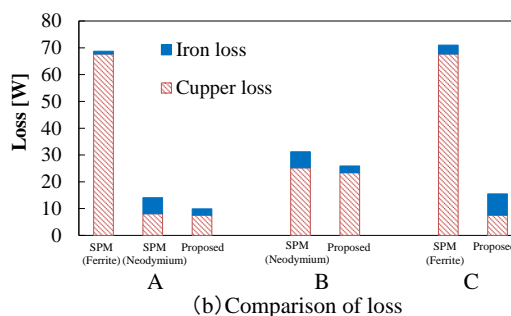


Fig.2 Shape of Proposed model



(a) Torque speed characteristic



(b) Comparison of loss

Fig.3 Comparison of characteristics

リラクタンスネットワーク解析に基づく 巻線界磁型クローポールモータの特性算定

市川優太, 中村健二, *鄭 浙化, *栗本直規
(東北大学, *(株)デンソー)

Performance Calculation of Field-Winding type Claw-Pole Motor based on Reluctance Network Analysis
Y. Ichikawa, K. Nakamura, *S. Jung, *N. Kurimoto
(Tohoku University, *DENSO CORPORATION)

はじめに

近年、モータの小型高出力化の要求に対し、構造を3次元化することで、鉄心と巻線の空間利用率を高め、トルクを向上させるアイデアがいくつか報告されている^{1),2)}。その中の一つである、界磁巻線型クローポールモータは、爪状の極を上下でかみ合わせた特殊な構造の回転子鉄心の中に同心円状に巻いた界磁巻線を取めることができるため、巻線占有率を大幅に高めることができる。また、界磁電流を調整することで、一般的な永久磁石界磁型のモータよりも広範囲な速度制御性を有する。しかしながら、本モータの特性算定には、3次元解析が必須であること、また電機子電流に加え、界磁電流も制御パラメータとなるため、諸特性を算定するためには、駆動回路も含めた高速・高精度な解析が必要不可欠である。そこで本稿では、リラクタンスネットワーク解析 (RNA) に基づくクローポールモータの特性算定について検討を行ったので報告する。

RNA によるクローポールモータの解析設計

Fig. 1 に、クローポールモータの基本構成を示す。磁気的な対称性を勘案して、Fig. 2(a)に示すように解析には 1/8 モデルを用いた。また同図(b)に示すように、RNA モデルの導出に際しては、斜めになっている爪状の極を階段状に近似した。Fig. 3(a)に、RNA に基づくクローポールモータの分割図、および分割数を示す。同図に示すように、モータを複数の要素に分割し、各々の要素を同図(b)に示すような3次元の単位磁気回路で表す。ここで、図中の磁気抵抗は分割要素の寸法と材料の $B-H$ 曲線から求めることができる。なお、ここでは回転子鉄心については磁気特性の非線形性を考慮し、固定子鉄心については無視している。

導出したクローポールモータの RNA モデルの妥当性について評価するため、有限要素法 (FEM) の結果と比較検討を行った。なお、FEM の解析形状は、Fig. 2(b)に示した RNA モデルと同一とした。Fig. 4 に界磁電流 3A、回転数 450 rpm で駆動させた場合の電機子電流対トルク特性の結果を示す。この図を見ると両者はよく一致しており、RNA の妥当性が了解される。また、両手法の計算時間は FEM がおよそ 21 時間であったのに対し、RNA は 10 分程度であり、99%以上の計算時間の短縮が図れた。

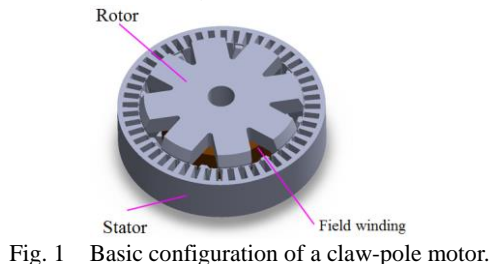


Fig. 1 Basic configuration of a claw-pole motor.

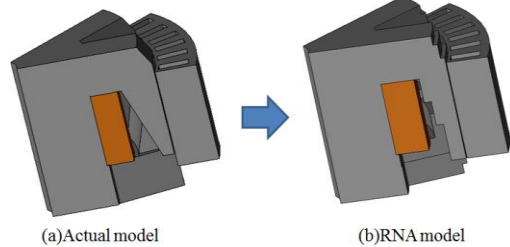
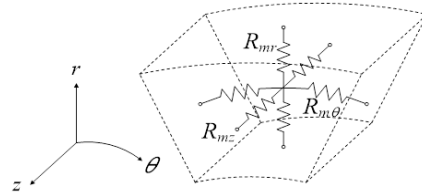


Fig. 2 RNA model of the claw-pole motor.

Number of division	r	θ	Z
Stator	4	60	1
Gap	1	60	5
Rotor	4	15~60	5
Field side	12		

(a)The motor division based on RNA



(b)Three-dimensional unit magnetic circuit

Fig. 3 Motor division and unit magnetic circuit based on RNA.

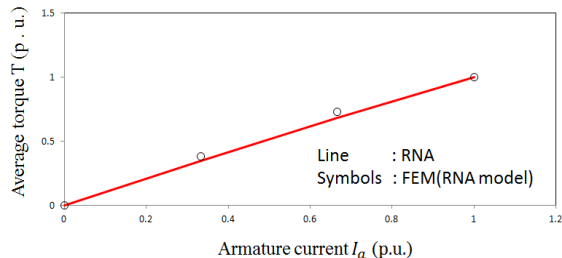


Fig. 4 Armature current versus torque characteristics.

参考文献

- 1) 榎本裕治, 床井博洋, 小林金也, 天野寿人, 石原千生, 安部恵輔, 電学論 D, **129**, 1004 (2009).
- 2) 井上正哉, モータ技術シンポジウム, **30**, C5-3-1 (2010).

リラクタンスネットワーク解析に基づく 永久磁石モータの熱-磁気連成解析に関する検討

川村恭平, 中村健二
(東北大学)

Electromagnetic and thermal Coupled Analysis for PM Motor based on Reluctance Network Analysis
K. Kawamura, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

近年, 産業・民生・運輸の様々な分野で, モータの需要が拡大している。その中でも, 永久磁石 (PM) モータは, 他のモータと比べて, 小型高出力・高効率であることから利用が増大している。一方, さらなる小型高出力化の要求に伴い, PM モータの損失, 特に磁石に流れる渦電流による発熱によって, 磁石が熱減磁する問題が顕在化している。したがって, PM モータの最適設計には, 熱の影響も定量的に把握する必要がある。

これまで筆者らは, リラクタンスネットワーク解析 (RNA) に基づき, モータの磁気回路網と熱抵抗回路網を連成・連携させることで, スイッチトリラクタンス (SR) モータ¹⁾や, PM モータ²⁾の温度上昇を算定する手法について検討を進めてきたが, 磁石渦電流損失まで考慮したPMモータの熱-磁気完全連成解析については, いまだ確立されていない。本稿では, 磁石渦電流損失まで考慮可能な熱-磁気連成解析モデルの構築を目指し, 基礎的な検討を行ったので報告する。

RNA に基づく PM モータの磁石磁束の算定

Fig. 1 に, 考察に用いた 3 相 6 スロット 4 極の外ロータ型 PM モータを示す。Fig. 2 は, PM モータの RNA モデルの一部である。磁石渦電流損失を算定するためには, 回転子の回転運動に伴って移動する永久磁石の各部に流れ込む磁束を求める必要がある。本モデルでは, この磁石各部に流れ込む磁束を計算するブロックを新たに加えた。

Fig. 3 に, 磁石表面のある箇所流れ込む磁束の計算波形の一例を示す。比較のため, 有限要素法による計算波形も併せて示す。この図を見ると, 両者は良く一致しており, モデルの妥当性が了解される。今後は, この磁束を用いて, 磁石渦電流を計算する回路を構築することで, 渦電流損失を求めるとともに, 熱抵抗回路網との同時連成解析の実現を目指す。

参考文献

- 菅井悠史, 中村健二, 一ノ倉理, “熱 - 磁気回路網による SR モータの温度解析に関する検討”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-14-168 (2014)
- 菅井悠史, 中村健二, 一ノ倉理, “熱回路網解析による表面磁石モータの温度上昇算定”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-15-120 (2015)

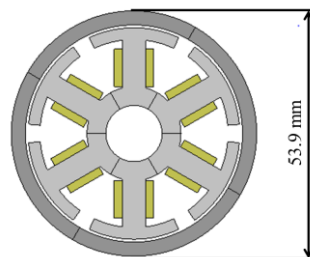


Fig. 1 Schematic diagram of outer-rotor-type PM motor.

Table. 1 Specifications of the PM motor.

Number of slot	6
Number of pole	4
Stack length	11.9 mm
Number of windings/pole	48
Magnetic length	3 mm
Core material	35A300
Magnet material	Nd-Fe-B

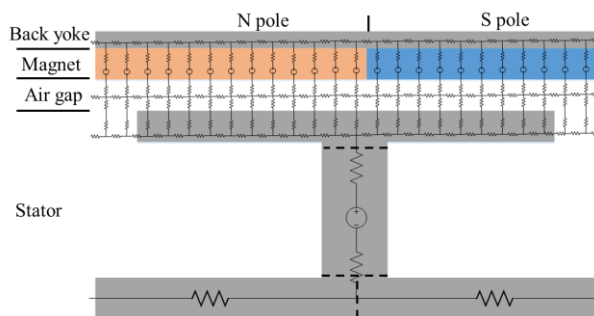


Fig. 2 A part of the RNA model of the PM motor.

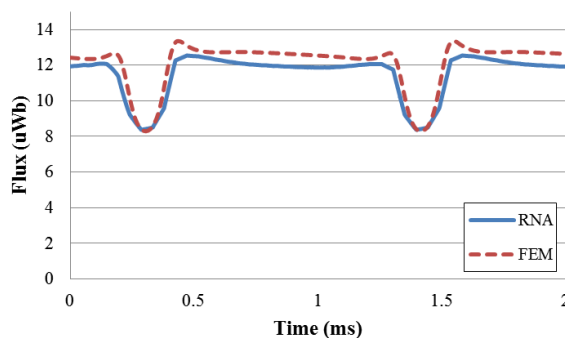


Fig. 3 Comparison of calculated fluxes flowing into a certain part of the magnet.

無方向性電磁鋼板の磁場中熱処理効果の基礎的検討

甲原和也、木下創*、下地広泰**、佐藤尊、戸高孝
(大分大、*住友重機械、**大分産科技セ)

Fundamental Study on Heat Treatment Effect of Non-oriented Electrical Steel Sheets in Magnetic Field
Kazuya Kouhara, Tsukuru Kinoshita*, Hiroyasu Shimoji**, Takeru Sato, Takashi Todaka
(Oita Univ., * SHI., ** Oita Idus. Rese. Insti.)

はじめに

モータ鉄心に使用されている電磁鋼板は、製造過程で加えられる加工応力によって磁気特性が劣化することが知られている。近年のトップランナー制度の適用により、モータの更なる高効率化の要求が高まっていることから、将来的には熱処理工程の追加による鉄損低減が必要となることが予測される。そこで著者らは、磁場中熱処理による磁気特性の改善や制御について検討を開始した。本発表では、無方向性電磁鋼板の短冊試料を用いて様々な磁場中熱処理を施し、磁気特性の変化について調査した結果を報告する。

実験方法

試料には 50mm×10mm の長方形に切出した電磁鋼板 50A470 を使用した。Fig.1 に示すように試料の長手方向の圧延方向 (RD) からの傾きを傾き角 (Inc) とし、RD Inc で試料を区別する。RD0 は長手方向が圧延方向、RD90 は長手方向が圧延垂直方向の試料である。磁場中熱処理^{1),2)}は真空中で保持温度 750~1200°C、磁場 0~10T の条件で行った。磁気特性の測定には、別途開発した小型 SST (単板磁気試験機) を用いた。

実験結果

Fig.2 に測定結果の一例として、前述の 2 種類の切出し角の異なる試料を 10T,750°C で熱処理した場合の鉄損が、0T,750°C で熱処理した場合の鉄損に対して変化した割合 (改善率) を示している。横軸の B_{max} は周波数 50Hz で鉄損を測定した時の最大磁束密度である。図のように、RD0 の試料は長手方向に磁場をかけながら熱処理すると鉄損が増加したが、RD90 の場合には、逆に鉄損が小さくなり磁気特性が改善した。磁場の印加方法としては、750°C に保持した後、降温時のみに磁場を印加したものである。使用した無方向性電磁鋼板は圧延磁気異方性の影響によって、圧延方向の透磁率が圧延垂直方向の約 1.5 倍程度の初期の磁気異方性を有している材料であるが、熱処理時に残留歪みが緩和される過程で磁場の影響で異方性が変化したと考えられる。他の条件での測定結果や結晶粒径の変化等については発表時に報告する。

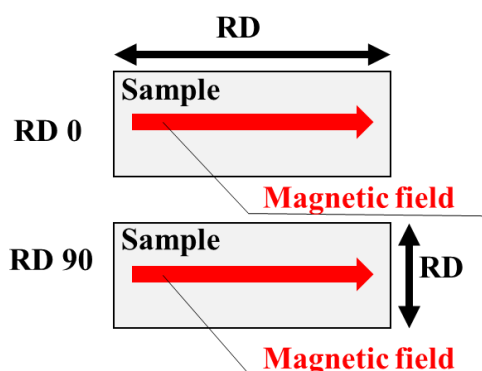


Fig.1. Samples

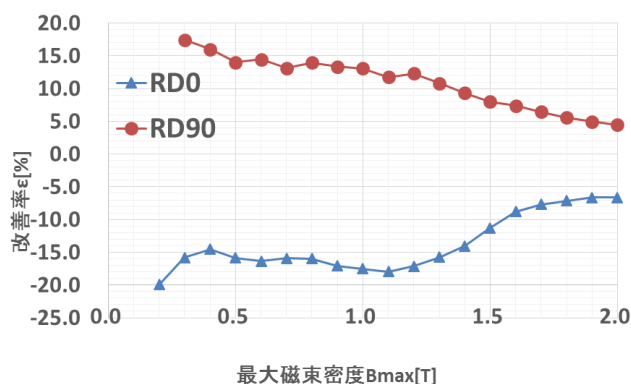


Fig.2 Improved rates of iron loss

参考文献

- 1) 木下、戸高、佐藤、下地、無方向性電磁鋼板の磁場中熱処理効果の評価、日本AEM学会誌、Vol.25, No. 2, pp. 162-167, 2017 (in press)
- 2) 小柴、重本、西沼、原田、異方性珪素鋼板の磁場中冷却処理について、日立評論「金属特集号 第2集」、別冊第16号

高周波変圧器用ラップ接合アモルファス巻鉄心の鉄損算定

栗田直幸, 畠山智行, 木村守
(日立製作所 研究開発グループ)

Iron loss estimation of amorphous wound core with lap-joint for high-frequency transformers

Naoyuki Kurita, Tomoyuki Hatakeyama, Mamoru Kimura
(Research & Development Group, Hitachi Ltd.)

はじめに

大規模洋上風力発電の長距離送電には高圧直流(HVDC)システムが使われる。その電圧の昇降圧には交直変換器と変圧器からなる DC-DC コンバータが用いられ、高周波変圧器(HFT)の適用で小形化される¹⁾。低損失なアモルファス薄帯を積層し、切断端をラップ接合した巻鉄心は商用変圧器に広く使われ、HFT への適用で低コスト化できる。高周波ではラップ接合部の鉄損が増加するが、定量化がほとんどされていない。そこでラップ接合部とそれ以外の薄帯の積層部で発生する鉄損を測定により分離し、両部分の特性の差異を検討した。

実験方法

Fig.1 に示す 2 つの巻鉄心 A と B を試作した。ラップ接合部の磁束は薄帯の束(フープ)の間を渡り、面内渦電流による鉄損 W_L (W) が発生する。また、積層部では単位質量あたり鉄損 P' (W/kg) が発生する。2 つの巻鉄心は磁路長以外が同じ仕様なので、同一の W_L と P' を持つと見なせる。鉄心の質量を M_i (kg) とすると、巻鉄心の鉄損 P_i (W) は、

$$P_i = P' M_i + W_L \tag{1}$$

と表される。周波数 f と励磁磁束密度 B_m に対する巻鉄心 A, B の P_i 特性を測定した。この結果より 2 つの未知数 W_L と P' の f, B_m についての各特性が求められ、ラップ接合部と積層部で発生する鉄損を分離できる。

実験結果

Fig.2 に、巻鉄心 A と B の単位質量・1 周期あたりの鉄損 $P_i/M_i/f$ (J/kg) の周波数特性を示す。実線と破線は次の鉄損式²⁾によるフィッティング曲線である。

$$P_i/M_i/f = A_h B_m^2 + A_e B_m^2 f + A_a B_m^{1.5} f^{0.5} \tag{2}$$

A_h, A_e, A_a はそれぞれヒステリシス損失、渦電流損失、異常渦電流損失の係数である。 P_i に対する W_L の割合の差を反映し、巻鉄心 B の値が A より大きい。Table 1 に、巻鉄心 A と B、および(1)式で分離した積層部の損失係数の比較を示す。 W_L を含む巻鉄心 A, B に比べ、積層部の A_e は薄帯状態の文献値²⁾に近い。 A_h, A_a の差は素材の組成、焼鈍条件の違いによると考えられる。

謝辞 本成果は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。

参考文献

- 1) G. Ortiz et al: Proc. of IECON 2010, pp. 631-638.
- 2) G. Bertotti: IEEE Trans. Magnetics, 24, pp.621-630 (1988).

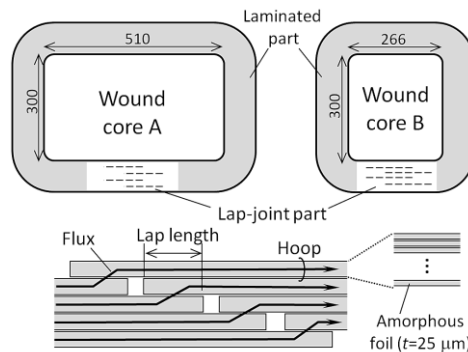


Fig.1 Dimensions of tested cores and schematic cross section of lap joint part (Unit: mm)

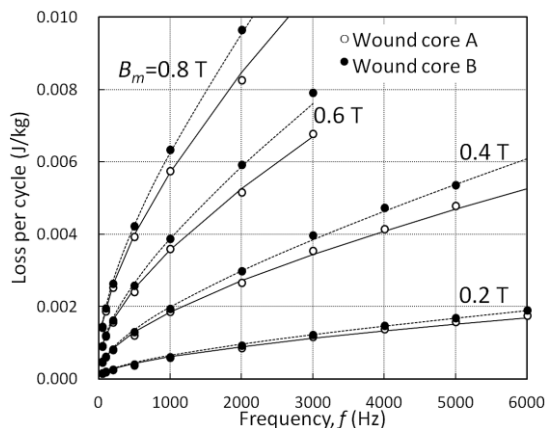


Fig.2 f -performances of loss per cycle of tested cores

Table 1 Comparison of loss coefficients in eq. (2)

Name	A_h	A_e	A_a
Wound core A	8.00×10^{-4}	1.65×10^{-6}	1.80×10^{-4}
Wound core B	8.00×10^{-4}	2.50×10^{-6}	1.80×10^{-4}
Laminated part (Extracted)	8.00×10^{-4}	3.48×10^{-7}	1.73×10^{-4}
As cast foil ²⁾	1.46×10^{-3}	3.24×10^{-7}	1.32×10^{-4}

アモルファス磁性材料のビルディングファクター評価

井上 皓太、佐藤 尊、戸高 孝

(大分大学)

Evaluation of building factor of amorphous magnetic material

Inoue Kota, Takeru Sato, Takashi Todaka,

(Oita Univ.)

はじめに

変圧器やモータの低損失化のためには低鉄損な磁性材料の利用が有効である。近年、アモルファス磁性材料等の急冷薄帯が渦電流損の低減のため注目されている。アモルファス磁性材料は優れた磁気特性を持つ一方、磁気歪みが大きく、積層加工すると磁気特性が大幅に劣化してしまうことが知られている。そこで低応力加工方法を検討するに当たり、積層状態での磁気特性を正確に評価できる装置が必要となった。本報告では積層アモルファス磁性材料の磁気特性測定装置の設計・試作を行い、検証用に作製した積層試料の評価検討を行った結果について述べる。

実験方法

開発した積層磁性材料の磁気特性測定装置は単板磁気試験器を模した構造となっており、PCで励磁電圧波形を作成し、その信号をD/Aコンバータを介してパワーアンプで増幅し、励磁コイルに印加した。試料中の磁束密度 B は B コイル、磁界強度 H は H コイルで検出した。 B コイルの誘起電圧はA/Dコンバータを介してPCに取り込み、目標の正弦波形になるまでフィードバック制御した。また、試作した装置は、渦電流の影響を避ける目的で、試料を両端の補助ヨークによって挟み込む形式を用いた。補助ヨークとのギャップの影響などを考慮し、磁界強度 H の測定には $2H$ コイル法を用いた。

実験結果

積層方法の差異が検出可能かを試験するため2種類の積層アモルファス試料を試作した。これらは、同じ寸法で作製後、試料側面を研磨したものとしていないものである。Fig.1(a), (b), (c)にそれぞれ鉄損、 B - H カーブ、ヒステリシスループ (1.3T) の比較を示す。測定周波数は50Hzである。図のように B - H カーブとヒステリシスループは大差がないが、Fig.2(a)に示すように側面研磨した試料の方が鉄損の値が大きくなっている事がわかる。試料の側面を研磨したことによる磁気特性の劣化の差異が検出可能であることが分かる。

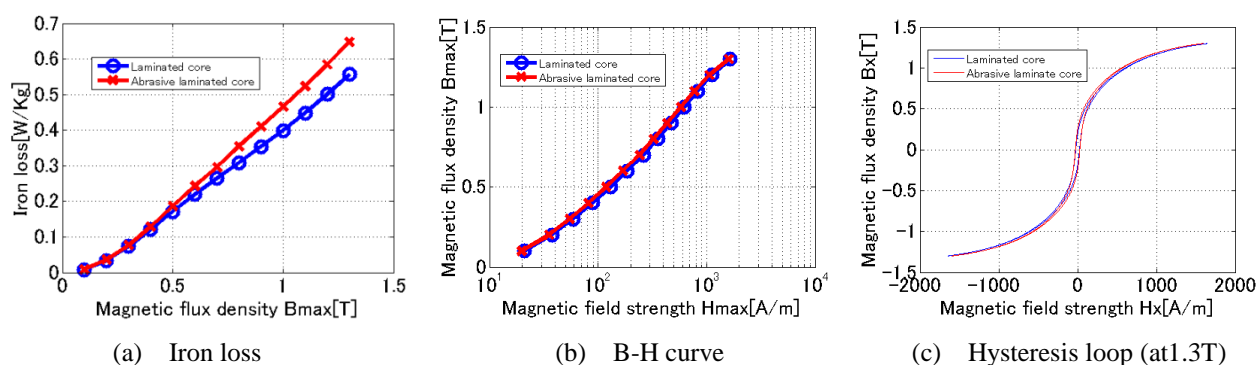


Fig.1 Comparison of measured magnetic properties of laminated amorphous cores.

参考文献

- 岡崎靖雄：「広幅鉄基非晶質鉄心材料の高機能化と配電トランス用巻鉄心への応用」，博士論文，1993.

磁気機能性流体を用いた平面研磨用工具設計のための磁界解析

池田慎治, 山本久嗣, 清水達也, 西島健一, 櫻井 豊, 西田 均
(富山高等専門学校)

Magnetic Field Analysis for Micro Processing of Flat Plate Utilizing Magnetic Compound Fluid
S. Ikeda, H. Yamamoto, T. Shimizu, K. Nishijima, Y. Sakurai, H. Nishida
(National Institute of Technology, Toyama College)

はじめに

磁気混合流体(MCF)はナノ、マイクロオーダーの磁性微粒子を分散させた磁性コロイド溶液である。MCFに非磁性砥粒を混合した上で、磁界によって微粒子を磁気クラスタ化し、加工対象面に対して摩擦運動させ、精密加工を行う¹⁾²⁾。既に優れた加工特性が見出されているが、特性向上や工具設計のために加工原理の解明が必要である。工具による発生磁界と磁気クラスタが加工面におよぼす力を求め、加工結果と比較した。

数値解析の方法と結果

本研究では、いくつかあるMCF研磨法の中で、平面を対象とした加工法を取り上げる。この加工法の様子をFig. 1に示す。加工工具は先端を円錐状に絞った形状で、先端は半径2.5mmの平面である。加工対象の上1.25mmに工具を配置し、空隙にMCFを満たす。回転軸方向に磁束を発生させながら工具を回転させることで、MCFは工具に保持されながら回転運動する。磁界解析は、有限要素法による軸対称2次元静磁界解析を適用し、磁束密度分布よりMCFと加工対象の間に作用する圧力を算出した³⁾⁴⁾。

Fig. 2に示す実験結果⁵⁾より、工具先端の平面部分の直下($r < 2.5\text{mm}$)では加工量が小さく、 $r > 4\text{mm}$ の領域で加工量が増加していることがわかる。Fig. 3に示す圧力の計算結果からは、工具先端直下よりも外側の領域で圧力が極大となることがわかり、実験結果と定性的に同じ特徴が見られる。加工量は圧力と加工距離の積に比例するので(プレストン則)⁵⁾、今後流体の流速分布を加味した解析および評価を行う予定である。

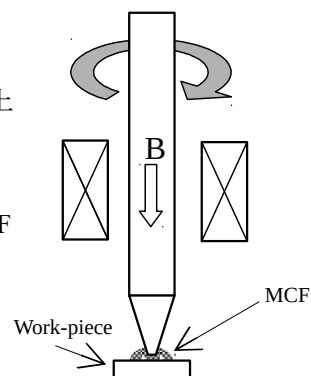


Fig.1 Schematic view of MCF Polishing for flat plate

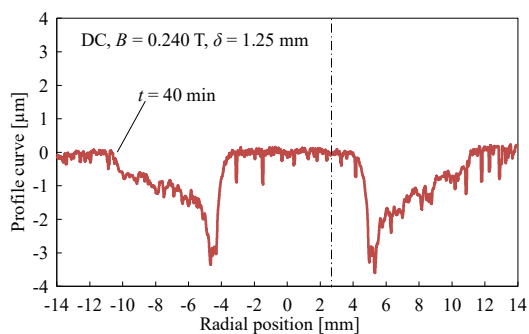


Fig.2 Surface profile of processed work piece

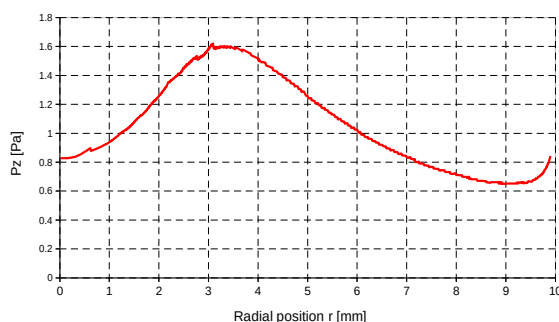


Fig.3 Magnetic pressure between MCF and work piece

参考文献

- 1) H. Nishida, et. al., Journal of JSAEM, Vol 22, pp.286-292 (2014)
- 2) Hitoshi Nishida, et. al., Journal of JSEM, Vol. 12, No. 4, pp.361-368 (2012)
- 3) 池田慎治 他, 第40回日本磁気学会学術講演概要集, p.129 (2016)
- 4) 池田慎治 他, 平成28年度磁性流体連合講演会講演論文集, pp. 3-4 (2016)
- 5) 赤羽里夢 他, 日本機械学会北陸信越支部第54期総会・講演会 講演プログラム G14 (2017)

Collaboration and Invisible Gap between Magnetics & Power Electronics Researchers

- Toward Better Magnetic Design of Inverter-Driven Equipment -

Masahiro Yamaguchi

(Department of Electrical Engineering, Tohoku University)

Many of the manufacturing industries meet revolutionary change in high-power electronics, controls, and communication links. Everyone in this scientific/technological field believes that magnetic and power electronic co-design/analysis greatly improve the equipment performance and extensively the quality of life. Nevertheless everyone also feels invisible gap between magnetic and power electronic approaches to solve the problems. In particular, design of non-linear magnetic core losses under non-sinusoidal wave excitation is a matter of common concern but differently approached by the two communities.

This talk firstly reviews the magnetic approach to analyze the core losses, which is featured by physical and material-scientific interests. Then power-system approach from the power electronics community will be introduced. The author suggests magnetic researchers to try finding physical/material meaning of behavior models suggested by power electronics side, and power electronics researchers to develop tools to apply non-sinusoidal magnetic field source to magnetics side.

Reference

- 1) R. M. Bozorth
- 2) Preisach
- 3) D. C Jiles
- 4) Play
- 5) Sakaki
- 6) Shimizu

パワーエレクトロニクス技術から見た磁気・磁性材料への期待

清水 敏久
(首都大学東京)

SiC や GaN 等の次世代パワーデバイスの出現によって、パワーエレクトロニクス装置の小型・高性能化、低コスト化の進展が期待されている。とりわけ、高速・高周波スイッチングによって変圧器・リアクトル、および電力用コンデンサなどの受動デバイスの小型化が期待されているが、受動デバイスの発熱に伴う温度上昇、および電磁ノイズの増加などの課題が明らかになってきた。

本稿では、パワーエレクトロニクスのスイッチング回路に使用される磁気デバイスの損失計測手法を紹介すると共に、各種磁性体の損失評価手法、およびこれらを用いた変圧器・リアクトルの低損失設計手法について解説する。さらに、今後のパワーエレクトロニクス技術の進展に対応した磁性材料への期待について紹介する。

Recent progress in Fe-based amorphous and nano-crystalline alloys for use in motor cores

Shin Nakajima¹, Daichi Azuma¹, Yuichi Ogawa², Motoki Ohta³ and Ryusuke Hasegawa⁴

¹ Soft Magnetic Materials and Components Business Unit, Hitachi Metals, Ltd., Tokyo 108-8224, Japan

² Metglas Yasugi Works, Hitachi Metals, Ltd., 692-8601

³ Metallurgical Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd., Shimane 692-8601, Japan

⁴ Metglas, Inc., Conway, SC 29526, U.S.A.

One of the most effective methods to reduce core loss in motor cores is to use superior soft magnetic materials. Non-oriented electrical steel (NO) is generally used for motor cores and core loss is reduced by decreasing its thickness to suppress eddy current loss. The thickness of currently commercial NOs ranges from 0.35 mm to 0.15 mm. However, from the standpoint of core loss reduction, it is much more effective to change core material from NO to Fe-based amorphous (Fe-based AM) or Fe-based nano-crystalline alloys (Fe-based NANO).

Table 1 lists magnetic properties of Fe-based AM Metglas[®] 2605SA1 (2605SA1), Fe-based NANO and NO. Core losses of 2605SA1 and Fe-based NANO are approximately 1/10 or less than that of a conventional NO (35H300). On the other hand, these materials have some disadvantages in manufacturing motor cores.

Fe-based AM is obtained in the form of thin strip by solidifying molten metal at cooling rates of more than 10^6 K/s which is faster than the growth rate of crystalline nuclei with single-roll rapid-solidification method. As-cast Fe-based AM has large internal stresses introduced by rapid solidification. Therefore, the stress relief annealing is essential to obtain better magnetic properties as indicated on “Non-field annealing” line in Table 1. However, the annealed Fe-based AM becomes slightly brittle. When the as cast Fe-based AM on “Non-annealing” in Table 1 is mainly considered in AM motor core, the core loss of the motor core is still much lower than that of NO. The thickness of an Fe-based AM strip is much smaller at approximately 0.025 mm, which is less than 1/10 of that of a conventional NO. And its Vickers hardness is 900, which is approximately 5 times that of NO. Therefore it is difficult to apply the conventional punching technique to Fe-based AM core manufacturing. Therefore IE5 efficiency class axial gap motors using Fe-based AM laminated stator cores manufactured with slitting and shearing methods, which are widely used for manufacturing Fe-based AM transformer cores, have been developed and commercialized.

Fe-based Nano is also cast by single-roll rapid-solidification method. Therefore the as-cast state has almost the same physical properties, such as thickness and hardness, as those of Fe-based AM. And Fe-based NANO requires high temperature annealing comparable with Fe-based AM in order to create nanocrystalline structure. Therefore Fe-based NANO is much more brittle than annealed Fe-based AM. In order to commercialize an Fe-based NANO motor, it is necessary to develop a core manufacturing method that is applicable to brittle alloy thin strips.

References

- 1) M. Ohta and Y. Yoshizawa, Appl. Phys. Express 2, 023005 (2009)
- 2) M. Ohta and R. Hasegawa, IEEE Trans. Magn., vol. 53, 2000205 (2017).

Table 1 Magnetic properties comparison between nanocrystalline alloys and conventional materials

Material		B _s (T)	P _{15/50} (W/kg)	P _{10/400} (W/kg)	P _{10/1k} (W/kg)
Fe-based AM 2605SA1	Non-field annealing	1.56	0.22 typ.	0.81 typ.	3.0 typ.
	Non-annealing		—	2.2 typ.	7.4 typ.
Fe-based NANO	FINEMET [®] FT-3M	1.23	—	0.12 typ.	0.57 typ.
	Fe ₈₂ Cu ₁ Nb ₁ Si ₄ B ₁₂ ⁽¹⁾	1.78	0.20	1.3	4.4
	Fe _{80.8} Cu _{1.2} Si ₄ B ₁₁ P ₂ ⁽¹⁾	1.79	0.18	1.8	6.8
	Fe _{80.5} Cu _{1.5} Si ₄ B ₁₄ ⁽¹⁾	1.80	0.27	1.6	5.8
	Fe _{81.8} Cu _{1.0} Mo _{0.2} Si ₄ B ₁₄ ⁽²⁾	1.75	0.28	1.5	5.0
NO	35H300 (t=0.35 mm)	2.0	2.4 typ.	18 typ.	78 typ.
	15HX1000 (t=0.15 mm)	2.0	2.0 typ.	9.3 typ.	33 typ.
	6.5% Si-Fe 10JNEX900 (t=0.1 mm)	1.8	—	5.7 typ.	18.7 typ.

Soft Ferrite Materials in Power Electronics

I. Nakahata¹, K. Mori² and M. Watanabe²

¹Materials development Center, TDK Corporation, Narita 286-8588, Japan

²Magnetics business group, TDK Corporation, Nikaho 018-0040, Japan

Magnetic materials are roughly classified into metallic magnetic materials and oxide magnetic materials by their composition. And, by their magnetic properties, magnetic materials are also classified into soft magnetic materials having the smaller coercive force (H_c) and hard magnetic materials having the large H_c . (figure 1)

Ferrites are well known as typical oxide magnetic materials. Since OP magnet and CuZn ferrite core were invented by Kato and Takei at 1930's, various kinds of hard/soft ferrites have been developed and used in many applications.

Soft ferrites are one of the important materials for power electronics, even today. Generally, the saturation magnetic flux densities of ferrite materials are smaller than that of metallic soft magnetic materials such as permalloy and silicon steel. However, because of their higher electrical resistivity, ferrites have superior magnetic properties at high-frequency. Therefore, soft ferrites have been widely used as the core of inductor and transformer for high-frequency.

MnZn ferrites and NiCuZn ferrites are well known as representative materials of soft ferrite.

Since these ferrites have different magnetic characteristics, suitable applications are different. For example, as shown in figure 2, appropriate operating frequency range is different by their different permeability range.

There are various magnetic materials, and even for only MnZn ferrite used as the core of transformer, there are many kinds of materials with different magnetic properties such as permeability, core loss and saturation magnetic flux density. Therefore, it is important to understand magnetic features of various magnetic materials to select suitable materials for applications.

On the other hand, it is becoming more and more important to consider actual operating condition and usage on recent development of magnetic materials.

In the presentation, the recent topic on the development of ferrite materials and its application examples in power electronics will be reported.

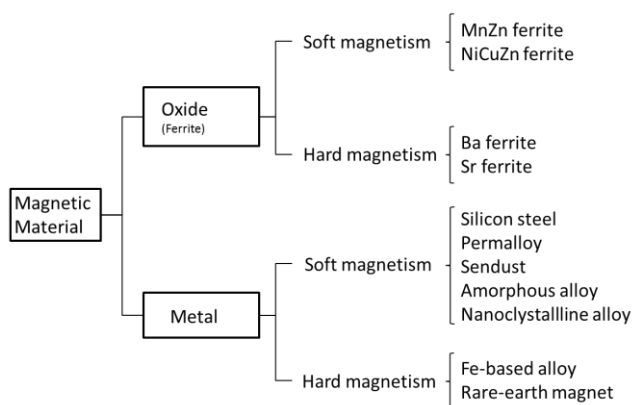


Figure 1. The classification of magnetic materials, and representative materials

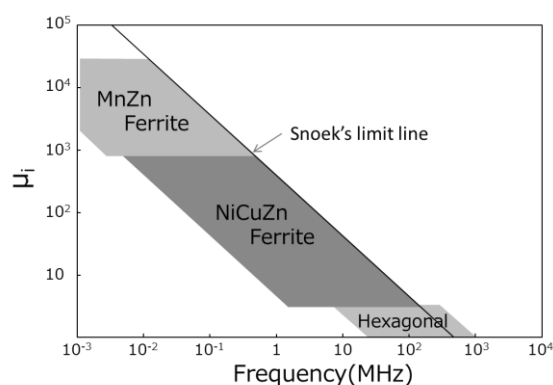


Figure 2. Schematic image of relationship between initial permeability range of ferrites and its appropriate operating frequency range.¹⁾

Reference

- 1) T.Hiraga: Ferrite (in Japanese), p.89 (Maruzen, Tokyo,1986)

Magnetic material and magnetic measurement of the traction electric motor for high efficiency and miniaturization

H. Nakai¹¹ Toyota Central R&D Labs., Inc., Nagakute, Aichi 480-1192, Japan

Compared to other types of electric motors used in vehicles, traction electric motors, which are used in hybrid vehicles (HVs), plug-in hybrid vehicles (PHVs), and electric vehicles (EVs), have a long operation time and a large output. In order to drive a vehicle, a motor must have a wide operation area. Motors are most frequently used under light- to medium-load conditions, and are driven by an inverter. Based on the above characteristics, traction electrical motors must be highly efficient and compact. In order for motors to satisfy these demands, high performance is also expected for magnetic materials.

Miniaturization of motors can provide an increase in the output power with the same volume, or in other words an increase in the output density. Increasing the rotation speed and torque are effective means for increasing the output density. It is desirable for the rotor to be constructed of a high-strength core material in order to increase the rotation speed. High torque density can be achieved by improving the saturation magnetic flux density and the space factor in the core material. In order to realize a high-efficiency motor, it is necessary to lower the iron and copper losses. Iron loss is caused by magnetic flux fluctuations. Therefore, reducing unnecessary magnetic flux, which does not contribute to the torque, and selecting an appropriate core material according to the flux fluctuation, are effective strategies for improving the efficiency.

Magnetic flux in the motor exhibits various behavior. Alternating flux is dominant in the stator teeth and the stator back yoke, while rotating flux is dominant in the tips of the stator teeth and in the joint of the stator teeth and back yoke. On a rotor, a DC flux is generated by a permanent magnet and a fundamental waveform of stator currents. At the area near the air gap, the magnetic flux fluctuates due to a change in the magnetic resistance. Moreover, an inverter superimposes high-frequency magnetic flux having a switching frequency on the above-mentioned magnetic fluxes. On the other hand, various mechanical situations occur in the motor. For example, for the case in which the stator is fixed by shrink fitting, a large stress is applied to the stator back yoke. In addition, when the coil end is compressed in order to miniaturize the height of the coil end, the stator core is subjected to stress in the direction of the rotation axis. As described above, the manner in which the magnetic flux flows and the manner in which the stress is applied are different for each portion. In motor design, it is important to know in detail the types of phenomena that occur for each portion. Understanding each phenomenon makes it possible to choose the appropriate materials in a suitable shape. Magnetic measurement is important in order to determine the characteristics of the materials. The next paragraph describes two important measurement examples.

First, we show the apparatus for measuring the rotational magnetic flux¹⁾. In this apparatus, the number of teeth of the excitation yoke is increased from four (in the conventional apparatus) to eight. The eight teeth are divided into two groups, a main-pole and a sub-pole, and different currents flow in the exciting coil on the main-pole and the exciting coil on the sub-pole. This makes generating a rotating magnetic field in the measurement part in the center of the specimen easy at high magnetic flux density. By setting the ratio of the magnetomotive force distribution of the sub-pole to the main pole to 30:70, this apparatus made it possible to measure the iron loss under the condition that there is a rotating magnetic flux up to 1.9 T, as shown in Fig. 1. Figure 2 shows the thin needle probes on a steel sheet used to measure a magnetic property under out-of-plane stress²⁾. Measurement is performed while pressurizing the measurement part from the normal direction of the plate. Therefore, the wire diameter of conventional search coils is too thick to generate uniform pressure. Therefore, thin-film probes were fabricated on the surface of the sheet by sputtering, and the magnetic flux was measured using the principle of the probe method. Since the probe formed by sputtering is as thin as 20 μm , it is possible to perform measurement while applying pressure. The measurement results revealed that the iron loss increased or decreased depending on the direction of the magnetic flux by pressurization.

By measuring the magnetic characteristics, we can design an electric motor that considers these properties in detail, allowing the design of highly efficient and high power density motors.

References

- 1) Y. Maeda et al., *IEEJ Transactions on fundamentals and materials*, Vol.131, No.6, pp.460-465 (2011).
- 2) Y. Maeda et al., *AIP Advances*, Vol. 7, issue 5, dot: 10.1063/1.4977760 (2017).

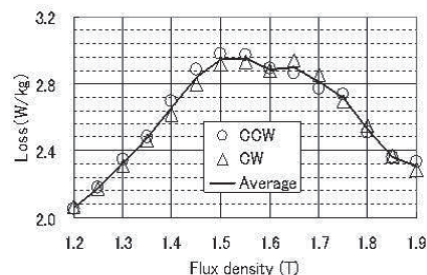


Fig. 1 Measurement results for the rotational flux.¹⁾

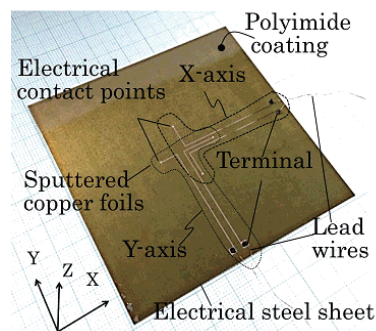


Fig. 2 Thin needle probe on a steel sheet.²⁾

Required Magnetic Material Excited by Power Electronics Equipment

Keisuke Fujisaki
(Toyota Technological Institute)

Energy magnetic material of soft one as well as hard one is used in electrical energy circumstance in order to obtain high magnetic flux density in small external magnetic field. Electrical motor, transformer and inductor are its application. Because of power semiconductor development, power electronics technology is widely applied to electrical energy. So power magnetic material is said to be excited by and used in power electronics equipment.

One of the most important key technologies in power electronics is a switching operation. By using it, the energy consumption in the power semiconductor becomes small, and then the electrical energy conversion such as AC to DC or DC to AC in any voltage and any frequency can be realized in high efficient and in high responsibility. So an electrical motor excited by inverter, a kind of power electronics equipment, makes it possible to rotate in variable velocity. Now the motor drive system can be applied to all the transportation vehicle such as automobile, ship and airplane.

However, this tendency of power electronics excitation makes energy magnetic material in a new operated condition. Usually, it is excited in commercial frequency without harmonics components basically as far as it is used in connection with electrical energy network directly. In power electronics circumstance, an operating frequency becomes high and electrical current and voltage has harmonics components. High frequency operation is required to make the electrical components small, and harmonics components always generates because of the switching operation of power semiconductors.

This tendency has been already realized in small electrical energy equipment such as mobile phone or notebook personal computer. The operating condition is MHz to GHz frequency in mW to W electrical power. However, the new tendency as transportation revolution and new material of SiC and GaN requires a new operation condition as kHz to MHz in kW to MW, which can be realized by power electronics research. New magnetic material is strongly expected.

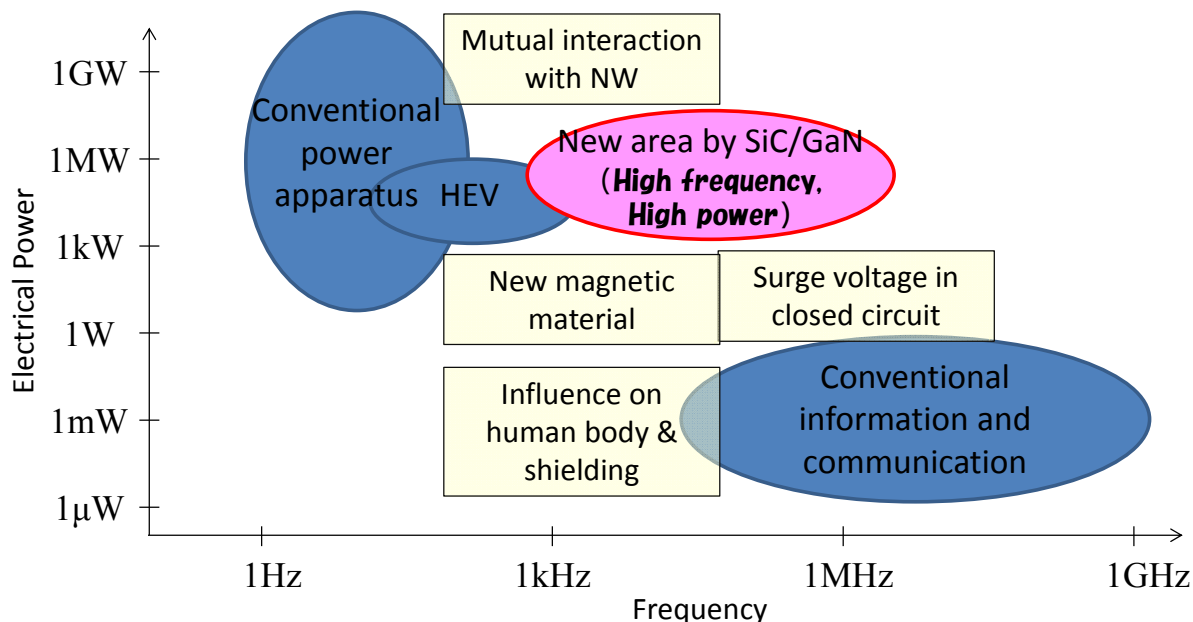


Fig. 1. Required magnetic material by power electronics development for new transportation system.

Reference

- 1) K. Fujisaki, "Required Magnetic Property for Energy Magnetic Material," Oct.29 - 31, 2014, 3rd International Conference of Asian Union of Magnetism Societies (IcAUMS), A1 - 03, 2014.10.
- 2) T. Heidel : "ARPA-E Initiatives in High Efficiency Power Conversion", APEC (Applied Power Electronics Conference and Exposition) 2014, Plenary Session Presentations, Fort Worth, (2014).
- 3) J. W. Kolar, "Future Challenges for Research and Teaching in Power Electronics," Presentation held at the 14th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2014), Brasov, Romania, May 22-24, 2014.

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).

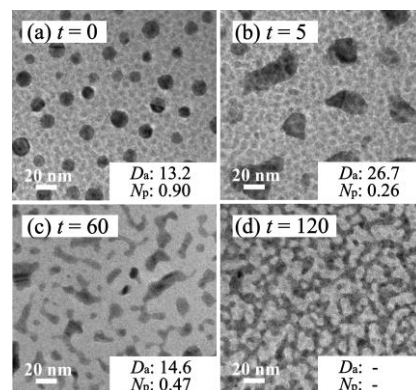


Fig. 1 TEM planer view images of FePt (a) on SiO_x , (b) - (d) on SiN ($t = 5, 60, 120$ nm), average FePt grain diameter D_a nm, and areal density of grains N_p T particles / inch².

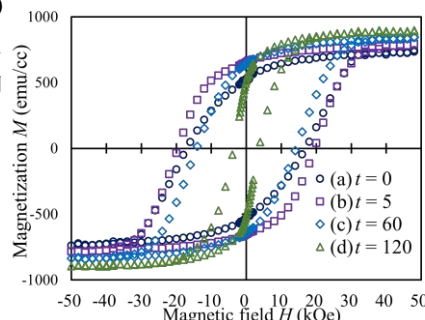


Fig. 2 M-H loops of FePt (a) on SiO_x , (b) - (d) on SiN ($t = 5, 60, 120$ nm) at 300 K.

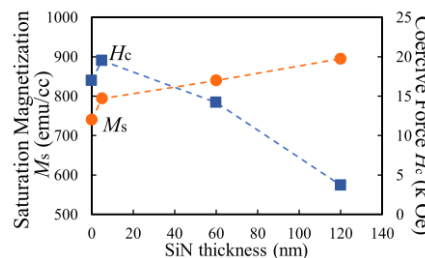


Fig. 3 Saturation Magnetization M_s and Coercive Force H_c of FePt (a) on SiO_x , (b) - (d) on SiN ($t = 5, 60, 120$ nm).

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).

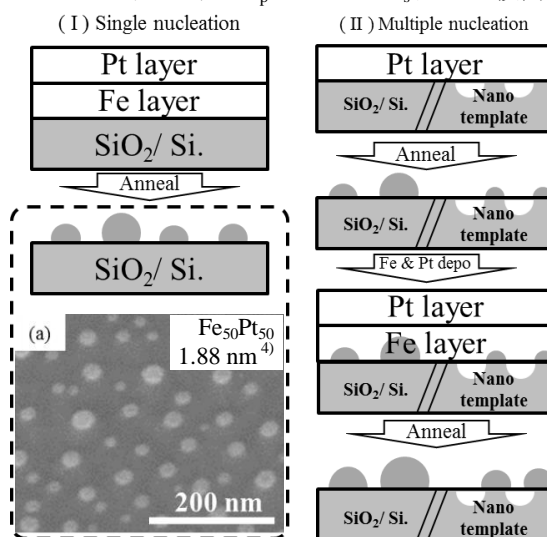


Fig.1 FePt formation procedure.

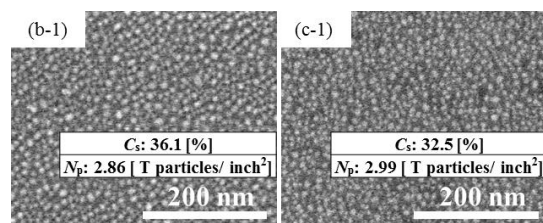


Fig.2 SEM planer view images of Pt particles of each samples.

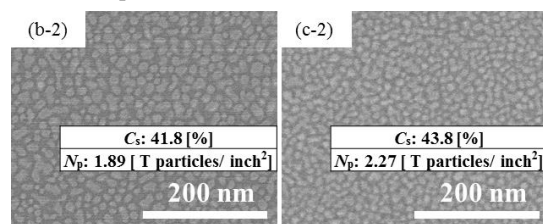


Fig.3 SEM planer view images of FePt particles of each samples.

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).

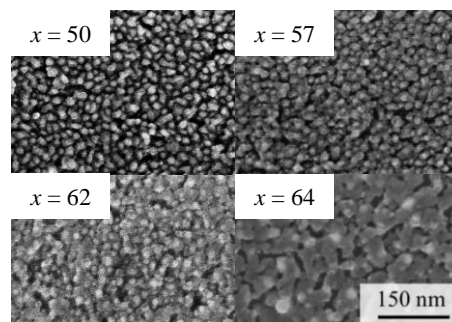


Fig. 1 SEM planer view of Fe_xPt_{100-x} grains on SASP substrate.

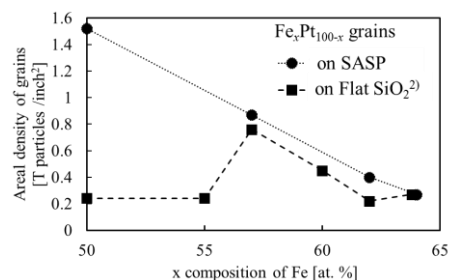


Fig. 2 Compositional dependency of areal density of grains for isolated Fe_xPt_{100-x} grains.

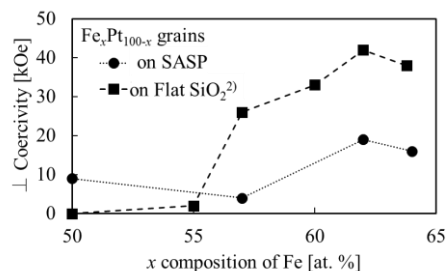


Fig. 3 Compositional dependency of Out of plane coercivity for Fe_xPt_{100-x} grains at room temperature.

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。

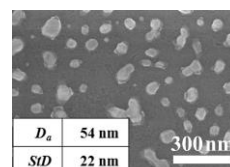


Fig. 1 SEM planer view of FePt particles fabricated by RTA.

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 N_2 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。

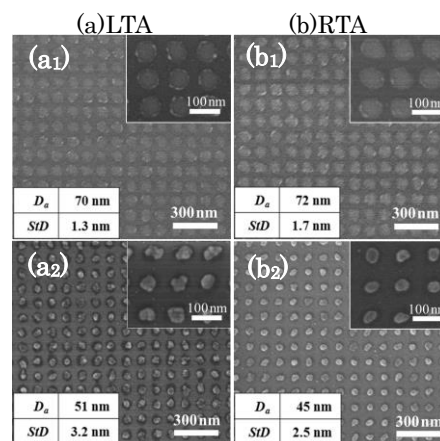


Fig. 2 SEM planer view of FePt pattern (a1), (b1) Lift off, (a2) heating rate: 100 °C/h. (b2) heating rate: 180 °C/sec.

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。

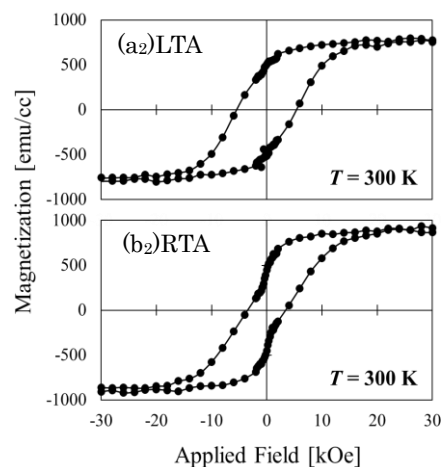


Fig. 3 M-H curves for FePt particles in out-of-plane. (a2) heating rate: 100 °C/h. and (b2) heating rate: 180 °C/sec.

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).

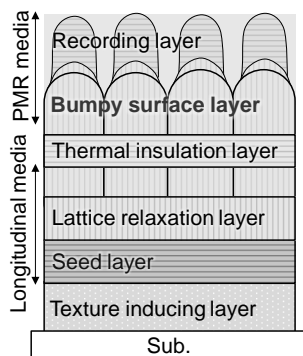


Fig. 1 Schematic of proposed structure for FePt granular media with columnar structure.

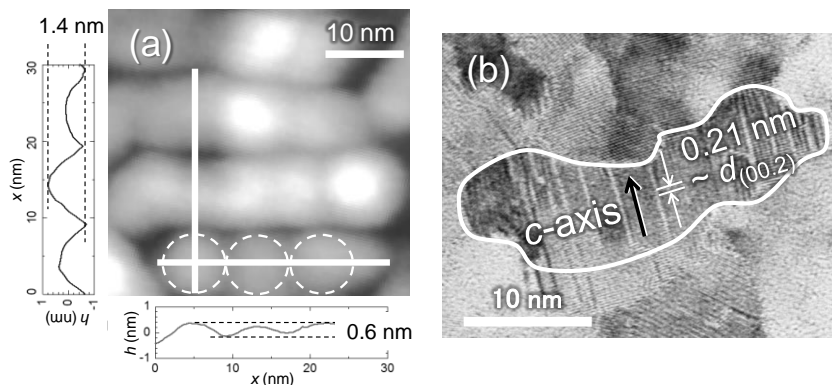


Fig. 2 (a) Plane-view TEM image (b) AFM surface topography image for (11.0) oriented Ru^H film.

$L1_0$ 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。

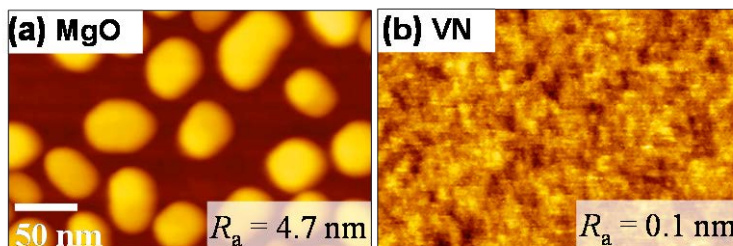


Fig. 1 AFM images of $L1_0$ -ordered FePt films of 2-nm average thickness formed on (a) MgO and (b) VN layers.

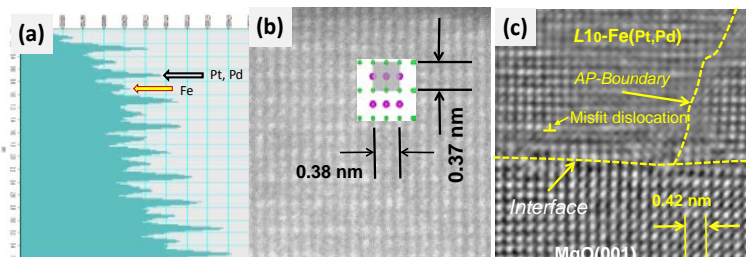


Fig. 2 TEM images of $L1_0$ -Fe(Pt,Pd) film grown on MgO(001). (a) Lattice line contrast, (b) TEM image corresponding to (a), and (c) atomic structure around the interface.

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).

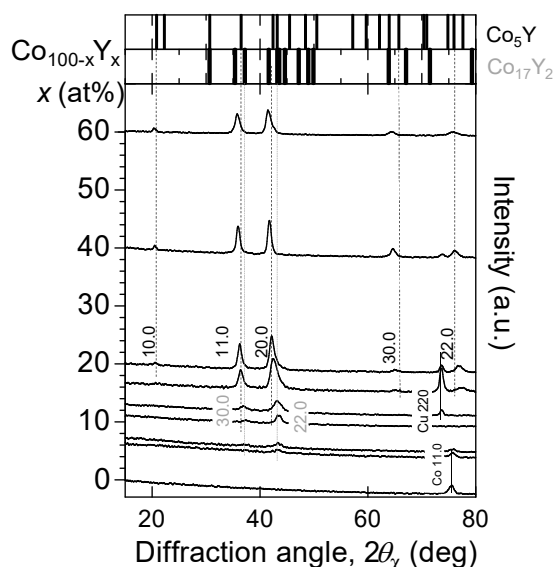


Fig. 1 In-plane XRD profiles for NiTa/Cu/Co_{100-x}Y_x films deposited at substrate temperature of 500°C.

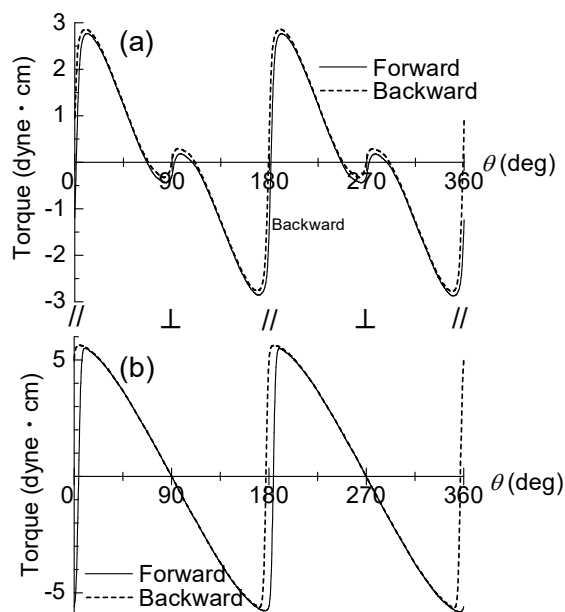


Fig. 2 Magnetic torque curves with external field of 25 kOe for (a) Co_{82.4}Y_{16.7} and (b) Co₇₇Y₂₃ films.

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).

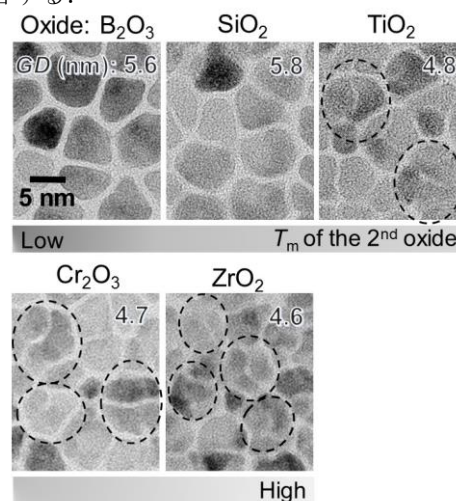


Fig. 1 In-plane-view TEM of CoPt-B₂O₃-oxide granular media. Grain size (GD) evaluated by XRD is shown in each image.

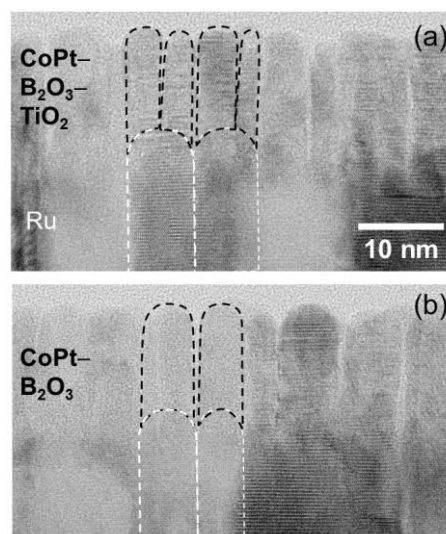


Fig. 2 Cross-section-view TEM of (a) CoPt-B₂O₃-TiO₂ and (b) CoPt-B₂O₃ granular media.

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).

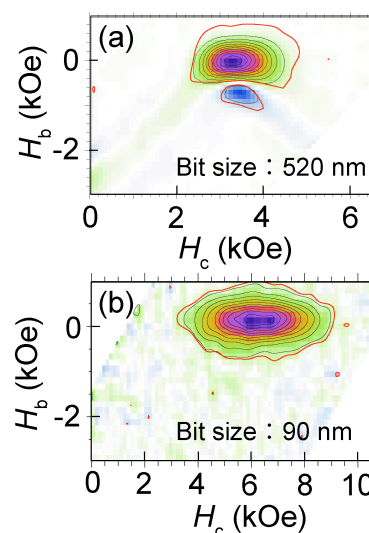


Fig. 1 FORC diagrams of ion beam patterned MnGa films with bit sizes of (a) 520 nm and (b) 90 nm.

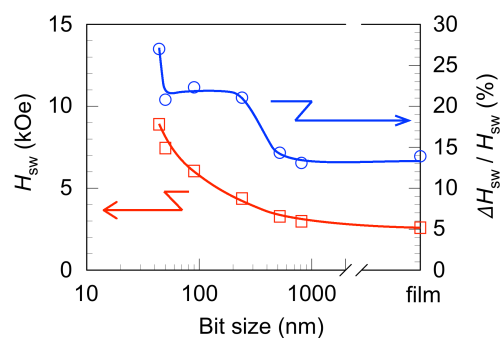


Fig. 2 Bit size dependences of average switching field H_{sw} and switching field distribution $\Delta H_{sw}/H_{sw}$ of MnGa bit patterned film.

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).

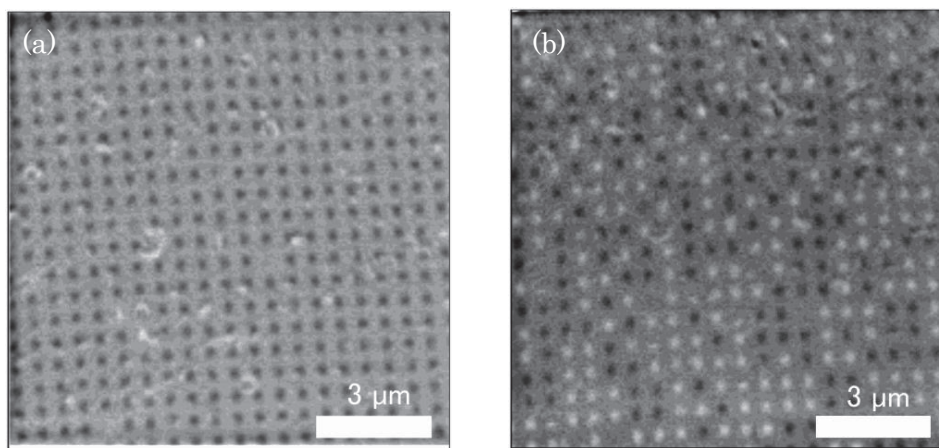


Fig. 1 Scanning XMCD images of bit patterned MnGa with a pitch size of 500 nm. Before taking the images, the sample was saturated by applying a field of +2 T, then negative fields (a) -0.2 T and (b) -0.3 T were applied for taking the images.

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)

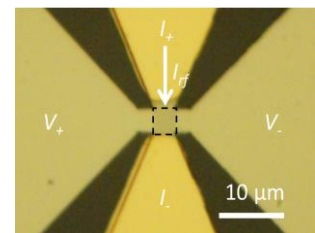


Fig.1 Optical microscope image of the sample

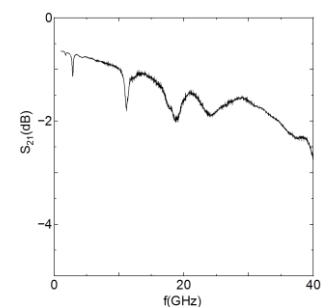


Fig.2 Transmission property of the fabricated sample

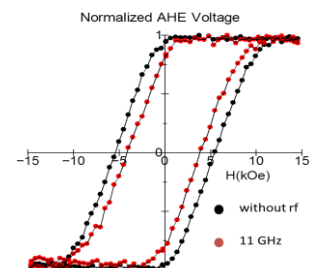


Fig.3 Magnetization curves without and with rf field ($f_{rf}=11$ GHz)

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).

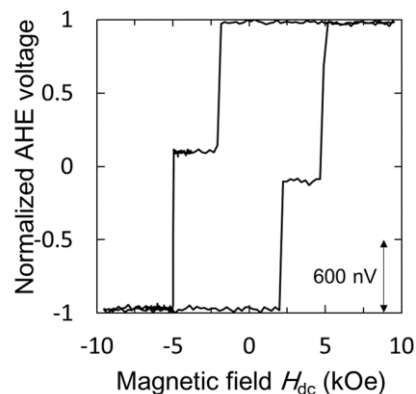


Fig. 1 Magnetization curve for the layer structured nanodot ($D = 2000$ nm)

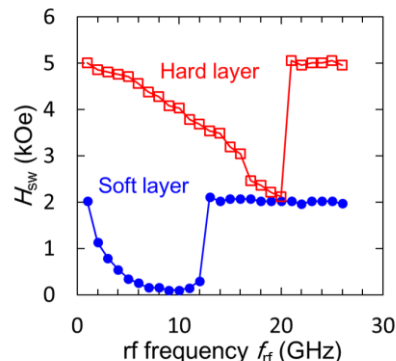


Fig. 2 Switching field H_{sw} of each layer of layer structured dot as a function of rf frequency

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.

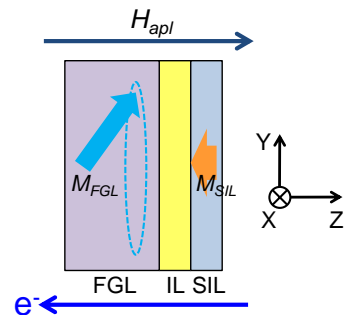


Fig. 1 Schematic of STO.

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

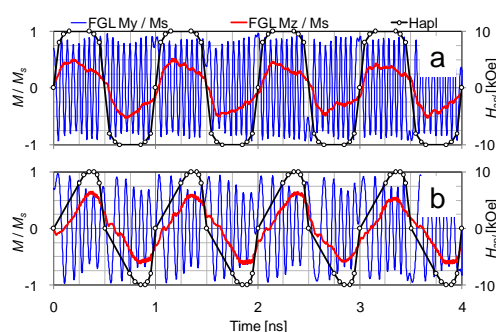


Fig. 2 Volume-averaged FGL oscillation vs. time. $J = 3.0 \times 10^8$ A/cm², AC external field = 1 GHz, 20 kOe_{pp}.

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/cm² 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/cm² 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 0~60GHz 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 erg/cm² 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 40~50GHz 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)	5.0×10 ⁶ erg/cm ³
異方性定数(Bottom Soft Layer)	3.0×10 ⁶ 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

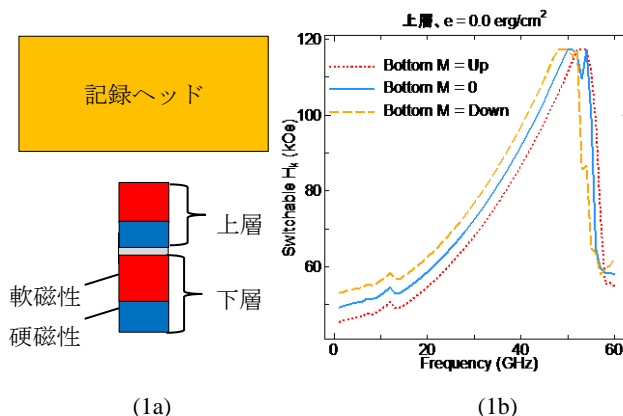


図 1.上層と下層の交換結合が 0 erg/cm² のとき

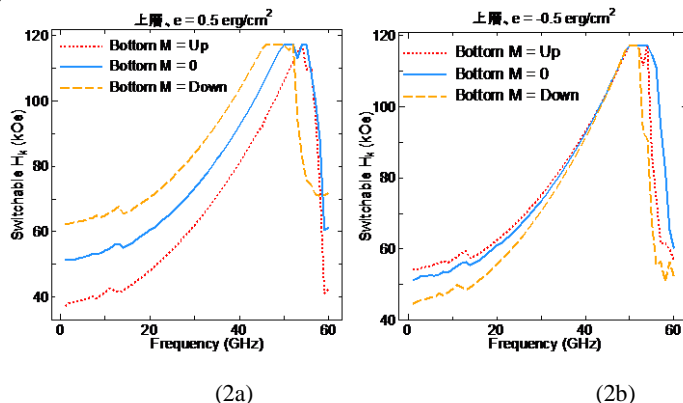


図 2.上層と下層の交換結合が ±0.5 erg/cm² のとき

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.

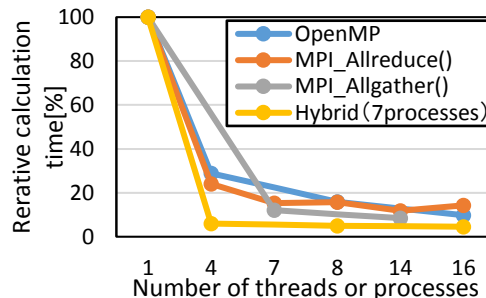


Fig.1 Relationship between number of threads or processes and calculation time for different types of parallelization

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。

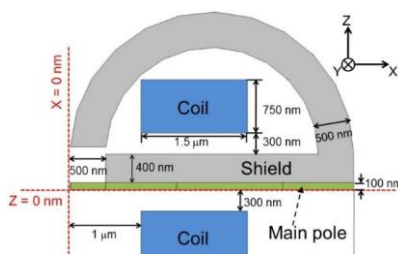


Fig. 1 モデル化した現用ヘッド

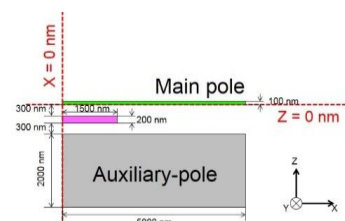


Fig. 2 主磁極先端励磁型ヘッド

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励磁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。

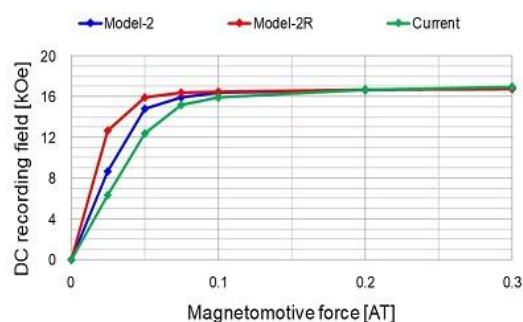


Fig. 3 起磁力に対する書き込み磁界強度

[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層目が下向きで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。

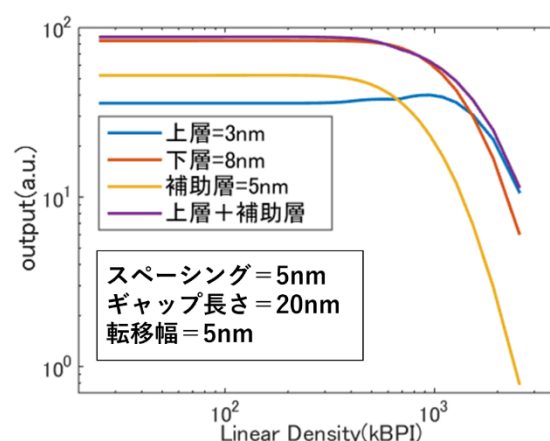


図1 ノイズ付加時の二層同時再生波形

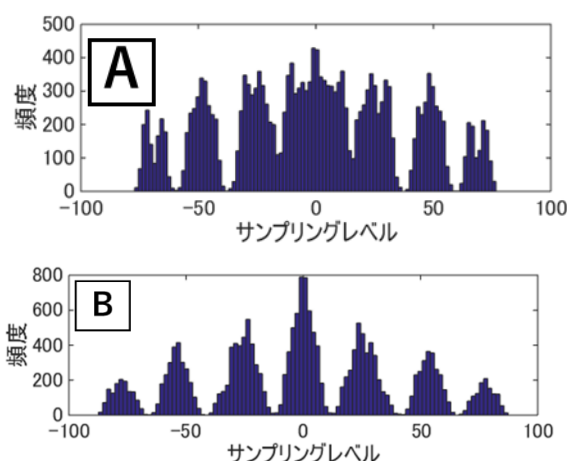


図2 A2層, B補助層を用いた時のクロック点での振幅レベルのヒストグラム。SN比は-28dBである

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。

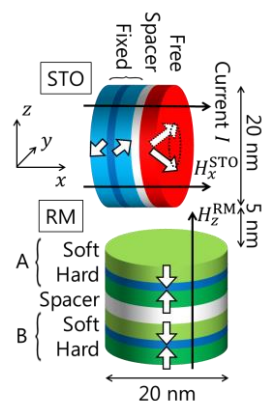


Fig. 1. STO and recording magnetization (RM).

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。

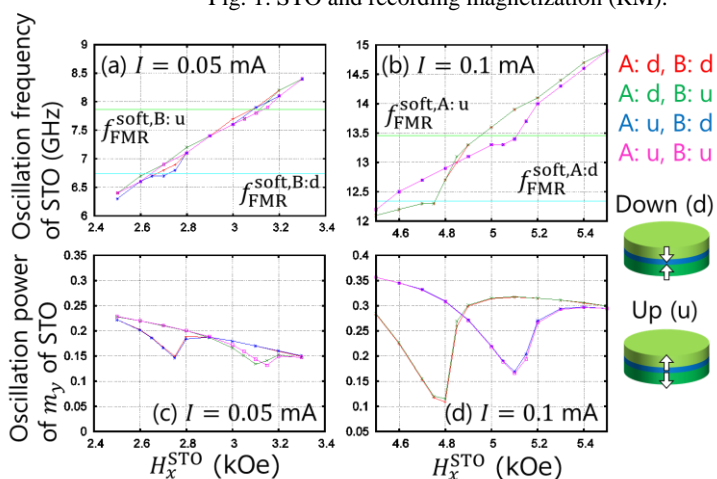


Fig. 2. Oscillation frequency and power of STO as a function of H_x^{STO} .

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) ナノスピンの変換科学(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).

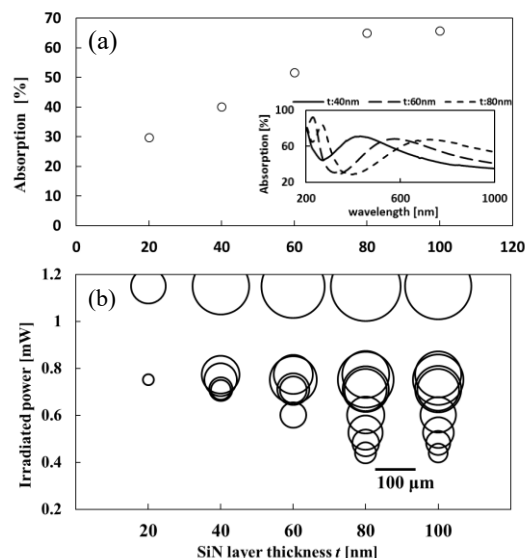


Fig. 1
(a) SiN layer thickness dependence of absorption (Inserted figure : Absorption spectrum)
(b) SiN layer thickness dependence of created domains size by AOS in the film SiN (t nm) / Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4} (20 nm) / SiN (5 nm) / glass sub. ($t = 20, 40, 60, 80, 100$)

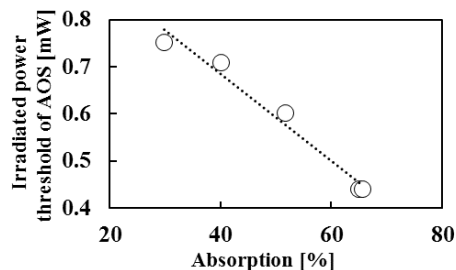


Fig. 2 The correlation between irradiated power threshold of AOS and absorption

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.

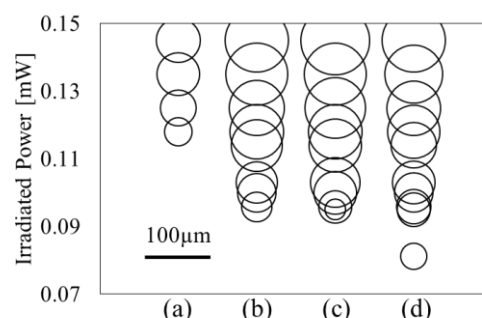


Fig. 1 The layer dependence of created domains sizes by AOS in the films SiN(60 nm) / Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4} (10 nm) / {(a)Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4}, (b)Al₉₀Ti₁₀, (c)Cu, (d)Pt} (5 nm) / SiN (5 nm) / glass sub.

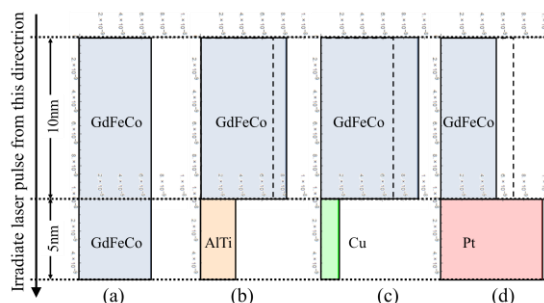


Fig. 2 The estimation of the energy distribution at reaching temporal equilibrium electron temperature with electronic specific heat