

令和元年6月20日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220902

研究課題名(和文) ナノスケールで構造を制御した人工磁気格子とその工学的応用

研究課題名(英文) Artificial Magnetic Lattices with Introducing Nanoscale Structures and its Engineering Applications

研究代表者

井上 光輝 (Inoue, Mitsuteru)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90159997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 152,100,000円

研究成果の概要(和文)：数nmから数百nmのスケールで人為的構造を導入した磁性体は、構造に起因する新規の磁性と機能を示すことから、これを工学的に利用する研究が重要な技術分野を形成しつつある。本研究において、我々は磁化の位相波であるスピン波の周期構造スピンシステムの性質を調べ、磁気媒体上に金属周期構造を形成することで、マグノンニック・バンドギャップを発現し、特定周波数ではスピン波の伝搬が阻止されることを実験的に示した。磁気光学効果を使った三次元ディスプレイを世界にさきがけて実証し、三原色を使ったカラー化、動画化の原理実証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、この「人工磁気格子」を一つの材料と見なし、光やスピン波といった異なる磁気情報キャリアの性質を踏まえながら、その基礎特性と設計指針とを解明することで、国内外を通じて例のない新たな材料分野の形成を行ったものである。

研究成果の概要(英文)：Research fields engineering of magnetic media with nanoscale artificial structures are becoming important technology because of their unique and interesting properties. In particular, interactions among light, spin waves, high frequency electromagnetic waves, and nanoscale structures have attracted interests because of the recent rapid development of the information communication technology. We investigated the fundamental properties of spin waves propagating in periodic spin systems, exhibiting magnonic band gap. In addition, some types of three-dimensional displays were demonstrated and improved using magneto-optical materials. These structures, namely artificial magnetic lattices, are significantly fascinating techniques not only in the field of physics but also engineering. In this study, fundamental properties and design rules of artificial magnetic lattices controlling photons, and spin waves were experimentally and theoretically revealed.

研究分野：工学、電子・電気材料工学

キーワード：磁性体 誘電体 光学 人工磁気格子

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

数 nm から数百 nm のスケールで人為的構造を導入した磁性体は、構造に起因する新規の磁性と機能を示すことから、これを工学的に利用する研究が重要な技術分野を形成しつつある。特に、最近の情報通信テクノロジーの飛躍的な進展に伴い、重要な情報キャリアである光やスピン波、あるいは高周波電磁界とナノ構造との相互作用が注目されるようになった。最もよい例は、光波長オーダーで周期構造体を形成したフォトニック結晶で、フォトニック・バンド構造や光局在現象を利用した多彩なフォトン輸送制御が試みられている。

これらフォトニック結晶に関する一連の研究とは別に、我々は、透明強磁性体にナノスケール構造を導入することで、巨大な磁気光学効果が発現することを見出し、磁性体のスピンの制御可能な新しい光学媒体の実現可能性を示した。この光とナノ構造スピンシステムとが結合したフォトニック結晶（磁性フォトニック結晶）は、光波の位相干渉を利用したものであるが、光ではなくても、波動として存在するものであれば同様の機能が発現する。

2. 研究の目的

我々は、上述の観点から、これまでの研究成果を発展させ、磁化の位相波であるスピン波の周期構造スピンシステムの性質を調べ、磁気媒体上に金属周期構造を形成することで、マグノニック・バンドギャップを発現し、特定周波数ではスピン波の伝搬（マグノンの存在）が阻止されることを実験的に示すことを目指した。磁気と光については、アプリケーションの実証フェーズは、本プロジェクト開始時点ですでに超えていたため、実用に耐えうるデバイスを目指し、高性能化を目指した。

すなわち、本研究は、この「人工磁気格子」を一つの材料と見なし、光やスピン波といった異なる磁気情報キャリアの性質を踏まえながら、その基礎特性と設計指針とを解明するとともに、デバイス実証・高性能化をすることを目的とした。

3. 研究の方法

上記の目的の達成のために、我々のグループで比較的良好に調べてきた磁性フォトニック結晶中のフォトンの振る舞いに習い、マグノニック結晶を用いてナノスケール波長のスピン波（マグノンフロー）の制御を行った。人工磁気格子に関する研究で、スピン波制御を行うマグノニック結晶は、構成材料の開発を含め基礎的研究課題が山積していた。そこで、本研究では、

- ①単結晶磁性ガーネット膜の形成とマグノニック結晶への展開、
- ②マグノニック結晶を用いた高感度マイクロ磁界センサの構築、
- ③磁性フォトニック結晶を用いた三次元ホログラムディスプレイの高性能化、等を行った。

4. 研究成果

①スピン波人工磁気格子：マグノニック結晶

小型・高集積化したマグノニック結晶デバイスへ展開するには、静磁波に代えてナノスケールオーダーの波長をもつスピン波の利用が不可欠となる。一般に、スピン波・静磁波の分散曲線は媒体厚に強い依存性を持つ。イットリウム鉄ガーネット（YIG）中でのスピン波（静磁波）の分散関係（波長 λ vs. 周波数 f ）から分かるように、数 GHz の帯域でナノスケール波長のスピン波を得るには、数十 nm 厚の良質な単結晶 YIG が必須となる。しかし研究開始時点で、500 nm 以下の膜厚で、ダンピング係数が概ね $\alpha = 10^{-5}$ 程度の良質な単結晶 YIG 膜は得られていなかった。このため、スピン波の伝搬損失は犠牲にして、薄くかつ加工性のよいパーマロイなどの金属強磁性膜（パーマロイで $\alpha = 10^{-3}$ ）も用いられているが最終的なマグノニック結晶デバイスへの応用では数十 nm 厚の薄い良質な単結晶 YIG 薄膜が不可欠と言える。そこで、本研究で成膜装置を準備し、薄膜を形成し、スピン波を制御したデバイス開発を行った。

①-1 スピン波人工磁気格子：マグノニック結晶

スピン波人工磁気格子を金属膜と、厚膜の YIG 膜上に形成することで、スピン波の伝搬速度を低速化し、欠陥層にスピン波を局在させることに成功した。YIG 上に、銅を装荷すると、銅がスピン波を減衰させ、波長が長くなる。銅の膜厚が十分に厚く 0.5 μm 以上のとき、この効果がみられることを定量的に明らかにした。本成果は、[J. Appl. Phys. 116, 083903 (2014).]と、[J. Appl. Phys. 117, 17E510 (2015).]で、報告した。

上記は、表面スピン波に対するマグノニック・バンドギャップの実証であったが、集積回路の応用を考えると、前進体積スピン波が適する。そこで、前進体積スピン波を用いたマグノニック・バンドギャップの実証も行った。

前進体積スピン波は、他のスピン波のモードと違い面内等方性が高いため、材料端部や境界でスピン波が反射し、ノイズを生みやすく、マグノニック・バンドギャップの観測が困難だった。我々は、このノイズを、金薄膜を用いた吸収層を使って抑え、前進体積スピン波に対するマグノニック・バンドギャップを観測した。得られた実験結果は、計算結果とよく一致し、実験で、前進体積スピン波に対するバンドギャップを確認した例としては、最初の報告となった。本件の詳細は、[Phys. Rev. Applied, 11, 014033 (2019).]に報告した。

①-2 差動スピン波回路を使った高感度磁界センサ

上述のスピン波人工磁気格子を使うことで、磁界に対する感度は上昇したが、これによって、

外乱の影響を強く受けるようになった。そこで、外乱の影響を抑制する手法として広く知られている、差動回路をスピン波回路にも適用した。磁化方向の異なる YIG 膜 2 つを使い、スピン波分散関係が外部磁場の変化に対しては同方向、外部温度の変化に対しては反対方向に変化するよう、構造設計を行った。実験の結果、1000 倍の外乱抑制に成功し、保有する測定系で測定できる限界の安定性を確認できた。本成果は、[Appl. Phys. Lett. 106, 132412 (2015).]に報告した。

② 光人工磁気格子：磁性フォトニック結晶

光波人工磁気格子は、3次元ディスプレイに適用して、高輝度化、高精細化を行っている。さらに、これまで緑色だけであった再生を、赤、青に拡張し、三原色の再生を可能にすることでフルカラーの3次元像の再生を行った。さらに、再生できる像は静止画に留まっていたことから、動画の再生が行えるように、装置を改造し、動画再生を目指した。

②-1 光波人工磁気格子：磁性フォトニック結晶を使った3次元ディスプレイの開発

研究開始時点で既に、磁性ガーネットにレーザーで微小な磁化反転領域をピクセルとして利用すると広視野角の3次元像が表示できることは明らかにしていた。しかし、これは、TbFe と呼ばれる磁気光学効果が非常に小さい金属材料を使用していたため、3次元像が不明瞭で輝度が低かった。そこで、これを、光波人工磁気格子と入れ替えた。すると、高輝度で鮮明な像が得られた。詳しく解析したところ、本媒体を用いると、透過率と磁気光学効果の大きさから計算される回折効率が向上していた。即ち、光波人工磁気格子を用いることで、3次元ディスプレイの高精細化に成功したと言える。得られた像の視野角はプラスマイナス 20 度であった。本件は、論文[Appl. Phys. Lett. 108, 022404 (2016).]で報告した。

②-2 フルカラー化

これまでの磁性膜を使用した3次元ディスプレイは、磁気光学効果の大きな波長 532 nm 単色での再生に留まっており、緑色の像しか表示ができなかった。自然な色彩を表現するために、フルカラー化を行った。

磁気光学効果の大きさは媒体の光路長に依存することから、膜厚を各波長に対応させて変化することで、赤・青・緑の三原色の3次元像の表示に成功した。左右の視野角に加え、上下の視野角ももつ、フルパララックスの3次元像が表示できている。この三原色を組み合わせることで、人間の目を感じる事が出来る全ての色彩を、磁性膜を使って表示できるようになった。本成果は、[IEEE Trans. Magn. 50, 1-4 (2014).][J. Magn. Soc. Jpn. 39, 44-47 (2015).]で論文報告した。

②-3 動画化

これまでの磁気光学ディスプレイは、静止した3次元像の再生に留まっていたことから、これを動画にして、テレビや映画のような物語を表現できるように、開発を進めた。今までは、ピクセルを一つ一つ書き込んでいく必要があったため、動画を構成する1フレームを書き込むためには、数秒かかり、動画化には磁性膜の特性は関係なく、書き込み光学系の機械的な制限が大きかった。

そこで、光波人工磁気格子をマイクロミラーデバイスに対して 30 度程度傾けることで、高速な書き込みシステムの構築を行った。これによって、まだ、パラパラと動く程度であるが、動画再生できることが分かった。書き込まれたピクセルは1マイクロメートルオーダーであり、磁性膜上には凹凸がないため、散乱光の発生がない。また、エッチングや、リソグラフィを必要とせず、多層膜だけでこれを実現することが出来る。さらに、ピクセルサイズだけではなく、ピクセルピッチも小さくすることで、視野角の増大もみられた。マイクロレンズアレイを使って、ピクセルピッチを小型化した。この光学系を用いて、動作周波数 10Hz、ピクセルピッチ 13.6 μ m、視野角 2.7 度、再生像サイズ 3mm \times 3mm の3次元立体動画再生を行った。赤色の立方体が回転する動画の1コマである。本件は、国際会議[IWH, Taiwan, 2016]にて、報告した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 39 件)

- 1) Y. Nakamura, P. B. Lim, T. Goto, H. Uchida, and M. Inoue, "Development of heat dissipation multilayer media for volumetric magnetic hologram memory," *Applied Sciences*, 9, 1738 (2019). (査読有)
DOI: 10.3390/app9091738
- 2) T. Goto, K. Shimada, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "One-dimensional magnonic crystal with Cu stripes for forward volume spin waves," *Physical Review Applied*, 11, 014033 (2019). (査読有)
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.014033
- 3) S. Mito, S. Kikuchi, Y. Ito, N. Ota, and M. Inoue, "Influence of sputtered zno and Al:ZnO top layers on magneto-optic responses of yttrium iron garnet films," *Crystals*, 8, 396 (2018). (査読有)
DOI: 10.3390/cryst8100396
- 4) S. Sakai, H. Takagi, K. Nakamura, T. Goto, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, and M. Inoue, "Development of a wide-viewing-angle magnetophotonic crystal for a magneto-optic three-dimensional display," *IEEJ Transactions on Fundamentals*

and Materials, 137, 398-403 (2017). (査読有)

DOI: 10.1541/ieejfms.137.398

- 5) K. Shimada, T. Goto, N. Kanazawa, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "Extremely flat transmission band of forward volume spin wave using gold and yttrium iron garnet," Journal of Physics D: Applied Physics, 50, 275001 (2017). (査読有)

DOI: 10.1088/1361-6463/aa7505

[学会発表] (計 309 件)

- 1) M. Inoue, Y. Nakamura, H. Takagi, T. Goto, P. B. Lim, and H. Uchida, "Artificial magnetic lattices and their optical and high frequency applications," in 日本磁気学会学術講演会, 金沢大学, (2016) [招待講演].
- 2) M. Inoue, H. Takagi, T. Goto, Y. Nakamura, and P. B. Lim, "Magnetophotonic Microcavities Enabling Three Dimensional Magneto-optic Display and Hologram Memory," in International Conference on Materials for Advanced Technologies & International Union of Materials Research Societies - International Conference on Advanced Materials (ICMAT&IUMRS-ICA), Suntec, Singapore, (2015) [招待講演].
- 3) M. Inoue, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, and T. Goto, "Novel magnetophotonic/magnonic devices and their applications," in International Conference on Optics-Photonics Design and Fabrication (ODF), 板橋区立文化会館, (2014) [招待講演].
- 4) M. Inoue, T. Goto, H. Takagi, Y. Nakamura, and P. B. Lim, "3D memory and display based on magneto-optic holography with magnetophotonic microcavities," in Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) International Magnetism Conference (Intermag), Maritim Hotel & Internationales Congress Center Dresden, Dresden, Germany, (2014) [招待講演].

[産業財産権]

○出願状況 (計 5 件)

名称: 欠陥検査装置及び欠陥検査方法

発明者: 高木宏幸、後藤太一、井上光輝、遠藤久

権利者: (株)日立製作所、豊橋技術科学大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2014/081653

出願年: 2014 年

国内外の別: 外国

[その他]

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 後藤 太一

ローマ字氏名: GOTO, TAICHI

所属研究機関名: 豊橋技術科学大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 00721507

(2) 研究分担者

研究分担者氏名: 中村 雄一

ローマ字氏名: NAKAMURA, Yuichi

所属研究機関名: 豊橋技術科学大学

部局名: 大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：20345953

(3)研究分担者

研究分担者氏名：リム パンボイ

ローマ字氏名：LIM, Pang Boey

所属研究機関名：豊橋技術科学大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40502597

(4)研究分担者

研究分担者氏名：関口 康爾

ローマ字氏名：SEKIGUCHI, Koji

所属研究機関名：横浜国立大学

部局名：大学院工学研究院

職名：准教授

研究者番号（8桁）：00525579

(5)研究分担者

研究分担者氏名：内田 裕久

ローマ字氏名：UCHIDA, Hironaga

所属研究機関名：豊橋技術科学大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：30271000

(6)研究分担者

研究分担者氏名：松田 厚範

ローマ字氏名：MATSUDA, Atsunori

所属研究機関名：豊橋技術科学大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：70295723

※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。