

平成 22 年 4 月 5 日現在

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2005～2009

課題番号：17106004

研究課題名（和文）

ナノ構造高次元磁性フォトニック結晶の形成とスピン依存線形・非線形光機能

研究課題名（英文） Formation of magnetophotonic crystals with nano-structured high dimensions and their spin-dependent linear and nonlinear optical functions

研究代表者

井上 光輝（INOUE MITSUTERU）

豊橋技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：90159997

## 研究成果の概要（和文）:

本研究は、2次元・3次元のナノスケール構造を人為的に形成した磁性構造体について、完全な構造体の形成と、そのスピン依存線形・非線形光学特性を総合的に解明することで、スピン制御可能な新たな光材料の創製と、そのマイクロ光磁気デバイスへの基礎的性質を探求するものである。

## 研究成果の概要（英文）:

This research is about fabrication of magnetophotonic crystals with nano-structured high dimensions, such as 2-dimension and 3-dimension, and investigation of their spin-dependent linear and nonlinear optical functions for the applications in optical material controlled by spin and micro device using magneto-optics.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	39,200,000	11,760,000	50,960,000
2006年度	19,500,000	5,850,000	25,350,000
2007年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2008年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2009年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
総計	86,200,000	25,860,000	112,060,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子・電気材料工学 / (A) 電気・電子材料

キーワード：磁性フォトニック結晶, 磁気光学効果, スピン, 線形, 非線形

## 1. 研究開始当初の背景・動機

数 nm から数 100nm 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とを示すことから、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ている。特に、最近の情報通信技術の飛躍的な発展に伴い、情報キャリアである光（フォトン）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・バンドギャップ構造を利用した多彩なフォトン輸送制御が試みられている。

我々は、これらフォトニック結晶に関する一連の研究とは別に、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、磁性体のスピンド制御可能な新しい光学媒体の実現可能性を示した。このナノスケール構造をもつ磁性体（磁性フォトニック結晶：MPC）に関する研究は、その後 JST さきがけ研究<sup>21</sup> や科研費基盤研究として展開してきたが、高次元磁性フォトニック結晶形成の難しさや、ナノ構造に基づく新規のスピンド依存フォトニックバンド構造の発現など、未だ解明されていない多くの研究課題が残されている。

## 2. 研究の目的

本研究は、上述の研究背景を踏まえ、2次元・3次元ナノスケール構造を人為的に形成した磁性構造体について、完全な構造体の形成と、そのスピンド依存線形・非線形光学特性を総合的に解明することで、スピ

ンド制御可能な新たな光材料の創製と、そのマイクロ光磁気デバイスへの基礎的性質を探求しようとするものである。

## 3. 研究の方法

(1) 試料形成： 1次元構造を有する MPC は、可変波長膜厚モニターを具備した RFデュアルイオンビームスパッタ装置を用いて形成した。2次元構造を有する MPC は、Ni スタンパを用いたアルミ自己組織化法により2次元周期構造をもつテンプレートを形成し、これにゲルコート法により磁性ガーネットを充填したものや、集束イオンビーム源を用いた直接描画により構造体を形成した。3次元 MPC は、パーティカルデポジション法によるサブナノ粒子自己組織化法を用いて、3次元周期構造を有する磁性構造体の作成や、高周波スパッタ法による自己クロージング法により試料を作成した。また、局在プラズモン共鳴を発現させる金属ナノ粒子分散系は、イオンビーム薄膜形成装置で極薄金薄膜を形成し、熱処理法や電子線描画法で構造を形成した。

(2) 特性評価： 上述の手順で得た試料の線形光学・磁気光学特性は、波長分解能に優れるファラデー・カー効果測定装置(BH-M600VIR-FKR-TU型、ストークスパラメータ評価機構付)を購入して調べた。非線形特性は、現有のOP0レーザシステムを用いて調べた。また、試料特性の再現性確保のため、

環境制御系(SH-661 型)を購入した。試料切断はダイシングソー(DAD321- HE3017)を導入して行った。MPC のデバイス応用では、小型レーザ(Excelsior-532- 150RT1-W)を導入して、素子性能を評価した。

#### 4. 研究成果

(1) 1次元 MPC: 任意の光波長で光局在化する MPC マイクロキャビティや、バンドギャップ端を利用する周期構造体を精度よく形成する技術を確立した。長波長側でバンドギャップを有する試料形成も完了し、これら試料について線形・非線形特性の実験・理論特性解明を完了した。また、誘電体多層膜中に磁性体欠陥層を2つ導入したナノ光学媒体であるデュアルキャビティ MPC の作製プロセスの確立を行い、これまで理論的には知られていたものの実現されていなかったデュアルキャビティの特性を実証した。薄膜型光アイソレータやマイクロチップレーザへの応用が期待される。

MPC 特性の評価方法として、OPO レーザシステムを用いて、局所的な磁気光学特性を評価できる磁気光学レーザ顕微鏡を構築した。この成果を踏まえ、文部科学省キーテクノロジー事業と連携して、1D-MPC ベース空間光位相変調デバイスや、薄い EO 膜とのハイブリッド化による新規の磁性フォトニック結晶機能薄膜を開発した。後者は、従来の常識では考えられなかった常磁性ガーネット膜が利用できる短波長対応型の光機能性薄膜である。一方、MPC と PC の界面欠陥に起因するタム状態1D-MPC を開発し、磁気光学効果が増大することを確認した。

(2) 2次元 MPC: 2次元周期構造を有するアルミナベースの MPC 形成を行い、明瞭なバンドギャップと磁気光学特性の変調を見出した。

これとは別に、電子線露光装置とナノ薄膜作製装置を用いて、多重周期性を持つ2次元 MPC を形成した。また、理論解析結果を踏まえ、ナノスケールの微細加工が可能な集束イオンビーム(FIB)を用いて、完全な周期構造体に近い2次元 MPC 構造の作製を行った(図1)。導波路型光サーキュレータへの応用のため、Siの周期構造、中心には磁性体欠陥層、リッジ型の導波路で構成されている。光サーキュレータの機能性を確認するための評価系の構築を完了し、これらの成果を活用して、平面型光集積回路への応用を検討している。

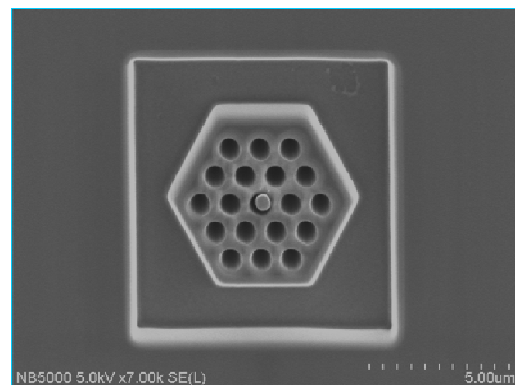


図1 2次元 MPC の構造を用いた光サーキュレータの電子顕微鏡写真。光制御のために FIB で光の波長オーダの微細加工を施した。中心の穴には磁性体を投入している。

(3) 3次元 MPC: パーティカルデポジション法とスパッタ法、およびゲルコート法とを組み合わせることで、3次元 MPC を形成した(図2)。3次元構造 MPC の偏光特性や入射方位依存性について、理論・実験から基礎特性を解明した。これらの成果を活用して3次元 PC の

形成を行い、光の指向性に影響されないことを確認した。また、スパッタとイオンミリングを交互に行う自己クローニング法で3次元磁性フォトニック結晶の作製プロセスを確立した。自己クローニング方法を導入することで高い周期性が得られ、磁気光学効果が向上された。これらの成果を活用して磁界印加によるスーパープリズム効果の発現など、新たな電子制御性を有する光媒体の構成とその応用を検討している。

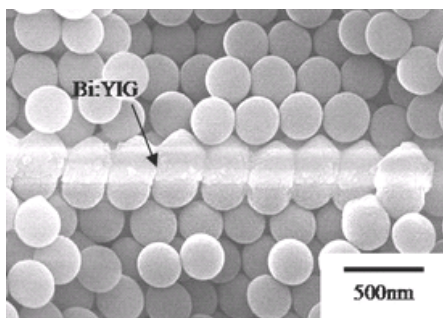


図 2 磁性ガーネットを欠陥層として含む3次元MPCの断面SEM写真。

(4) 局在プラズモン励起: Au などの金属超微粒子を磁性ガーネット内に分散させることで、局在プラズモン共鳴によるファラデー効果の増大現象を実験・理論から示した。この効果は、前述したタム状態と連携させることで大きな磁気光学効果が発現することが分かっており、この現象を用いたバイオセンシングへの応用展開につながった。このような増大現象はこれまで実験的に示された例はなく、MPC との連携による本手法の工学的な応用が期待される。

(5) スピン波機能: 磁性体固有の波動として、スピン波(静磁波)があり、磁氣的に形成した MPC と同様な構造を持つ1次元マグネティック結

晶でスピン波が光と同じようなバンドギャップを形成することを実験的に示した。この構造体は、磁区構造を電子的に制御することで、制御性を有する GHz 帯の高周波マイクロデバイスや室温での高感度磁界センサへの応用が期待できる。静磁波を用いたマグネティック結晶で、37pT/Hz という著しい磁界感度を有する室温での測定値を見出し、室温駆動心臓磁界計測や室温駆動脳磁界計測への適応を開始している。

## 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 ]

- (1) 招待論文, **M. Inoue**, R. Fujikawa, A. Baryshev, A. Khanikaev, P. B. Lim, H. Uchida, O. Aktsipetrov, A. Fedyanin, T. Murzina and A. Granovsky, "Magneto-photonic crystals", J. Phys. D: Appl. Phys., vol.39, No.8, pp.R151-R161, 2006.
- (2) A. V. Baryshev, A. B. Khanikaev, H. Uchida, **M. Inoue**, M. F. Limonov, "Interaction of polarized light with three dimensional opal-based photonic crystals", Phys. Rev. B, vol.73, No.3, pp.033103-1-4, 2006.
- (3) A. Khanikaev, A. Baryshev, **M. Inoue**, Y. S. Kivshar, "One-way electromagnetic Tamm states in magnetophotonic structures", Appl. Phys. Lett., vol.95, pp. 011101, 2009.
- (4) M. V. Rybin, A. B. Khanikaev, **M. Inoue**, K. B. Samusev, M. J. Steel, G. Yushin, and M. F. Limonov, "Fano Resonance between Mie and Bragg Scattering in Photonic Crystal", Phys. Rev. Lett., vol.103, pp. 023901-1, 2009.
- (5) K. Takahashi, F. Kawanishi, S. Mito, H. Takagi, K. H. Shin, J. Kim, P. B. Lim, H.

Uchida, and **M. Inoue**, "Study on magnetophotonic crystals for use in reflection-type magneto-optical spatial light modulators", J. Appl. Phys., vol. 103, pp.07B331, 2008.

- (6) R. Fujikawa, A. V. Baryshev, J. Kim, H. Uchida and **M. Inoue**, "Contribution of the surface plasmon resonance to optical and magneto-optical properties of a Bi:YIG-Au nanostructure", J. Appl. Phys., vol. 103, pp. 07D301, 2008.

など, 欧文論文誌 59 編.

[学会発表]

- (1) 招待講演, **M. Inoue**, "Magneto-optical spatial light modulator with magnetophotonic crystals for collinear holography", Intern. Workshop on Plasmonics and Applications in Nanotechnologies, 34, Singapore, December 2006.
- (2) 招待講演, **M. Inoue**, R. Fujikawa, A. Baryshev, A. Khanikaev, P. B. Lim, H. Uchida, O. Aktsipetrov, A. Fedyanin, T. Murzina, A. Granovsky, "Magneto-photonic crystals", INTERMAG 2006, San Diego, USA, May 2006.
- (3) 招待講演, **M. Inoue**, R. Fujikawa, H. Uchida, K. H. Shin, A. Khanikaev, A. Baryshev, A. Fedyanin, A. Granovsky, "Nano-magnetophotonics: Control of Light and Spin Waves by Introducing Artificial Nano-scaled Structures", PIERS2007, Prague, Czech Republic, August 2007.
- (4) 招待講演, **M. Inoue**, R. Fujikawa, H. Uchida, K. H. Shin, A. Baryshev, A. Khanikaev, A. Fedyanin and A. Granovsky, "Nano-magnetophotonics: control of light by introducing artificial nanostructures and their applications", ISAMMA 2007, Jeju, Korea, June 2007.

など, 招待講演 31 編, 一般講演 178 編.

[図書]

- (1) **M. Inoue**, A. Granovsky, O.

Aktsipetrov, H. Uchida, K. Nishimura, Springer Series in Material Science 94, Magnetic Nano-structures, "Magneto-photonic crystals", pp.29-43, Springer-Verlag, 2007.

など, 6 編.

[産業財産権]

出願状況

名称: 磁気光学空間光変調器

発明者: 大久保年永, 河合博貴, 梅澤浩光, 井上光輝

権利者: F D K(株), 豊橋技科大

番号: 特願 2009-140510

出願年月日: 2009/06/11

国内外の別: 国内

など, 20 件.

[その他]

ホームページ等

<http://www.maglab.eee.tut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 光輝 (豊橋技科大)

研究者番号: 90159997

(2) 研究分担者

BARYSHEV ALEXANDER (豊橋技科大)

研究者番号: 70402667

金 周映 (豊橋技科大)

研究者番号: 20409048

内田 裕久 (東北工大)

研究者番号: 30271000

(3) 連携研究者

西村 一寛 (鈴鹿高専)

研究者番号: 60343216