

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820124

研究課題名(和文) 高い性能指数を持つ磁性フォトニック結晶の開発と3次元ディスプレイへの応用

研究課題名(英文) Development of high diffraction efficiency three-dimensional display composed of magnetophotonic crystal

研究代表者

高木 宏幸 (Takagi, Hiroyuki)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40390463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、リアルな3D画像を再現する広視野フルパララックス電子ホログラフィディスプレイの実現を目的とするものである。このために、透光性磁気光学膜および磁性フォトニック結晶(MPC)技術を利用することで、4階調以上の表示ができ、回折効率が金属磁性膜を用いた場合の2,000倍以上に達する新規の3Dディスプレイ表示磁性材料を開発した。また併せて、当該表示材料を用いたプロトタイプの3Dディスプレイを構築した。

研究成果の概要(英文)：In this study, I developed wide-viewing-angle holographic display. The display is composed of high transmittance magnetic garnet and magnetophotonic crystal. Therefore, the display has high brightness and multi-level modulation. In addition, I developed prototype of the three-dimensional display.

研究分野：磁性体工学，磁気光学効果

キーワード：電気・電子材料 磁性フォトニック結晶

1. 研究開始当初の背景

3次元(3D)ディスプレイが身の回りで実用化され身近となっているが、既存のメガネ方式や多眼式では、ユーザーにとって疲れやすく、視点を固定され、3次元の正確な位置情報を表示出来ない事からリアルな3D映像を表示できない。

我々は実物同様のリアルな3D像を表示できるディスプレイを目標に、光アドレス型の電子ホログラフィディスプレイを開発してきた。アモルファス垂直磁化膜(*a*-TbFe:膜厚100nm)にレーザを集光・加熱することで約800nmの磁化方位を制御して、磁気ピクセルを形成した。磁気ピクセルによって偏光面が変調され、ホログラムの原理でそれら光が干渉しあい、視野角フルパララックス30度以上の3D像を再生できた。

一方、*a*-TbFeは金属かつ垂直磁化膜であり、光は表層で反射するため、体積効果を利用出来ず2階調変調が上限となっている。また、金属磁性体のため透過率が低く室内光下で観察が難しい輝度の3D像の再生となっていた。

2. 研究の目的

本研究は、リアルな3D画像を再現する広視野フルパララックス電子ホログラフィディスプレイの実現を目的とするものである。このために、透光性磁気光学膜および磁性フォトリソニック結晶(MPC)技術を利用することで、4階調の表示ができ、回折効率が金属磁性膜を用いた場合の2,000倍以上に達する新規の3Dディスプレイ表示磁性材料を開発する。また併せて、当該表示材料を用いたプロトタイプの3Dディスプレイを構築するものである。

3. 研究の方法

平成25年度~27年度の3年間で下記研究を実施した。初年度の平成25年度は、高い回折効率を有しナノスケールの磁区を形成できる希土類置換型磁性ガーネット膜(Bi:YIG)を形成した。また、MPC構造を用いることで回折効率を向上させ高輝度の3D像を再生した。

平成26年度では個々の磁気ピクセルの偏光面回転角を制御することで多階調変調を行った。偏光面回転角は磁気ピクセルの磁化反転の深さに依存するため、深さ方向で磁化反転を制御できる多結晶体の磁性ガーネット膜を作製した。

最終年度では、動画レートでの3D像の再生を目的に、ピクセルサイズ13 μm の3D動画表示のデモンストレーションを行った。

4. 研究成果

(1)高輝度3D像再生用のディスプレイ材料の作製

磁気ホログラムの再生像の明るさは、表示媒体である磁性膜の透過率と偏光面回転角

に依存する。偏光面回転角は磁性膜の磁化および膜厚に依存する。*a*-TbFe膜は金属膜のため透過率は可視光域で1%以下と極めて低い。また、加えて、透過率の低い*a*-TbFeでは膜厚を増やすことができず、偏光面回転角の増大には限界がある。

磁性膜を透光性の希土類置換型磁性ガーネット膜にすることで輝度向上を行った。垂直磁気異方性と高透過率の為にDyとAlを置換した(BiDyY)₃(FeAl)₅O₁₂(BiDyAlYIG)とした。この多結晶磁性ガーネット膜は(2)の多階調表示の際に優れた特性を有する。さらなる輝度向上のためにMPC構造の設計と作製を行った。MPCは磁気光学膜の欠陥層を2つの誘電体ミラーで挟んだマイクロキャビティ構造を持ち、光の局在により特定の波長で高い透過率と大きな偏光面回転角の増大が得られる。構造は(Ta₂O₅/SiO₂)²/BiDyAlYIG/(SiO₂/Ta₂O₅)²とした。BiDyAlYIG膜に光が局在され偏光面回転角が増加する。局在波長は532nmに設計した。

MPCの回折効率は、*a*-TbFeに比べ約2,500倍となり、参照光強度8.6mW/cm²においてディスプレイの輝度として必要な100cd/m²を達成できることを示した。

(2)多階調3D像再生用の多結晶磁性ガーネット膜の作製

磁気ホログラムの輝度が磁気ピクセルの偏光面回転角に依存する事に着目し、熱磁気記録時の磁化反転領域の深さをコントロールすることで多階調表示の原理実証を行った。熱磁気書き込みの光は、磁性体の表面から吸収され、温度が向上する。キュリー温度以上まで加熱された部分が磁化反転される。熱磁気書き込み光のエネルギーを調整することで磁化反転深さを制御でき、ホログラム像の輝度を制御できる。膜厚方向で磁化反転できる磁性材料として、(1)で作製した多結晶磁性ガーネット膜を用いた。磁性ガーネット膜はA₃B₅O₁₂の結晶構造を持っている。スパッタターゲットの組成をA:B=3:5から僅かにずらすことで、不純物が結晶粒間に形成され、個々の結晶粒間の磁気結合が弱い多結晶膜を形成できる。この結果、キュリー温度に加熱された部分のみを磁化反転することが出来る。

上記、多結晶磁性ガーネット膜を作製し50nmの結晶粒が個々に磁化反転できた。磁気ピクセルを制御するための光を60mJ/cm²~102mJ/cm²の領域で調整することで、回折効率を0.2 $\times 10^{-2}$ %~3 $\times 10^{-3}$ %まで連続的に調整できるようになった。

(3)3D動画の基礎特性

磁気情報の消去と再書き込みによる動画表示の原理実証として、デジタルマイクロミラーデバイス(DMD)上に表示したホログラムを直接転写する方法を用いて動画表示を行った。DMD上にホログラムのパターンを

表示し、記録光(波長 532 nm, パルス幅 10 ns, 発振周波数 10 Hz)と同期させて磁性膜上にホログラムを連続的に記録した。磁性膜上の磁気情報のリフレッシュにはコイルによる外部磁界(400 Oe)を用いた。レーザによって磁性膜上に記録されたホログラムは、外部磁界が印加されるまでの 80 msec のあいだ立体像を再生する。これが動画の 1 フレームのサイクルである。磁性膜上にホログラムが表示されている間に DMD は次のフレームのホログラムへ切り替えられる。このシステムを用いて、ワイヤフレームのキューブが回転する動画(ピクセルサイズ 13.6 μm , 画面解像度 367 \times 367 画素, フレームレート 10 fps)を表示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- (1) K. Nakamura, H. Takagi, T. Goto, P. B. Lim, H. Horimai, H. Yoshikawa, V. M. Bove, M. Inoue, "Improvement of diffraction efficiency of three-dimensional magneto-optic spatial light modulator with magnetophotonic crystal", *Appl. Phys. Lett.*, 108, 022404 (2016) 査読有。
 - (2) H. Takagi, K. Nakamura, S. Tsuda, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue, "Magneto-optic Three Dimensional Holographic Display with Tiling Optical Addressing Method", *SENSOR MATER*, 27, 1003-1008, (2015). 査読有
 - (3) H. Takagi, K. Nakamura, K. Kudo, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue, "Colorized magneto-optic three dimensional display using optical space division method", *J. Magn. Soc. Jpn.*, 39, 44-47 (2015). 査読有
 - (4) K. Nakamura, K. Kudo, T. Goto, H. Takagi, L. P. Boey, M. Inoue, "Colorization of Magnetic Hologram Images With Optical Space Division Method", *IEEE Trans. Magn.*, 50, 11, 1-4 (2014). 査読有
 - (5) H. Takagi, K. Nakamura, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue, "Magneto-optic spatial light modulator with submicron-size magnetic pixels for wide-viewing-angle holographic displays", *Opt. Lett.*, 39, 11, 3344-3347 (2014). 査読有
- 〔学会発表〕(計 35 件)
- (1) K. Kudo, K. Nakamura, S. Sakai, T. Goto, H. Takagi, Pang Boey and M. Inoue, "Colorization three dimensional holographic display composed of multi-cavity magneto-phonic crystal", *MMM/INTERMAG 2016 Joint Conf.*, CR-11, pp.357-358, San Diego, USA, 2016.1.13.
 - (2) H. Takagi, K. Kudo, K. Nakamura, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue, "THREE DIMENSIONAL DISPLAY COMPOSED OF MULTI-CAVITY MAGNETOPHOTONIC CRYSTAL FOR COLOR IMAGES", *MORIS2015*, Mo-P-07, pp.31-32, Penang, Malaysia, 2015.11.30.
 - (3) 酒井将生, 工藤慧, 中村和樹, 後藤太一, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "磁気光学 3 次元ディスプレイのための磁性フォトリック結晶の角度依存性の改善", 電子情報通信学会 CPM 研究, CPM2015-96, pp.59-62, 長岡, 2015.11.7.
 - (4) 根本亜紀, 山崎和樹, 津田宗太郎, 工藤慧, 中村和樹, 後藤太一, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "磁気光学 3 次元ディスプレイの書き込みエネルギーの低減および回折効率の向上", 電子情報通信学会 CPM 研究会, CPM2015-95, pp.55-58, 長岡, 2015.11.7.
 - (5) 高木宏幸, 後藤太一, 中村雄一, Lim Pang Boey, 井上光輝, "磁気光学ホログラフィックディスプレイ", *Optics and Photonics Japan2015*, 28pBS3, 筑波, 2015.10.28.
 - (6) 津田宗太郎, 中村和樹, 高木宏幸, 後藤太一, 林攀梅, 井上光輝, "人工磁気格子を用いた磁気光学 3 次元ディスプレイに関する研究", 平成 27 年電気学会 基礎・材料・共通部門大会, 18-B-p2-5, pp.172-177, 金沢, 2015.9.18.
 - (7) 工藤慧, 中村和樹, 酒井将生, 後藤太一, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "磁気光学 3 次元ディスプレイのカラー化", 平成 27 年電気学会 基礎・材料・共通部門大会, 18-B-p2-4, pp.166-171, 金沢, 2015.9.8.
 - (8) 工藤慧, 中村和樹, 酒井将生, 後藤太一, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "カラー用磁性フォトリック結晶の設計", 第 39 回日本磁気学会学術講演会, 08aD-8, p.52, 名古屋, 2015.9.8.
 - (9) K. Nakamura, H. Takagi, T. Goto, P. B. Lim, and M. Inoue, "Study on magneto-optic three dimensional display composed of magnetophotonic crystal", *META'15*, P6, pp.337-338, NYC, USA, 2015.8.6.
 - (10) 酒井将生, 工藤慧, 中村和樹, 後藤太一, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "磁性フォトリック結晶の広角化に関する研究", 電気学会マグネティックス研究会, MAG-15-073, pp.13-16, 長岡, 2015.8.4.
 - (11) H. Takagi, K. Nakamura, T. Goto, P. B. Lim, and M. Inoue, "Magneto-optic Three Dimensional Holographic Display with Tiling Optical Addressing Method", *IGNITE2014*, 2014-03-36-0042, pp.256-259, Penang, Malaysia, 2014.12.15.
 - (12) H. Takagi, K. Nakamura, K. Kudo, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue, "Colorization of Magneto-Optic Three-Dimensional Display Composed of Magnetic Garnet Films", 2014

- MRS Fall Meeting & Exhibit, L14.16, Boston, USA, 2014.12.4.
- (13) K. Nakamura, H. Takagi, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue, "Magnetophotonic Crystal for Magneto-Optic Three Dimensional Display with Optical Addressing Method", 2014 MRS Fall Meeting & Exhibit, L11.07, Boston, USA, 2014.12.3.
- (14) K. Nakamura, H. Takagi, T. Goto, P. Lim and M. Inoue, "Modulation of Faraday rotation angle for gray-level MO-3DD.", 59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference, BV-06, p. 213, Hawaii, USA, 2014.11.4.
- (15) H. Takagi, K. Nakamura, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue, "Magneto optic Three dimensional Display Using Magnetic Lattice Structure", ICAUMS2014, Symposium, -4A, -27, p.240, Hainan, China, 2014.10.31.
- (16) K. Nakamura, H. Takagi, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue, "Magneto optic Three Dimensional Display for Gray level Holograms", ICAUMS2014, Symposium, Session -1A, -05, p.229, Hainan, China, 2014.10.29.
- (17) 津田宗太郎, 中村和樹, 後藤太一, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "磁気光学3次元ディスプレイの多諧調化に関する研究", 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM), CPM2014-120 (2014-10), p.69-73, 長野, 2014. 10.25.
- (18) 根本亜紀, 松上一樹, 中村和樹, 後藤太一, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "希土類-遷移金属薄膜による磁気光学3次元ディスプレイのピクセル形成エネルギーの低減", 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM), CPM2014-119 (2014-10), p.65-68, 2014.10.25.
- (19) 松上一樹, 根本亜紀, 中村和樹, 後藤太一, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "磁気光学3次元ディスプレイのための熱磁気記録光学系の研究", 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM), Vol.114, No.237, CPM2014-97, p.25-28, 東京, 2014.10.8.
- (20) 中村和樹, 高木宏幸, 後藤太一, Lim Pang Boey, 井上光輝, "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", 第38回日本磁気学会学術講演会, 2pC-15, p.57, 東京, 2014.9.2.
- (21) 高木宏幸, 工藤慧, 中村和樹, 後藤太一, Lim Pang Boey, 井上光輝, "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", 第38回日本磁気学会学術講演会, 2pC-11, p.53, 東京, 2014.9.2.
- (22) 中村和樹, 後藤太一, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "磁性フォトニック結晶を用いた広視野角磁気光学3次元ディスプレイの光利用効率向上", 電気学会 基礎・材料・共通(A)部門大会, 21-B-a2-5, p.14, 長野, 2014.8.21.
- (23) (invited) H. Takagi, K. Nakamura, K. Kudo, T. Goto, P. B. Lim, M. Inoue, "Magneto-optic Three-dimensional Display Using Magnetophotonic Crystal", 23rd congress International Commission for Optics, 24, Santiago de Compostela, Spain, 2014. 8.26.
- (24) Nakamura K., Kudo K., Goto T., Takagi H., Lim P.B., Inoue M., "COLORIZATION OF MAGNETO-OPTIC THREE DIMENSIONAL DISPLAYS USING OPTICAL SPACE DIVISION METHOD", MISM2014, 2PO-I2-5, p.786, Moscow, Russia, 2014.7.2.
- (25) K. Nakamura, K. Kudo, T. Goto, H. Takagi, P. B. Lim, M. Inoue, "Colorization of Magneto-optic Three Dimensional Display with Magnetic Garnet Films", IEEE International Magnetism Conference, HV-02, Dresden, Germany, 2014.5.8.
- (26) 中村和樹, 後藤太一, 高木宏幸, Lim Pang Boey, 井上光輝, "磁気光学3次元ディスプレイのための磁性フォトニック結晶の構造設計", IEEE Magnetics Society 名古屋支部若手研究会, 名古屋, 2014.2.7.
- (27) K. Nakamura, K. Matsugami, T. Goto, H. Takagi, P. B. Lim, M. Inoue, "High brightness magneto-optical three dimensional displays using magnetophotonic crystal", MORIS2013, Th-02-03, pp.198-199, 埼玉, 2013.12.5.
- (28) K. Matsugami, K. Nakamura, H. Takagi, M. Inoue, "Study on Magneto-optic Three-dimensional Display with Light-emitting Diode Array", ISTS2013, ID226, pp. 257-258, Hong Kong, China, 2013.11.21.
- (29) 中村和樹, 高木宏幸, 林攀梅, 井上光輝, "磁性フォトニック結晶を用いた磁気光学3次元ディスプレイの基礎特性", 日本電子材料技術協会 第50回秋期講演大会, P7, p.18, 東京, 2013.11.8.
- (30) H. Takagi, K. Nakamura, K. Matsugami, P. B. Lim, M. Inoue, "Magneto-optic three-dimensional display composed of magnetic garnet films", 58th Annual Conference on MMM, FC-06, pp.528, Denver, USA, 2013.11.7.
- (31) K. Nakamura, K. Matsugami, T. Goto, H. Takagi, P. B. Lim and M. Inoue, "Improvement of Brightness Using Magneto-photonic Crystal for Magneto-optical Three Dimensional Displays", The Irigo Conference 2013, 25P-66, p.97, 田原, 2013.10.25.
- (32) 中村和樹, 松上一樹, 高木宏幸, 林攀

梅, 井上光輝, “磁性ガーネット膜を用いた磁気光学 3 次元ディスプレイ”, 第 37 回日本磁気学会学術講演会, 3aF-5, p.99, 札幌, 2013.9.3.

- (33) 中村和樹, 松上一樹, 高木宏幸, 林 攀梅, 井上光輝, “磁性ガーネット膜を用いた磁気光学 3 次元ディスプレイの光利用効率改善”, 電気学会 マグネティックス研究会, MAG-13-083, pp.77-81, 名古屋, 2013.8.8.
- (34) K. Nakamura, K. Matsugami, H. Takagi, P. B. Lim and M. Inoue, “Magneto-optical three-dimensional display with magnetic garnet thin films”, the 2013 Summer Topicals meeting, MP10, 2013.7.8.
- (35) **(invited)**H. Takagi, K. Nakamura, P. B. Lim and M. Inoue, “Magnetophotonic microcavity for holographic three-dimensional display”, CC3DR 2013, pp.2-3, Jeju, Korea, 2013.6.24.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.spin.ee.tut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 宏幸 (TAKAGI, Hiroyuki)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・

准教授

研究者番号：40390463