

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.

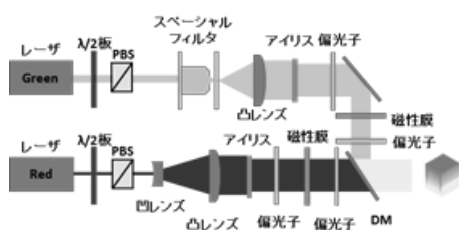


Fig.1 空間分割方式再生系

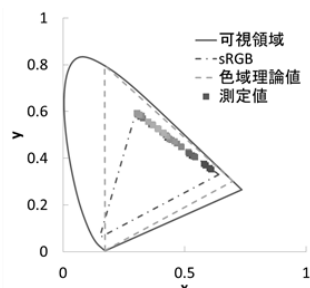


Fig.2 ガモット図(Yxy表色系)

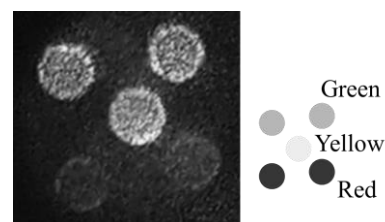


Fig.3 カラー3次元像

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).

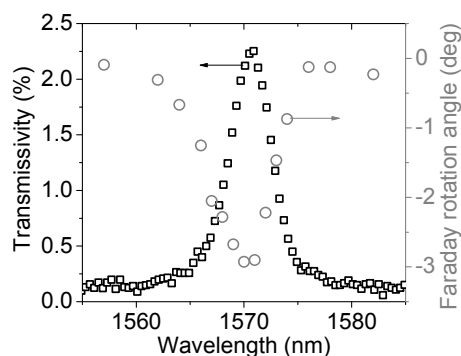


Fig. 1 Faraday rotation angle and transmission spectra in the vicinity of the resonant wavelength of the sample comprising garnet substrate/SiO₂/(Ta₂O₅/SiO₂)⁸/CeYIG/(SiO₂/Ta₂O₅)⁸.

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ンジ形状を示す。Fig. 2 (a) に示すように単層膜では表面付近の磁気フリンジが繋がったが、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ンジが膜深くにまで形成され、表面の磁気フリン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).

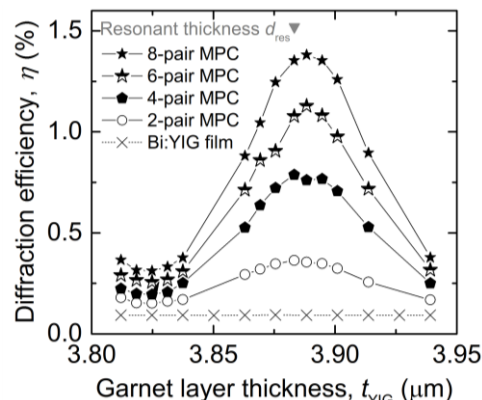


Fig. 1 Garnet thickness dependence of diffraction efficiency

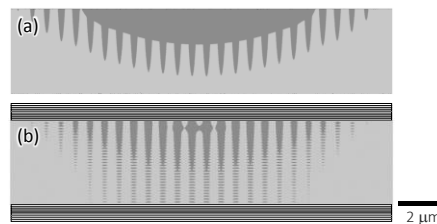


Fig. 2 Typical magnetic fringes. (a) Bi:YIG film. (b) 8-pair MPC.

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)

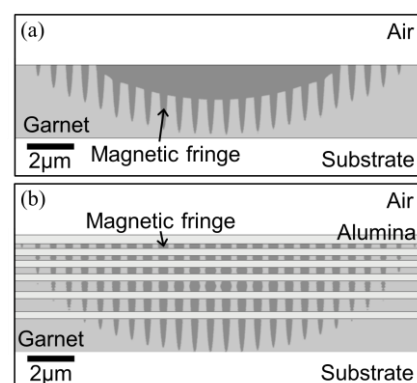


Fig. 1 Shapes of magnetic fringe formed by 80 mJ/cm^2 in (a) garnet single layer and (b) garnet/alumina multilayer films.

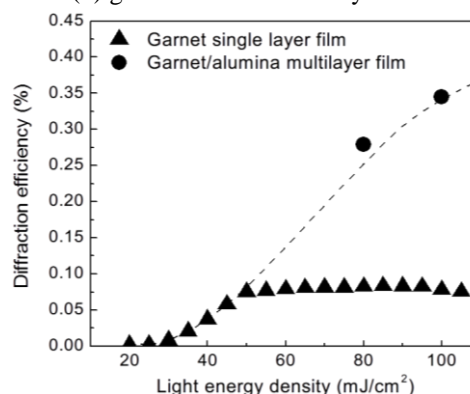


Fig. 2 Diffraction efficiency of the multilayer film and single-layer film.

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として規格化した結果を 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).

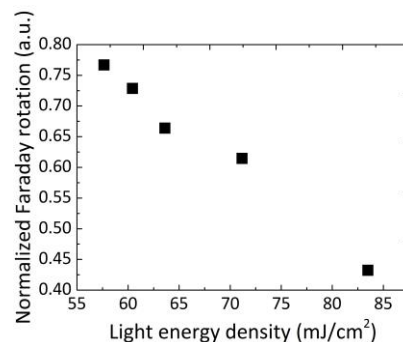


Fig. 1 ファラデー回転角の
照射光エネルギー依存性

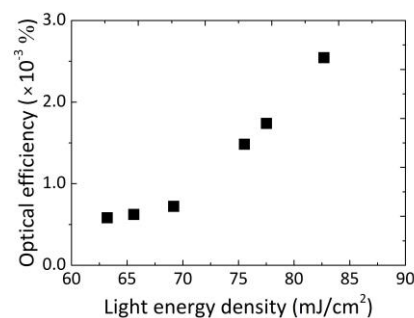


Fig. 2 光利用効率の
照射光エネルギー依存性