

Bi フェライトの磁気応答特性の評価

山口明啓¹、山本敏寛¹、内海裕一¹、中嶋誠二²、藤沢浩訓²

(¹兵庫県立大学 高度研、²兵庫県立大学 工学研究科)

Characterization of magnetic and optical response in a single crystalline Bi-Ferrite

A. Yamaguchi¹, T. Yamamoto¹, Y. Utsumi¹, S. Nakashima², H. Fujisawa²

(¹LASTI, Univ. of Hyogo, ²Grad. Sch. Eng. Univ. of Hyogo)

はじめに

マルチフェロイック材料は、強誘電特性と磁気特性を併せ持つ材料である。強誘電体の有する高誘電率、自発分極反転特性、圧電特性、電気光学効果、音響光学効果など様々な特性と磁氣的応答特性が相関を持って出現することから、基礎物性の研究だけではなく、不揮発性メモリやアクチュエーター等の応用が注目されている。数あるマルチフェロイック材料の中で、本研究ではBi フェライト(BiFeO₃)に注目した。バルク Bi フェライトは、空間群 R3c の結晶構造を有し、ネール温度 370°C、キュリー温度 850°C と室温に比べて十分に高く、室温で強誘電性と反強磁性が共存している系である。薄膜では、スピんキャントによる弱磁性が報告されている物質である。本研究では、Bi フェライト単結晶薄膜の音響・磁気応答特性を評価する。

実験方法

マグネトロンスパッタを用いてBi フェライト薄膜を作製した。結晶構造の評価は、X線回折によって行い、単結晶化していることを確認した。マイクロカー磁気光学測定ならびに分光光学透過率と分光反射率スペクトル測定を行った。音響特性を測定するために、微細加工を施し、その応答特性を測定した。

実験結果と考察

結晶面(100)に対するBi フェライト単結晶の分光透過率 $T(\lambda)$ と分光反射率 $R(\lambda)$ のスペクトルを図1に示す。 λ は光の波長である。図1から吸収係数 $a(\lambda)$ を求め、光子エネルギー E について $\{\alpha(E)E\}^2$ をプロットした (図2)。その結果、本研究で用いるBi フェライトのバンドギャップは、約 2.64 eV であることが分かった。この値は、先行研究とほぼ一致する結果であると考えられる。^{1,2)}

講演では、微細加工技術を用いた電極構造を用いた音響特性評価等についても報告を行う。

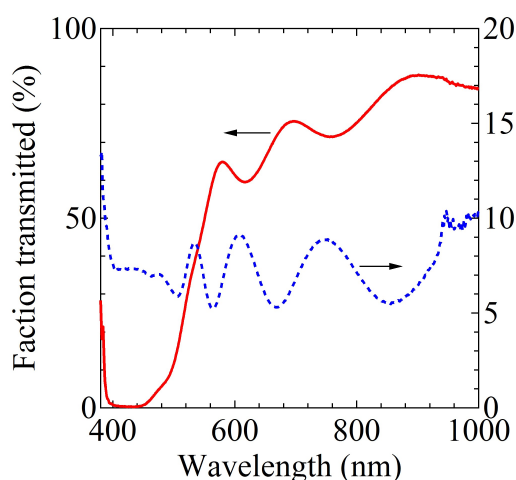


図1 分光透過率 $T(\lambda)$ と分光反射率 $R(\lambda)$ スペクトル。

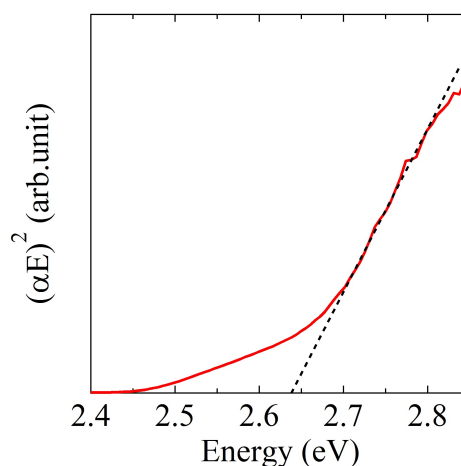


図2 $\{\alpha(E)E\}^2$ の光エネルギー依存性。

参考文献

- 1) S. R. Basu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **92**, 091905 (2008); P. Chen *et al.*, Appl. Phys. Lett. **96**, 131907 (2010).
- 2) J. M. Park, F. Gotoda, T. Kanashima, M. Okuyama and S. Nakashima, J. Kor. Phys. Soc. **59**, 2537 (2011).

Y型フェライトの作製と特性評価

寺岡 拓人 劉 小晰

(信州大学)

Preparation and characterization of Y-type ferrite

Takuto Teraoka Xiaoxi Liu

(Shinshu university)

・はじめに

近年、マルチフェロイック物質と呼ばれる強磁性と強誘電性を併せ持つ物質が注目を集めている。本研究では、らせん状のスピンを持つことから、マルチフェロイック物質として期待されている Y 型フェライト¹⁾ について、その薄膜の作製及び特性評価を行った。本研究により Y 型フェライト薄膜を作製し、マルチフェロイック物質として応用することが出来れば、磁界によって電気分極を操作し、電界によって磁化を操作できるというその性質から、大容量かつ低消費電力な新規なメモリデバイスが実現できる可能性がある。

・実験方法

本研究で用いた試料は、まず有機溶媒に金属の有機化合物を溶かした塗布型材料を用いて、Pt 下地 20 nm をスパッタした SiO₂ 基板上に滴下しスピンコートにより薄膜を成膜した後、電気炉を用いて熱処理を行い結晶化させるという手法で作製した。スピンコートを用いることの利点としては、フェライトの組成変更が容易であること、また膜厚の調整が容易なことが挙げられる。そして、作製したフェライト薄膜について、VSM による磁気特性、X 線回折(XRD)による結晶構造の測定等を行い評価した。

・実験結果

Fig.1 に 800 °C から 1100 °C まで、電気炉を用いてそれぞれの温度で 1 時間ポストアニールを行ったフェライト薄膜の保磁力の変化、Fig.2 に 1000 °C、1050 °C、1075 °C でポストアニールを行った試料の M-H ループを示す。800 °C から 1000 °C までの温度で、保磁力は 4 kOe 前後の値を保っているが、1000 °C から 1050 °C にかけて垂直方向、面内方向ともに保磁力が大きく低下しており、Y 型フェライトが軟磁性体であることから、1050 °C で熱処理を行うことが Y 型フェライトの作製に必要な条件の一つではないかと考えられる。

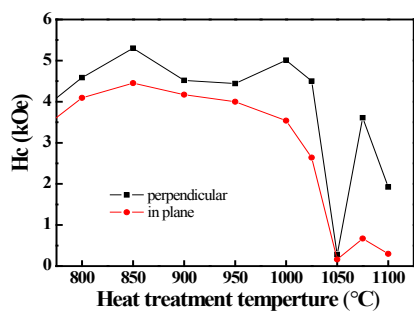


Fig.1 熱処理温度による保磁力の変化

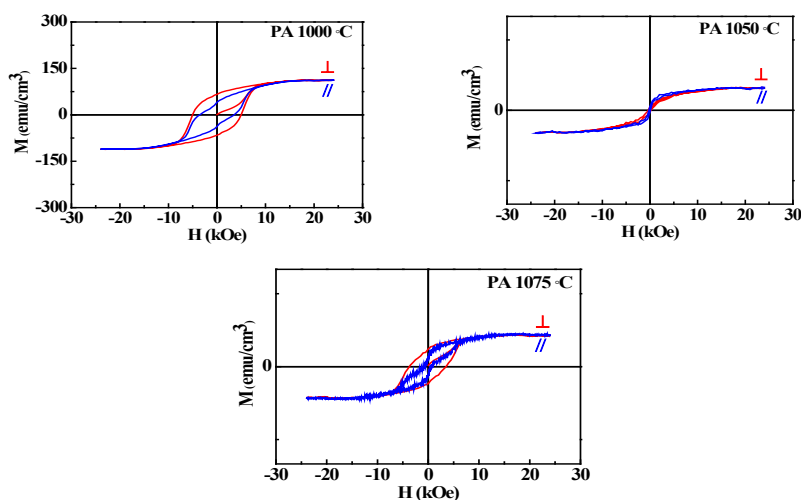


Fig.2 PA 1000 °C, 1050 °C, 1075 °C の M-H ループ

参考文献

- 1) “Low-Magnetic-Field Control of Electric Polarization Vector in a Helimagnet”
Shintaro Ishiwata, Yasujiro Taguchi, Hiroshi Murakawa, Yoshinori Onose, Yoshinori Tokura
SCIENCE Vol.319 21 MARCH 2008 (1643-1646)

(111)配向 BiFeO₃系マルチフェロイック薄膜を用いた 局所電界印加による磁化方向制御

吉村 哲、菅原 祐輔、芦 佳、江川 元太、木下 幸則、齊藤 準
(秋田大)

Control of direction of magnetization by local electric field
in BiFeO₃ based multiferroic thin films with (111) orientation

S. Yoshimura, Y. Sugawara, J. Lu, G. Egawa, Y. Kinoshita, and H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに 強磁性・強誘電性を併せ持つマルチフェロイック材料は、電場 E による磁化 M の方向制御、磁場 H による電気分極 P の方向制御が可能であるので、革新的な次世代電子材料として現在盛んに研究されている。強誘電体である BiFeO₃ において、Bi を Ba, Fe を Mn や Ti で置換した Bi_{1-x}Ba_xFeO₃¹⁾, BiFe_{1-x}M_xO₃(M=Mn,Ti)²⁾などの薄膜では、強磁性が観測されている。昨年、BiFeO₃系マルチフェロイック薄膜の記録デバイス応用を念頭に、生産性に優れたスパッタリング法を用い、分極方向が膜面垂直となるよう(111)配向制御された BiFeO₃ 薄膜を 400°C程度の低温で非単結晶基板上に形成するプロセスを報告した³⁾。本研究では、BiFeO₃の Bi を Ba で置換した強磁性・強誘電 Bi_{1-x}Ba_xFeO₃ 薄膜への局所電界印加により強磁性ドメインを誘起することで、磁気記録デバイスへの適応性を検証することを目的とした。

方法 Bi_{1-x}Ba_xFeO₃(BBFO)(x=0-0.4)薄膜(膜厚 100 nm)を、マグネトロンスパッタリング法を用いて、熱酸化膜付き Si 基板上に Ta(5 nm)/Pt(100 nm)の下地層を成膜した後、積層膜として作製した。積層膜は基板温度として、Ta を室温、Pt を 300°C、BBFO を 400~500°Cで成膜した。さらに、BBFO 薄膜のペロブスカイト構造の形成を促進させるために、スパッタリング成膜時の薄膜に弱い高周波(VHF)プラズマを照射した。本条件で成膜することにより、Pt 下地層および BBFO 層は(111)配向することがX線回折装置(XRD)により確認できた。作製した積層膜の磁気測定は試料振動型磁力計(VSM)により、誘電測定は、BBFO 積層膜の最表面に Pt ドット状電極(φ200 μm)を成膜し、強誘電特性評価システムにより行った。薄膜表面の同一箇所の磁区構造および電荷の分域構造は、磁気力顕微鏡および電気力顕微鏡を用いて観察した。

結果 Fig. 1 に、昨年の BFO 積層膜の検討から得られた最適条件で成膜した BBFO 薄膜の飽和磁化(M_s)および飽和分極(P_s)の Ba 置換量(x)依存性を示す。x の増大に伴い M_s が増加し、x=0.4 において、PLD 法等で単結晶基板上に高温で作製された薄膜の値と同程度の 60 emu/cm³ が得られ、かつ $P-E$ および $M-H$ 曲線において明瞭なヒステリシスを示すことから、本薄膜は強制的秩序のマルチフェロイック特性を有している。しかしながら、 P_s は最大 10 μC/cm² 程度であり、PLD 法等で単結晶基板上に高温で作製された薄膜の値の 5 分の 1 以下であった。その原因として BBFO 薄膜組成の化学量論比からのずれや酸素欠損が挙げられる。Fig. 2 に、マルチフェロイック特性を有する Bi_{0.6}Ba_{0.4}FeO₃ 薄膜における、走査型プローブ顕微鏡および導電性探針を用いて観察した表面像を(a)に、同装置および探針を用いて局所電界印加 (3×3 μm 領域に+13 V, 1×1 μm 領域に-13 V) を施した後の分域構造を電気力顕微鏡により観察した像を(b)に、磁性探針を用いて磁区構造を磁気力顕微鏡により観察した像を(c)に、それぞれ示す。(b), (c) いずれにおいても、1×1 μm の中心領域と 3×3 μm の外周領域とでコントラストが異なり、極性が異なることが示唆される。各探針の極性およびその振動の位相変化の結果から、中心および外周領域はそれぞれ-, S, および+, N, であった。以上の結果から、本薄膜において、局所電界印加により強磁性ドメインの誘起させることに成功し、電界制御方式の磁気記録デバイスの実現可能性を示した。講演では、本薄膜の微細組織についても述べる予定である。

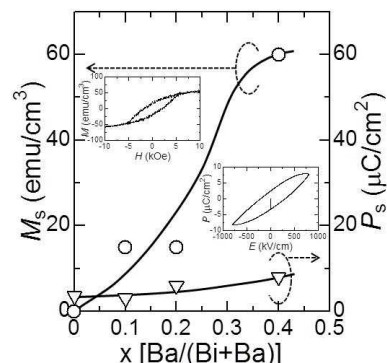


Fig. 1 Dependence of P_s and M_s of Bi_{1-x}Ba_xFeO₃ films onto Ta/Pt underlayer on Ba concentration.

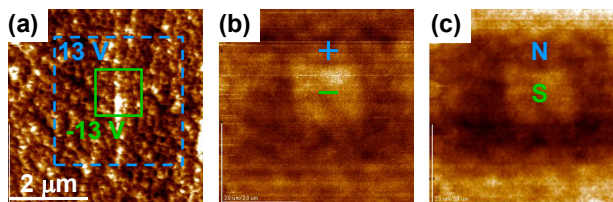


Fig. 2 (a) topographic, (b) EFM, and (c) MFM images of Bi_{0.6}Ba_{0.4}FeO₃ multiferroic film onto Ta/Pt underlayer.

参考文献 1) D. H. Wang et al., Applied Physics Letter, 84, 212907 (2006), 2) I. O. Troyanchuk et al., Neorganicheskie Materialy, 46-4, 475 (2010), 3) 吉村 哲 他, 第 37 回日本磁気学会学術講演概要集, 3aC-6

謝辞 誘電特性評価にご協力賜りました, 名古屋大学 浅野秀文先生・坂本渉先生に感謝申し上げます。

トーラス型磁気クラスターにおける異なる磁化過程

寺島 颯一、鈴木 健司、山口 克彦、内一 哲哉*、高木 敏行*
(福島大、*東北大)

Different magnetization process of torus magnetic cluster

K. Terashima, K. Suzuki, K. Yamaguchi, T. Uchimoto*, T. Takagi*
(Fukushima Univ. *Touhoku Univ.)

はじめに

近年、磁気還流構造をとるトーラス型磁気リングへの関心が高まっており、実験及び理論的な観点から盛んに研究が行われている。これまでに Co トーラスリングの実験などが行われており、磁化反転の途中で一度、安定状態になるという報告がなされている。さらに LLG 方程式を用いたシミュレーションもなされており、安定状態である還流構造か、磁化が概ね同一方向を向いている状態のどちらか一方を含んだ磁気的特性を持つ、と示されている。しかしながら、実験は多数のリングを纏めて測定したものであり、さらにシミュレーションの結果とはそぐわないものであった。よって、シミュレーションで得られたそれぞれの磁気特性を、実験と合うように足し合わせた統計的な解析が行われてきた¹⁾。

そこで本研究は、1つのリングが持つ磁気的性質を解析するために、半径の異なるトーラスリングクラスターを用いてモンテカルロ (MC) シミュレーションを行った。これによりトーラスリングの実際の磁化過程が明らかになると期待できる。

計算手法

クラスターは Fig.1 に示したようなトーラス型で、単純立方格子の格子点上に磁性サイトを配置し、 $r=3, R=8, 10, 15, 20$ の 4 個を用いた。計算はメトロポリスサンプリングによる MC シミュレーションで行い、ハミルトニアンには(1)式を用いた。第一項が交換相互作用、第二項が磁気双極子相互作用、第三項が印加磁場を与え、 S_i は i 番目のスピンベクトルである²⁾。

$$H = -\sum_{near} J_{ij} S_i \cdot S_j + D \sum_{all} \left(\frac{S_i \cdot S_j}{|r_{ij}|^3} - \frac{3}{|r_{ij}|^5} (S_i \cdot r_{ij})(S_j \cdot r_{ij}) \right) + B \sum_i S_i \quad (1)$$

結果

Figure 2 には $r=3, R=10$ のクラスターによるシミュレーション結果を示した。同一クラスターにおいて、2つの異なる磁化過程を含んでいることが分かる。1つは途中で還流構造をとるものである。還流構造は磁場の逆向きをとっている部分の内側からスピンが反転し、別の小さな還流構造を作る。磁場が大きくなるにつれ、小さな還流構造は外側へと移動し、最終的に磁化が反転する。もう1つはスピンの向きを維持したまま回転するように磁化反転をする過程である。これら2つの磁化過程を含む磁気特性は他のクラスターにおいても同様に見られた。

参考文献

- 1) F. Q. Zhu, et. al, *Adv. Mater.* Vol.16, Issue 23-24, 2004, pp.2155-2159.
- 2) K. Yamaguchi, et. al, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, 2011, pp. 1118-1121.

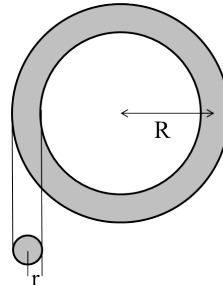


Fig.1 Schematic diagram for torus ring cluster.

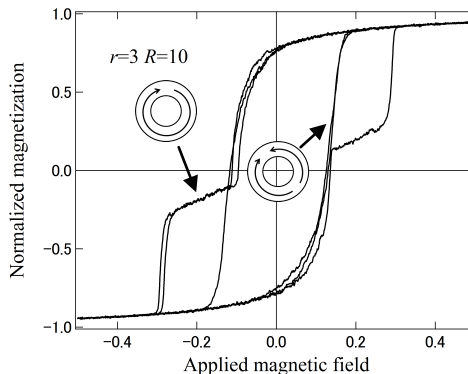


Fig.2 Hysteresis loops of torus ring cluster with $r=3, R=10$ repeat three times.

マイクロマグネティックシミュレーションにおける 中間磁化を用いた高速化の検討

安宅正、古屋篤史、藤崎淳、清水香壺、上原裕二、田中智大、大島弘敬*
(富士通株式会社、*株式会社富士通研究所)

Accelerating method of micromagnetic simulation interpolating magnetization vector

T. Ataka, A. Furuya, J. Fujisaki, K. Shimizu, Y. Uehara, T. Tanaka, H. Oshima*

(Fujitsu Limited, *Fujitsu Laboratories Limited)

はじめに

永久磁石の保磁力は結晶粒径や温度、結晶粒界の物性などに依存して変化することが実験的に知られているが、その詳細なメカニズムは今のところ十分に理解されていない。そこで近年、永久磁石の保磁力発現のメカニズムを解明するためにマイクロマグネティックシミュレーションが注目されている。この手法は磁石材料の磁化過程を理解する上で非常に有用であるが、磁壁の構造や磁壁移動を表現するために非常に細かいメッシュ分割が求められている。例えば、Nd-Fe-B 磁石では磁壁の厚さが 5nm と非常に薄いために 1nm 程度のメッシュ分割が必要である。一方で、結晶粒径は数百 nm～数 μm とメッシュ幅に比べ非常に大きく、粒界を含む多結晶の計算に必要なメッシュ数は膨大になり計算時間がかかる。計算時間を短くするため、空間刻みが大きくても磁壁の構造や磁壁移動が表現できる数値計算手法が求められており、この点について検討した。

計算手法

交換結合エネルギー、異方性エネルギーにより得られる有効磁界の計算において、(1) 式で与えられる、磁化の長さ条件を満たす中間磁化を仮想的に配置した (Fig.1)。式中の c はメッシュの形状や重心位置により決定される案分比である。

$$\vec{m}'(i, j) = \frac{c\vec{m}(i) + (1-c)\vec{m}(j)}{|c\vec{m}(i) + (1-c)\vec{m}(j)|} \quad \dots (1)$$

中間磁化はメッシュ上の磁化に対する LLG 方程式を計算する際に使用される一時的なものであり、一つのメッシュ上における磁化の計算コストが増えるが、メッシュを粗くすることで全体として計算時間を短縮することが可能となる。この中間磁化を用いたエネルギーの離散化を行い、各磁化の有効磁界を変分計算により求める。

計算結果

中間磁化を用いて 2次元の離散化を行い、保磁力を計算した (Fig.2)。保磁力の誤差はメッシュサイズが大きい領域において従来の要素中心のみに磁化を配置する方法より改善することがわかる。

参考文献

- 1) A. Sakuma et al; J. Magn. Magn. 84 (1990) pp.52-58

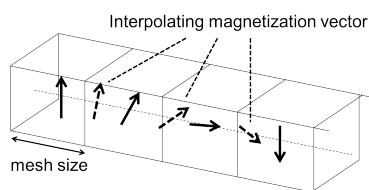


Fig.1 Conceptual diagram of interpolating magnetization vector

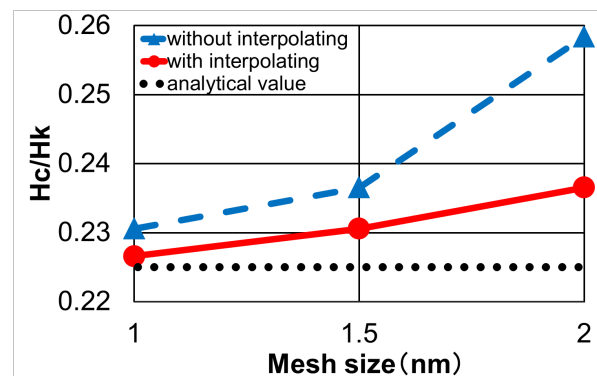


Fig.2 Normalized coercivity of 2D calculation