

機関番号：10106  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560314  
 研究課題名（和文） 完全フォトニックバンドギャップ磁性フォトニック結晶に基づく新機能光デバイスの提案  
 研究課題名（英文） A study on novel photonic devices based on magneto photonic crystal with absolute photonic bandgap  
 研究代表者  
 辻 寧英（YASUhide TSUJI）  
 北見工業大学・工学部・准教授  
 研究者番号：70285518

研究成果の概要（和文）：本研究では、光回路の小型化を目指し、完全フォトニックバンドギャップを有するフォトニック結晶を利用した TE、TM 両方の偏波が伝送可能なフォトニック結晶導波路の設計を行い、両方の偏波に対して単一モード伝送を実現する構造を見出した。また、そのデバイス応用として、磁性材料を用いた非相反デバイスについての提案を行った。併せて、光デバイスの最適設計法の開発を行い、磁性フォトニック結晶を利用した光サーキュレータの設計を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to realize ultra compact photonic circuit devices, photonic crystal waveguides with absolute photonic bandgap, which can support both TE and TM waves, are proposed. In these waveguides, single mode propagation is realized for both TE and TM waves. Using these waveguides and magneto photonic materials, nonreciprocal photonic crystal devices are investigated. Furthermore, the optimization method for magneto photonic crystal waveguides is also developed and photonic circulator is designed utilizing it.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：理工系・工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：フォトニック結晶、磁気光学効果、有限要素法、トポロジー最適化

## 1. 研究開始当初の背景

インターネットを始めとする通信需要の増大にともない超高速・超大容量光通信システムを実現すべく各種の新しい光デバイスの探索がなされている。こうしたなか、近年、フォトニック結晶を利用した光デバイスへの関心が高まっている。フォトニック結晶は、屈折率の異なる材料を周期配列したもので、強い分散性や光波の伝搬が禁

じられるフォトニックバンドギャップ(PBG)の存在など特異な性質を数多く有していることから、従来の構造では得られない新しい光デバイスの実現が期待されている。フォトニック結晶の一部に導波路となる欠陥を設け、フォトニックバンドギャップによる強い光閉じ込めを利用した光回路もその一例である。PBGによりクラッドへの光の放射が禁じられるため、従来の光回

路では困難とされる、光の波長オーダーでの光路の制御が可能になるものと期待され、多くの研究がなされている。特に最近では、電気光学効果、熱光学効果、非線形光学効果などの各種光学効果のフォトニック結晶光波回路への応用の研究も活発になってきている。こうした中で磁性材料を用いた磁性フォトニック結晶の研究の報告がいくつかなされてきている。磁気光学効果は非相反性を実現できる効果であり、光アイソレータ、光サーキュレータ等の実現のために利用できる。特に、磁性フォトニック結晶では局所的に光を強く閉じ込めることで磁気光学効果を強め、小型の光アイソレータ、光サーキュレータを実現できるものと期待される。実際に1次元磁性フォトニック結晶を用いたファラデー回転効果の測定において非相反特性を強められることが確認されている。しかしながら、光回路の集積化を考えた場合には導波路型のデバイスの検討が必須である。磁性材料を用いた2次元フォトニック結晶に関しては、実際に一様な2次元結晶の作製例が報告されているものの、実際の導波路デバイス化に向けてはまだ検討しなければならないことが多く残されている。

## 2. 研究の目的

光回路の小型化を目指し、完全PBGを利用した光導波路デバイスの可能性について検討するとともに、これを利用した非相反性を有する磁性フォトニック結晶デバイスについての検討を行う。ここでは、TEおよびTMの両方の偏波が伝送可能でありかつ両方の偏波が単一モード伝送可能である導波路の設計を行う。これまでのフォトニック結晶導波路についての検討は、TEあるいはTM波のどちらかの偏波のみを伝送するものが主であったが、両方の偏波を伝送できれば、偏波分離素子や偏波変換素子などの小型化が可能である。また、併せて、磁性フォトニック結晶デバイスの解析のための任意異方性材料に対応した有限要素法に基づく数値計算法の開発と、これを利用した磁性フォトニック結晶にも適用可能な光導波路デバイスの自動最適設計法として関数展開法に基づくトポロジー最適化の開発を行う。最適設計法では過去の経験に頼らずにまったく新しい構造の光導波路を見出せることも期待される。

## 3. 研究の方法

### (1) 磁性フォトニック結晶解析法の開発

ここでは、微細な任意形状の取り扱いに適した有限要素法に基づく数値解析法を磁性フォトニック結晶を取り扱えるように拡張する。解析では、磁場の印加方向により、ス

カラー波解析が可能な場合と、2次元であってもベクトル波解析が必要な場合があり、両方の場合に対して、非相反性を有する磁性フォトニック結晶回路の伝搬特性を解析するためのプログラムの開発を行う。また、より実際的な3次元光導波路のための解析プログラムの開発も行う。

### (2) 完全PBGを実現するフォトニック結晶格子の探索

完全PBGを実現する結晶格子がいくつか報告されているが、ここでは、完全PBGとなる帯域を広くとれる構造を探すとともに、スラブ型のフォトニック結晶を考えた際の深さ方向の放射を避けるために、第一バンドと第二バンドの間に完全フォトニックバンドギャップを実現できる構造についても調べる。

### (3) 完全PBG結晶導波路の伝送特性についての検討

完全PBGフォトニック結晶に線欠陥を導入することで導波路を形成することができるが、ここでは特に、両方の偏波に対して単一モード伝送を実現でき、回路への応用として導波路曲り等の伝送特性が良好な導波路構造についての検討を行う。

### (4) トポロジー最適化による磁性フォトニック結晶の最適設計

光導波路デバイスの最適設計法にはいくつかの手法が提案されているが、申請者はこれまでに2次元等方性の光導波路に対するトポロジー最適化法として、関数展開法に基づくトポロジー最適化法を提案している。この方法ではしばしば問題となる媒質境界を不明瞭にするグレイ領域の問題を回避できる。ここでは、磁性フォトニック結晶の最適設計のためのトポロジー最適化の拡張と検討を行う。屈折率表現に用いる展開関数について、フォトニック結晶の表現に適した関数の検討も行う。

## 4. 研究成果

### (1) 磁性フォトニック結晶解析法の開発

磁気光学材料を含めた任意の異方性材料を扱うために、2次元および3次元ベクトル有限要素法による不連続問題解析のためのプログラムを開発した。要素に三角形はエッジ/ノーダルハイブリッド要素および四面体エッジ要素を用い、入出力の境界条件には完全整合層を用い、非相反モードの入射に対応できる改良を行い、磁性フォトニック結晶を含めた光導波路解析・設計を可能にした。

### (2) 完全PBGを実現するフォトニック結晶格子の探索

ここでは、完全PBGを得るために、TE波に

PBGを有する格子とTM波にPBGを有する格子の複合格子として2種類のフォトニック結晶構造について検討を行った。そのバンド図を図1に示す。(a)は三角格子とハニカム格子の複合格子であり、(b)はエアホールと誘電体ピラーの複合格子である。(a)は2次元構造を考えているが、(b)ではスラブ型フォトニック結晶を考え、等価屈折率法に基づく準3次元解析を行っている。図で青で示した線がTE波、赤で示した線がTM波の分散曲線であり、完全バンドギャップを緑の領域で示している。図1(b)の構造では第一バンドと第二バンドの間にPBGが形成されており、回路を構成する際の深さ方向への放射の抑圧に有利であるが、構造が多少複雑化している。

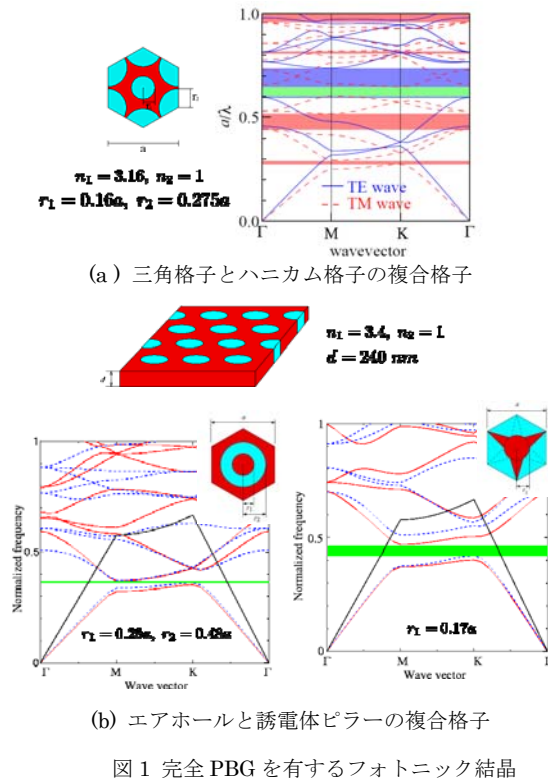
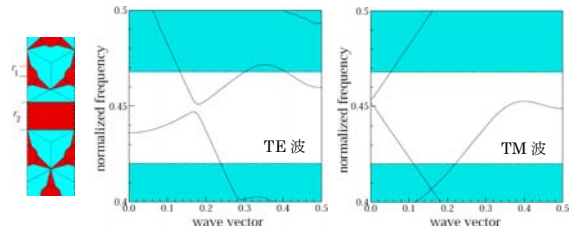


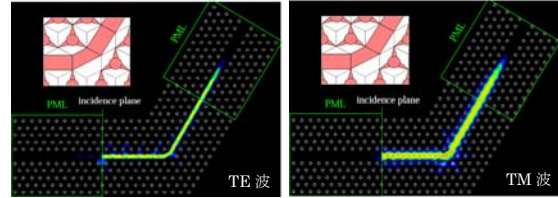
図1 完全PBGを有するフォトニック結晶

(3) 完全PBGフォトニック結晶導波路の伝送特性についての検討

完全PBGフォトニック結晶に線欠陥を導入したフォトニック結晶導波路の分散特性についての検討を行った。図1(b)の結晶格子に線欠陥を導入したフォトニック結晶導波路とその分散曲線を図2に示す。TE波、TM波それぞれに単一モード伝送帯域が見られるが、両者の帯域は一致していないことがわかる。図2にはこの導波路を用いて回路を構成したときの曲り部での光の伝搬の様子も示している。規格化周波数は0.44とした。曲り部の構造を工夫することで、両方の偏波に対して反射を低く抑えられ、高次モードへの変換もほとんどないことがわかる。



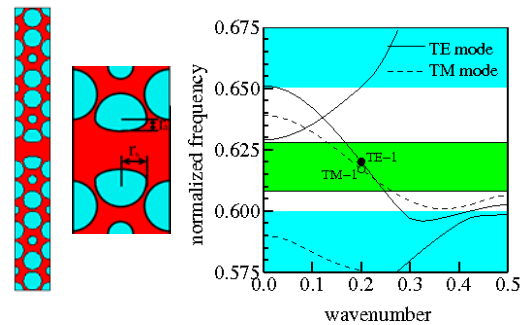
導波路構造と分散曲線



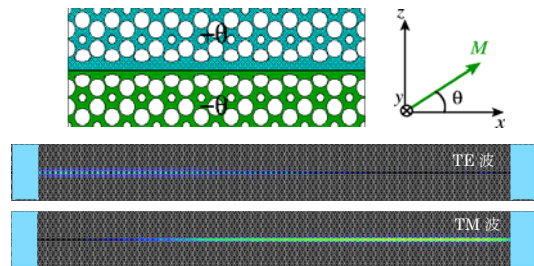
導波路曲り部での光の伝搬

図2 線欠陥導波路(図1(b)の結晶格子)

次に、図1(a)の構造に対して線欠陥を導入したフォトニック結晶導波路の構造と分散特性を図3に示す。この構造では、TE波とTM波に単一モード伝送領域があり、両者の帯域に重なりがあることがわかる。両方の偏波が単一モードとなる帯域を図に緑色の領域として示している。また、この分散曲線ではTE波とTM波の分散曲線が交差しており、特定の周波数において両偏波の位相整合が取れることがわかる。したがって、磁性フォトニック結晶を特定の方向に磁化することで非相反な偏波変換を実現することができる。



導波路構造と分散曲線



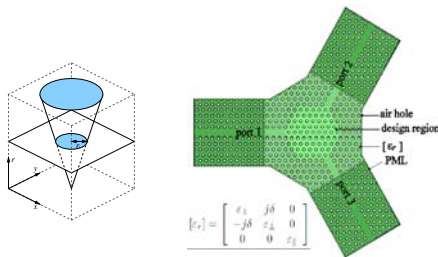
導波路中心で磁化を反転した導波路中での偏波変換

図3 線欠陥導波路(図1(a)の結晶格子)

図3には導波路の中心で磁化を反転した磁性フォトニック結晶導波路中の光波の伝搬の様子も示している。ここではTE波の光を入射しており、入射したTE波が伝搬とともにTM波に変換されていることがわかる。磁気光学効果による偏波変換は非相反特性を示すため、これを利用した光アイソレータの実現が見込まれる。

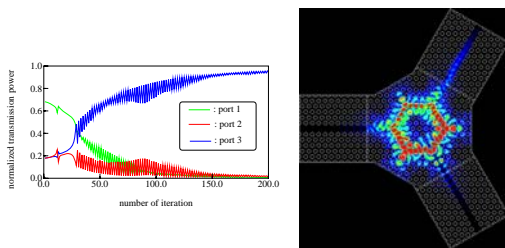
(4) トポロジー最適化による磁性フォトニック結晶の最適設計

ここでは関数展開法に基づくトポロジー最適化を磁性フォトニック結晶を扱えるように拡張を行った。併せて、屈折率を表現する関数についても検討を行い、フォトニック結晶を扱うために、新たに図4に示す円錐関数を導入した。図4に磁性フォトニック結晶を利用した光サーキュレータの設計例を示す。この最適化では120度の回転対称性が保たれるように構造を修正しており、等方性材料では光をport1から入力するとport2, port3に等しい出力を得るが、磁気光学効果により非相反性が生じ、port1からの光がport2へ出力し、同様にport2からの光はport3へ、port3からの光はport1へ出力され、光サーキュレータを実現している。



$$w(x, y) = \frac{N}{\pi^2} \left\{ -r_1 + \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \right\}$$

問題の設定

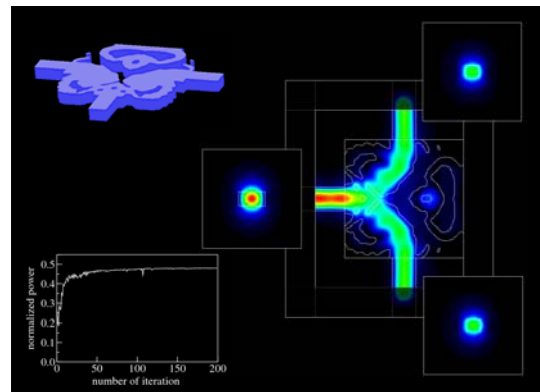
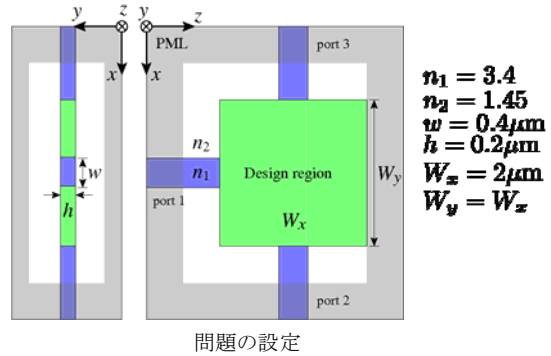


最適化の過程における出力パワーの変化と最適構造での光の伝搬

図4 磁性フォトニック結晶サーキュレータの最適設計

最後に、より実際の3次元光導波路の設計例として、等方性材料からなる2分岐導波路の設計例を図5に示す。解析には3次元のベクトル有限要素法を用い、最適化には関数展開法に基づくトポロジー最適化を用いた。ここでの屈折率分布を表現する展開関数はフーリエ級数とした。最適化の過程における

出力パワーの変化、最適化構造、最適化構造における光の伝搬の様子を示している。出力パワーは最適化の反復とともに改善し、最終的に入射した光は各ポートに48.5%ずつ出力されており、3次元光導波路に対しても最適化が行えることが示された。本手法を拡張することで3次元磁性フォトニック結晶の最適化も可能になる。



最適化結果

図5 3次元光導波路の最適設計

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6件)

- ① M. Eguchi and Y. Tsuji, "Bending loss of elliptical-hole core circular-hole holey fibers bent in arbitrary bending directions," *OSA Applied Optics*, Vol. 59, No. 32, pp. 6207–6212, Nov. 2010. (査読有)
- ② M. Eguchi and Y. Tsuji, "Bending loss evaluations of holey fibers having a core consisting of an elliptical-hole lattice by various approaches," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 46, No. 5, pp.

601–609, May 2010. (査読有)

- ③ K. Hirayama, Y. Tabata, Y. Tsuji, and Y. Hayashi, “Topology optimization of coupling between slab and photonic crystal waveguide,” *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 50, No. 12, pp. 3009–3012, Dec. 2008. (査読有)
- ④ M. Eguchi and Y. Tsuji, “Design of single-polarization elliptical-hole core circular-hole holey fibers with zero dispersion at  $1.55\mu\text{m}$ ,” *Journal of Optical Society of America B*, Vol. 25, No. 10, pp.1690–1701, Oct. 2008. (査読有)
- ⑤ M. Eguchi and Y. Tsuji, “Squeezed lattice elliptical-hole holey fiber with extremely high birefringence,” *Optics Letters*, Vol. 33, No. 16, pp. 1792–1794, Aug. 2008. (査読有)
- ⑥ Y. Tsuji, and K. Hirayama, “Design of optical circuit devices using topology optimization method with function-expansion- based refractive index distribution,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 20, No. 12, pp. 982–984, June 2008. (査読有)

[学会発表] (計 1 2 件)

- ① 木島涼輔, 藤本幸太, 辻寧英, 平山浩一, 佐藤慎悟, “3次元光導波路デバイスの関数展開法に基づくトポロジー最適化”, 電子情報通信学会総合大会, 2011年3月.
- ② 藤本幸太, 辻寧英, 平山浩一, 佐藤慎悟, “磁性フォトニック結晶デバイスの関数展開法に基づくトポロジー最適化”, 電子情報通信学会総合大会, 2011年3月.
- ③ 江口真史, 辻寧英, “楕円ホールコア円形ホールホーリーファイバと単一モードファイバの接続損失の評価”, 光ファイバ応用技術研究会, 2010年11月.
- ④ 藤本幸太, 辻寧英, 平山浩一, “光回路設

計のためのトポロジー最適化における関数展開法の屈折率表現に関する検討”, 電磁界理論研究会, 2010年11月.

- ⑤ 瀬田純己, 辻寧英, 平山浩一, “遺伝的アルゴリズムによるモード結合を利用した光デバイスの設計に関する検討”, 電磁界理論研究会, 2010年7月.
- ⑥ 藤本幸太, 辻寧英, 平山浩一, “関数展開法とSVEA に基づくトポロジー最適化による光デバイスの設計に関する検討”, 電磁界理論研究会, 2010年7月.
- ⑦ 瀬田純己, 辻寧英, 平山浩一, “遺伝的アルゴリズムと有限要素ビーム伝搬法を用いた方向性結合器型波長分離素子の設計”, 電子情報通信学会総合大会, 2010年3月.
- ⑧ 藤本幸太, 辻寧英, 平山浩一, “遺伝的アルゴリズムとトポロジー最適化による波長分離素子の設計”, 電子情報通信学会総合大会, 2010年3月.
- ⑨ 江口真史, 辻寧英, “楕円ホール格子コアをもつホーリーファイバの任意方向への曲げによる損失の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, 2009年10月.
- ⑩ 下川原佳喜, 辻寧英, 平山浩一, “緩慢変化包絡線近似に基づく有限要素法によるトポロジー最適化に関する検討”, 電子情報通信学会総合大会, 2009年3月.
- ⑪ 江口真史, 辻寧英, “ホーリーファイバの曲げ損失の評価法に関する検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, 2008年11月
- ⑫ 下川原佳喜, 辻寧英, 平山浩一, “完全PBG を有するスラブ型フォトニック結晶導波路に関する一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, 2008年7月.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻寧英 (YASUhide TSUJI)  
北見工業大学・工学部・准教授  
研究者番号：70285518

(2) 研究分担者  
該当なし

(3) 連携研究者  
該当なし