

令和元年6月24日現在

機関番号：52601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21569

研究課題名(和文) 高速磁区制御機能を持つ光人工磁気格子の形成と固体光偏向素子への応用

研究課題名(英文) Development of the magneto optic lattice with controlled magnetic domain;
Application for a solid-state optical deflector

研究代表者

水戸 慎一郎 (Mito, Shinichiro)

東京工業高等専門学校・電子工学科・准教授

研究者番号：10637268

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)： 逆磁歪効果により磁性ガーネット層の磁区を制御できる光人工磁気格子膜を形成し、その機能を用いて光回折状態を連続的に電子制御できる固体光偏向素子を開発した。

組成探査に適した液相エピタキシー成膜装置を開発し、磁気回折応用に適した縞状磁区構造をもつ単結晶磁性ガーネット膜を開発した。開発したガーネット膜に圧電アクチュエータで300ppmの変位を加えたところ、磁気回折角が約1度変化した。また、回折効率も応力により変化させられることを明らかにした。これらは、世界ではじめての応力による磁気回折制御例である。以上の成果を応用し、個体光偏向素子を試作し、動作を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気回折を用いた光制御に、逆磁歪効果を用いるという新たな手法を提供することができた。また、磁気回折を用いた応用に適した磁性ガーネットの組成を提案することができた。応力を印加した際の磁気回折の変化はこれまで明らかになっておらず、本研究により回折角度、及び回折強度を変化させられるとわかったことには学術的意義があるといえる。また、応力は圧電アクチュエータを用いることで電圧制御できるため、CMOS等との親和性が高く、磁気回折を利用した光制御デバイス実現の助けとなると言え、社会的意義も高いと言える。

研究成果の概要(英文)： We developed the Magneto-optic (MO) lattice with strain controlled magnetic domain. By using the function of the MO lattice, a electrically-controllable solid-state optical deflector was made.

A optimum magnetic garnet film for the optical reflected was fabricated by the developed liquid phase epitaxy furnace. The angle of the deflected light from the fabricated film was changed 1 degree with the strain of 300ppm. In addition, diffraction efficiency was also modulated by the stress.

研究分野：磁気光学

キーワード：磁気回折 逆磁歪効果 磁性ガーネット 光偏向器 光変調器

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

レーザー光源を用いた様々な応用の中で、光路を制御する光偏向素子はキーデバイスの一つとして重要な位置付けにある。光偏向素子には、ガルバノミラーや MEMS ミラーなどの鏡を用いたものや、電気光学効果を用いたものがあるが、前者は比較的安価で偏向角も大きい反面、マイクロ秒以下の高速動作が難しい。電気光学効果を用いたものはピコ秒オーダーの高速動作ができるものの、制御できる偏向角が4度程度に留まっている。光交換器やレーザーレーダーなどの光応用システムでは、数十度以上の光偏向をナノ秒オーダーの高速動作で実現する光偏向素子が熱望されているが、未だこの要求を同時に満たすものは実現されていない。

我々は、ストライプ状磁区をもつ磁性ガーネット膜から磁気光学効果により光回折現象（ファラデー回折）が発現することに着目し、この原理に基づく光偏向素子の実現を理論・実験の両面から検討してきた。Numata らの報告 (T. Numata, et al., "Stripe domain control in garnet films," IEEE Trans. Magn., 1197 (1980)) によれば、ストライプ状磁区の方位と幅とを制御することで、大きな偏向角で光の回折を制御できる可能性がある。しかしこの研究では、磁区幅の制御に外部印加磁界を用いているため、磁区幅比の保存が難しいことや、全体が一様に磁化されてしまうことから、光偏向角は数度に留まっている。また磁界印加による磁区の高速制御が困難であることなどの理由から、実用に供する具体の素子実現には至っていない。そこで本研究では、逆磁歪効果を利用した磁区幅の制御を行うことで、これら難点のない高速広角度光回折機能を有する光人工磁気格子膜の実現を図ることを目的とした。

2. 研究の目的

本研究は、逆磁歪効果により磁性ガーネット層の磁区幅を高速に制御できる光人工磁気格子膜の形成と、その機能を用いて光回折状態を連続的かつ大幅に電子制御できる固体光偏向素子を実現するものである。磁性ガーネット膜は、磁区幅に応じた光回折現象（ファラデー回折）を示すことから、可動部のない固体光偏向素子への応用が期待される。しかし一般に、磁区幅の制御は磁界印加により行われるため、変調速度が遅く、また光回折角が小さい難点があった。我々は、応力を印加した磁性ガーネット膜の磁気異方性が実効的に変化することに着目し、この手法で磁区幅（したがって光回折角）を連続的かつ大幅に制御できることを理論的に示した。本研究はこの知見に基づき、磁性ガーネット単結晶膜と圧電膜とを積層した2層構造で実験的検証を行うと共に、最終的に光人工磁気格子膜と圧電膜とを積層したハイブリッド構造膜を形成し、TTL レベルの電圧で45度以上の光回折角を高速に連続制御できる固体光偏向素子の実現を目指す。

3. 研究の方法

(1) 逆磁歪効果による回折角度変調の原理実証

市販のイットリウム鉄ガーネット (Yttrium Iron Garnet: YIG) 単結晶膜に Al 反射膜をスパッタリング法により形成し、その上に圧電アクチュエータを接着した (図 1(a))。作製したサンプルに直線偏光させたレーザー光を入射し、反射光をクロスニコル配置の検光子に通すことで磁気回折光を取り出した (図 1(b))。この状態で圧電アクチュエータに加える電圧を加え、磁性ガーネットを歪ませることで応力を印加し、応力印加による磁気回折の変化を調べた。

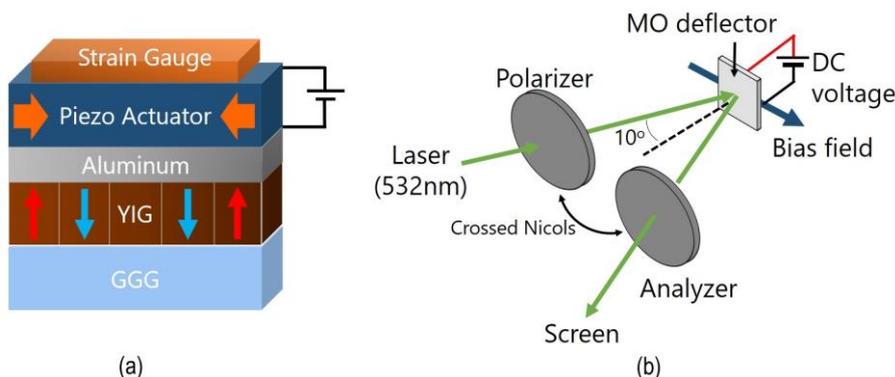


図 1 (a) 応力印加による磁気回折変調の原理実証デバイスと (b) 実験光学系

(2) 磁気回折応用に適した単結晶磁性ガーネット膜の開発

市販の YIG 膜は磁気光学効果 (ファラデー効果) が小さく、磁気回折応用には向かなかった。そこで、ファラデー効果を大きくする効果のある Bi 添加を行い、磁気回折応用に向けた YIG 膜の組成探査を行った。成膜には、単結晶ガーネット膜の作製に適した液相エピタキシー (Liquid Phase Epitaxy: LPE) 法を用いたが、一般的な LPE 装置は溶液の交換が難しく、組成探査に向かない。そこで、溶液交換が容易な液相エピタキシー装置の開発も行った。

(3) 磁気光学光偏向器の開発

開発した磁気回折に適した磁性ガーネット膜を用い、光偏向器の試作を行った。回転磁場発生装置の中心にガーネット膜を設置し、磁場により光回折方向をコントロールできるか調べた。図2に、開発した磁気光学光偏向器と光学系を示す。

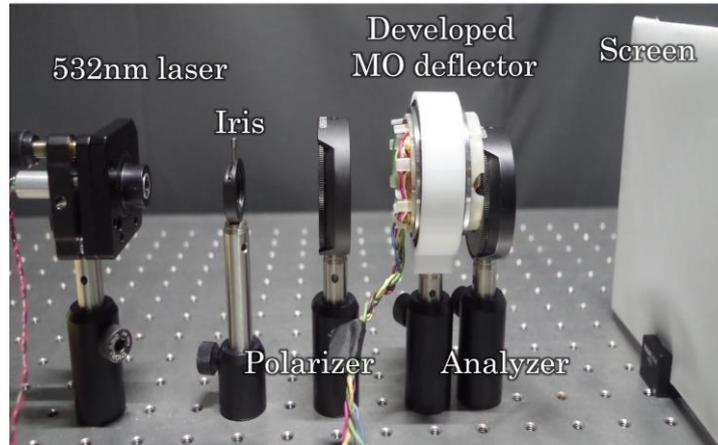


図2 開発した磁気光学光偏向器(MO deflector)と光学系

(4) 応力による磁気回折光変調器の開発

応力印加により磁気回折を変化させ、光強度を変化させるデバイスの試作を行った。磁性ガーネット単結晶膜をスルーホール付き圧電アクチュエータではさみ、応力印加により磁気回折が変化するか調べた。

4. 研究成果

(1) 逆磁歪効果による回折角度変調の原理実証

縞状磁区を持つ磁性ガーネット膜に圧電アクチュエータを接着し、圧電アクチュエータに加える電圧を変化させ、磁性ガーネット膜の応力を加えた際の磁気回折変化を図3に示す。中心の光点が0次光、斜めの方向に対称的に現れているのが磁気回折光(1次光)である。図4(a)が応力印加前、図3(b)が応力印加後の磁気回折像であるが、応力を印加することでスクリーン上における0次光と1次光の距離が変化した、これは、回折角が9.12度から10.20度に、約1度変化したことを表している。また、計算上では縞状磁区の周期が3.3mmから3.0mmに変化したことに相当する。この結果より、応力(逆磁歪効果)により磁気回折を制御できることを明らかにできた。

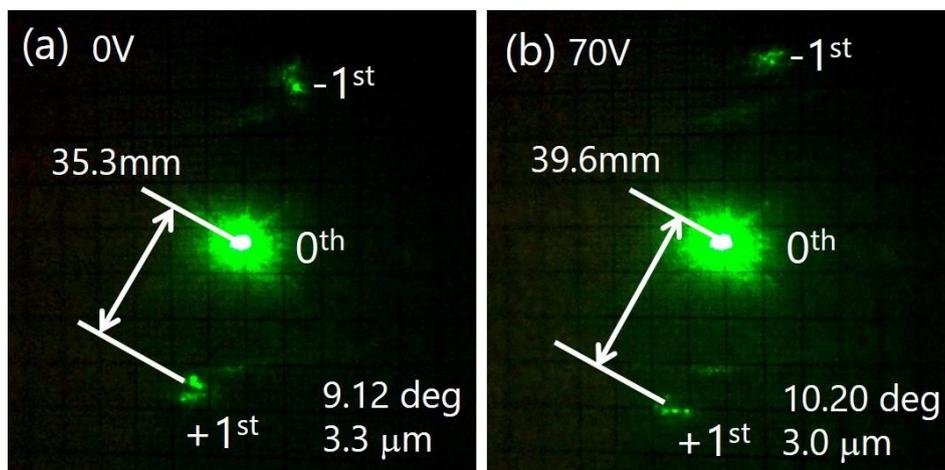


図3 応力印加による磁気回折角変化

(2) 磁気回折応用に適した単結晶磁性ガーネット膜の開発

内部でるつぼを 180 度回転できるようにし、溶液を流し捨てて交換することができる液相エピタキシー装置を開発した。図 4 に、この装置で成膜した Bi 置換磁性ガーネット膜の写真と磁区像を示す。市販の YIG 膜の回折効率(0 次光に対する 1 次光強度)は約 1%と低かったが、組成探査の結果、 $\text{Bi}_{0.2}\text{Y}_{2.8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ の組成において約 50%と、YIG と比較して 50 倍の磁気回折効率を持つガーネットを得ることができた。これは、Bi を添加したことによるファラデー回転角の向上と、磁気異方性の変化によって光の進行方向に平行な磁気モーメントの成分が増えたためであると考えられる。

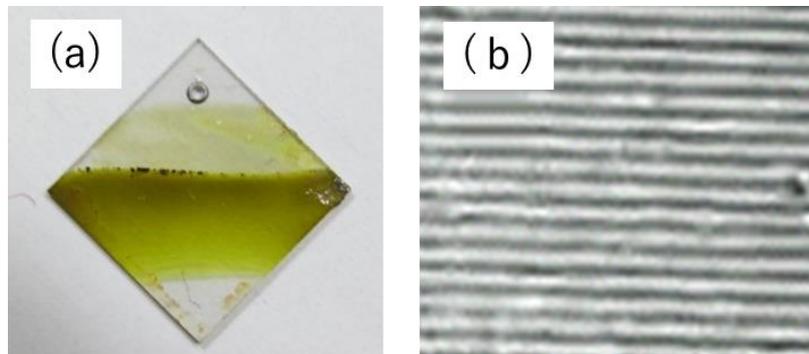


図 4 作製した磁性ガーネット単結晶膜の (a) 写真, および (b) 磁区観察像

(3) 磁気光学光偏向器の開発

開発した磁気光学光偏向器の回折像を図 5 (a) に示す。本研究で開発したガーネット膜を用いることで、明瞭な 1 次磁気回折光を得ることができた。面内に回転磁場を与えることで、1 次回折光の回折方向が変化し、回折方向を制御することが出来た。図 5 (b) に、回転磁場を与えて 1 次回折光を動かしている状態での長時間露光 (1 秒) 写真を示す。1 次回折光が円周上を移動している様子が分かる。

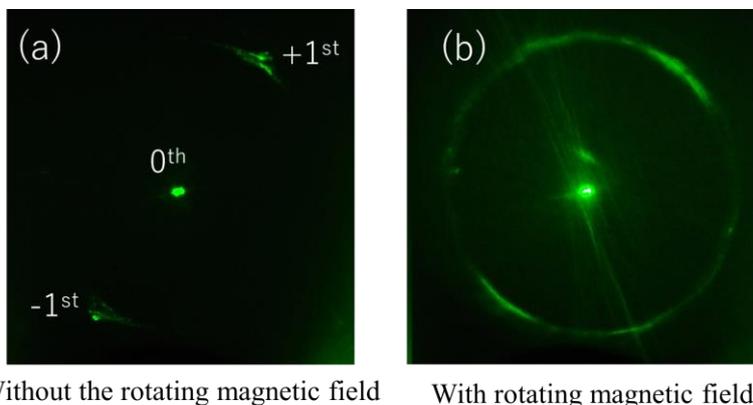


図 5 磁気光学光偏向器の (a) 回折像. および (b) 回転磁場印加時の写真

(4) 応力による磁気回折光変調器の開発

図 6 に、印加電圧に対する 0 次光強度変化を示す。圧電アクチュエータに電圧を印加し、これにより発生した応力が磁性ガーネットについたわることで、磁気回折効率(0 次光強度)が変化していることが分かる。これは、逆磁歪効果により磁気異方性が変化したことで、縞状磁区内の磁気モーメントの方向が変化したためであると考えられる。一般に逆磁歪効果により磁気モーメントの方向を変えるにはバイアス磁場が必要であるが、縞状磁区の場合は隣り合った磁区間の浮遊磁場により磁気モーメントの変化を効率的かつ可逆的に起こせていると考えられる。

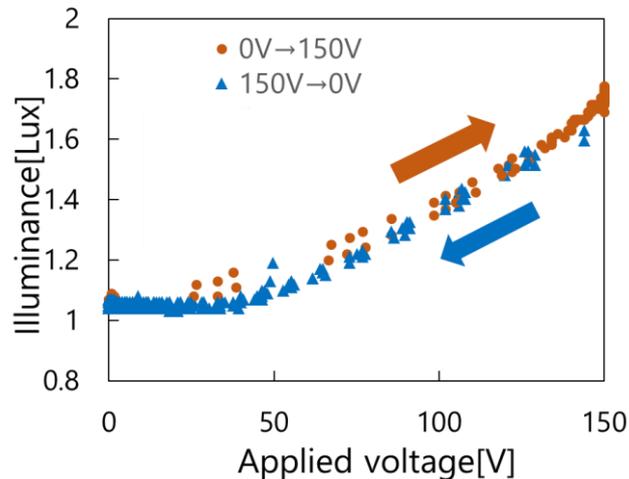


図 6 圧電アクチュエータへの印加電圧に対する 0 次光強度変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

① Shinichiro Mito, Yuki Yoshihara¹, Hiroyuki Takagi, and Mitsuteru Inoue, Stress induced modulation of magnetic domain diffraction of single crystalline yttrium iron garnet, AIP Advances 8, 056439 (2018)

② Shinichiro Mito, Satsuki Kikuchi, Yasutoshi Ito, Nana Ota and Mitsuteru Inoue, Influence of Sputtered ZnO and Al:ZnO Top Layers on Magneto-Optic Responses of Yttrium Iron Garnet Films, Crystals 2018, 8(10), 396

③ Shinichiro Mito, Yusaku Shiotsu, Junji Sasano, Hiroyuki Takagi, and Mitsuteru Inoue, Enhancement of magnetic circular dichroism in bi-layered ZnO-Bi:YIG thin films, AIP Advances, 7, 056316 (2017)

④ Shinichiro Mito, Takuya Kawashima, Takuma Kawaguchi, Junji Sasano, Hiroyuki Takagi, and Mitsuteru Inoue, Electroless Plated Maghemite for Three-dimensional Magneto Photonic Crystals, AIP Advances, 7, 056304 (2017)

〔学会発表〕 (計 3 件)

① Shinichiro Mito, Yuki Yoshihara¹, Hiroyuki Takagi, and Mitsuteru Inoue, Stress induced modulation of magnetic domain diffraction of single crystalline yttrium iron garnet, 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Pittsburgh, PA, USA (2017)

② Shinichiro Mito, Satsuki Kikuchi, Yasutoshi Ito, Nana Ota and Mitsuteru Inoue, Influence of Sputtered ZnO and Al:ZnO Top Layers on Magneto-Optic Responses of Yttrium Iron Garnet Films, 11th International Conference of Electrical, Transport, and Optical Properties on Inhomogeneous Media, Cracow, Poland (2018)

③ 志村 開, 水戸 慎一郎, 磁性ガーネット単結晶膜の組成探査へ向けた液相エピタキシー装置の開発, 信学技報, vol. 118, no. 228, CPM2018-40, pp. 17-20, 2018 年 10 月

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ

<https://mitolab.net/magnetooptics/>

新聞掲載

日刊工業新聞「東京・多摩から先進技術支援 5G・自動運転、高精度化へ実証」2019年
4月16日付朝刊, (33)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。