

新博士紹介

1. 氏名 谷内敏之
2. 論文提出大学 東京大学
3. 学位種類 博士 (工学)
4. 取得年月日 2007年3月
5. 題目 放射光光電子顕微鏡による磁性ナノ構造の磁区構造に関する研究
6. 使用施設 KEK/PF-AR NE1B, KEK/PF BL-28, SPring-8 BL17SU, BL25SU, BL39XU

7. 要旨

[序]

近年、磁気記録デバイスは超高密度化に伴って微小化が進み、1ビットあたりの記録領域はナノメートルサイズに達している。ミクロン～サブミクロンサイズの磁性体の磁区構造はバルクと異なり、磁気物性が形状や大きさに強く依存する。このような磁性体の磁区構造を直接観察することは磁気記録デバイスへの応用のみならず微小磁性体の磁区形成に関する基礎的な理解の上でも非常に重要である。微小磁性体の磁区観察手法としては、現在漏れ磁束を検出する磁気力顕微鏡 (MFM) が主に用いられてきたが、例えば還流磁区構造やメゾスコピック磁性体特有の渦構造の磁化分布を持った vortex 構造は磁束が内部で閉じており磁化分布の直接観察は困難である。これを可能にする手法として光電子顕微鏡 (PEEM) が注目されている。PEEM は光により放出した電子を結像するイメージング技術であり、エネルギー可変かつ左右偏光切り換え可能な放射光を利用した X 線磁気円二色性 (XMCD) との組み合わせにより磁気モーメントの高空間分解能マッピングが可能である。

本研究では放射光 PEEM システムの開発を行い、メゾスコピック磁性体の磁区構造の直接観察を試みた。PEEM システムは高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と共同で開発し、KEK PF-AR の AR-NE1B に接続して実験を行った。開発した放射光 PEEM システムの性能評価を行ったところ、約130 nm と高い空間分解能を有していることが分かった¹⁾。この装置を用いて、「パーマロイ微細構造における vortex カイラリティ制御」および「 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜およびナノ構造の磁区観察」を目的として研究を行った。具体的には、前者ではメゾスコピック磁性体における磁気渦構造を制御するための磁気デバイスの設計と実証を、また後者では強相関酸化物薄膜における磁区形成解明を行った。

[パーマロイ微細構造における vortex カイラリティ制御]

ミクロン～サブミクロンサイズのメゾスコピック磁性体ディスクは vortex と呼ばれる磁気渦構造を持つことが知られている。Vortex の状態 (トポロジー) を表す一つの

指標として、磁気渦の向きの時計回り・反時計回りを示すカイラリティが存在する。vortex のカイラリティを制御することにより、ビット間の磁氣的干渉のない磁気ランダムアクセスメモリー (MRAM) を実現できることが期待されている。MRAM は DRAM に比べて不揮発性、低消費電力、高速書き込み、高耐久性という優れた点をもつが、従来の MRAM では各記録ビットの磁化による磁氣的な相互干渉が超高密度化の壁となっている。この問題を解消する方法として、磁束が閉じた vortex の利用が検討されている。しかしながらこれにはカイラリティを安定に制御する方法を見出す必要がある。そこで本研究ではカイラリティ制御を目標として、磁場によるカイラリティ制御手法を考案し、PEEM によるカイラリティ制御の実証を試みた。

はじめにマイクロ磁気シミュレーションを用いて、カイラリティ制御の実現に不可欠である vortex 構造の磁化反転過程を詳細に調べた。その結果、2つの vortex が同時に存在するような磁化反転過程が2種類あり、互いに異なる磁化曲線を持つことが分かった²⁾。

計算は結晶磁気異方性を持たないパーマロイを用いて行った。形状は直径100～1000 nm のディスクであり、有限要素 (セル) の大きさは5～10 nm で行った。マイクロ磁気シミュレーションの結果、2つの vortex が同時に存在するような磁化反転過程が2種類あり、互いに異なる磁化曲線を持つことが分かった。これら2種類の磁化反転過程は生成する2つの vortex のカイラリティが等しいモードと異なるモードに分類することができる。前者ではカイラリティが等しく2つの vortex は結合して単一 vortex 状態へと変化するが (C-shaped mode)、後者ではカイラリティが異なるため2つの vortex は結合することなく、ゼロ磁場においても2つの vortex が存在することが明らかになった (S-shaped mode)。これら2種類の磁化反転モードにおけるディスク内の磁化分布の変化についてさらに詳細に検討した結果、磁化分布の対称性がモードを決定していることを明らかにした。

以上のシミュレーションで得られた知見から、ディスク形状の対称性を変化させ、さらに vortex 生成位置を決定することで磁化反転モードの制御やカイラリティの制御が可能になると考えることができる。本研究では Fig. 1 に示す模式図のような形状の制御素子を新しく考案しシミュレーションを行った。その結果、磁場の印加方向によって、残留状態で時計回りと反時計回りのカイラリティを持った vortex が生成し、カイラリティ制御の可能性が示唆された。

そこでこの形状の素子を実際に電子ビームリソグラフィとリフトオフによる微細加工により作製し、PEEM を用いてカイラリティ制御の実証を試みた。測定は円偏光アンジュレータビームライン PF-AR NE1B (KEK) および

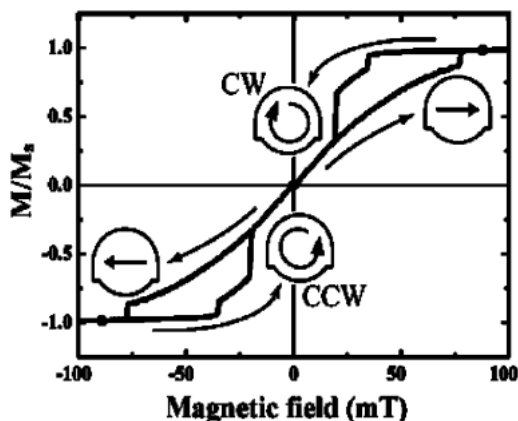


Fig. 1 Magnetization curve and schematic images of magnetization configuration on chirality-controlled device calculated by micromagnetics simulation.

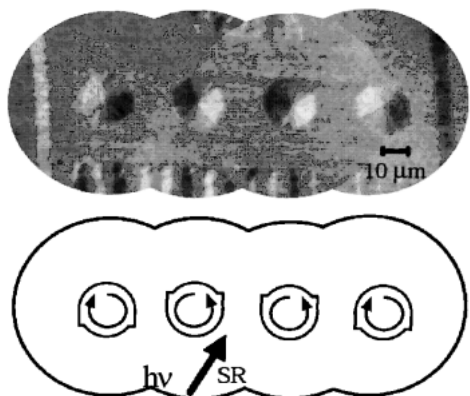


Fig. 2 XMCD-PEEM image and geometry of designed permalloy devices for chirality control. The diameter of the devices is 20 μm and the thickness is 50 nm. The photon energy is set at the Ni L_3 edge. The arrows in the devices indicates clockwise and counterclockwise magnetization rotations.

BL25SU (SPring-8) で行った。測定結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 上段はカイラリティ制御素子における、右方向磁場印加後にゼロ磁場に戻した時の磁気イメージである。明るい領域は光の入射方向に対して平行の磁化を、暗い部分は反平行の磁化を示している。Fig. 2 下段に、実験結果で示す素子の形状と測定より明らかになったカイラリティの模式図を示す。素子の向きと磁場の印加方向の関係をみると4つ全ての素子のカイラリティが制御されていることが分かる。よってこの手法によるカイラリティ制御が実現可能であることが実証された²⁾。また直径1~20 μm のサイズの素子をそれぞれ複数作製しPEEM観察を行ったところ、全ての素子において室温で安定な制御が可能であると分かった。この素子では磁化分布の対称性に大きな影響を与える反磁界エネルギーの安定化が熱揺らぎに耐えられるほど十分に大きいため、カイラリティ制御が実現したものと考えられる。

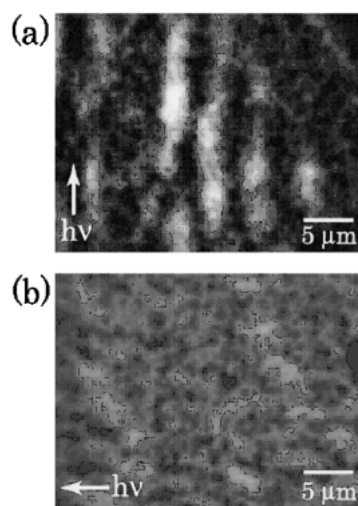


Fig. 3 Magnetic images of ferromagnetic LSMO ($x=0.4$) thin film taken at room temperature ($T=300\text{ K}$) with the photon energy of 641 eV corresponding to the Mn L_3 -edge. The incident directions of the synchrotron radiation beam are along the directions of (a) $[100]$ and (b) $[010]$, where the atomic step direction is aligned with the $[100]$ direction.

[La_{1-x}Sr_xMnO₃ 薄膜およびナノ構造の磁区観察]

巨大磁気抵抗素子のような磁気記録デバイスでは、磁性薄膜や微小磁性体における磁気異方性や磁区形成がデバイス特性に大きな影響を与えるため、デバイス特性の向上にはそれらを制御することが重要な技術となる。ハーフメタリック伝導性を有するLa_{1-x}Sr_xMnO₃ (LSMO) は次世代トンネル磁気抵抗素子への応用が期待されている。表面にステップ&テラス構造を持つ基板上に成長したLSMOエピタキシャル薄膜は、ステップに誘起された一軸磁気異方性が発現することが知られている。本研究ではステップ誘起一軸磁気異方性を持ったLSMO薄膜の磁区形成を明らかにするため、PEEMによる磁区構造観察を行った。LSMO ($x=0.4$) エピタキシャル薄膜はレーザーMBE法を用いて $[100]$ 方向に原子ステップを持つSrTiO₃ (100)基板上に作製した(テラス幅: 100~200 nm)。PEEMによる磁区観察は円偏光アンジュレータビームラインBL25SU (SPring-8) にて行った。

Fig. 3 に LSMO 薄膜の磁区構造観察結果を示す。Fig. 3 (a)は放射光が基板のステップ方向 ($[100]$) に対して平行に入射したときの像である。観察結果から薄膜の磁区がステップ方向に細長く伸びていることが分かった。一方、Fig. 3 (b)に示すように放射光をステップ方向に対して垂直に入射したときの像ではこのような磁気イメージは観測されなかった。以上の結果は、ステップ基板上に成長させたLSMO薄膜が、約2~3 μm の幅を持った細長い180°磁区が支配的に形成される一軸磁気異方性を持っていることを示している³⁾。このような磁区形成はSrTiO₃基板表面の原子ステップによって誘起されたものと考えられる。また

Fig. 3(b)には薄膜中に小さなコントラストが存在している。PEEMの空間分解能(100 nm程度)を考慮すると、これはノイズではなく有意な磁化成分を示していることが分かる。このことは磁化容易軸はステップ方向に支配的であるが、それとは異なった方向の面内磁化成分の存在を示していると考えられる。このような磁区形成は、ステップによって誘起された一軸の磁気異方性に加え、二軸の結晶磁気異方性が関係しているためだと予想される。以上の結果は磁気記録デバイスの特性向上に向けた重要な知見を与えるものと期待される。

[まとめ]

高い空間分解能を有する放射光PEEMシステムを開発した。またマイクロ磁気シミュレーションを用いて vor-

texの磁化反転過程を調べた。これをもとにカイラリティ制御素子を設計し、PEEM観察を行い制御の実証に成功した。一方、ステップ誘起磁気異方性を有するLSMO薄膜の磁区形成をPEEMを用いて観察した。その結果、磁区形成に対するステップ誘起磁気異方性と形状異方性の効果ならびにサイズ効果の影響が明らかとなった。

参考文献

- 1) T. Taniuchi, M. Oshima, H. Akinaga and K. Ono: *J. Electron Spec. Relat. Phenom.* **144-147**, 741 (2005).
- 2) T. Taniuchi, M. Oshima, H. Akinaga and K. Ono: *J. Appl. Phys.* **97**, 10J904 (2005).
- 3) T. Taniuchi *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **89**, 112505 (2006).

一口メモ

石楠花 (シャクナゲ)

ツツジ科シャクナゲ属の常緑性低木で、ニホンシャクナゲは高山で自生し、しばしばハイマツと混生する。生育には水はけがよくて保水性がある土壌を好み、空気中の湿度が高い場所が理想的である。最近、外来種の西洋シャクナゲも多く見られ、平地でも簡単に栽培できる。葉は革質の長楕円形で、光沢のある表面は深緑色で、裏面には淡褐色または白色密毛を生ずる。初夏、つつじに似た5弁から7弁の合弁花を多数開く。その花の色は白、ピンク、赤、紫とさまざまである。

私は世界各地に友人を持っていて、彼らから時々次のような質問を受けます。日本を訪問する季節はいつがよいのか? もちろん、私の答えは5月の半ばから下旬と答えます。なぜなら、周囲の木々は新緑から青葉に移り、その色彩と香りはすべての人を和ませてくれるからです。

(No. 75, K. Ohshima)

