

低炭素鋼の冷間圧延・回復過程における硬度と磁気特性変化

伊藤 史也, 武川 幸平, 村上 武, 菊池 弘昭
(岩手大学)

Magnetic properties and hardness changes on cold rolled low carbon steel under recovery process
Fumiya Ito, Kohei Takekawa, Takeshi Murakami and Hiroaki Kikuchi
(Iwate University)

1. 緒言

橋梁・高速道路などの社会基盤構造物の経年劣化が問題となっている。構造物の安全性・信頼性の確保のために、高精度、信頼性の高い非破壊検査技術の確立が求められている。構造物の多くには強磁性材料である鋼が使用されており、材料の内部組織変化が磁気特性や硬度などの機械特性に影響を与えることから、磁気的非破壊評価が有効であると考えられる¹⁾。磁気特性と機械特性の相関については多くの検討がなされているが^{2), 3)}、その定量的な対応関係については不明な点もある。そこで本研究では、磁気的非破壊評価を実用化する上で重要な磁気特性と硬度との定量的関係について明らかにするため、低炭素鋼(S15C)を試料として用い、それらを冷間圧延および熱処理することで内部組織を変化させ、磁気特性と硬度を評価した。

2. 実験方法

試料には低炭素鋼 S15C を用いた。はじめ試料に圧延率 0, 5, 10, 40% で冷間圧延を施し、それぞれの試料に対し熱処理前後で試料の組織の分析と磁気特性の評価、及び硬度測定を行った。試料の内部組織観察には EBSD を用いた。磁気特性の評価は磁気ヒステリシスループの計測から保磁力を求め、測定時には励磁方向を変化させた。圧延方向を 0° とし 0~180° の範囲で変化させた。熱処理温度は 600°C、熱処理時間は 1, 3, 5, 10, 15, 25, 40 分とした。硬度測定はビッカース硬さ試験を用いた。

3. 実験結果

Fig. 1 は熱処理前の試料について保磁力とビッカース硬度を圧延率に対してプロットしたグラフである。圧延率の増加に伴って保磁力と硬度は増加する。一般に冷間圧延により格子欠陥である転位が増加する。この転位が磁壁のピンニングサイトとして働くので保磁力は増加する。また、増加した転位は互いに相互作用し合い、転位同士の移動を妨げるので、硬度は増加する。このことから保磁力と硬度は良い相関を示す。Fig. 2 は圧延率 40% の試料において、真空中 600°C で熱処理を施した時の各熱処理時間における保磁力とビッカース硬度の変化を示した図である。保磁力は熱処理時間初期に大幅に低下している。一方、硬度は 20 分程度までの変化は小さく、保磁力と硬度の挙動は異なっていることが確認される。圧延した試料は冷間圧延後、格子欠陥の蓄積により自由エネルギーの高い状態にある。これを原子の拡散が十分に起こる高温で熱処理をすると、自由エネルギーを減少させるように転位の消滅や再配列、すなわち、回復が起こる。回復過程における転位の消滅や再配列は保磁力の低下に寄与するが、硬度に対しては影響を及ぼさず、ここでは、保磁力と硬度とは相関を持たない。

参考文献

- 1) H. Krommüller, *Int. J. Nondestruct. Testing*, Vol. 3, p. 315, 1972.
- 2) D. C. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman & Hail, London UK, 1991.
- 3) S. Takahashi, J. Echigoya, and Z. Motoki, *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, p. 805, 2000.

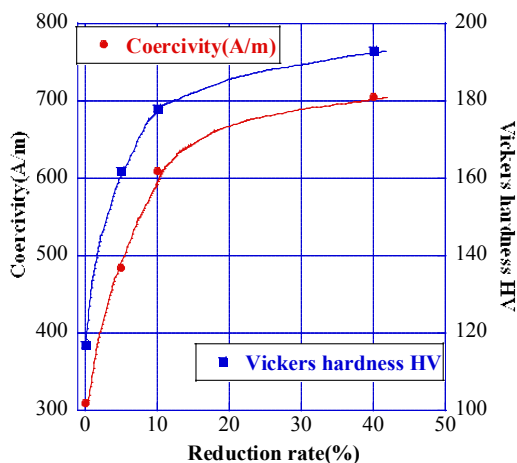


Fig.1 Coercivity and Vickers hardness of each reduction rate on as-rolled specimen.

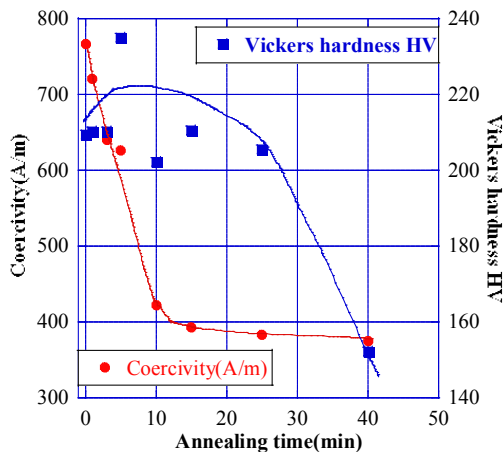


Fig.2 Coercivity and Vickers hardness of each annealing time on 40% rolled specimen.

Nano-Granular In Gap Magnetic Sensor を使用した厚さ測定

小澤哲也、増子英明、渥美紘一、薮上信、戸塚巡*、小山恵史*、早坂淳一**、若生直樹**、荒井賢一**
(東北学院大学、*大同特殊鋼、**電磁材料研究所)

Measurement of Thickness Using Nano-Granular In Gap Magnetic Sensor

T. Ozawa, H. Mashiko, K. Atsumi, S. Yabukami, J. Totsuka*, S. Koyama*, J. Hayasaka**, N. Wako**, K.I. Arai**
(Tohoku Gakuin University, *Daido Steel Co., Ltd, **Research Institute for Electromagnetic Materials)

はじめに

渦電流探傷は渦電流によって生じる磁束を計測する方法を原理としているため、探傷する表面の電気伝導率の影響を受ける。アルミニウムの表面にきれいな塗装膜を形成する方法としてアルマイト処理がある。アルマイト自体は酸化物であり渦電流が流れないため、深部にある電気伝導性がよい部分にて渦電流が生じることになる。そこで渦電流探傷を利用することで、アルマイトの膜厚測定に成功したことを報告する。

実験方法

磁気センサとしては Nano-Granular In Gap Magnetic Sensor (以後、略して GIGS¹⁾)を使用した。GIGS はナノグラニューラーTMR フィルムをヨーク対で挟み込んだ構造の磁界センサであり、センサ幅が数十 μm 程度で高い空間分解能が得られるものである。GIGS は、磁界を加えると抵抗が減少する特性であり、15 Oe を加えたときの変化率は $70 \Omega/\text{Oe}$ である。装置の構成を Fig. 1 に示す。バイアスコイルは GIGS 磁界センサに 15 Oe の直流バイアス磁界を加えるために使用する。渦電流探傷面に交流磁界を加えるために使用する励磁コイルは直径 2 mm のパーマロイに 30 ターンのコイルを巻きつけたものである。励磁コイルは、アルマイト表面に対して垂直に励磁する。GIGS で検出された磁界強度は、ロックインアンプを用いて直列接続された抵抗における電圧降下の値の変化として計測する。

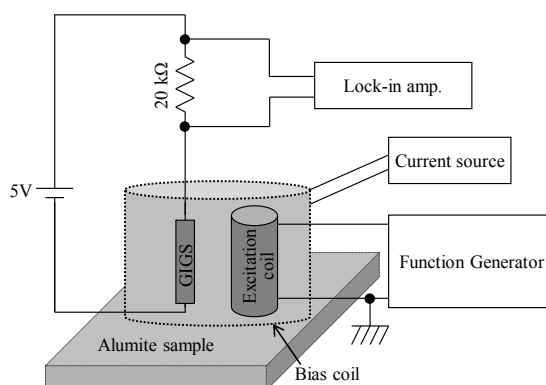


Fig. 1 Measurement configuration

実験結果

Fig. 2 は、サンプルとして用いたアルマイト処理済みのアルミニウム板である。電界処理時間によって塗装の濃度が変わることがわかる。Fig. 3 は、周波数 1 kHz の励磁磁界をアルマイト処理済みのアルミニウム板に加えたとき、GIGS に直列接続されている抵抗で生じる電圧降下の交流成分の実効値である。膜厚の変化に対して電圧降下が変わっていることがわかり、アルマイトの膜厚測定方法として利用できることがわかる。

参考文献

- 1) M. Naoe et al., J. Magn. Soc. Jpn., 35, 11-16 (2011)

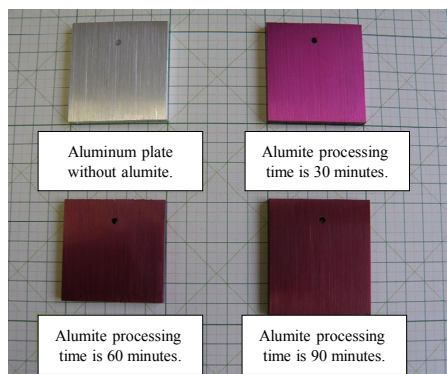


Fig. 2 Photograph of Alumite samples

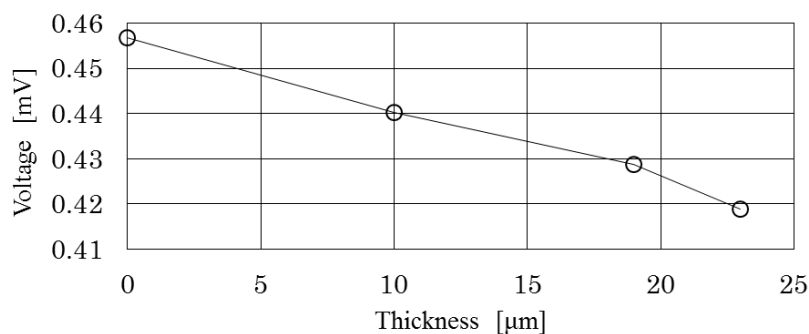


Fig. 3 Relationship between Alumite thickness and detected voltage

保温材下配管外面欠陥の磁氣的検査装置の開発

原 拓也, 春日 基志, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二
(岡山大学)

Development of a magnetic inspection apparatus for detection of corrosion under insulation.

Takuya Hara, Motoshi Kasuga, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, and Keiji Tsukada (Okayama University)

はじめに

現在, 日本の石油コンビナートで用いられている保温材被覆配管は, 50 年以上使用されているものが多く, 老朽から漏洩事故が年々増加している. 配管の漏洩は, 工場の運用に深刻な影響を与えるため定期的な検査を行い, 欠陥の早期発見が必要である. 一般的な配管の非破壊検査は超音波や磁気を用いた方法が確立されているが, リフトオフや磁性体である外装板などの影響から, 保温材下配管に対する非破壊検査法はまだ確立されていない. 破壊検査は, 外装板や保温材を剥ぎ取る必要があり, 多くのコストや時間, また破壊による疲労などが懸念されるため, 定期的な検査には不向きである. そこで, 本研究では保温材下配管を対象とした, パルスリモートフィールド探傷法での非破壊検査装置の開発を行った.

実験方法

本研究で設計した実験システムについて説明する. 図 1 はシステムの構成図である. 本システムは, リモートフィールド探傷法とパルス渦電流法を組み合わせたパルスリモートフィールド探傷法を基に設計した. 本システムの構成要素は, MR センサ, 印加コイル, 発振器, データ取得システムである. 本システムは, 非破壊かつ配管使用中の欠陥検出を可能にするため, 印加コイル・検出素子共に配管外部に設置している点が通常のリモートフィールド探傷法とは異なっている. 検出方法は, パルス渦電流法に類似しているが, 印加コイルを用いて試験サンプルに交流磁場を印加し, 伝播して発生する渦電流に伴って変化する磁場の平行成分を計測し欠陥検出を行っている. 試験サンプルは, 欠陥のない正常管, 中心に腐食欠陥を想定した減肉 50%の人工スリット欠陥を有するパイプ A, 減肉 25%を有するパイプ B の三種類である. 今回は, 中央前後 20mm 間隔で 11 点分の測定を行い, 本システムでの欠陥検出が可能であることを検証した.

実験結果

初めに, 保温材下配管の非破壊検査が困難な原因の 1 つである外装板による影響を調べるために, 外装板を取り外し, 保温材のみの状態および外装板をつけた状態での実験を行った. パルス渦電流法では, 検査対象内部の情報が波形の減衰部分に現れた. 図 2 は, 欠陥上での外装板の影響を比較した結果である. 検出信号は, 減衰率の変化を見やすくするため, ピーク値での規格化を行った. 図 2 の検出信号から, 正常管と欠陥パイプとの間に保温材のみ・外装板込みで減衰率に違いがあることが分かる. 以上から外装板がある場合においても, 欠陥検出が可能であることが分かった. また, 正常管と欠陥パイプの検出信号を 3D 等高線にマッピングしたデータも作成し, 欠陥パイプと正常管において違いが出ていることも確認した. 以上から, 設計した本実験システムは, 保温材下配管における欠陥検出が可能であることが分かった.

参考文献

Keiji Tsukada and Toshihiko Kiwa, "Magnetic property mapping system for analyzing three-dimensional magnetic components," Review of Scientific Instrument, vol.77, No.6, pp. 063703-063703-6, Jun 2006

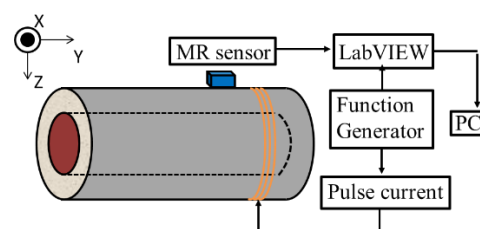
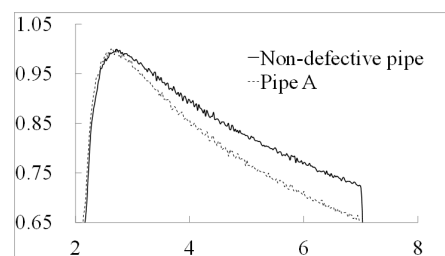
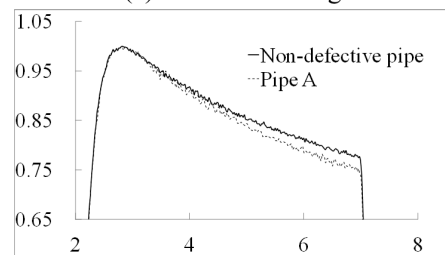


Fig.1 Measuring system



(a) Without cladding



(b) Including cladding

Fig.2 Detection signal at the defective point

TMR センサを用いた裏面欠陥の漏洩磁束探傷検査

志賀 啓秀、塚本 有哉、堺 健司、紀和 利彦、西川 卓男*、塚田 啓二
(岡山大学、*コニカミノルタ(株))

Detection of back-side defect by magnetic flux leakage method using TMR sensor

K.Shiga, Y.Tsukamoto, K.Sakai, T.Kiwa, T.Nishikawa*, K.Tsukada

(Okayama Univ., *Konica Minolta, Inc.)

研究背景

発電所や各種プラントなどの構造物で使用されている鋼板は内部を液体やガスといった流体が通るため裏面に欠陥が生じやすいため、欠陥を早期に検出する非破壊検査が必要である。放射線透過検査や超音波探傷検査がよく用いられているが、熟練者が必要であったり安全性の確保が難しかったりといった問題がある。そこで本研究では次世代の凡用高感度磁気センサとして期待されているトンネル型磁気抵抗素子¹⁾を用いて漏洩磁束探傷検査法により鋼板の裏面欠陥を正確かつ迅速に検出する非破壊検査装置の開発を行った。

装置構成

開発した非破壊検査装置は Fig.1 のように構成されており、発振器から発生させた交流信号を交流電流源で増幅させ、励起コイルに流す。コイルに巻かれた鉄心と測定試料である鋼板に磁気回路が形成される。測定試料の内部や裏面に欠陥が存在すると磁束が迂回するため空气中に迂回した磁束を TMR センサで検出し、ロックインアンプで位相検波することで欠陥を検出する。

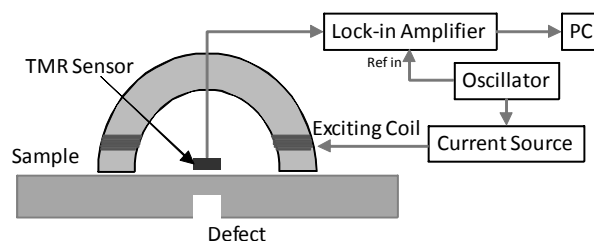


Fig.1 Measurement system of back-side

測定結果

試料には厚さ 8.6 mm の鋼板の裏面の中心に円形の欠陥を入れたものを用いており、欠陥径 Φ と欠陥深さ d が異なる試料を欠陥周辺 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ を走査した。解析方法にはロックインアンプによって取得された磁場強度 B と位相 θ を式(1)に代入することで位相成分を考慮した磁場強度 B' が得られ $\lambda=10^\circ, 20^\circ, \dots, 180^\circ$ と変化させることで欠陥検出に最適な画像化を行った²⁾。

$$B' = B \sin(\theta + \lambda) \quad (1)$$

裏面欠陥形状 $\Phi=6 \text{ mm}$, $d=6 \text{ mm}$ 印加周波数 10 Hz のときの磁場強度 B のみのマッピング図、位相を考慮した磁場強度 B' ($\lambda=130^\circ$) のマッピング図を Fig.2 に示す。比較すると磁場強度のみのマッピング図より位相を考慮した図の方が欠陥が明瞭になった。次に周波数別による $\Phi=6 \text{ mm}$, $d=4 \text{ mm}$ のときのマッピング図を Fig.3 に示す。印加周波数 5 Hz の方が 50 Hz より欠陥が明瞭的になっていることがわかる。よって最適な周波数と λ を選ぶことで裏面欠陥を検出することができた。

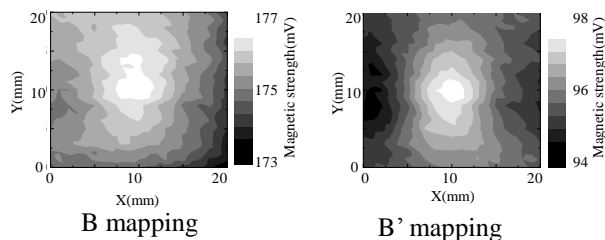


Fig.2 Two dimensional mapping of B and B'

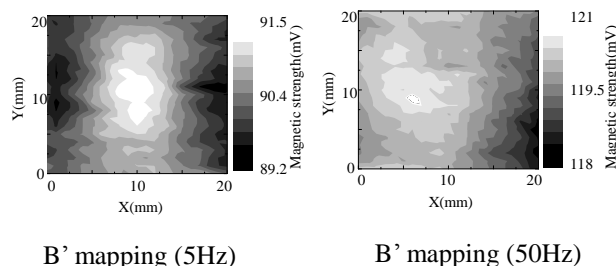


Fig.3 Two dimensional mapping at frequency of 5 Hz and 50 Hz

参考文献

- 1) 西川卓男,他,強磁性トンネル接合を用いた高感度生体磁気センサの開発,平成 25 年 9 月 18 日応用物理学会シンポジウム 18p-C15-5
- 2) Keiji Tsukada, et al.,NDT&E International, Vol. 43,pp.323-328(2010)

渦電流センサによる SUS304 鋼管レーザー溶接継手の内部欠陥検出評価

*矢崎 耕平^{1,2}, 杉村 佳奈子², 曾根原 誠², 佐藤 敏郎², 島津 進¹(¹高島産業株式会社, ²信州大学)

Evaluation on internal defect detection for laser welding joint on SUS304 pipe using by eddy current sensor

K. Yazaki^{1,2}, K. Sugimura², M. Sonehara², T. Sato², S. Shimadu¹(¹Takashima Sangyo Co., Ltd., ²Shinshu University)

はじめに

レーザーの出力不足により生じる溶接継手の内部未溶接欠陥は、破損の原因となり得るため、医療部品では特に非破壊による全数検査が望まれている。筆者らは、Fig. 1 に示す構造の渦電流センサを用いて SUS304 鋼管溶接継手の内部未溶接欠陥の検出を検討している¹⁾。SUS304 鋼管は、加工履歴によって磁化特性が変化するため、センサの設計、試作に先立ち、その物性値を明確にしたので報告する。

実験方法

SUS304 鋼管 (手島精管(株)製) をファイバーレーザー (IPG Photonics 製) を用いて Fig. 2 の条件で溶接し、溶接部の磁化特性と組織を評価した。磁化測定用の試料は Fig. 2 のように研削で切り出し、振動試料型磁力計 (VSM, 理研電子(株)製; BHV-55) により静磁化曲線を測定し、そこから最大比磁化率を求めた。切り出す溶接部のサイズは、最も溶接幅が広がるレーザー溶接出力 150 W のサイズに合わせて $410 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ とし、VSM の印加磁界は Fig. 1 の渦電流センサの励磁方向と同様に SUS304 鋼管の軸方向とした。また、径方向に破断した溶接部をエッチングしてオプトデジタルマイクロスコープ (オリンパス(株)製; DSX500) により組織観察を行った。

実験結果

Fig. 3 に各出力で溶接した溶接部の最大比磁化率を、Fig. 4 に組織観察写真を示す。Fig. 3 より、レーザー溶接出力が 120 ~ 150 [W] において最大比磁化率はほぼ一定であるが、レーザー溶接出力が 105 W になると最大比磁化率が 3 倍ほど高くなった。また、Fig. 4 からレーザー溶接出力 135 W までは内部まで十分に溶接されているのに対し、レーザー溶接出力 105 W では内部が十分に溶接されておらず、溶接された部分の組織はオーステナイト相であるのに対し、未溶接部分には加工誘起マルテンサイト相が認められる。このことから、レーザー溶接出力 105 W では磁化測定サンプル内部に未溶接部、マルテンサイト相が多いため磁化が高くなったと考えられる。

以上の結果から、レーザー出力が低下した際に生じる内部未溶接欠陥は、十分に溶接されたものと比較して比磁化率が高くなり、空隙を有するため、渦電流センサによる欠陥検出が可能であると考えられる。当日は、試作した渦電流センサの欠陥検出性について報告する。

参考文献

1) K. Sugimura, et al.: 2014 Annual Conf. FMS IEEJ (2014).

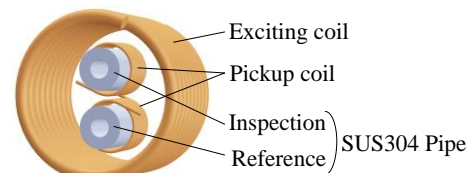


Fig. 1 Eddy current sensor

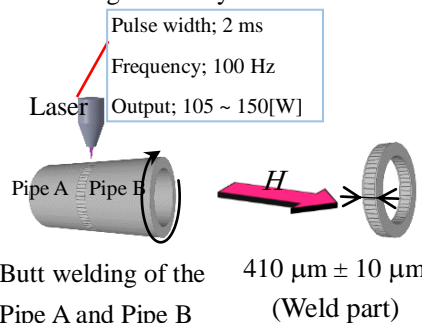


Fig. 2 Manufacture of magnetization measurement sample in laser welding joint of SUS304 pipe

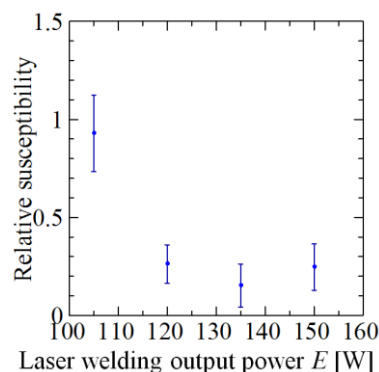


Fig. 3 Relation between laser welding output power and relative susceptibility in laser welding joint of SUS304 pipe

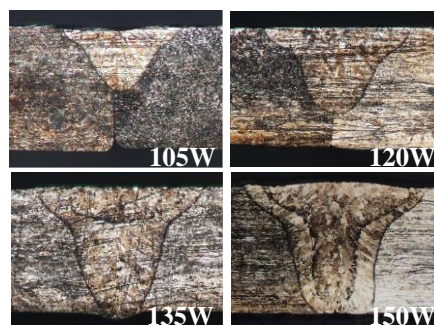


Fig. 4 Micrograph of weld part in laser welding joint of SUS304 pipe

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。

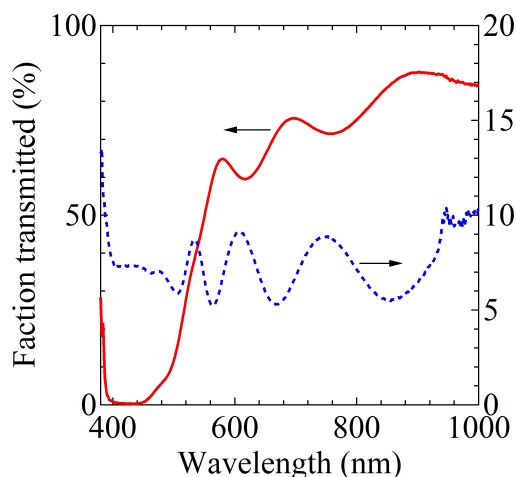


図1 分光透過率 $T(\lambda)$ と分光反射率 $R(\lambda)$ スペクトル。

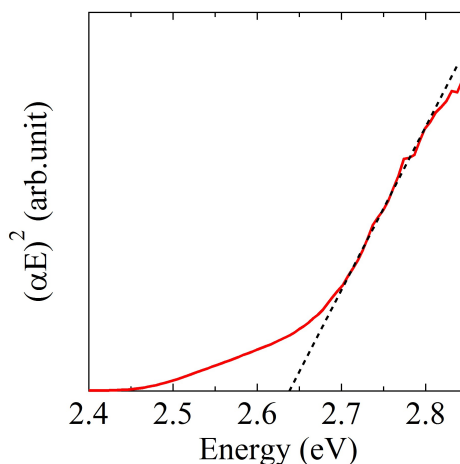


図2 $\{\alpha(E)E\}^2$ の光エネルギー依存性。

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。

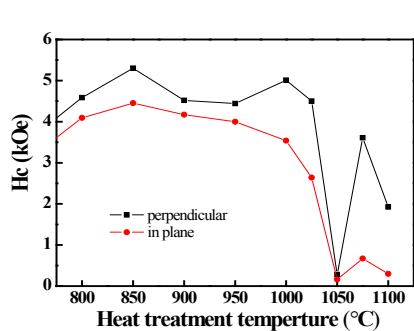


Fig.1 熱処理温度による保磁力の変化

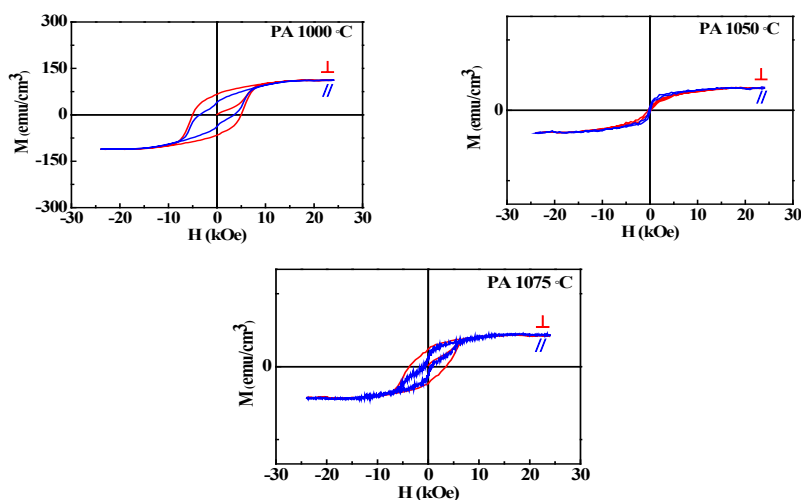


Fig.2 PA 1000 °C, 1050 °C, 1075 °C の M-H ループ

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。

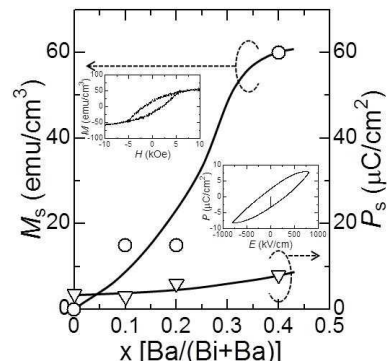


Fig. 1 Dependence of P_s and M_s of Bi_{1-x}Ba_xFeO₃ films onto Ta/Pt underlayer on Ba concentration.

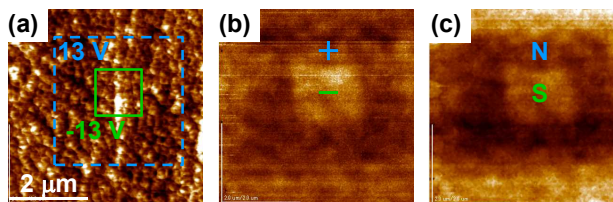


Fig. 2 (a) topographic, (b) EFM, and (c) MFM images of Bi_{0.6}Ba_{0.4}FeO₃ multiferroic film onto Ta/Pt underlayer.

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.

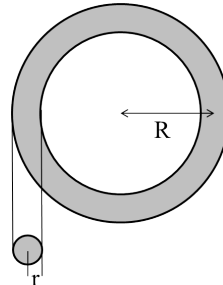


Fig.1 Schematic diagram for torus ring cluster.

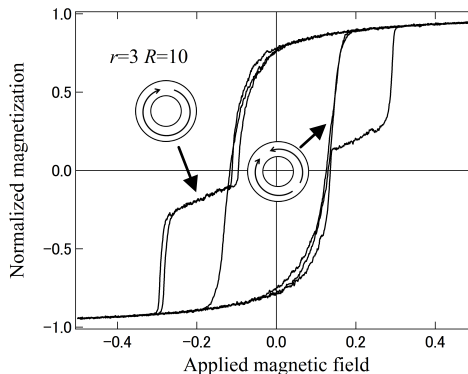


Fig.2 Hysteresis loops of torus ring cluster with $r=3, R=10$ repeat three times.

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

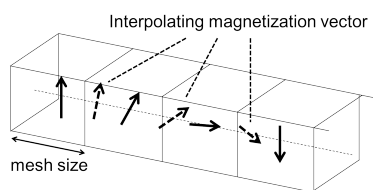


Fig.1 Conceptual diagram of interpolating magnetization vector

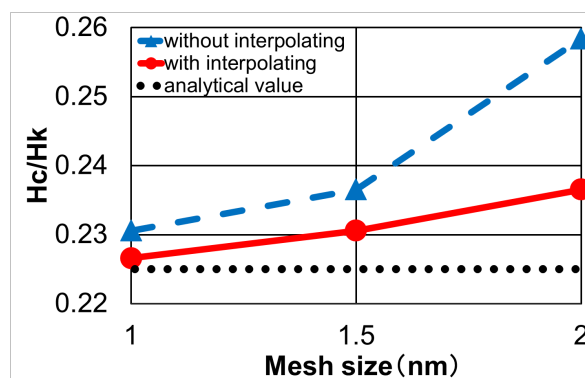


Fig.2 Normalized coercivity of 2D calculation

Au / Zn フェライト薄膜における表面プラズモンの磁気応答性

成嶋和樹, 芦澤好人, K. Brachwitz*, H. Hochmuth*, M. Lorenz*, M. Grundmann*, 中川活二
(日本大学, *Univ. Leipzig)

Surface plasmon responding on magnetic field for Au / ZnFe₂O₄ film

K. Narushima, Y. Ashizawa, K. Brachwitz*, H. Hochmuth*, M. Lorenz*, M. Grundmann*, and K. Nakagawa
(Nihon University, *Univ. Leipzig)

はじめに

近年、表面プラズモンの磁気応答性が報告され、誘電率変化に対する応答感度が高い特徴から、高感度磁気センサへの応用が期待される。これまでに我々は、表面プラズモンを効率的に生成する非磁性金属および磁気応答性を担う磁性金属に機能を分離した薄膜を用いることで、表面プラズモンに磁気応答性を付与した²⁾。磁気応答性増大には磁界に依存した大きな誘電率変化が重要である。本報告では新たに、磁気応答層として非磁性金属で、室温でフェリ磁性を示す ZnFe₂O₄ 薄膜³⁾を用い、磁界による誘電率変化を期待して、表面プラズモンの磁気応答性を検討した。

実験方法

表面プラズモンの励起には Au を用いた。試料は SrTiO₃ (111) / ZnFe₂O₄ / Au とした。ZnFe₂O₄ 層はパルスレーザー堆積 (PLD) 法、Au 層はスパッタリング法により、それぞれ 50 nm 成膜した。試料の結晶構造解析は X 線回折 (XRD) 法にて行った。表面プラズモンの励起および検出にはクレッチマン配置を利用した全反射減衰 (Attenuated Total Reflection: ATR) 法を用いた。p 偏光の光をプリズムを通して試料に入射し、反射率の角度依存性を測定した。試料面に対して垂直方向に磁場を印加し、磁場の有無の反射率差から表面プラズモンの磁気応答性を評価した。測定時の入射光の波長は 600 nm とした。

実験結果

SrTiO₃ (111) / ZnFe₂O₄ / Au 薄膜の XRD プロファイルを図 1 に示す。2θ = 36.9°、38.3° に ZnFe₂O₄ (222) 面および Au (111) 面に起因する回折線が観測され、いずれの結晶相も (111) 面配向していることがわかる。

本試料において ATR 法で表面プラズモンの磁気応答性を評価した結果を図 2 に示す。反射率は、42.4° 付近の臨界角から急激に減少して 44.7° 付近で最小値 19.8% を示し、さらに高角側で増加した。磁気応答性は最大で $\Delta R = (R(400) - R(0)) / R(0) = 0.18$ を示した。金属非磁性材料と非磁性材料において表面プラズモンに磁気応答性を付与が可能であることを示した。

謝辞

本研究の一部は、科研費若手研究(B) No. 24760324, 文科省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (平成 25 ~ 29 年) の助成を受けた

参考文献

- 1) J. B. Gonzalez-Diaz *et al.*, *Phys. Rev. B*, **76**, 153402 (2007).
- 2) Toru Tachikawa, Yoshito Ashizawa, and Katsuji Nakagawa, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **38**, 135-138 (2014).
- 3) M. Bohra *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 262506 (2006).

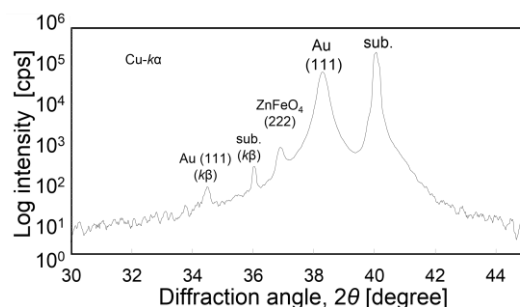


Fig. 1 XRD profile of SrTiO₃(111) / ZnFe₂O₄ / Au film.

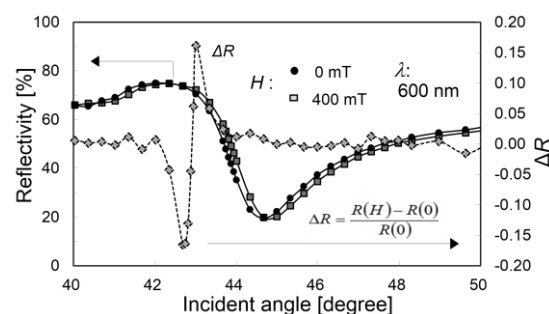


Fig. 2 Reflectivity curve and ΔR of SrTiO₃(111) / ZnFe₂O₄ / Au film as a function of incident angle.

アモルファス基板の上に成膜したビスマス鉄ガーネットの緩衝層依存性

安達信泰、林一成、木場勇作、藤内紗恵子、太田敏孝
(名古屋工業大学・先進セラミックス研究センター)

Buffer Layer Dependence of Bismuth Iron Garnet Prepared on Amorphous Substrates

N. Adachi, K. Hayashi, Y. Kiba, S. Fujiuchi and T. Ota

(Advanced Ceramics Research Laboratory, Nagoya Institute of Technology)

はじめに

可視光領域で磁気光学効果の極めて大きな物質としてビスマス鉄磁性ガーネット $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (BIG)があるが、我々は、気相法以外に有機金属分解法 (MOD法) により単結晶基板にも合成し、磁界センサーとして活用できることを示してきた¹⁾。最近、バッファー層と導入することでガラス基板への高濃度ビスマス置換鉄ガーネットが作製できることが示された²⁾。BIG についても、様々な基板への成長が可能となれば、その応用性は広がると考えられる。そこで、ガーネット組成の異なるバッファー層上に BIG を成長させ、その磁気光学特性の比較と行った。

実験方法

緩衝層として、有機金属溶媒を用いて $\text{BiY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (BiYIG)、 $\text{BiNd}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (BiNdIG)、 $\text{NdY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (NdYIG)をガラス基板の上にスピンドコーティングし、熱処理結晶化させた後、BIG 層の結晶化を試みた。緩衝層は、 600°C から 800°C の範囲で結晶化させ、BIG 層は 480°C で結晶化させた。評価はXRD、SEM、ファラデー回転測定により行った。

実験結果

XRD の結果より、BiYIG および BiNdIG の結晶化最適温度は 650°C 、NdYIG の最適温度は 750°C と判断した。緩衝層と BIG 膜の格子定数マッチングに関しては、BiNdIG と NdYIG とが回折ピークの分離ができない結果となった。その上に、BIG を作製したところ、Fig. 1 に示すように大きなファラデー回転を示した。NdY₂IG を緩衝層として用いた BIG 薄膜が、大きな磁気光学特性を示し、単結晶ガーネット基板上に作製した BIG に近い値を示した。Fig. 2 に緩衝層の表面微構造を示す。NdY₂IG の表面がクラックはあるものの、滑らかな構造を示した。また、断面観察を行ったところ Bi が含まれている緩衝層は 40nm 程度の結晶粒が観察できた。これらの結果から、NdY₂IG の場合は、緩衝層が 2 次的に結晶成長し、Bi を含む緩衝層は 3 次的に島状成長していると思われる。これらのことから、表面がなめらかで格子定数が BIG に近い緩衝層を用いることで、単結晶と同等の特性を持つ BIG をガラス基板上へも作製可能であることが示された。

References

- 1) N. Adachi, T. Ota, Journal of the Ceramic Society of Japan 122(1), 40-43 (2014)
- 2) T. Ishibashi, T. Yoshida, T. Kobayashi, S. Ikehara and T. Nishi, J. Appl. Phys 113, 17A926 (2013)

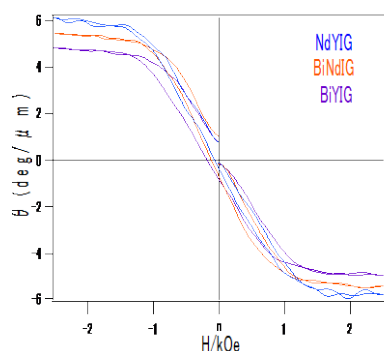


Fig.1. Faraday hysteresis curves at 635 nm of BIG/buffer on glass substrates

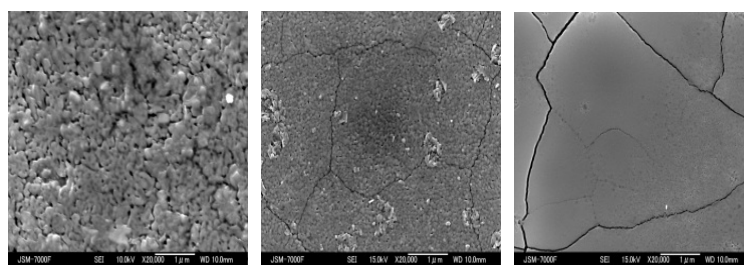


Fig.2. SEM micrograph of buffer layers (a: BiY₂IG, b: BiNd₂IG, c: NdY₂IG)

フェライトと銅カイラル構造を組み合わせた メタ分子による磁気カイラル効果

富田知志、澤田桂*、ポロフニユク・アンドレイ**、上田哲也**
(奈良先端大物質、*理研 SPring-8、**京都工繊大工芸)

Magneto-chiral effects by a meta-molecule consisting of a ferrite rod and copper chiral structure
Satoshi Tomita, Kei Sawada*, Andrey Porokhnyuk**, Tetsuya Ueda**
(GSMS-NAIST, *RIKEN SPring-8 Center, **Kyoto Inst. Tech.)

はじめに

磁性とカイラリティが共存する物質では、偏光には依存せず、光の進行方向に依存する光学異方性としての磁気カイラル効果の存在が理論的に予言されている¹⁾。これまではマルチフェロイックス材料などで、物質が持つ磁性とカイラリティの内因的な相互作用を用いる研究が行われてきた²⁾。それにも関わらず実験的に磁気カイラル効果を直接観測した報告はない。しかし今回我々は、メタマテリアル³⁾の概念を応用し、フェライトと銅カイラル構造を組み合わせたメタ分子を作製して、マイクロ波には磁性とカイラリティがあたかも相互作用しているかのように見える状況を作り出したところ、磁気カイラル効果の直接観測に成功した。

実験方法

磁気カイラルメタ分子は、フェライトロッドと銅のカイラル構造を組み合わせて作製した[図(a)]。メタ分子をマイクロ波導波管(WR-90)に挿入し、電磁石で直流磁場をかけた。 X バンドのベクトルネットワークアナライザを用いて、図(a)の左から、もしくは右から伝搬するマイクロ波の透過率に対応する S パラメータ (S_{21} と S_{12}) の強度と位相を測定した。

結果と考察

図(b)に S_{21} の位相から S_{12} の位相を差し引いた差分スペクトルを示す。無磁場下では S_{21} と S_{12} は等しく、スペクトルに構造は見られない。しかしここに直流磁場を加えると、10GHz 辺りにローレンツ分散形状の構造が現れた。これは銅カイラル構造が示す 10GHz 辺りの共鳴の光学活性によって増強された磁気カイラル効果によるものと考えられる。直流磁場の方向を反転させると分散形状も反転した。位相の差分から、+200mT の直流磁場での屈折率実部の差は 5.4×10^{-3} 程度であると見積もられた⁴⁾。外部磁場を強くすると、この屈折率差は大きくなった。この磁気カイラルメタ分子は、新しいタイプのマイクロ波一方素子や電磁波にとっての実効的ゲージ場⁵⁾を実現すると期待される。

参考文献

- 1) L. D. Barron and J. Vrbancich, *Molecular Physics* **51**, 715 (1984).
- 2) M. Mochizuki and S. Seki, *Phys. Rev. B* **87**, 0134403 (2013).
- 3) D. R. Smith, J. B. Pendry, and M. C. K. Wiltshire, *Science* **305**, 788 (2004).
- 4) S. Tomita, K. Sawada, A. Porokhnyuk, and T. Ueda, submitted.
- 5) K. Sawada and N. Nagaosa, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 237402 (2005).

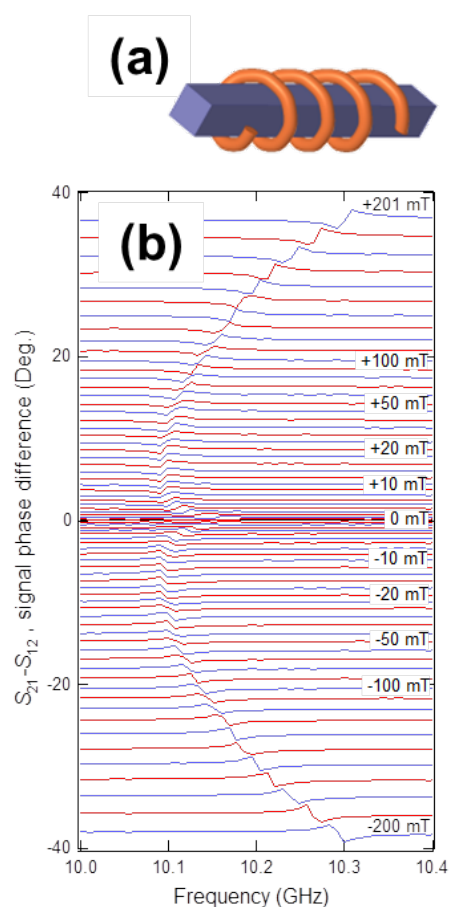


図 (a)磁気カイラルメタ分子と(b) X バンドでの磁気カイラル効果

有機金属分解法による $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ ($y = 0, 0.5, 1$) 薄膜の ガラス基板上への作製と評価

妻 庚健、佐々木 教真、箸中 貴大、目黒 燎、二宮 南、石橋 隆幸
(長岡技科大)

Characterization of $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ ($y = 0, 0.5, 1$) films on glass substrates
prepared by Metal Organic Decomposition (MOD) method

G. Lou, M. Sasaki, T. Hashinaka, A. Meguro, M. Ninomiya, T. Ishibashi
(Nagaoka Univ. of Tech.)

はじめに

我々は、これまでに Bi とイオン半径の近い Nd を用いた $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_4\text{GaO}_{12}$ をガラス基板上に作製することに成功し、大きな磁気光学効果と垂直磁気異方性を同時に得ることに成功したことを報告した[1]。しかし、Bi 置換量の大きな Bi 置換希土類鉄ガーネットにおける磁気異方性の制御に関する報告はこれまでほとんどない。今回は、Nd 系ガーネットの磁気異方性の制御のため、Fe サイトを置換する Ga の量を変化させた $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ ($y = 0, 0.5, 1$) 薄膜をガラス基板上に作製し評価を行った結果について報告する。

実験方法

ガラス基板上に、MOD 法によりバッファー層として厚さ $d = 0.12 \mu\text{m}$ の $\text{Nd}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$ (Bi1:NIGG) を作製し、その上に厚さ $d = 0.2 \mu\text{m}$ の Ga の置換量を変えた $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ ($y = 0, 0.5, 1$) 薄膜を作製した。バッファー層は、MOD 溶液 (高純度化学研究所製) の塗布 (3000rpm, 60 秒), 乾燥 (100°C , 10 分), 仮焼成 (450°C , 10 分) を 3 回繰り返した後、本焼成 (700°C , 3 時間) により結晶化を行った。 $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ ($y = 0, 0.5, 1$) 薄膜はバッファー層上に塗布から仮焼成の行程を 5 回繰り返した後、本焼成 (700°C , 3 時間) によって結晶化を行った。

結果及び考察

Fig.1 に波長 550 nm における $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ ($y = 0, 0.5, 1$) 薄膜のファラデーヒステリシスを示す。Ga 置換量の増加に伴ってヒステリシスの形状が変化し、磁気異方性が面内から垂直に変化していることがわかる。Mr/Ms の値は、 $y = 0, 0.5, 1$ についてそれぞれ、0.11、0.23、0.83 であった。以上のことから、我々が開発した $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ ($y = 0, 0.5, 1$) 薄膜は、大きなファラデー効果を維持したまま、磁気異方性を制御することが可能であることがわかった。詳細については、当日報告する。

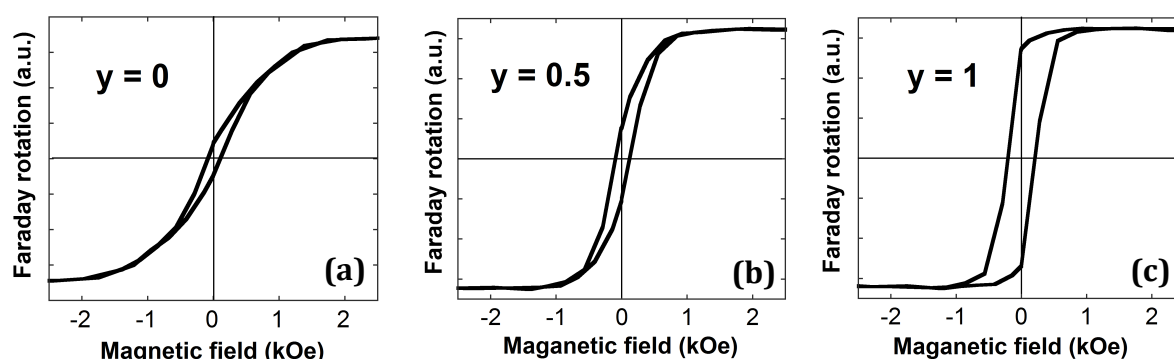


Fig.1 Faraday hysteresis of $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ films; (a) $y = 0$, (b) 0.5 and (c) 1.

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人情報通信研究機構の委託研究「革新的な三次元映像技術による超臨場感コミュニケーション技術の開発」により行った。

参考文献

[1] T. Yoshida, et al., European Phys. J. Web of Conf. (in press)

Co/Ru 多層膜の光学応答に現れるスピン依存散乱の効果

○斉藤伸¹, 水野翔太², 赤羽浩一¹, 佐藤春彦², 内田裕久² (¹ 東北大学, ² 東北工業大学)

Effect of Spin-dependent Scattering on Optical Properties for Co/Ru Multilayer Film

S. Saito¹, S. Mizuno², K. Akahane¹, H. Sato², and H. Uchida² (¹ Tohoku Univ., ² Tohoku Inst. Tech.)

1. はじめに 磁気センサは、空間の「磁界の大きさや方向」を検出するデバイスである。所望の周波数帯において高い検出感度や必要なダイナミックレンジを達成するために、様々な磁界効果を測定原理とするデバイスが提案され、実用化される。中でも光をプローブとしたセンサは、検出部を小型にでき、真空中、液中、あるいは狭空間中での磁界のセンシングが可能となるため注目されている。偏光子を用いない簡素な光学系でこれを実現するためには、材料の反射率や透過率が磁界によって変化する現象の活用が有効であり、材料開発が待望されている。著者らは、強磁性材料では磁化状態を印加磁界に対応させて変化させられることを鑑み、伝導電子のスピン依存散乱現象の光学特性に表れる効果に注目した。特に巨大磁気抵抗 (GMR) 効果、すなわち、強磁性/非磁性金属多層膜において、隣接する強磁性層のスピンの向きが平行/反平行配列した際に現れる直流抵抗変化は非常に大きく¹⁾、この現象が近赤外から可視光領域の周波数でどの程度光学特性に現れるか興味を持たれる。このような観点での先行研究は、理論報告は 1999 年以降²⁾、実験報告は 2002 年以降³⁾ にみられ始めている。しかしながら、実験報告に注目すると、GMR 効果が確認された Co/Cu 多層膜⁴⁾ を基本として磁性層材料を CoFe 合金とした論文²⁾ が散見される程度で、材料検討は十分とはいえない。そこで著者らは、まず、非磁性層材料として Ru を選択し、強い反強磁性的層間結合を有する Co/Ru 多層膜を作製した。続いて透過率の磁化状態に対する変化を評価したので報告する。

2. 実験結果 Fig. 1 に今回構築した光学系の模式図を示す。ハロゲンランプ光源から出射した白色光を集光して試料に照射し、試料を透過した光を分光検出した。検出光の波長範囲は 900 nm~1650 nm である。磁界は試料面内方向に印加した。Fig. 2 に 一例として反強磁性的層間結合を有する [Co(4 nm)/ Ru(0.7 nm)]₁₀ 多層膜の (a) 磁化 M および (b) 波長 1550 nm での透過率の印加磁界に対する変化を示す。透過率は最大印加磁界 14 kOe 時の値で規格化した。(a)によると、最大印加磁界では磁界方向に飽和していた M は印加磁界を減少させると 10 kOe 付近から減少し始め、零磁界状態では、ほぼ零となり反平行配列することがわかる。これに対応して透過率 (b) は、10 kOe から減少し始め、零磁界状態では飽和時から 1%強度が低くなる。このことより透過率変化は、光ファイバが使用できる近赤外領域でも十分検出可能であることがわかった。Fig. 3 には規格化透過率の磁界ヒステリシスを波長毎に分光測定した結果をカラーマップとして示す。図中の白線が Fig. 2 (b) に対応する。この図によると、長波長ほどスピン依存散乱による透過光量変化が大きくなることが見てとれる。

参考文献 1) M. N. Baibich et al., *PRL*, **61**, 2472 (1988). 2) A. B. Granovskii et al., *JETP*, **89**, 955 (1999). 3) V. G. Kravets et al., *PRB*, **65**, 054415 (2002). 4) M. Vopsaroiu et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, 3127 (2004).

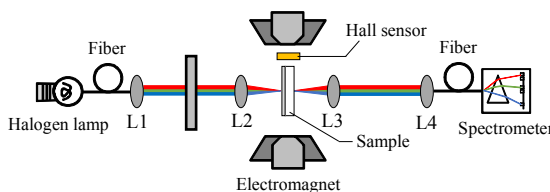


Fig. 1 Sketch of the spectroscopic magneto-refractive measurement system. L1-L4 are condensing and collimation lens

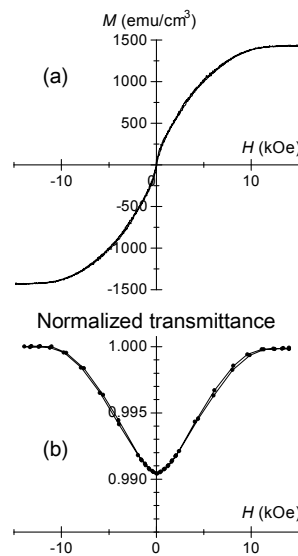


Fig. 2 (a) Hysteresis loop and (b) normalized transmittance at $\lambda = 1550$ nm for a [Co(4)/ Ru(0.7)]₁₀/ SiN(10) film.

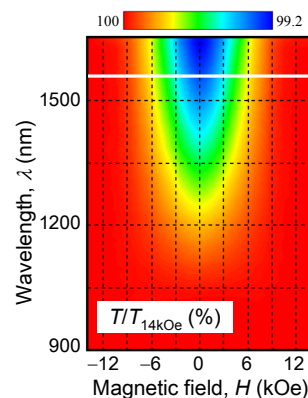


Fig. 3 Normalized transmittance plotted against wavelength and magnetic field. The white line corresponds to Fig. 2 (b).

磁気光学 3次元ディスプレイのカラー化に関する基礎研究

高木宏幸, 工藤慧, 中村和樹, 後藤太一, Lim Pang Boey, 井上光輝
(豊橋技科大)

Fundamental study on colorization of magneto-optical three dimensional display

H. Takagi, K. Kudo, K. Nakamura, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue
(Toyohashi Univ. Tech.)

はじめに 自然な3次元像を再生できる表示技術としてホログラフィが注目されている¹⁾. 我々は, ホログラムの表示に磁気光学効果を使用した磁気光学3次元ディスプレイの開発を行ってきた. 磁性膜に可視光領域で優れた磁気光学特性を示す希土類置換型イットリウム鉄ガーネット(BiDyYFeAlGarnet)を使用することで, 広視野角の緑色単色像が再生できている. しかしながら, これらは緑単色の参照光で, 緑用に設計された磁性体での単色光の再生像であった. 本研究では, 磁気光学3次元ディスプレイのカラー化の基礎研究として, 光の3原色の加法混合による中間色の再生を目的とした. 赤(R) 緑(G) 青(B) 各波長に対し磁性体膜厚を設計し, 空間分割方式の再生系を用いた中間色の表示を行った. 表示した像についてガモット図を用いて中間色の評価を行った. 今回はこれらの結果をもとに, 最終的にRGのカラーの3次元像を再生した.

実験方法 マトリックスアプローチ法を用いて, 磁性膜への入射光に対する1次回折光の比である光利用効率が最大となる膜厚を求め, 各色のホログラムを再生するための磁性体膜厚を設計した. 照明光源の波長は, R: 633 nm, G: 532 nmである. RGの中間色の表示を行うため, Fig. 1に示すRG合成用空間分割方式の再生系を構築した. 各色の像を磁性膜から再生し, 光学的に合成することで中間色を表示した. 磁性膜にはRGそれぞれの像を再生できるホログラムを記録した. 再生像の中間色を評価するために, 赤色と緑色の合成像について照明光源の強度を変化させてsRGBの色域を持つカメラで撮影を行った. 撮影像から抽出したRGB256階調値をもとに, デバイスで表示可能な色域を示すYxy表色系ガモット図を作成した. 以上の結果をもとに3D-RG合成像の表示を試みた.

実験結果 磁性膜の膜厚が, R: 2.0 μm , G: 1.9 μm のとき, それぞれの光利用効率はR: $1.83 \times 10^{-2} \%$, G: $3.58 \times 10^{-2} \%$ となった. RG合成像について, 作成したガモット図をFig. 2に示す. RG合成による中間色がsRGBにおける緑色・赤色の間の直線上に現れた. これは赤色と緑色のみを合成したためであり, 本方式で中間色が再生できた. この結果をもとにRG合成で3次元像を表示させた(Fig.3). 表示像は, RG単色および中間色である黄色を持つ球が再生できている. 今回の結果から, 磁性膜に記録されたホログラムを用いてRGカラー像の再生ができた. 本結果に青色による再生像を加えることで, 表示可能な色域は現在一般的に用いられているsRGBの規格を満たすことができると考えられる.

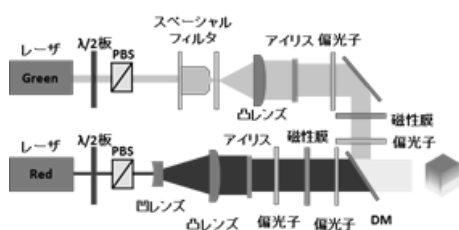


Fig.1 空間分割方式再生系

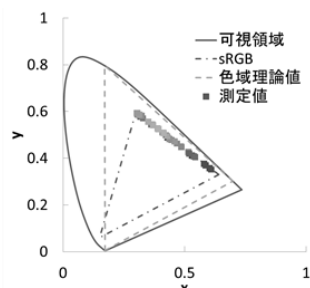


Fig.2 ガモット図(Yxy表色系)

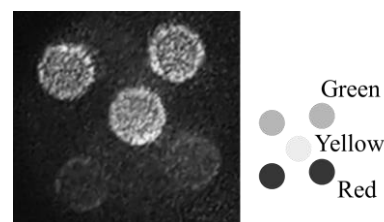


Fig.3 カラー3次元像

参考文献

- 1) D. Gabor, Nature, 161, 777 (1948).

Ce 置換イットリウム鉄ガーネットを用いた 磁性フォトニック結晶の形成

後藤太一, 吉本拓矢, 金澤直輝, 磯谷亮介, 高木宏幸, Caroline A. Ross*, 井上光輝
(豊橋技科大, *マサチューセッツ工科大)

Formation of magnetophotonic crystals with cerium substituted yttrium iron garnets

Taichi Goto, Takuya Yoshimoto, Naoki Kanazawa, Ryosuke Isogai,
Hiroyuki Takagi, Caroline A. Ross*, Mitsuteru Inoue
(Toyohashi Univ. Tech., *MIT)

はじめに

磁性フォトニック結晶は, Bi 置換イットリウム鉄ガーネット (Bi:YIG) などの透明磁性材料を誘電体ミラー中に挿入することで, ファブリーペロー共鳴を利用し, 薄膜で厚膜と同程度の磁気光学効果を発現可能な光学媒体である. 薄膜の特徴を活かし, アイソレータ¹⁾や, 光変調器²⁾等の応用が提案され, 一部は実現されている. これまで応用先の要求から磁性フォトニック結晶に挿入される磁気光学材料は Bi, Dy, Gd などの希土類で Y サイトを置換した磁性ガーネットが多く, 可視光波長域の磁気光学効果を増大することを目的に研究が進められてきた. 一方で, 磁性ガーネットの光吸収が抑えられる近赤外波長域で動作する磁性フォトニック結晶の形成例は少なかった. これは, 近赤外波長域で大きな磁気光学効果をもつ Ce:YIG が誘電体ミラー基板上で形成することが困難であったことによる. しかし, 最近, 真空熱処理法を用いることで単結晶に匹敵する大きな磁気光学効果と低い光吸収係数をもった Ce:YIG が多結晶基板上に形成可能であることが報告された³⁾. そこで, 本研究では Ce:YIG を用いた磁性フォトニック結晶を形成し, 光学特性, 及び磁気光学特性を調べた.

実験方法

イオンビーム蒸着法を用いてガーネット基板上に 8 ペアの Ta₂O₅ と SiO₂ から構成される誘電体ミラーを形成した. 各層の厚さは, 波長 1550 nm において Bragg の回折条件を満足させた. この誘電体ミラー上に, 高周波マグネトロンスパッタ法と真空中熱処理を用いて Ce:YIG を形成した. 成膜は, 到達真空度 1.0×10⁻⁷ Torr, 10 mTorr の Ar ガス雰囲気中で行われた. 成膜直後の膜は, 非晶質であった. 同試料に 800 度の真空中熱処理を施した結果, 多結晶の Ce₁Y₂Fe₅O₁₂ が得られた. この Ce:YIG 層の上に, 誘電体ミラーを下部と同数形成した. 試料の透過率を分光光度計, 磁気光学効果を磁気光学効果測定装置を用いて測定した.

実験結果

Fig. 1 のように, 共振波長において磁気光学効果が増大され, 磁性フォトニック結晶が形成できたことを確認した. ただし, 透過率が 2.3 %程度と低かった. これは, 誘電体ミラー中の Ta₂O₅ が結晶化し, 光散乱を生じたため, 損失が増加したことが原因と考えられる. 講演会では, 詳細な試料形成方法と, X 線回折法, 及び X 線光電子分光を用いた試料の解析結果について報告する.

謝辞

本研究の一部は, 日本学術振興会 科研費 若手研究 (A) No. 26706009, 挑戦的萌芽研究 No. 26600043 の助成を受けて行われた.

参考文献

- 1) Y. Haga, et al., J. Magn. Soc. Jpn., **36**, 54 (2012).
- 2) T. Goto, et al., Opt. Express, **21**, 19648 (2013).
- 3) T. Goto, et al., J. Appl. Phys., **113**, 17A939 (2013).

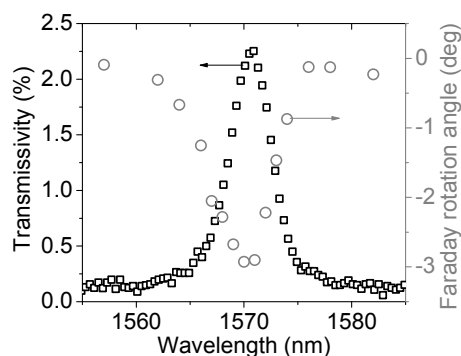


Fig. 1 Faraday rotation angle and transmission spectra in the vicinity of the resonant wavelength of the sample comprising garnet substrate/SiO₂/(Ta₂O₅/SiO₂)⁸/CeYIG/(SiO₂/Ta₂O₅)⁸.

磁性フォトニック結晶を用いた体積磁気ホログラムの回折効率

磯谷 亮介, 小林 完, 鈴木 章太, 後藤 太一, 高木 宏幸, 中村 雄一, 林 攀梅, 井上 光輝
(豊橋技術科学大学)

Study on Diffraction Efficiency of Volumetric Magnetic Holograms with Magnetophotonic Crystal
R. Isogai, K. Kobayashi, S. Suzuki, T. Goto, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, and M. Inoue
(Toyohashi University of Technology)

はじめに

ホログラムメモリは高転送レート・高記録密度が実現できることから、次世代のストレージデバイスとして期待されている。我々は、書き換えが可能な磁気ホログラムを提案し、ビスマス置換型イットリウム鉄ガーネット (Bi:YIG) 膜を用いて磁気ホログラムの記録・再生に成功している。しかし磁気メディアの回折効率は低く、データストレージとして用いるためにはさらなる回折効率の向上が必要である。体積磁気ホログラムの回折効率は、ファラデー回転角 θ_F とホログラムの書き込み深さ d_w に依存する。我々は、誘電体多層膜ミラー (BM) で磁性膜を挟んだ人工磁気格子である磁性フォトニック結晶 (MPC) が、 θ_F と d_w を増加させ、高い回折効率を示すことを報告した¹⁾。本研究では、より高い回折効率を得るため、MPC 構造を用いたホログラム媒体における BM の層数が回折効率に及ぼす影響について数値計算により評価した。

実験方法

MPC の構造は、SGGG 基板 / (Ta₂O₅ / SiO₂)^r / Bi:YIG / (SiO₂ / Ta₂O₅)^r とした。ここで r は誘電体多層膜のペア数で、SiO₂ および Ta₂O₅ の膜厚は $\lambda/4n$ ($\lambda = 532 \text{ nm}$ は局在波長, n は各膜の屈折率) とした。計算モデルは二光束干渉方式とし、Bi:YIG 膜の膜厚 t_{YIG} , 誘電体多層膜のペア数 r および書き込みエネルギー密度を変化させ、各構造における回折効率を有限要素法 (COMSOL Multiphysics) により評価した。具体的にはまず信号光と参照光を照射し、キュリー温度以上に加熱された部分を磁化反転領域とした。その後、参照光のみを照射し、得られた 1 次回折光の強度, I_1 , と透過光強度, I_0 , より回折効率 $\eta = I_1 / (I_0 + I_1) \times 100$ (%) を評価した。

実験結果及び考察

Fig. 1 に回折効率のガーネット膜厚依存性を示す。評価した範囲の膜厚では、単層膜の回折効率は飽和しており膜厚依存性は見られないが、MPC 構造では、共鳴膜厚 d_{res} においてファラデー回転角が増大するため、この膜厚近傍において回折効率が最大となった。Fig. 2 に単層膜と MPC メディアの磁気フリッジ形状を示す。Fig. 2 (a) に示すように単層膜では表面付近の磁気フリッジがつながったが、MPC では BM 間で光が多重反射して定在波が立つとともに、膜厚方向に熱分布を均一化させる効果もあるため、Fig. 2 (b) に示すように、それに対応した島状の磁気フリッジが膜深くにまで形成され、表面の磁気フリッジの潰れも抑制されることがわかる。これらの効果は BM の層数を増やすことで増大し、その結果、8 ペアの MPC は単層膜 (0.09%) の約 15 倍の 1.4% の回折効率を示した。しかしながら BM の層数を増すと、一般に MPC の Q 値は増大し、光学特性の光の入射角度依存性が大きくなる。発表では、MPC 構造における光の入射角度依存性について調査した結果についても報告する。

謝辞 本研究は日本学術振興会 基盤研究 (S) 26220902 および特別研究員奨励費 25・8942 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) R. Isogai, N. Sagara, T. Goto, Y. Nakamura, P. B. Lim, et al., *J. Magn. Soc. Jpn.*, **38**, pp.119-122 (2014).

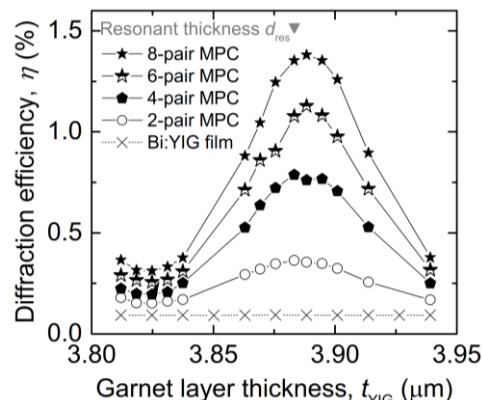


Fig. 1 Garnet thickness dependence of diffraction efficiency

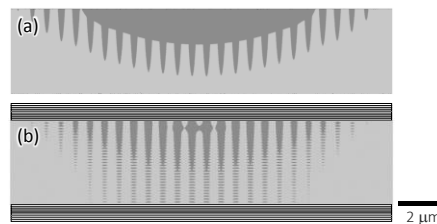


Fig. 2 Typical magnetic fringes. (a) Bi:YIG film. (b) 8-pair MPC.

磁性ガーネット/アルミナ多層膜構造の磁気ホログラム回折効率

小林完、磯谷亮介、鈴木章太、後藤太一、高木宏幸、林攀梅、中村雄一、井上光輝
(豊橋技科大)

The Diffraction Efficiency of Magnetic Volumetric Hologram in Magnetic-Garnet/Alumina Multilayer Film

K. Kobayashi, R. Isogai, S. Suzuki, T. Goto, H. Takagi, P. B. Lim, Y. Nakamura and M. Inoue
(Toyohashi Univ. Tech.)

はじめに

我々は、書き換え可能なホログラムメモリの実現を目指し、ファラデー回転角が大きく透光性に優れた、磁性ガーネット膜を用いて磁気ホログラムの記録・再生が可能であることを示してきた¹⁾。しかしながら、その回折効率は十分ではなく、明瞭な再生像を得るには回折効率の向上が必要である。磁気ホログラムの再生には磁気光学効果を用いるため、回折効率の向上には、回転角を上げるため深い干渉縞を記録する必要がある。磁気ホログラムは熱磁気書き込みで記録するので、書き込み光のエネルギー密度を高くすることで、深くまで書き込みできる。しかし従来の単層膜では、エネルギー密度を上げていくと、膜表面付近の温度が高くなり過ぎ、明瞭なフリンジ形状を維持することができず、回折効率はある値で飽和してしまう。そこで本研究では、膜厚方向に深くまで明瞭な磁気フリンジを形成することを目的とし、アルミナ膜をヒートシンク層として導入した多層膜構造に着目し、シミュレーションを用いてその設計および回折効率の評価を行った。

実験方法

多層膜の設計および体積磁気ホログラムの記録状態、回折効率の評価には有限要素法 (COMSOL Multiphysics v4.3a) を用いた。まず種々の膜厚のアルミナ膜とガーネット膜の組み合わせに対し、ガーネット層に周期的に熱源を与え、種々の熱源温度に対して、形成される磁気フリンジ幅の変化を評価した。その結果を踏まえ、ガーネット単層膜への記録時の温度プロファイルを元に、磁性ガーネット/アルミナ多層膜の設計を行い、2光束干渉法により回折光と透過光の比率から回折効率を評価した。

実験結果

磁気フリンジ幅の変化の評価結果から、任意の熱源温度に対し磁気フリンジ形状の乱れが小さくできるアルミナとガーネットの膜厚の関係を見いだした。この結果と多層膜表面における光の反射が小さくなる条件に基づき、多層膜構造を決定した。書き込みエネルギー密度 80 mJ/cm^2 の条件で設計した多層膜構造とそこに形成された磁気フリンジの形状を、単層膜のそれと合わせて Fig. 1 に示す。図のように単層膜では膜表面付近で隣接するフリンジ同士が熱の拡散により結合し、実効的な磁気フリンジの深さが短くなっている。それに対し、設計した多層膜では磁気フリンジの結合が無く、磁気フリンジが膜厚いっぱいまで形成できることがわかった。Fig. 2 に種々の書き込みエネルギー密度で評価した単層膜と多層膜の回折効率を示す。参考までにレーザー照射直後のフリンジ形状を用いた回折効率を破線で示している。図のように単層膜では約 50 mJ/cm^2 以上で回折効率が飽和しているが、多層膜を用いることで 80 mJ/cm^2 において 0.28%、 100 mJ/cm^2 では 0.35% の回折効率が得られ、レーザー照射直後の単層膜とほぼ同等の値を示した。これより更に膜厚を厚くした多層膜構造を用いることで、高い回折効率が期待できることがわかった。発表では設計方法の詳細等についても報告する。

参考文献 S. Baek, H. Sakurai, P. B. Lim, A. V. Baryshev, et al, IEICE Technical Report, vol. 111, pp. 21-25 (2011)

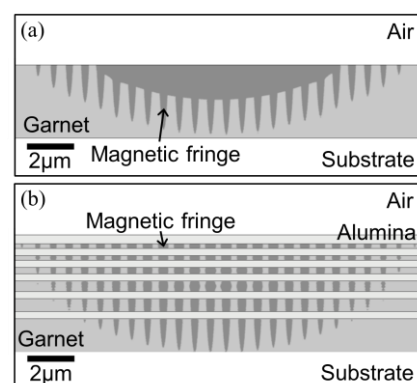


Fig. 1 Shapes of magnetic fringe formed by 80 mJ/cm^2 in (a) garnet single layer and (b) garnet/alumina multilayer films.

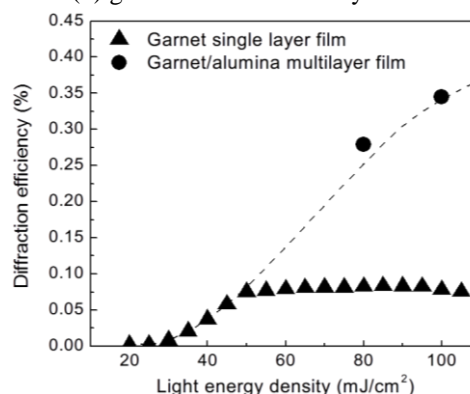


Fig. 2 Diffraction efficiency of the multilayer film and single-layer film.

磁気光学 3次元ディスプレイによる グレーレベルホログラム表示の基礎研究

中村和樹, 高木宏幸, 後藤太一, Lim Pang Boey, 井上光輝
(豊橋技科大)

Fundamental study on magneto-optic three dimensional displays for gray-level holograms
K. Nakamura, H. Takagi, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue
(Toyohashi Univ. Tech.)

はじめに 自然な立体像を表示することができる 3次元表示技術として電子ホログラフィがある。我々は、希土類置換型イットリウム鉄ガーネット(BiDyYFeAlGarnet)を用いた広視野角の磁気光学 3次元ディスプレイについて研究を行ってきた。ピクセル制御は光アドレス方式および熱磁気書き込みを用いている。レーザー光によってキュリー温度以上に加熱された部分は、周りの磁化からの磁界で逆方向に磁化反転し磁気ピクセルを形成する。この時、磁気ピクセルを透過する光のファラデー回転角は、垂直磁化膜のため2値のみであり、表示するホログラムはバイナリーホログラムであった。ファラデー回転角を2値から多値化することで、より実物に近い再生像を得ることができるグレーレベルのホログラムを表示出来ると考えた。本研究は、ファラデー回転角に影響する磁気ピクセルの形成深さが記録時の照射光エネルギーに依存することに着目し、光エネルギーを制御することで磁気ピクセルの多階調化を行った。

実験方法 磁気ピクセルは、光が照射された磁性体表面から加熱され磁化反転が生じる。今回は、照射光エネルギーを制御することで、表面から磁化反転する深さを制御できると考えた。ファラデー回転角は磁化に依存することから、磁気ピクセルの形成深さを制御することで多階調化を行った。磁性ガーネット膜上に、照射光エネルギーを $58 \text{ mJ/cm}^2 \sim 83 \text{ mJ/cm}^2$ まで変化させて熱磁気記録を行い、磁化反転の生じた領域のファラデー回転角の変化を測定した。熱磁気記録には、低解像度空間光変調器上に表示したパターンを縮小転写することで微小な磁気ピクセルを形成するタイリング光学系を用いた。使用した光源は、波長 532 nm 、パルス幅 10 ns 、発振周波数 10 Hz のパルスレーザーである。また、磁気ピクセルの階調に対する回折光強度の変化を調査するため、タイリング光学系を用いて線幅 $1.36 \mu\text{m}$ の格子を磁性ガーネット膜上に書き込み、入射光強度に対する 1 次回折光の強度を光利用効率として測定した。

結果と考察 照射光エネルギー強度に対するファラデー回転角の変化を調査した。光照射前のファラデー回転角を 1 と規格化した結果を Fig.1 に示す。照射光エネルギーの増加にしたがって、ファラデー回転角が変化していることがわかる。これは照射光エネルギーの強度で磁化反転領域およびファラデー回転角を制御できたためと考えられる。Fig.2 に格子状の磁気ピクセルパターンを形成した時の光利用効率を示す。光利用効率はファラデー回転角に依存していることから、照射光エネルギーによって光利用効率を変調できた。現状では、1階調あたり 0.1 mJ/cm^2 の照射光エネルギーの制御により、256階調を得ることができる。これらの結果から、ピクセルの形成条件を任意に制御できる光アドレス型の磁気光学 3次元ディスプレイにおいて、照射光エネルギーの制御により磁気ピクセルの階調を多値化できることが示された。

参考文献

- 1) D. Gabor, *Nature*, 161, 777 (1948).

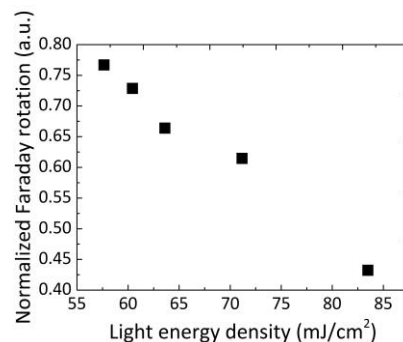


Fig. 1 ファラデー回転角の
照射光エネルギー依存性

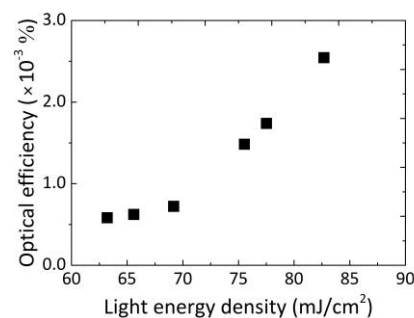


Fig. 2 光利用効率の
照射光エネルギー依存性