

## 研究課題別研究評価

1. 研究課題名： 磁性フォトニック・クリスタルの構造と機能に関する基礎的研究

2. 研究者名： 井上 光輝

3. 研究のねらい：

1989年にYabnolovitchが提案したフォトニック結晶(光波長オーダーの1次元、2次元あるいは3次元周期構造をもつ誘電体構造媒体：以下PCと略記する)は、フォトン<sup>1</sup>の存在を許さないフォトニック・バンド・ギャップ(以下PBGと略記する)を示すことから、輻射場の制御が可能な新しい光媒体として注目された。最近では、フォトニック結晶の概念は、マイクロアンテナなどの電磁場領域や空間音場の制御を目的とした音響場領域にまで拡大しており、光エレクトロニクスのみならず広範な工学分野で重要な概念となっている。

さきがけ研究開始以前に、これら一連のフォトニック結晶に関する研究とは独立に、透光性磁性体をナノスケールで配置した1次元構造体(1次元磁性フォトニック・クリスタル)の光学・磁気光学特性について厳密な理論解析を行ったところ、著しい磁気光学効果の増大現象が発現することを見出したが、その起源や高次元体の性質について混沌とした状態にとどまっていた。本研究はこの時点で開始し、著しい磁気光学効果増大現象の解明、実際の媒体形成による実験的検証と新しい光デバイスへの応用、さらに高次元構造を有する媒体の形成と特性解明を主なテーマとして展開した。

4. 研究結果及び自己評価：

(1) フォトニック結晶構造における巨大磁気光学効果の発現機構

フォトニック結晶構造で、なぜ巨大な磁気光学効果の増大現象が発現するかについて厳密な理論解析を行い、その発現機構を解明した。これらの成果は論文(3)、(4)、(5)、(8)で報告した。

この成果は、後述の研究に重要な知見を与えたものと評価できる。

(2) 1次元磁性フォトニック結晶の形成と特性解明

上記解析結果の実験的検証として、実際に磁性ガーネット薄膜、磁性グラニューラー薄膜、金属Co薄膜などを用いた1次元磁性フォトニック結晶を形成し、解析により定量的に一致する優れた磁気光学特性を有することを世界で初めて実証した。これらの成果は論文(6)、(7)、(9)、(10)、(11)、(12)で報告した。さらに磁場印加により電子的に特性制御可能な1次元磁性フォトニック結晶構成材料として、室温で強磁性と強誘電性が共存する新しい酸化物材料を開発した。この成果は論文(13)で報告した。

これらの成果は、世界的に見ても初めての実験検証結果を示したものであり、高く評価できる。

(3) 1次元磁性フォトニック結晶の非線形特性解明

上記線形特性に加え、1次元磁性フォトニック結晶における著しい電界閉じ込め効果による非線形磁気光学効果の発現を世界で初めて実験的に見出した(2002年国際会議報告決定)。

この研究は開始したばかりであるが、今後飛躍的な展開が期待できるものといえる。

(4) 1次元磁性フォトニック結晶を用いた新しい光デバイス

1次元磁性フォトニック結晶の特長を生かした新しい光デバイスとして、空間光変調デバイスや薄膜光アイソレータなどの応用を示した。前者については論文(14)、(15)で一部報告し、後者については現在論文投稿中である。これら新規の光デバイスの有用性は高く、テラバイト光ディスク記録装置などの工学的応用を開拓した。またこれら新規デバイスをコアにして、H13年度よりJST戦略的基礎研究推進事業(ペタバイト情報ストレージ)での研究を開始した。

これら一連の研究は、工学的に新しい分野を開拓するものとして高く評価できる。

(5) 2次元磁性フォトニック結晶形成

2次元磁性フォトニック結晶形成法として、自己組織化アルミナテンプレートとウエットプロセス（ゾル-ゲル法）による磁性ガーネット形成を組み合わせた手法を考案し、この方法で数十ナノメートルの直径をもつ磁性ガーネットナノ構造体を世界で初めて形成した。この成果は現在論文執筆中である。

2次元磁性フォトニック結晶を得るには未だ構造の周期性範囲が狭く、今後より広範囲な周期性をもつ媒体形成が不可欠といえる。

#### (6) 3次元磁性フォトニック結晶形成

3次元磁性フォトニック結晶を得る方策として、ミスト熱分解法で得られる磁性酸化物微粒子を用いた自己組織化形成法を試みた。ミスト熱分解法については論文(1)、(2)で報告した。この手法で得られる磁性微粒子形状のばらつきが大きく、3次元磁性フォトニック結晶への応用には至っていない。この難点を克服する方策として、酸化シリコン微粒子体などをコアにした尿素熱分解法を開発し、現在この手法による3次元構造体形成を試みている。

当該研究課題において最も技術的に難しいこともあり、十分な成果が得られていない。今後より詳細かつ定量的な研究を必要とする。

#### (7) 高次元磁性フォトニック結晶特性の理論解析

上記2次元、3次元体の特性を理論的に解析する方法として、周波数ドメイン及び時間ドメインによる離散的計算法を開発し、磁性ガーネット超微粒子が3次元周期構造を形成しているモデルについてそのフォトニックバンド構造を解明した。

(5)、(6)の実験結果との検証が不可欠であると同時に、明確なバンドギャップをもつ構造決定が行われていないため、今後重点的に実施すべき検討課題であると考えている。

### 5. 領域統括の見解

フォトニック結晶で磁気光学効果の増大現象が現れる機構を理論解析によって解明した。この理論に基づいて、室温で強磁性と強誘電性とが共存する酸化物材料を発見した。さらに二次元、三次元磁性フォトニック結晶への発展をしつつある。物性研究とその応用において積極的な進展を目指し、これからの飛躍的発展が大いに期待される。本さきがけ研究後、母校の教授に就任。まさに理想的なキャリアといえよう。

### 6. 主な論文等（代表的論文は(9)）

- (1) Y. Ikeda, C. Hara, T. Fujii, M. Sato, and M. Inoue, "Direct synthesis of lead-hexaferrite particles by mist pyrolysis," J. Magn. Soc. Jpn., vol.22, No.S1, pp.249-251, (1998).
- (2) T. Fujii, S. Nanpei, M. Inoue, and K. I. Arai, "Preparation of high bismuth and gallium substituted yttrium iron garnet films by coating gel on glass substrate", J. Magn. Soc. Jpn., vol.22, pp.200-202, (1998).
- (3) M. Inoue, T. Fujii, K. I. Arai, and M. Abe, "Huge enhancement of magneto-optical Faraday effect in YIG films with disordered multilayer structures", J. Magn. Soc. Jpn., vol.22, pp.141-143, (1998).
- (4) 井上光輝, 荒井賢一, 藤井壽崇, 阿部正紀, "遺伝的アルゴリズムによる積層構造の乱れた磁気光学多層膜の設計," 日本応用磁気学会誌, vol.22, pp.321-324, (1998).
- (5) M. Inoue, K. I. Arai, T. Fujii, and M. Abe, "Magneto-optical properties of one-dimensional photonic crystals composed of magnetic and dielectric layers," J. Appl. Phys., vol.83, pp.6768-6770, (1998).
- (6) M. Inoue, K. I. Arai, T. Fujii and M. Abe, "One-dimensional magnetophotonic crystals," J. Appl. Phys., vol.85, No.8, pp.5768-5770, (1999).
- (7) M. Inoue, K. Matsumoto, K. I. Arai, T. Fujii and M. Abe, "Preparation and properties of magneto-optical micro-cavities composed of Co thin film and dielectric multilayers," J. Magn.

- Magn. Mat., vol.196-197, pp.611-613, (1999).
- (8) 井上光輝, 荒井賢一, 阿部正紀, 藤井壽崇, S. Fan, J. D. Joannopoulos, “1次元磁性フォトニック結晶の局在モードの磁気光学性能指数,” 日本応用磁気学会誌, vol.23, No.7, pp.1861-1866, (1999).
  - (9) 高山知子, 仲村健志, 弥生宗男, 井上光輝, 藤井壽崇, 阿部正紀, 荒井賢一, “Bi置換YIG膜を用いた1次元磁性フォトニック結晶の作製と特性,” 日本応用磁気学会誌, vol.24, pp.391-394, (2000).
  - (10) M. Abe, E. Takeda, Y. Kitamoto, F. Shirasaki, N. Todoroki, G. Gorodetzky, S. Ohnuma, T. Masumoto, M. Inoue and K. I. Arai, “Enhancement of Magneto-optical Kerr effect in annealed granular films of Co- Au and Co-AlOx,” Korean J. of Ceramics, vol.6, pp.100-102, (2000).
  - (11) E. Takeda, N. Todoroki, Y. Kitamoto, M. Abe, M. Inoue, T. Fujii, and K. I. Arai, “Faraday effect enhancement in Co-ferrite layer incorporated into one-dimensional photonic crystal working as a Fabry-Perot resonator,” J. Appl. Phys., vol.87, No.9, pp.6782-6784, (2000).
  - (12) M. Inoue, K. I. Arai, T. Fujii and M. Abe, “Huge enhancement of magneto-optical Kerr effect of one-dimensional magnetophotonic crystals with a ferromagnetic defect layer,” Korean J. Chem., vol.6, pp.408-41 (2000).
  - (13) 加島篤, 中村優哉, 井上光輝, 藤井壽崇, “鉄基強磁性酸化物スパッタ薄膜における磁界による誘電率変化,” 日本応用磁気学会, vol.25, pp.875-878 (2001).
  - (14) J. H. Park, M. Inoue, D. H. Lee and J. K. Cho, “Effects of groove depth and patterned permalloy film on magnetization switching of LPE-gaent pixels for use in magneto-optic spatial light modulators,” J. Appl. Phys., in press (2002).
  - (15) H. Kato and M. Inoue, “Reflection-mode operation of one-dimensional magnetophotonic crystals for use in film-based magneto-optical isolators,” , J. Appl. Phys., in press, (2002).

その他の原著論文 4 編、国際会議招待講演 5 件、国内会議招待講演 5 件

当該研究に係る出版書籍：藤井壽崇、井上光輝「フォトニック結晶」、コロナ社 (2000).