

磁壁によるスピン波の位相制御とロジックインメモリへの応用

今村謙汰, 浦塚泰夫, 田中輝光, 松山公秀
(九州大学大学院 システム情報科学府)

Successive logic-in-memory operation in spin wave based devices with domain wall data coding scheme

K. Imamura, Y. Urazuka, T. Tanaka, K. Matsuyama

(Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University)

はじめに

スピン波の位相情報を利用した電荷レス情報伝送によるスピン波干渉型論理演算デバイスが提案されている 1). 近年, 磁壁通過によりスピン波の位相シフトが生じることが発見されており 2), 磁壁の有無を論理動作における入力値に対応させたスピン波干渉による論理演算の可能性が示されている 3). 本研究では, スピン波導波路を流れるスピン偏極電流の STT 効果および外部局所磁界の制御により, このデバイス中における磁壁の選択的転送を利用した論理入力値の書き換えをマイクロマグネティックシミュレーションで解析した. さらに, 論理入力値の書き換え動作から論理演算動作に至る連続機能動作をシミュレーションにより検証した.

計算方法

垂直磁化細線を想定した論理演算デバイスの計算モデルを Fig. 1 (a) に, デバイス左部の詳細図を Fig. 1 (b) に示す. 磁性細線中の磁壁位置制御およびスピン波による論理演算動作を LLG 方程式の数値計算により解析した. Fig. 1 (a) に示すように, 2本の導体線 (GE1, GE2) によりスピン波の励起を行い, 中央に配置した誘導検出器により干渉波を検出し論理動作を行った. スピン波の π rad 位相シフトを引き起こすネール磁壁対の有 (“1”) 無 (“0”) により, 論理入力値の符号化を行った. 磁性細線中の磁壁位置規定は, 幅 230 nm の磁気異方性局所変調 (ピンングサイト (PS)) により行っている. スピン偏極電流による STT 効果と Fig. 2 (b) に示すヘアピン状導体線が作る電流磁界を用いて PS1 中のネール磁壁対を PS0 へ転送し論理入力値 “11” から “01” への書き換えを行った.

計算結果

Fig. 2 (a) にスピン波励起時の出力電圧波形を示す. 初期入力値 “11” で磁壁が安定している場合の小さな出力電圧は論理出力値 “0” に対応している. この後, スピン波導波路を流れるスピン偏極電流による STT 効果, およびピンングサイト上に配置されたヘアピン状導体線が生じる電流磁界を用いて磁壁のディピンングとピンングを行った. Fig. 2 (b) に磁壁位置の時間遷移を示す. 1 対のネール磁壁対が PS1 から PS0 へ制御性よく転送されていることが確認された. データ書き換え後の論理入力値 “01” 時の出力電圧は, 初期論理入力 “11” の出力電圧値に比べ 18 倍程度大きな値となっている. この論理入力値 “01” 時の出力は論理出力値 “1” に対応する. 以上の結果より, 磁壁転送による論理入力値の書き換えと, スピン波干渉による排他的論理和動作との連続動作の可能性が示された.

参考文献

- 1) A. Khitun, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **111**, 054307 (2012)
- 2) R. Hertel, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 257202 (2004)
- 3) Y. Urazuka, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **115**, 17D505 (2014)

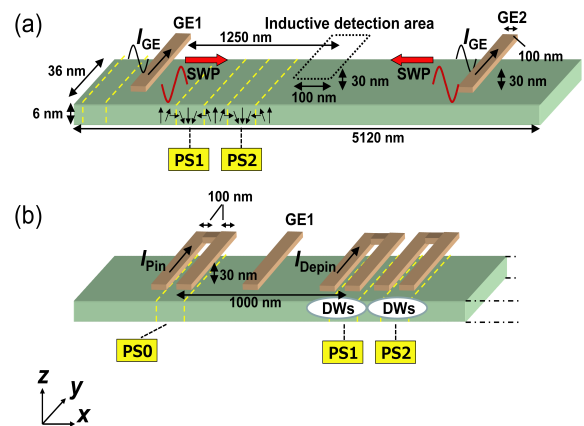


Fig. 1. (a) Schematic figure of perpendicularly magnetized nanowire with spin wave generator and detector. (b) Schematic figure of domain wall pinning sites (PS0, PS1, PS2) located at the left side of the perpendicularly magnetized nanowire

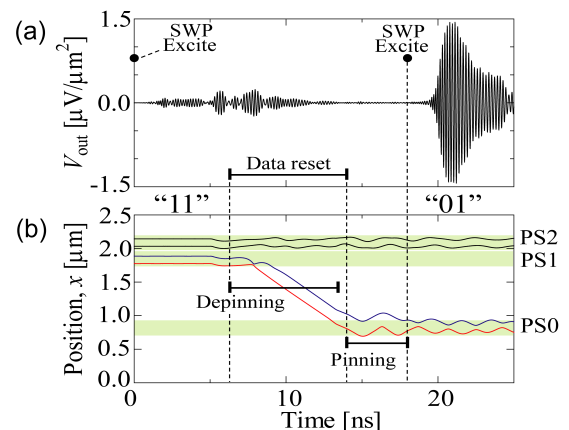


Fig. 2. (a) Inductively detected output voltage of interferometric spin wave packets. (b) Time transient of the two DW pairs driven by spin polarized currents.

[Co/Pd]磁性細線における電流駆動磁区の磁気抵抗変化による検出

奥田光伸^{1,3}、宮本泰敬^{1,2}、宮下英一¹、斎藤信雄¹、林直人¹、中川茂樹³
 (¹NHK、²(一財)NHK エンジニアリングシステム、³東京工業大学)

Detection of Current Driven Magnetic Domains in [Co/Pd] Nanowire by Magneto-Resistive Change

M. Okuda^{1,3}, Y. Miyamoto^{1,2}, E. Miyashita¹, N. Saito¹, N. Hayashi¹ and S. Nakagawa³

(¹NHK, ²NHK Engineering System, inc., ³Tokyo Institute of Technology)

はじめに

近年、磁性細線における磁壁の電流駆動に関する研究¹⁾に注目が集まり、レーストラックメモリ²⁾に代表されるような新しい原理のメモリなどが提案されている。この磁性細線を並列に複数配置し、それぞれの磁性細線を HDD のデータトラックのように扱うことができれば、並列アクセスによる超高速磁気記録デバイスを実現することが期待される³⁾。そこで我々は[Co/Pd]垂直磁化磁性細線中の磁区をパルス電流により駆動させることによって記録・再生を実現する研究を進めている。今回、TMR センサを用いた表面磁区観察装置である nano-MDS (Magnetic Domain Scope for wide area with nano order resolution)⁴⁾を用いて、TMR センサ直下を移動する磁区の磁化方向をリアルタイムに検出することができたので報告する。

実験方法

イオンビームスパッタ法および電子線リソグラフィにより、表面熱酸化 Si 基板上に[Co/Pd]垂直磁化多層膜を堆積し、磁性細線の上部が基板より 40 nm 程度露出した構造の試料を作製した。細線幅は 150 nm、細線長は 20 μm とした。作製した磁性細線の保磁力はおよそ 630 Oe であった。細線の両端には Cu 電極を形成し、電流を印加できるようにした。その後、作製した細線について nano-MDS により表面の磁区状態の観察を行うとともに、パルス電流を印加することにより磁区を駆動させ、細線上 30 nm にオントラックさせた TMR センサにより細線の磁化方向の変化を観察した。

実験結果

Fig.1 は作製した磁性細線の(a)残留磁化状態での nano-MDS 像と(b)パルス電流印加後の nano-MDS 像である。試作した磁性細線に平行して、測定位置原点マーカ (長さ 1 μm) が図示してある。明領域 (赤) が上向きの磁化方向の磁区、暗領域 (青) が下向きの磁化方向の磁区を表しており、+15 mT ~ -9 mT の磁束密度を持つ磁区が形成されていた。この細線にパルス幅 50 ns、電流密度 $6.3 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ のパルス電流を右側から左側に向かって複数回印加することにより、(b)に示すように細線中の複数の磁区をまとめて移動させることができた。磁区は電流の向きとは反対方向に約 200 nm 移動した。左側から右側に向かって電流を印加したときには磁区はそれぞれ左に向かって動いた。

さらにこの磁性細線上に nano-MDS の TMR センサをオントラックさせパルス電流を印加したところ、センサ直下を横切る磁区の磁化方向の変化に伴って磁気抵抗値が変化し、その磁化状態を推定できることがわかった。講演では磁化方向のリアルタイム検出についても報告する。

参考文献

- 1) H. Tanigawa *et al.* : *Appl. Phys. Express*, **2**, 053002 (2009).
- 2) S. S. P. Parkin, M. Hayashi and L. Thomas : *Science*, **320**, 190 (2008).
- 3) Y. Miyamoto, M. Okuda and E. Miyashita : *J. Inst. Image Inform. TV. Engnr.*, **68**, 1, J34 (2014).
- 4) T. Chikamatsu, A. Ogawa and T. Mizuno : *Magnetics Japan*, **6**, 6, 357 (2011).

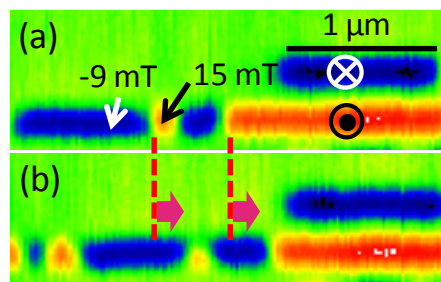


Fig.1 (a) Remanent nano-MDS image and (b) nano-MDS image after application of pulse current, for [Co/Pd] nanowire.

傾斜電界印加による磁壁駆動シミュレーション

村山 創、山田 啓介、仲谷 栄伸
電気通信大学、情報理工学研究科

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

Soh Murayama, Keisuke Yamada, and Yoshinobu Nakatani

Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

はじめに

現在、磁壁駆動型デバイスは、省電力化を担う磁気記録装置として注目されている[1]。磁壁駆動型デバイスでは、磁壁駆動の制御に外部磁界を印加する手法や、スピン偏極した電流を注入する手法が用いられている。これらの手法は、磁壁駆動のための閾電力が多く、その低減が課題となっている。近年、閾電力を低減する新たな手法として、電界印加による磁壁駆動方式が提唱されている[2, 3]。本研究では、磁性細線に傾斜電界を加えた時の磁壁駆動について、マイクロマグネティックシミュレーションより調査した。

実験結果

磁性細線のサイズは、 $200\text{ nm} \times 60\text{ nm} \times 3.9\text{ nm}$ とした。材料定数はCo/Ni多層膜の値を用い、飽和磁化 660 emu/cm^3 、異方性定数 4.1 M erg/cm^3 、交換スティフネス定数 1.0×10^6 、損失定数 0.02 とした[4]。電界効果は、異方性定数が変調する効果とした[5]。傾斜電界効果は、図1のように、磁性細線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 ($\text{erg/cm}^3/\text{nm}$)と定義した。図1は、 $\Delta K_u = 1000\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$ の場合で、左端($x = 0\text{ nm}$)で磁気異方性の減少率を 0% とし、右端($x = 200\text{ nm}$)で減少率 5% を表している。磁壁の初期位置は、細線中心 ($x = 100\text{ nm}$)とした。

シミュレーションの結果、傾斜電界印加 ($\Delta K_u = 500\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$)によって、磁壁が異方性減少方向 ($x > 100\text{ nm}$)へ移動することを確認した。この時、磁壁移動速度は 1100 cm/s であった。図2は、各 ΔK_u における磁壁移動速度を示す。 ΔK_u が $500\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$ までは磁壁の移動速度が単調に増大した。それ以後は、磁壁の移動速度が急激に減少する Walker breakdown と同様の現象が見られた。図2に、各外部磁界印加 (H_{ext})による磁壁移動速度を示す。それぞれの磁壁移動速度を比較すると、 $\Delta K_u = 500\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$ の傾斜電界は、 $H_{\text{ext}} = 2\text{ Oe}$ の磁界に相当することが分かった。

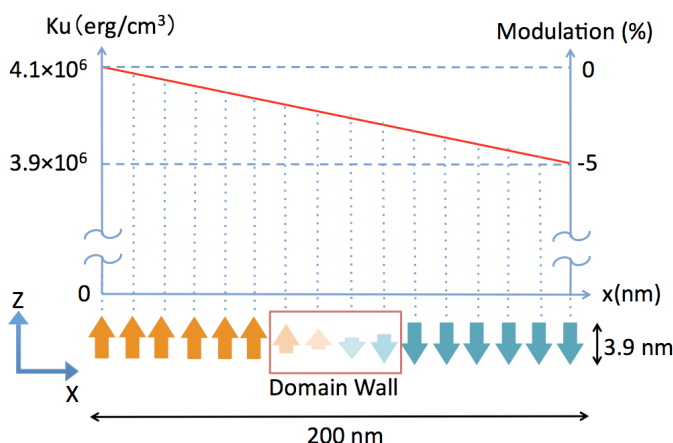


Fig. 1 Schematic of the slope electric field at $\Delta K_u = 1000\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$

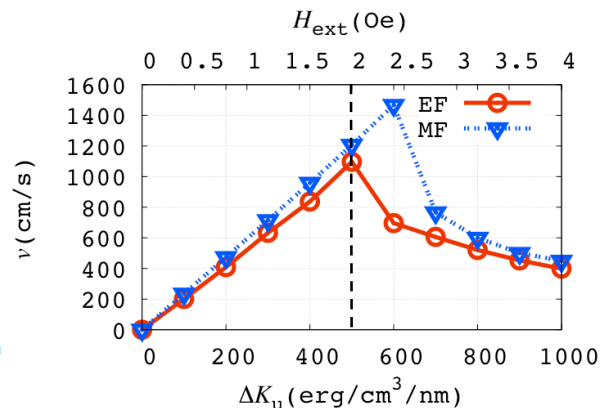


Fig. 2 Domain-wall velocity as a function of the magnetic field and the slope electric field

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] T. Koyama, *et. al.*, Appl. Phys. Exp. **1**, 101303 (2008).
[5] M. Weisheit, *et. al.*, Science **315**, 349 (2007)

磁性多層膜を有する微小ドットの磁気力顕微鏡による磁化状態操作

岩城圭亮、野村光、中谷亮一

(大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻)

Magnetization manipulation method for nanodots with magnetic multilayer by magnetic force microscopy

K. Iwaki, H. Hikaru, and R. Nakatani

(Department of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University)

近年、磁性量子セルラーオートマタ(MQCA: magnetic quantum cellular automaton)をはじめとする微小磁性体を用いたデバイスは、次世代を担う情報処理デバイスの有力な候補として注目を集めている。MQCA等の基礎的研究では、各磁性体の磁化情報を任意に制御することが不可欠となる。我々はこれまでに、磁気力顕微鏡(MFM: magnetic force microscope)を利用し、磁性体の磁化状態を制御する手法を提案してきた[1]。しかしながら、これまでの手法では、基板表面に二次元的に配置された微小磁性体のみを磁化状態の制御対象としており、磁性多層膜を有する微小磁性ドットへの磁化状態制御手法は未だ確立されていない。そこで、本研究では、磁気力顕微鏡を用い、磁性多層膜からなる磁性ドットの各磁性層の磁化状態を制御する手法を確立することを目的とする。

磁気力顕微鏡には、日立ハイテクサイエンス社製の

MFM(SPA-300HV)へLabVIEW FPGA/Real Time OSを用いて開発した独自の制御装置を追加したものを用いた。また、磁気力探針には、市販のSI-MF40を用いた。磁化状態制御の対象として、電子線リソグラフィ法、イオンビームスパッタリング法、リフトオフ法を用い、Si基板上にNi-20at.%Fe(20 nm)/SiO₂(40 nm)/Ni-20at.%Fe(20 nm)/Au(3 nm)からなる磁性ドットを作製した(Fig. 1)。この試料に対し、任意のx-y座標において、探針・基板表面間距離 d_z を制御することで磁化状態制御を実施した。磁性ドットの磁化状態の初期化ならびに、磁化状態制御のための補助磁場として、外部磁場をy軸に沿って印加した[Fig. 1(b)]。磁性ドットの磁化状態の画像化には、磁性ドットの磁化への影響を十分に抑えるため、高さ一定モードMFMを用いた。

Figure 2 (a), (b)に、磁性状態制御前後の磁気力顕微鏡像を示す。Fig. 2 (a)で得られていた明瞭なコントラストが、Fig. 2 (b)では消失している。このことから、上部磁性層の磁化の向きと、下部磁性層の磁化の向きが反平行となり、互いに漏洩磁場を打ち消し合っていると考えられる。また、Fig. 2 (c)に磁化状態制御の際に取得された、MFMの位相遅れ信号の探針・基板表面間距離依存性を示す。Fig. 2 (c)から、上部の磁性層が反転した後も、下層の磁性層の磁化の向きは反転していないことがわかる。

以上の結果より、MFMを用いることで、磁性多層膜からなる磁性ドットの各磁性層の磁化を任意に制御できることが明らかとなった。本手法は、近い将来実現が期待されている、磁性多層膜からなる三次元MQCAに関する研究において欠かすことのできないツールとなる。

1) H. Nomura and R. Nakatani, *Appl. Phys. Express*, **4**, 013004 (2011).

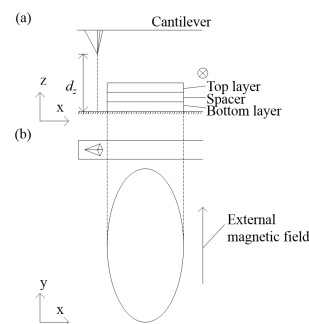


Fig.1 Schematic (a) front view and (b) top view of cantilever and nano dot.

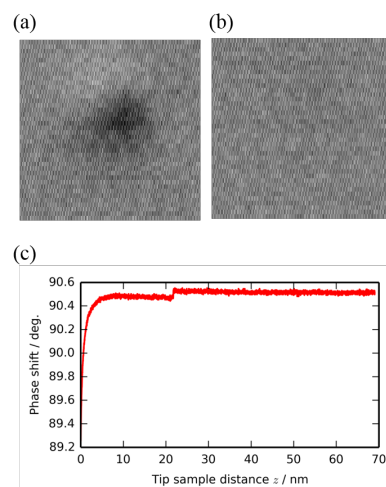


Fig. 2 MFM images of (a) initial state and (b) magnetization manipulation result of nano dot. (c) Force curve measurement result during the magnetization manipulation.

グラフェンナノリボンの炭素空孔によるヤーンテラー変形と磁性

太田 憲雄
(筑波大数理物質)

Jahn-Teller distortion and magnetism of carbon void defect on graphene-nano-ribbon

Norio Ota

Pure and applied sciences, University of Tsukuba

はじめに

グラフェンやグラファイトで報告されている室温強磁性¹⁾ やリチウムイオン電池における触媒反応の起因は炭素の抜けた空孔が一因ではないかと考えられている。最近STMを用いた炭素配置の観察がなされるようになってきた²⁻³⁾。しかし、安定炭素配置やそれにとまなう多重スピン配置の計算によりさらに詳細なメカニズム解明が必要である。ここでは第一原理計算による予測をおこないSTM実験との照合を行った。無限長のABスタック2層グラフェンリボンを対象に、ガウシアンパッケージでの密度汎関数法計算をおこなった。GGA近似で6-31Gd基底関数系を用いた。

Yahn-Teller 変形と安定スピン配置

図1の初期の空孔配置は、まわりの3個の炭素が正三角形(一辺2.48Å)である。6個の不対電子をもつが交換相互作用によるエネルギー上昇を避けるため、Yahn-Teller変形を引き起こす。図2が計算結果で、空孔のまわりの炭素は2等辺三角形(長辺2.59Å, 短辺2.14Å)となって安定する。多重スピン状態として S_z が6/2から0/2にいたる4個が可能であるが、安定なスピン状態は $S_z = 2/2$ であった。スピン密度を見ると、長辺端の炭素にUp-Spinが最も密に集中する。シグマ電子とパイ電子が混合した形状である。

サイトと安定スピン配置

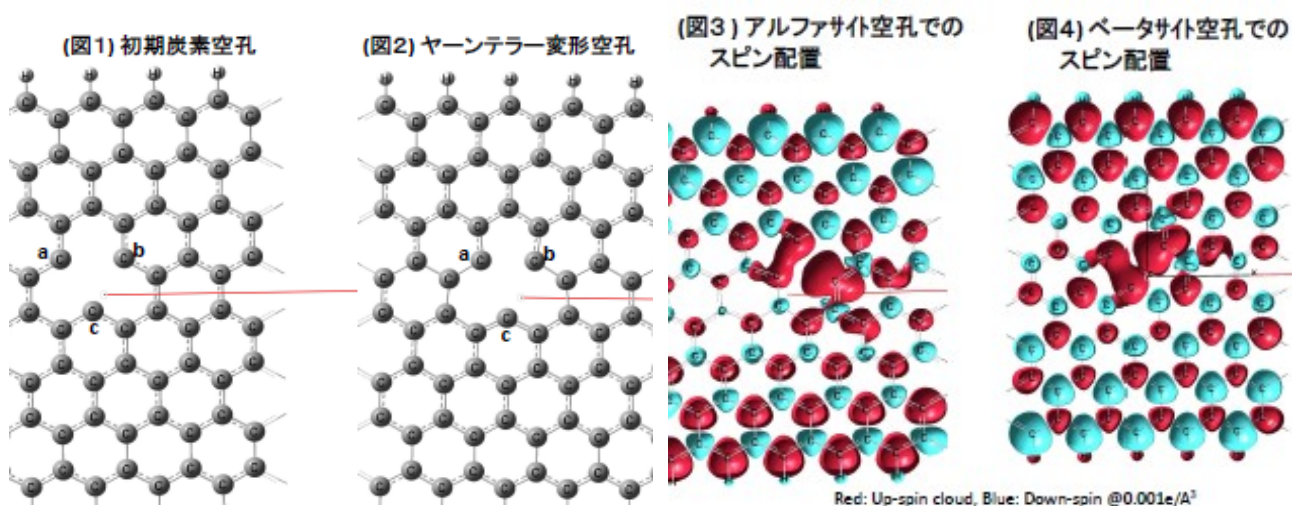
ABスタック2層グラフェンでは、格子ベクトルに対応し2種(アルファ、ベータ)の位置の炭素がある。アルファ位置空孔での安定スピン配置は図3となった。またベータ位置の場合は図4である。この二つの空孔付近の電荷およびスピン密度配置をくらべると互いに60度異なる回転対称となった。

実験との比較

M. Ziatdinovらによる最近のSTM観察³⁾では、ABスタックグラファイトの最表面をアルゴンでたたいた空孔で互いに60度配置が異なる2種の欠陥が見出されている。今回の計算でのふたつの安定スピン配置に対応すると推測される。ただし、欠陥中心の詳細(Yahn-teller変形)やスピン密度分布はまだ観察されていない。今後の実験に期待したい。

参考文献

- 1) J. Cervenka et al, Nature Physics, **5**, 840 (2009)
- 2) T. Kondo et al, Phys. Rev. B, **86**, 035436(2012)
- 3) M. Ziatdinov et al, Phys. Rev. B, **89**, 155045(2014)



表面ナノ金属構造を有する基板の作製と 高密度 FePt 孤立微粒子形成

今里真之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)

Fabrication of surface nano metallic structure and high density isolated FePt particles

M. Imazato¹, A. Tsukamoto²

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

はじめに

本研究は BPM (Bit Patterned media) 等において重要となる, 高密度に配列した磁性微粒子形成手法を得ることを目的とする. 我々は高分子ポリマーの自己組織化/集積化現象を利用した周期的表面ナノ凹部を有する基板 (Nano dent Array :NDA) の作製¹⁾, 配列したナノシリカ粒子間に Au を充填した構造を作製することで, Au と SiO₂ の表面エネルギー差により Au 上部へと FePt 孤立微粒子形成位置誘導の可能性を報告している²⁾. 本報告では, 双対の関係となる粒径 10 nm 以下の孤立配列した Au 粒子形状の形成を目的とし, 上記 NDA 上に成膜した金属薄膜に傾斜 Ar⁺エッチングを行い形成した基板を用い高密度 FePt 孤立微粒子群を作製した.

実験

最終的な基板での表面構造スケールを決定する NDA 凹部間隔として 12 nm 程度とすることを目標とし, 分子量 8400 g/mol の両媒親性トリブロックコポリマーの自己組織化/集積化現象を用いて作製した. NDA の表面 SEM 像を Fig. 1 に示す. 凹部は稠密構造である六方細密構造状に配列し, 平均凹部径は約 5 nm, 凹部配列の間隔は 11.2~14.0 nm である下地を形成した.

DC magnetron sputter 法にて Au(2.5 nm)/Fe(1.0 nm)/NDA の順に成膜した. SEM 観察により表面に連続した金属膜が形成されたことを確認し, 膜面から 5° の低入射角度にて傾斜 Ar⁺ドライエッチングを行った. Fig. 2 に表面 SEM 像を示す. 平均粒径約 9.5 nm, 下地構造を反映していると考えられる領域の Au 粒子群の配列の間隔は 12.7~15.0 nm である. 膜面全体にわたって均一な Au ナノ粒子群の形成には至らなかったが, 明らかに下地構造とエッチング方向を反映したと思われる粒径 10 nm 以下の粒子群が形成された.

FePt 孤立微粒子の高密度化及び微細化を期待し, (A):表面ナノ金属構造上, (B):熱酸化平坦 Si 基板上にそれぞれ同条件にて FePt 孤立微粒子を形成し比較, 検討を行った. まず(A)の場合につき, 組成比が Fe₅₀Pt₅₀ となるように Pt (1.05 nm)/Fe(0.83 nm)/sub の順に成膜し, 急速昇降温熱処理 (Rapid Thermal Annealing :RTA)¹⁾ により最高到達温度 ($T_M=406$ °C), 昇温速度 ($T_R=107$ °C/s) として FePt 孤立微粒子を作製した. Fig. 3(a) に表面 SEM 像を示す. 表面ナノ金属構造上に作製した孤立微粒子群の平均粒径 ($D_a=7.63$ nm), 粒子数密度が 3.82 T particle/in² となる領域を観察した. 次に比較対象となる(B)について同条件で Pt/Fe/sub の順に成膜し RTA により $T_M=672$ °C, $T_R=112$ °C/s として FePt 孤立微粒子を作製した. Fig. 3(b) に表面 SEM 像を示す. 熱酸化平坦 Si 基板上に作製した微粒子群の $D_a=14.1$ nm, 粒子数密度は 0.76 T particle/in² である. 以上より表面ナノ金属構造上において熱酸化平坦 Si 基板上では得られなかった高密度な微細粒子群が生じたことを確認した.

まとめ

表面凹部間隔 11.2 ~ 14.0 nm の NDA を用いて Au 粒子が孤立配列した粒径 10 nm 以下の下地形状を得ることを目的とし検討を行い, 平均 Au 粒径約 9.5 nm の表面ナノ金属構造を形成した. 形成した基板を用い FePt 孤立微粒子を形成することで熱酸化平坦 Si 基板上では観察されなかった高密度な微細粒子群の存在を確認した.

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) A,Itoh J, A.Tsukamoto. Magn. Soc. Jpn. 33, 6-2, pp507-512 (2009).

2) 藤井翔太,水澤謙太,塚本新,伊藤彰義 自己集積ナノシリカを利用した金属/誘電体ナノ構造基板の作製 日本磁気学会学術講演会 (2011).

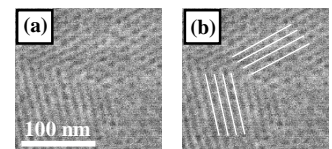


Fig. 1 SEM planer view image of NDA (b) guide to eye.

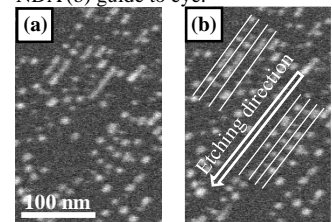


Fig. 2 SEM planer view image of etched Au/Fe/NDA thin film (b) guide to eye.

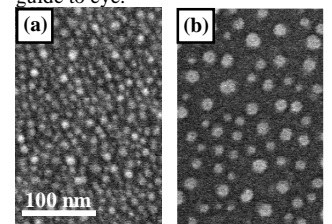


Fig. 3 SEM planer view images of FePt isolated grain. (a) on etched Au/Fe/NDA thin film, (b) on SiO₂/Si sub.

強磁性金属カイラルメタ分子における磁気共鳴

児玉俊之, 富田知志, 澤田桂*, 細糸信好, 柳久雄

(奈良先端大物質, *理研 SPring-8)

Magnetic Resonance of Ferromagnetic-Metal Chiral Meta-Molecules

T. Kodama, S. Tomita, K. Sawada*, N. Hosoi, and H. Yanagi

(GSMS-NAIST, *RIKEN SPring-8 Center)

1 はじめに

我々はこれまで、薄膜応力を利用してコバルト (Co) の螺旋構造-Co カイラルメタ分子-を作製し、磁気共鳴を調べてきた^{1,2)}。角度分解電子スピン共鳴 (ESR) 測定の結果、Co カイラルメタ分子に対して印加する磁場の角度を変えても、共鳴磁場がシフトしない特異な共鳴が得られた。この共鳴の起源として、Co 薄膜の Kittel モードの強磁性共鳴が考えられた。しかしながら、リフトオフされていない Co 残留膜からの共鳴信号と重なっていたため、詳細な検討は難しかった。そこで本研究では作製工程を改良し、残留膜の無い試料の作製を試みた。

2 結果および考察

改良した作製工程では、まずシリコン基板上にレジスト SU8 を短冊状にパターニングする。次にパーマロイ ($\text{Fe}_{21.5}\text{Ni}_{78.5}$, Py) 薄膜をマグネトロンスパッタリング装置で成膜する。そして N-メチル-2-ピロリドンに浸けると短冊は基板から剥がれる。このとき、Py 薄膜が誘起する応力のため自発的に巻き上がり、自立した Py カイラルメタ分子が形成される。これらのメタ分子の内、14 個を別のシリコン基板に移し、配向させた上でグリスで固定した。この試料に対し、Fig. 1(a) に示すように印加磁場 (H_{ext}) の角度 (θ_H) を変えて、角度分解 ESR 測定を行った。

Py カイラルメタ分子の ESR スペクトルを Fig. 1(b) に示す。 $\theta_H = 0^\circ$ のとき、115 mT に大きな共鳴ピークが見える。このピークは θ_H が 90° に近づくにつれて、強度は低下するが、共鳴磁場はほとんどシフトしない。一方で、 θ_H が 45° になると、128 mT や 150 mT に新たな共鳴が現れる。これらの共鳴は θ_H が 90° に近づくにつれて、高磁場にシフトしていく。このシフトしない共鳴とシフトする共鳴の起源は共に、Py 薄膜の三次元構造での Kittel モードの強磁性共鳴であると考えられる。講演では、Py 以外の金属カイラル構造での磁気共鳴についても報告する予定である。

References

- 1) T. Kodama, S. Tomita, N. Hosoi, H. Yanagi, submitted.
- 2) 児玉俊之, 富田知志, 細糸信好, 柳久雄, 第 37 回日本磁気学会学術講演概要集, p368, 6aD-1(2013)

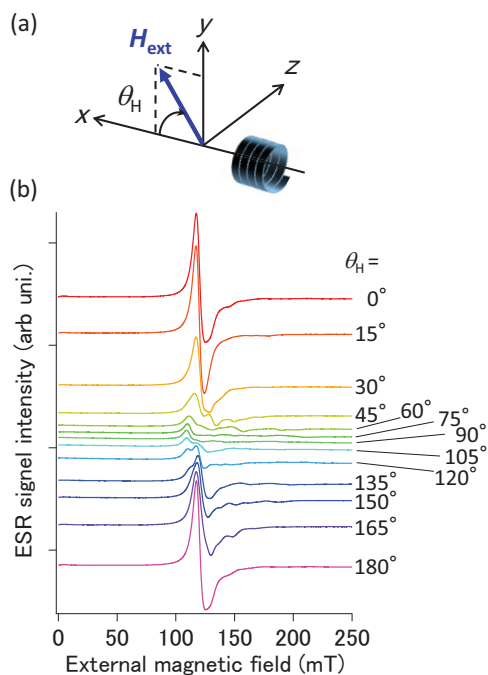


Fig. 1 (a) Schematic illustration of sample configuration in angle-resolved ESR measurements. (b) Angular dependence of ESR spectra of Py CMMs.

Co/Pt ナノドットの強磁性共鳴測定

菊池伸明, 古田正樹, 岡本 聡, 北上 修, 島津武仁
(東北大)

FMR measurement on Co/Pt multilayer nanodots

N. Kikuchi, M. Furuta, S. Okamoto, O. Kitakami, and T. Shimatsu
(Tohoku Univ.)

はじめに

スピントルクオシレータやマイクロ波アシスト磁化反転など, 磁化の共鳴現象と密接に関係するデバイスが注目を集めている. これらのデバイスでは, 大振幅の非線形領域での挙動の理解が必要であるが, 通常の強磁性共鳴 (FMR) 測定においては安定点付近の微小振動の範囲の測定にとどまっている. また, ナノ構造の FMR 測定には, トンネル接合などを利用して磁気抵抗効果による検出が広く用いられている. しかしながら, これらの手法では参照層の磁化との相対位置が信号として検出されるため, 参照層の磁化も変化するような大きな磁場のもとでは, 解析が非常に複雑となる. そこで, 本研究においては, マイクロ波帯域の交流磁場下における磁化の挙動の異常 Hall 効果による検出を試みた. 異常 Hall 効果では参照層等の複雑な構造は不要である. 今回は, 垂直に磁化した Co/Pt 多層膜ナノドットについて測定した結果を報告する.

実験方法および結果

Co/Pt 多層膜は, DC マグネトロンスパッタリングにより, SiO_2 sub./Ta(2)/Pt(25)/[Co(1.3)/Pt(0.5)]₄/Pt(10) という構成で成膜した. 括弧内の数字は nm 単位での膜厚である. 薄膜の状態での有効異方性磁界 $H_{\text{keff}}^{\text{film}}$ は -1 kOe であった. この多層膜を直径 $d = 400 \sim 3000$ nm のドット状に加工し, 異常 Hall 効果計測用の電極およびマイクロ波交流磁場印加用の Cu 線路をあわせて形成した. Fig. 1 に試料の光学顕微鏡写真の一例を示す. Cu 線路の太さは $5 \mu\text{m}$ であり, その直下に Co/Pt 多層膜ドットが配置してある. FMR の測定は, dc は膜面に垂直に, マイクロ波交流磁場を膜面内に印加した状態で行った. この配置では, 磁化は膜面に垂直な軸を中心に歳差運動を行うため, それに伴い磁化の垂直成分が減少する. その磁化の変化を Hall 効果の変化量として検出した. なお, 本研究では, 得られる信号が微弱であるため, 交流磁場強度を約 10 kHz で振幅変調し, 同期した Hall 効果の変化をロックインアンプで検出した. Fig. 2 に, 周波数 $f_{\text{rf}} = 7$ GHz, 振幅 $H_{\text{rf}} = 80$ Oe のマイクロ波交流磁場下で測定した直径 400 ~ 3000 nm の Co/Pt ドットの異常 Hall 効果の変化量 ΔV_{AHE} を dc 磁場 H_{dc} の関数として示す. いずれの場合にも, 共鳴に伴う磁化の垂直成分の減少によるディップがみられた. 直径の減少に伴い, ディップの位置は反磁界の減少に対応して低磁場側にシフトした. また, 直径 400 nm の場合には, 明瞭に分離した複数のディップが観測された. これは, 波数の異なる定在波間のエネルギー差が増加したことに対応する.

謝辞 本研究の一部は, 文科省「ナノマクロ物質・デバイス・システム創製アライアンス」および科研費, JST「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」ならびに SRC からの援助の下行われた.

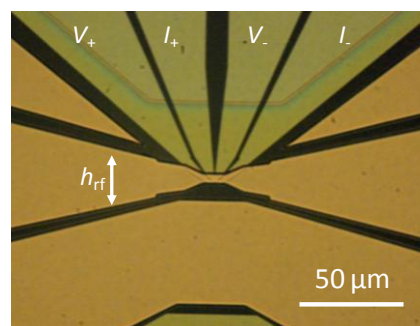


Fig. 1 Optical microscope image of AHE measurement device with a Cu coplanar waveguide for rf field application.

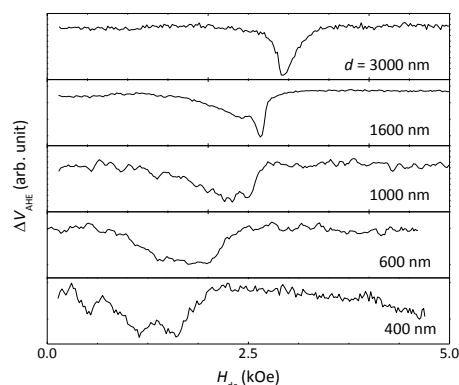


Fig. 2 AHE voltage change ΔV_{AHE} of single Co/Pt multilayer dots with diameters $d = 400 - 3000$ nm as a function of dc field H_{dc} . ($f_{\text{rf}} = 7$ GHz, $h_{\text{rf}} = 80$ Oe)

W/Fe/W (001)エピタキシャル 3 層膜の 巨大な負の垂直磁気異方性

松本勇輝¹, 岡本聡¹, 菊池伸明¹, 北上修¹, 三浦良雄²
(¹東北大, ²京都工芸繊維大)

Large negative magnetic anisotropy in epitaxial trilayer of W/Fe/W (001)
Y. Matsumoto¹, S. Okamoto¹, N. Kikuchi¹, O. Kitakami¹, and Y. Miura²
(¹Tohoku Univ, ²Kyoto Institute of Technology)

はじめに

負の一軸異方性を発現する物質としては、これまでに CoIr 合金[1]や Fe/Co 多層膜[2]などが知られており、その値は -0.8×10^{-7} erg/cc (CoIr), -1×10^{-7} erg/cc (Fe/Co)に達する。これらは垂直記録媒体の裏打ち層やスピントルク発振器のフリー層などへの応用が期待されている。本研究では新たな材料として、W/Fe/W(001)において大きな負の垂直磁気異方性が観測されたので報告する。

実験方法

分子線エピタキシー(MBE)によって、MgO sub./W (10)/Fe (t_{Fe})/W (3)3 層膜を作製した。()内は各層の膜厚(単位 nm)である。基板は MgO (001)とし、到達真空度は 3×10^{-7} Pa 以下である。まず 800°Cで基板をフラッシング後、同温度に保ったまま W 下地を製膜、その後室温まで冷却後に Fe, W の製膜を順次行った。構造評価には RHEED および XRD, 磁気特性の評価には VSM および異常ホール効果(AHE)測定を行った。

実験結果

Fig.1に W/Fe/W3 層膜の RHEED 像を示す。解析の結果、以下の方角関係でエピタキシャル成長していることが確認出来た。

MgO (001)[100] || W (001)[110] || Fe (001)[110]
|| W (001)[110]

なお、下地膜 W (10 nm)の RHEED 像では (2×2)の表面再構成が確認でき、また XRD においてはメインピークの周囲にフリンジ回折が確認でき、平滑かつ結晶性に優れた下地膜が得られているものと判断できる。格子歪として c/a を評価したところ、 $t_{Fe} \sim 1$ nm を境界にして緩和が生じており、 $t_{Fe} < 1$ nm では $c/a \sim 0.96$ であった。Fig.2に垂直磁気異方性 K_u の Fe 膜厚(t_{Fe}) 依存性を示す。 t_{Fe} の減少に伴い、 K_u が大きな負の値をとり、 $t_{Fe} = 0.5$ nm において -2×10^{-7} erg/cc (300K), -3.5×10^{-7} erg/cc (10 K)であり、著者らの知る範囲では、これまでに報告されている中で最大の負の垂直磁気異方性が得られた。当日は第一原理計算の結果も併せて報告する。

参考文献

- 1) N. Kikuchi et al, J. Phys.: Condens. Matter **11** L485 (1999).
- 2) S. Okamoto et al, J. Magn. Soc. Jpn. **33**, 451 (2009).

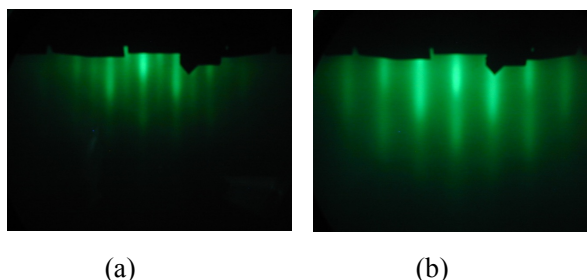


Fig. 1 RHEED patterns of MgO/W (a) and MgO/W/Fe (b). E-beam is parallel to MgO[110].

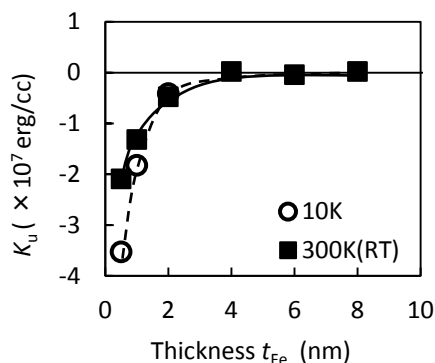


Fig. 2 Fe layer thickness (t_{Fe}) dependence of perpendicular magnetic anisotropy K_u for W/Fe/W trilayer

結晶粒内で反強磁性的結合を有する CoCrPt グラニューラ 垂直磁気記録媒体の磁気特性と磁化反転機構

中山湧稀, 堀田明良, 島津武仁, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修
(東北大学)

Magnetic properties and magnetization reversal for CoCrPt granular perpendicular media consisting of anti-ferromagnetic coupling grains

Y. Nakayama, A. Hotta, N. Kikuchi, S. Okamoto, T. Shimatsu, and O. Kitakami
(Tohoku University)

はじめに MAMR (Microwave Assisted Magnetic Recording) は, 将来の高密度磁気ハードディスクの有望な記録方式である. グラニューラ垂直磁気記録媒体では粒子間の静磁的な相互作用 (双極子相互作用) が磁化の反転磁界分散を引き起こす. そのため, 結晶粒内で磁化を反強磁性的に結合させることで双極子相互作用を低減させた媒体を MAMR 記録に用いて, 強磁性共鳴により再生する方法が検討されている^{1,2)}. 反強磁性的な結合を取り入れた垂直媒体は熱安定性向上のために検討されたことがあるが³⁾, 従来の記録方式では再生出力が低下する等の理由から応用に至らなかった. 本研究では, 結晶粒内で反強磁性的結合を有する CoCrPt-TiO₂ グラニューラ垂直媒体を作成し, その磁化機構と MAMR へ向けた同媒体の課題を議論した.

実験方法 CoCrPt-TiO₂ グラニューラ媒体は DC マグネトロンスパッタ法により焼結ターゲット用いて形成した. 薄膜は 2.5 インチディスクを 10mm 角にカットした基板の上に, Ru 下地膜を用いて室温で形成した. CoCrPt-TiO₂ 層内部に設けた Ru 層の厚みにより, 上下の CoCrPt の反強磁性的な磁化結合強さを調整した.

結果および考察 Fig.1 は, CoCrPt(15 nm) 単層媒体, ならびに, 上から CoCrPt(3 nm)/Ru(0.7 nm)/CoCrPt(12 nm) の反強磁性結合媒体 (AFC 媒体) の磁化曲線と, ΔM プロット⁴⁾の結果を示した. AFC 媒体の残留磁化は 360 emu/cm³ と単層媒体の残留磁化の約 60% であり, AFC 媒体の上下層が反強磁性結合した際の見かけの磁化量に比例している. AFC 媒体の ΔM プロットの最大値 ΔM^{\max} (190 emu/cm³) ならびに図中に示した反転磁界分散 ΔH (約 4.0 kOe) も, 見かけの磁化量に比例して単層媒体の約 60% に低下していた. このことは, 粒子分離度を始めとするグラニューラ構造を大きく変化させずに, 結晶粒内に AFC 構造が実現できていることを示唆している. Fig.2 には, 見かけの磁化量がゼロとなる CoCrPt(3 nm)/Ru(0.7 nm)/CoCrPt(3 nm) AFC 媒体の磁化曲線を示した. 残留磁化状態から磁界を増加させた際の磁化反転は非常にシャープになっており, 磁化の反転磁界分散が, 見かけの磁化量に比例して低下することを示している.

参考文献

- 1) T. Yang, T. H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, K. Mizushima and R. Sato, *J. Appl. Phys.*, **114**, 213901 (2013).
- 2) H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, K. Mizushima and R. Sato, *Nanotechnology*, **25**, 245501 (2014).
- 3) Erol Girt and H. J. Richter, *IEEE Trans Magn.*, **39**, 2306 (2003).
- 4) P. E. Kelly, K. O'Grady, P. I. Mayo, R. W. Chantrell, *IEEE Trans. Magn.*, **25**, 3881 (1989),

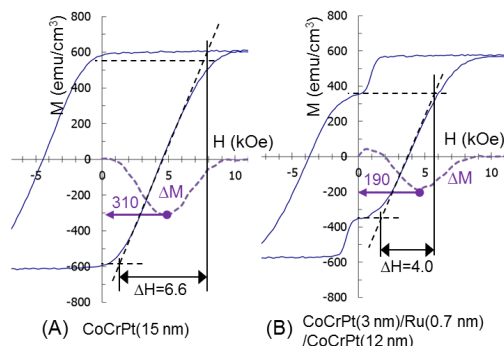


Fig.1 Magnetization curves for (A) single layer medium and (B) AFC medium.

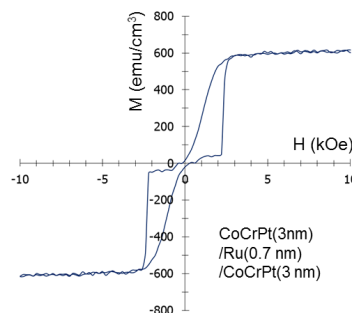


Fig.2 Magnetization curve for CoCrPt(3nm)/Ru(0.7nm)/CoCrPt(3nm) AFC medium.

$L1_0$ -FePt 多結晶垂直磁化膜の Pt 表面偏析と規則度の Pt 組成依存性

堀田明良*, 小野拓也***, 島津武仁*, 菊池伸明*, 岡本 聡*, 北上 修*
(*東北大学, **富士電機)

Pt surface segregation and ordering of $L1_0$ -FePt perpendicularly magnetized polycrystalline films

A. Hotta*, T. Ono***, T. Shimatsu*, N. Kikuchi*, S. Okamoto*, and O. Kitakami*
(*Tohoku University, **Fuji Electric Co., Ltd.)

はじめに $L1_0$ -FePt は 7×10^7 erg/cm³ 程度の大きな一軸磁気異方性 K_u を有し^{1,2)}, $L1_0$ -FePt グラニューラ垂直磁化膜は次世代磁気記録媒体の有力候補である。我々は、超清浄雰囲気中のスパッタ法を用いることで、成膜温度 300°C でも $K_u = 3.5 \times 10^7$ erg/cm³ を有する $L1_0$ -FePt 多結晶膜が形成できることを報告している³⁾。しかし、MgO 基板に形成した単結晶膜では、膜厚を 2 nm まで低下させると規則度および K_u が低下しており⁴⁾、これは多結晶膜でも同様であった。 $L1_0$ -FePt の膜面垂直方向への規則化挙動に関する解析の結果、Pt の表面偏析現象が観察されたので、本研究では、 $L1_0$ -FePt 多結晶膜の Pt の表面偏析と規則度の Pt 組成依存性について議論した。

実験方法 試料は、超高真空性能を有するマグネトロンスパッタ装置を用いて形成した。FePt の組成は、RBS により分析した。多結晶垂直磁化膜は、2.5 インチガラスディスク上に、(001)配向した MgO 多結晶膜等の下地膜を形成し、その上にエピタキシャル成長させた。 K_u は異常ホール効果を用いた磁化方位検出法を利用して磁気トルク法により求めた (最大印加磁界 7T)。

結果及び考察 Fig.1 は、Cs(球面収差補正)-STEM で観察した $L1_0$ -FePt 多結晶膜の HAADF 像である。膜の最表層において Pt が 2 層連続で形成されており、単結晶膜でも同様に観察された。このことは、NiPt 等の薄膜堆積過程で観察されている Pt の表面偏析^{5,6)}が FePt 薄膜の堆積中にも生じており、膜面垂直方向に規則化を促す要因の一つになっていることを示唆している。Fig.2 には、膜厚 2nm および 10nm の FePt 多結晶膜における K_u の Pt 組成依存性を示した。いずれの膜厚でも K_u は 50at.% Pt において最大値を示し、46at.%Pt 組成を除き、膜厚 2 nm の K_u は 10 nm よりも低い。薄膜堆積初期から Pt 表面偏析が生じている場合、膜厚 2 nm の膜中 Pt 組成は設計組成よりも低下し、 K_u が最大となる組成が高 Pt 側にシフトすると考えられるが、そのような結果は得られていない。このことから、薄膜堆積初期段階では Pt 表面偏析が生じず、膜厚 2 nm での規則度の低下に結びついているものと考えられる。一方、46at.%Pt 組成では、膜厚 2 nm の K_u は比較的高いものの、膜厚 10 nm になると K_u が低下した。構造解析の結果、膜厚の増加にともない膜面内方向のバリエーションが生じているためであり、低 Pt 組成域におけるバリエーションの形成は、厚い薄膜における先行検討の結果⁷⁾と定性的に一致した。

参考文献 1) R. F. C. Farrow, et al., *JAP*, **79**, 5967 (1996), 2) S.

Okamoto, et al., *PRB*, **66**, 024413 (2002), 3) T. Shimatsu, et al., *JAP*, **109**,

07B726 (2011), 4) A. Hotta, et al., *JAP*, **115**, 17B712 (2014), 5) Y.

Gauthier, et al., *PRB*, **31**, 6216(1985), 6) G. Treglia and B. Legrand, *PRB*,

35, 4338(1987), 7) K. Barmak, et al, *JAP*, **95**, 7501 (2004).

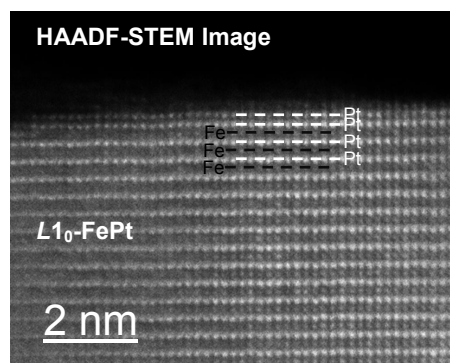


Fig.1 HAADF-STEM cross sectional image of $L1_0$ -FePt polycrystalline film.

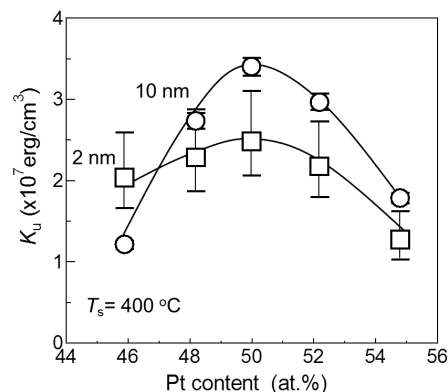


Fig.2 K_u of $L1_0$ -FePt polycrystalline film as a function of Pt content.

稠密面配向 CoPt 合金スパッタ薄膜の原子積層構造および一軸結晶磁気異方性 (I)

○斉藤伸, 野沢直樹, 日向慎太郎, 高橋研 (東北大学)

Atomic Layer Stacking Structure and Uniaxial Magnetocrystalline Anisotropy of CoPt Alloy Sputtered Films with Close-packed Plane Orientation (I)

S. Saito, N. Nozawa, S. Hinata, and M. Takahashi (Tohoku Univ.)

1. はじめに

次世代のエネルギーアシスト磁気記録媒体では、室温での高い熱擾乱耐性が求められ、 10^7 erg/cm^3 を越える高い一軸結晶磁気異方性 (K_u) を備えた材料の開発が必須である。我々は、六方晶 (hcp) Co-Pt 系合金を次世代媒体に適用することが、現行の成膜プロセスや結晶配向制御用下地材料についての知見を引き継げるため有益であると考え、本合金の稠密面配向薄膜の材料探索を続けている。Co-Pt 合金の結晶構造と磁性に関する研究の歴史は古いですが、スパッタ法により作製される薄膜では、新たな規則相や積層欠陥 (SFs) 等、平衡状態図に記載されない準安定構造が形成され、またそれらに対応する K_u は $10^6 \sim 3 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ 程度の様々な値が報告されており、未だ構造と K_u の系統的な理解に至っていない。一般に Co 基合金の K_u はスピン-軌道相互作用によってもたらされることが知られており、六方晶の格子定数比 (c/a) や SFs, 異種原子の配列周期性により大きく影響を受けると考えられるため、スパッタ薄膜についてもこれらを定量的に評価する必要がある。

一方で我々は、稠密面配向薄膜中の SFs の導入度合いをインプレーン X 線回折装置により定量評価する解析法を確立しており、これを種々の非磁性遷移金属合金スパッタ薄膜 (host; Ru, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt, Cu, Au Additional; Cr, Mo, W, Ta, Ti) について適用した結果、合金の平均価電子数 9 が hcp と面心立方構造 (fcc) との臨界であることを見出している。このような観点からも 9 族元素と 10 族元素との合金である強磁性 Co-Pt 合金薄膜中の SFs の導入量には興味を持たれる。そこで本講演では、種々のプロセス条件にて作製した c 面配向 CoPt 合金薄膜の原子積層構造を評価した結果を説明する。

2. 実験結果

Fig. 1 および Fig. 2 に種々の基板温度 T_{sub} にて作製した hcp $\text{Co}_{100-x}\text{Pt}_x$ 薄膜の SFs の導入度合い P_{fcc} と格子定数比 c/a を Pt 濃度 x に対して示す。横軸副軸には合金の平均価電子数も付した。Fig. 1 によると $T_{\text{sub}} \geq 300^\circ\text{C}$ では、 P_{fcc} は純 Co 薄膜の 0.7% 程度から $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ 薄膜の 100% に向け x に対して単調に増加している。Fig. 2 によると、 c/a は T_{sub} に依らず $x < 50 \text{ at}\%$ では剛体球モデルの理論値 1.633 より小さく、 $x = 50 \text{ at}\%$ 付近でほぼ 1.633 となっている。すなわち Co-Pt 合金薄膜は、hcp-fcc の共有結合をもたらす混成軌道の安定性が拮抗している材料系であり、その原子積層構造は $T_{\text{sub}} \geq 300^\circ\text{C}$ では、概して平均価電子数に対応して、軸比と SFs 導入度合いとが決定づけられていることがわかった。

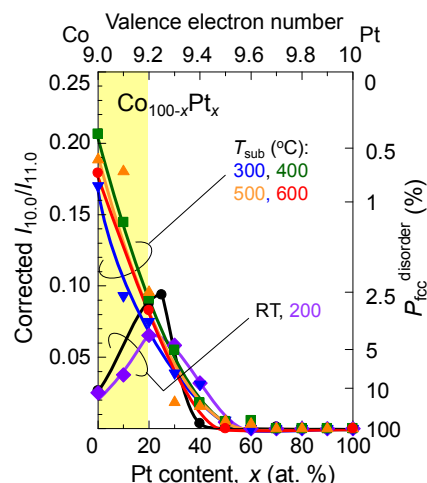


Fig. 1 Integral intensity ratio of $I_{10.0}$ to $I_{11.0}$ in in-plane XRD corrected by Lorentz and polarization factors for $\text{Co}_{100-x}\text{Pt}_x$ sputtered films. The second vertical axis corresponds to fcc-like stacking faults probability.

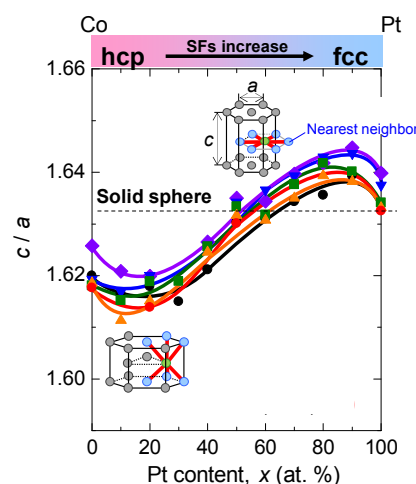


Fig. 2 Lattice constant ratio, c/a for $\text{Co}_{100-x}\text{Pt}_x$ sputtered films. The theoretical value of c/a (1.633) for solid sphere model is also shown by a broken line.

稠密面配向 CoPt 合金スパッタ薄膜の原子積層構造および一軸結晶磁気異方性 (II)

○齊藤伸, 野沢直樹, 日向慎太郎, 高橋研, 澁谷一成*, 星野和哉*, 栗屋聡*
(東北大学, *材料科学技術振興財団)

Atomic Layer Stacking Structure and Uniaxial Magnetocrystalline Anisotropy of CoPt Alloy Sputtered Films with Close-packed Plane Orientation (II)

S. Saito, N. Nozawa, S. Hinata, M. Takahashi, K. Shibuya*, K. Hoshino* and S. Awaya* (Tohoku Univ., MST)

1. はじめに

高い一軸結晶磁気異方性 (K_u) を備えた材料開発の一つの指針として, 規則相の探索が有望視されている. 稠密面配向 Co-Pt 合金スパッタ薄膜においては, 平衡状態では形成されないスパッタ膜特有の構造として $\text{Co}_{75}\text{Pt}_{25}$ 組成近傍で $m\text{-D0}_{19}$ 型構造, $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ 組成近傍で $L1_1$ 型構造の存在が超格子回折線の観測を根拠として報告されている. しかしながらこれらの実験報告によると試料の規則度は大きくても 0.6 程度であり, 各サイトの原子まで特定した構造解析は行われていない. 著者らは稠密面配向 Co-Pt 合金薄膜では, 膜面と平行に積層欠陥が導入されやすいこと, すなわち fcc 原子積層と hcp 原子積層との形成安定性が拮抗していることを別途見出ししており, そのような合金系でも規則相が存在するのか興味を持たれる. 本研究では, 超格子回折線が観測される Co-Pt 合金スパッタ薄膜に形成される原子積層構造について, プローブ径 1\AA 以下の走査型透過電子顕微鏡の高角散乱環状暗視野法 (HAADF 法) にて直接評価したので報告する.

2. 実験結果

Fig. 1 に基板温度 400°C で作製した $\text{Co}_{100-x}\text{Pt}_x$ 薄膜の out-of-plane X 線回折プロファイルを示す. 純 Co 薄膜において 44.5° 付近に観測された hcp (00.2) 回折線は x の増加に伴い, 純 Pt 薄膜で 39.8° 付近に観測される fcc (111) 回折線へと滑らかに低角側にシフトしている. これを基礎線とすると, $10 \leq x \text{ (at\%)} \leq 50$ の薄膜では基礎線の 2 倍の面間隔に相当するブラッグ角に超格子線が観測されていることがわかる. この超格子線に注目すると, 積分強度が $\text{Co}_{80}\text{Pt}_{20}$ 薄膜で最大となっていること, 並びに $x \geq 20 \text{ at\%}$ ではブロードニングを起こしていることが特筆される.

Fig. 2 に $T_{\text{sub}} = 300^\circ\text{C}$ で作製した $\text{Co}_{80}\text{Pt}_{20}$ 薄膜の断面方向の HAADF 像を示す. 各結像点は奥行き方向に連なる原子群に対応する. 結像点の位置関係に注目すると, ほぼ hcp 原子積層していることがわかる. またコントラストに着目すると, 明点と暗点は概して層状かつ交互に配列しており, 同一原子層内では結像点にコントラストがついていない. これらのことから本薄膜では, 原子稠密面内では Pt と Co がランダムにサイトを占めており, 膜厚方向には Pt リッチ, Pt プア層が交互積層された原子層組成変調構造が形成されていることがわかった. この CoPt 合金スパッタ薄膜中にみられる原子層組成変調構造は, 最隣接原子が上下の稠密面内に存在すること (交互積層), Co-Pt 原子対を可能な限り多く形成すること (層状配列) という配列原理により形成されたものと推察している.

講演では, 積層欠陥の導入度合い, 並びに組成変調度合いに対する K_u の変化について, 結晶磁気異方性の高次項の発現についても触れながら説明する.

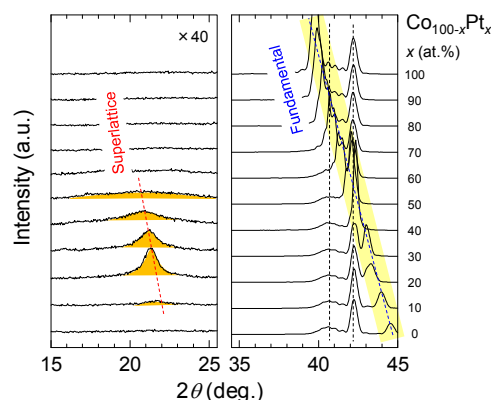


Fig. 1 Out-of-plane XRD for $\text{Co}_{100-x}\text{Pt}_x$ sputtered films with $(00.2)_{\text{hcp}}$ and/or $(111)_{\text{fcc}}$ sheet texture sputtered under $T_{\text{sub}} = 400^\circ\text{C}$.

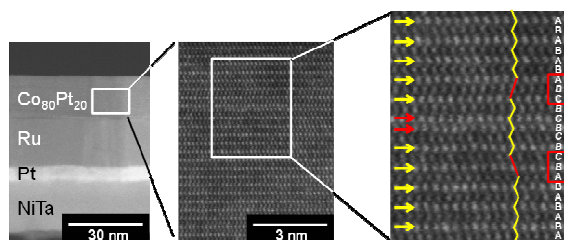


Fig. 2 HAADF image for a $\text{Co}_{80}\text{Pt}_{20}$ sputtered film fabricated under $T_{\text{sub}} = 300^\circ\text{C}$.

原子層積層制御した Ni / Co 人工格子の磁気特性

塩田明弘、島田淳平、関剛斎、高梨弘毅

(東北大金研)

Magnetic property of Ni / Co multilayers prepared by atomic layer control

A. Shioda, J. Shimada, T. Seki, and K. Takanashi

(IMR, Tohoku Univ.)

はじめに 磁気記録媒体や磁気記憶メモリなどの高密度化には、ナノサイズでの磁化の熱安定性を確保するために、高い一軸磁気異方性(K_u)を有する材料が必要となる。FePt や FePd などの $L1_0$ 型規則合金は高 K_u 材料の代表格であるが、Pt 等の貴金属が含まれるため高価であることが問題となっている。これまで、Co-Fe 系[1]、Fe-Ni 系[2]において規則構造の形成による一軸磁気異方性の増大が検討されてきた。一方で、Ni-Co 系では、多層膜における垂直磁気異方性の発現は多く報告されているものの[3]-[5]、規則構造を形成させる試みは少ない。そこで本研究では、貴金属や希土類元素を含まない材料系として Ni-Co 合金に着目する。Ni および Co 層厚を原子層レベルで制御し、Ni / Co 人工格子において各層厚と磁気特性との相関を系統的に調べた。

実験方法 分子線エピタキシー (MBE) 法を用いて、サファイア基板 a 面上に V(110) を 10 nm、Au(111) を 10 nm 成長した後に、Ni 層と Co 層を交互に積層させて人工格子を作製した。本研究では、およそ 0.20 nm が一原子層に相当すると計算した。X 線回折により構造解析を行い、原子間力顕微鏡で表面形態を評価した。磁気特性の評価には極カー効果および振動試料型磁束計を用いた。

実験結果 図 1 に、(a)[Ni(0.6 nm) / Co(0.2 nm)]₁₀ 膜と (b)[Ni(0.2 nm) / Co(0.2 nm)]₂₀ 膜の磁化曲線をそれぞれ示す。いずれも膜面垂直磁場を印加した磁化曲線の角形性が高く、垂直磁化膜となっている。 K_u の値は、それぞれ 8.4×10^6 (erg / cc) および 6.8×10^6 (erg / cc) であり、Ni 膜厚の減少に伴い K_u は減少することが分かった。しかしながら、一原子層レベルで交互積層させた試料においても、垂直磁化が得られたということは、各層が平坦に成長しており、原子層積層制御の効果が現れていることを示唆している。発表では、界面磁気異方性の大きさについても議論する予定である。

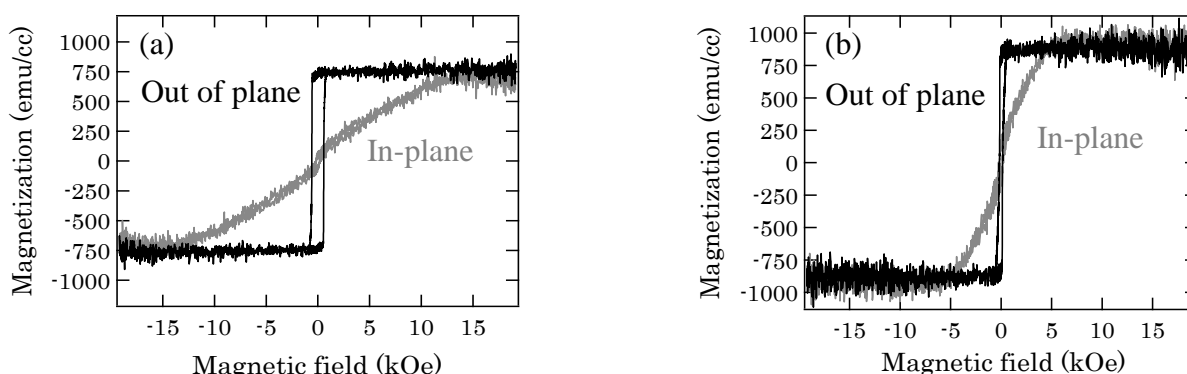


Fig. 1. Magnetization curves of (a) [Ni(0.6nm) / Co(0.2nm)]₁₀ and (b) [Ni(0.2nm) / Co(0.2nm)]₂₀.

謝辞 本研究は、科研費 基盤研究(S) (No. 25220910)による支援を受けて行われた。

- 参考文献** [1] T. Burkert *et al.* PRL **93**, 027203 (2004) [2] T. Kojima *et al.* JJAP **51**, 062601 (2012).
 [3] G. H. O. Daalderop *et al.* PRL **68**, 682-685 (1992) [4] S. Girod *et al.* APL **94**, 262504 (2009)
 [5] S. Fukami *et al.* APEX **6**, 073010 (2013)