

共振器付フォトニック結晶導波路における多波長伝送に関する数値的検討

大塚 直輝¹⁾ ・ 横田 光広²⁾

Numerical Examination on Multi-Frequency Lightwave Propagation in Two-Dimensional Triangular Photonic Crystal Waveguide with Microcavity

Naoki OHTSUKA, Mitsuhiro YOKOTA

Abstract

Two-dimensional photonic crystal (PC) waveguide with the microcavity is examined numerically by FD-TD method. We use an absorbing boundary condition (ABC) at the edge of the window called Mur's ABC. The structure of the PC is the triangular array and the microcavity is made by removing the several crystals in parallel with the PC waveguide. The effects of the number of removed pillars and the radius of the surrounding pillars on the resonance are examined. From the numerical results, we show that resonance frequency can be determined by adjusting the number of removed pillars and the radius of the surrounding pillars. Also, the structure which takes out the light is examined from the practical point of view.

Key Words :

Photonic crystal, FD-TD method, Microcavity

1. まえがき

近年、フォトニック結晶を用いた光波回路に関する研究が活発化しており、光機能素子を構成する曲がり導波路や方向性結合器といった基本回路素子の研究が盛んに行われている¹⁾⁻³⁾。フォトニック結晶とは、屈折率の異なる2種類以上の物質を光の波長以下のサイズで2次元あるいは3次元周期的に配列させた人工的な光学材料で、光が伝搬できない波長域(フォトニックバンドギャップ)を持つ。このような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中に欠陥と呼ばれる構造を導入すると、光がこの欠陥部分に閉じ込められる。この欠陥が線欠陥のとき導波路となり、また点欠陥のとき共振器となることが知られている⁴⁾。多層膜構造は1次元フォトニック結晶として知られており、解析も容易なため多くの研究が行われている。最近、非線形媒質の1つであるカー媒質を用いた多層膜に共振構造を付加した構造について検討が行われ、光強度や層数に対する透過率や反射係数が示され

ている⁵⁾⁻⁷⁾。また、正方格子および三角格子で配置された2次元ピラー型フォトニックにより構成された曲がり導波路に共振器(microcavity)が作成された場合について、共振特性の数値的検討が詳細に行われている⁸⁾⁻¹⁰⁾。また、共振器のQ値についても検討が行われている¹¹⁾。

本研究では、2次元ピラー型フォトニック結晶共振器およびフォトニック結晶共振器に導波路を組み合わせた場合の伝搬特性や共振特性およびQ値について、時間領域差分法(FD-TD法)¹²⁾を用いて数値的に検討している。また、吸収境界条件としてMurの2次を適用している。フォトニック結晶は三角格子で構成され、共振器構造は誘電体円柱の本数および取り除いた誘電体円柱の周りの円柱の半径をそれぞれ変化させることによって構成する。また、共振器から光を取り出す構造についても検討を行っている。本研究の結果はWDM(波長分割多重伝送)の設計に有用なデータを供すると考える。

¹⁾電気電子工学専攻

²⁾電気電子工学科教授

2. 数値シミュレーション

2.1 三角格子フォトニック結晶共振器のQ値

三角格子フォトニック結晶光導波路で用いるパラメータとして, $\epsilon_a = 1.0$ (空気), ロッド半径 $r/a = 0.175$, 比誘電率 $\epsilon_b = 11.56$, 格子定数 $a = 6.2 \times 10^{-7} [m]$ と想定している。また, $\Delta x = \Delta z = a/20, \Delta t = 5.11 \times 10^{-17} [s]$ とした。この2次元フォトニック結晶では, 誘電体円柱の柱軸方向, すなわち y 方向に電界成分をもつ TE モード (H_x, E_y, H_z) に対して, $0.304 \leq \omega a/2\pi c \leq 0.495$ の周波数帯にバンドギャップが形成されることが知られている⁸⁾。解析領域は x 方向に $15.5 [\mu m]$ ($425 \Delta x$), z 方向に $92.4 [\mu m]$ ($3000 \Delta z$) と設定している。

入射波は次式を与えている。

$$E_y = \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{w_0} \right)^2 \right] \cdot \exp(-\alpha(t - t_0)^2) \cos(\omega_c(t - t_0)) \quad (1)$$

ただし, $\alpha = (2/t_0)^2, t_0 = 2.3 \times 10^{-14} [s]$ とする。また, 一般に, フォトニック結晶共振器の性能を検討するには周波数特性の半値幅から求めるQ値を用いる場合がある^{11), 13)}。まず, 共振器のみが存在する場合の周波数特性を調べる。構造は図1において, 導波路構造が無いものに相当する。共振器内部の電力を測定し, 高速フーリエ変換 (FFT) を用いて周波数特性を求めると図2に示す結果が得られる。このとき, 共振周波数は規格化周波数 $\omega a/2\pi c = 0.411$ であり, また, Q値は半値幅より約400と見積もることができる。この値は, 必ずしも大きな値ではないが, 共振器周辺の円柱半径や屈折率を変化させることに改善できると考えている。

一方, 図1に示すように導波路を組み合わせた共振器の場合について考える。図3に電力の周波数特性を示す。図3より, Q値は約90となる見積もられる。導波路を組み合わせた場合に共振器のQ値が下がっているのは, 共振器から導波路への光の漏れなどにより影響を受けるためと考えられる。

2.2 フォトニック結晶光分波器

前節において, 誘電体円柱を1本取り除いた構造 (1defect) の共振器が WDM (波長分割多重伝送) に最も適していることを示した。そこで, この共振器構造を用いて光分波器を構成し, 光の取り出しについて検討する。図4に本手法のモデル図を示す。まず, 導波路外の誘電体円柱を1本取り除き共振器を構成する。次

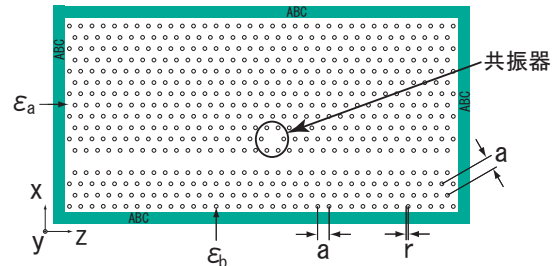


図1: 導波路を組み合わせた三角格子フォトニック結晶共振器のモデル図

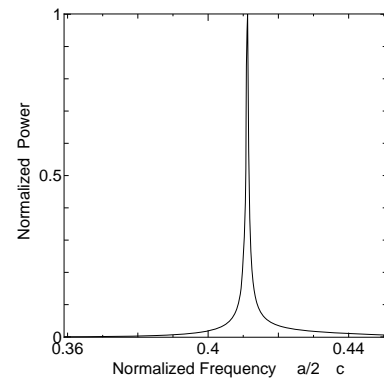


図2: 共振器のみの場合の周波数特性

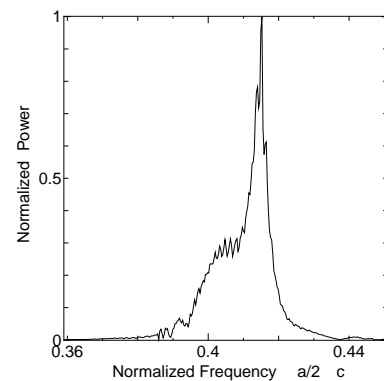


図3: 導波路を組み合わせた場合の 1defect の電力の周波数特性

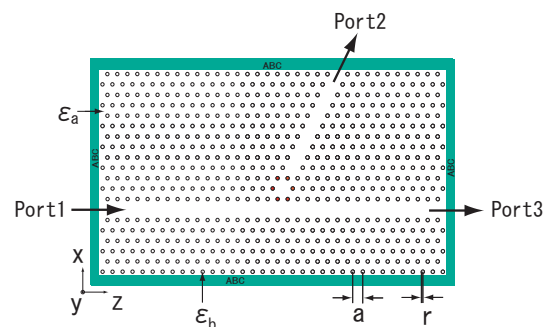


図4: 三角格子フォトニック結晶光分波器のモデル図

に、共振器から斜め方向に光を取り出すための導波路を構成する。Port2 および Port3 にどの程度の電力が流れているかを次式で評価する。

$$\text{分配率} = \frac{\int W_i dz}{\int W_{all} dz} \quad (i = 2 \text{ or } 3)$$

図 5 に周波数に対する分配率を示す。図 5 より、共振

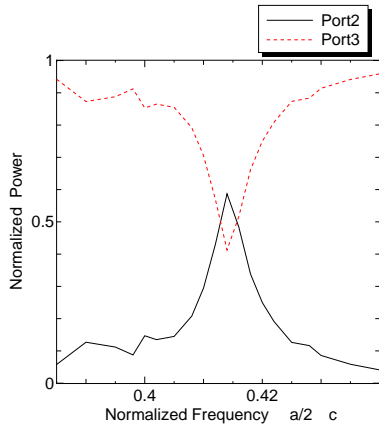


図 5: 周波数に対する分配率の関係

器の共振周波数である規格化周波数 $\omega a/2\pi c = 0.414$ 付近で Port2 の出力が約 59 % で最大となっていることが確認できる。しかし、Port3 で最小の場合でも約 41 % が出力されており、光の取り出しが十分であるとはいえない。そこで、効率よく光を取り出すため図 6 に示す分波器を考える。この構造における周波数に対する分配率の関係は図 7 のようになる。この図より、Port2 の出力は規格化周波数 $\omega a/2\pi c = 0.414$ 付近で約 74%、Port3 では約 26% となり、共振器が 1 個の場合と比べて光の取り出しが改善されていることがわかる。

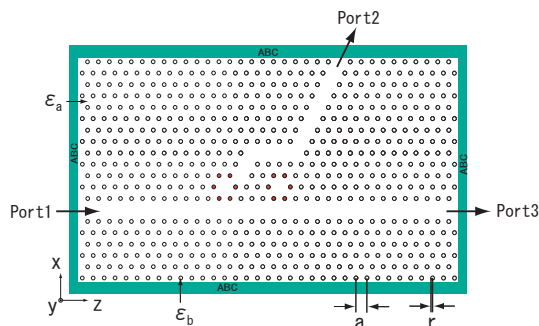


図 6: 改良した三角格子フォトニック結晶光分波器のモデル図

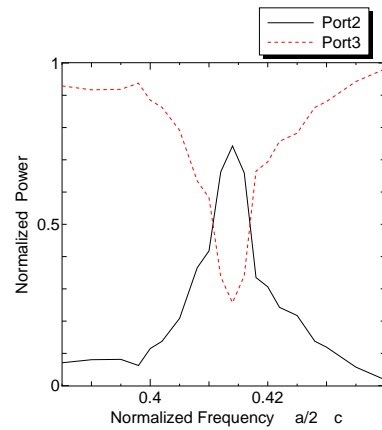


図 7: 入射周波数と分配率の関係

2.3 誘電体円柱半径の変化による共振周波数の選択

次に、共振周波数を選択するため、誘電体円柱の半径を変化させることで共振器構造を変化させる手法を提案する。図 4 のモデル図において、取り除いた誘電体円柱に接していた周りの誘電体円柱の半径を変化させることにより共振器構造を構成する。図 8 に周波数特性を示す。

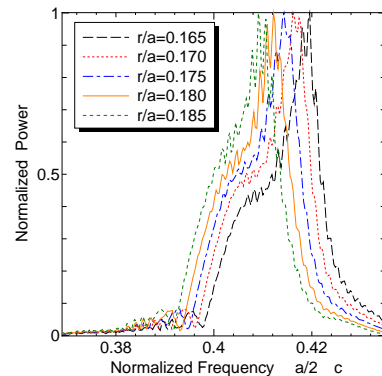


図 8: 共振器構造を誘電体円柱の半径によって変化した場合の周波数特性

図 8 より誘電体円柱の半径を小さくすることにより、共振周波数が高い周波数帯へ変化していることがわかる。また、誘電体円柱の半径を大きくすることにより、共振周波数が低い周波数帯へ変化していることがわかる。この特性は、取り除いた 3 本の誘電体円柱に接していた周りの円柱の半径を変化させることで、共振器内の面積が変化するため、共振周波数も同様に変化したものと考えられる。このように、誘電体円柱の半径を変化させることで容易に共振点を変化、または増加することができる。ことがわかる。

2.4 フォトニック結晶多波長光分波器

これまでの結果を用いて、2つの波長の光を分波する構造について検討する。図9にモデル図を示す。左側の共振器は半径 $r/a = 0.175$ とし、右側の共振器は半径 $r/a = 0.155$ とする。この構造において、各共振器の共振周波数に相当する周波数を搬送波とする2つの波長を同時に入射した場合について考える。図9における Port2, Port3 の周波数特性を図10に、分配率を図11に示す。

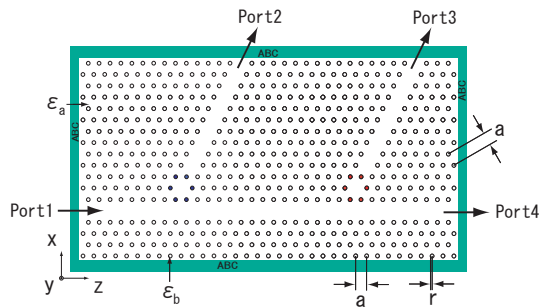


図9: 三角格子フォトニック結晶多波長光分波器のモデル図

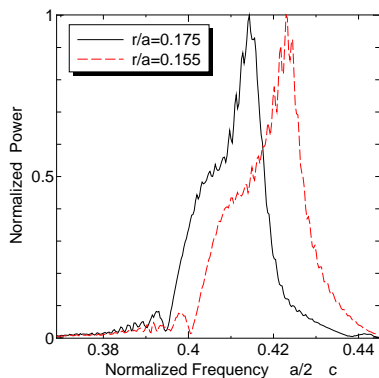


図10: 2つの波長を同時に入射した場合の周波数特性

図10, 図11より、分波器によって同時に入射された光が周波数分離され、Port2, Port3において各々約50%出力されていることがわかる。この結果から、フォトニック結晶多波長光分波器を構成できたと考えられる。

最後に、第2.2節で示した光取り出しを改善した分波器構造を用いて多波長分波器を構成する。図12にモデル図を示す。図13は分配率を示している。図13より、Port2, Port3における出力は各々約60%となっており、図9のモデル図の構造と比べて出力が改善されていることが確認できた。

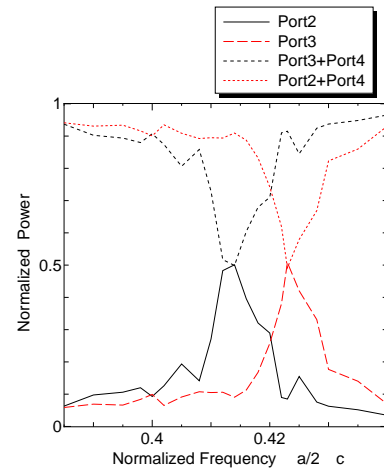


図11: 周波数に対する分配率の関係

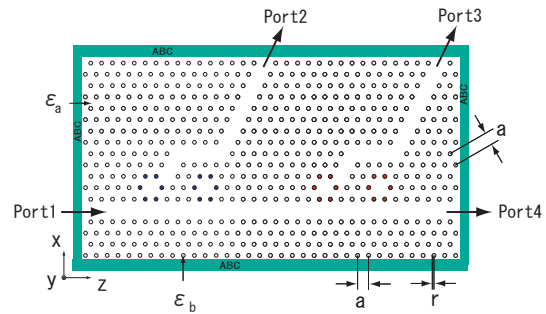


図12: 改良した分波器を用いた三角格子フォトニック結晶多波長光分波器のモデル図

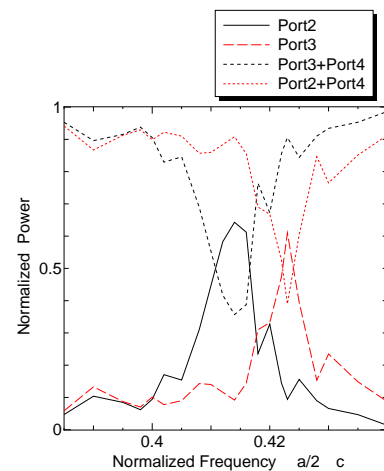


図13: 入射周波数と分配率の関係

3. まとめ

本論文では共振器を含んだ 2 次元ピラー型フォトニック結晶光導波路の基本特性を FDTD 法を用いて解析した。まず、作成したプログラムの妥当性を検討するために、フォトニック結晶光導波路の基本特性である光閉じ込め効果を確認し、プログラムの妥当性を示した。次に、導波路が無い場合と導波路を組み合わせた場合のフォトニック結晶共振器の周波数特性を示した。共振器構造を誘電体円柱の本数、または取り除いた誘電体円柱に接していた周りの円柱の半径を変化させることによって、共振周波数を容易に変化できることがわかった。また、共振器の Q 値について検討し、導波路を組み合わせることによる影響を確認した。また、共振器から光取り出し用の導波路を設けることによって光分波器を構成できることを確認し、共振器および光取り出し用の導波路の組み合わせを工夫することにより光の取り出しの比率が改善されたことを示した。さらに、多波長を入射した場合の光分波器の構造についても検討を行い、共振器を用いたフォトニック結晶多波長光合分波器を提案した。

しかし、今回提案したフォトニック結晶光合分波器は、共振器の Q 値が低いいため十分な周波数分離ができおらず、約 30 ~ 50 % の光が共振器に取り込まれずに導波路を通過している。また、共振器が導波路の影響により、共振周波数がわずかに変化しており、Q 値も低下している。このため、今後の課題として、共振器の Q 値を改善し、導波路による影響を受けにくくするような構造の工夫が必要であると考えている。

参考文献

- 1) A. Sakai, T. Baba: "FDTD Simulation of photonic Devices and Circuits Based on Circular and Fan-Shaped Microdisks", *Journal of lightwave technology*, vol.17, NO.8, pp.1493-1499, 1999.
- 2) S. Y. Lin, E. Chow, S. G. Johnson, J.D. Joannopoulos: "Direct measurement of the quality factor in a two-dimensional photonic-crystal microcavity", *OPTICS LETTERS*, vol.26, No.23, pp.1903-1905, 2001.
- 3) 吉野 勝美, 武田 寛之: 「フォトニック結晶の基礎と応用」コロナ社, 2004.
- 4) J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn: "Photonic Crystals—Molding the Flow of Light—", Princeton University Press, 1995.
- 5) A. Boag, B. Z. Steinberg: "Narrow-band microcavity waveguides in photonic crystals", *J. Opt. Soc. Am. A*, vol.18, No.11, pp.2799-2805, 2001.
- 6) S. Blair: "Self-focusing of narrow one-dimensional beams in photonic microcavity arrays", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol.20, No.7, pp.1520-1526, 2003.
- 7) S. Blair: "Nonlinear sensitivity enhancement with one-dimensional photonic bandgap microcavity arrays", *Optics Lett.*, vol.27, No.8, pp.613-615, 2002.
- 8) H. Ikuno, Y. Naka: "Finite-Difference Time-Domain Method Applied to Photonic Crystals", *Electromagnetic Theory and Applications for Photonic Crystals*, Ch.8, 2006.
- 9) 倉持 栄一: 「フォトニック結晶による光導波路, 光共振器」 <http://www.brl.ntt.co.jp/event/splaza2005/poster.html>, 2005.
- 10) 赤羽 良啓, 浅野 卓, 宋 奉植, 野田 進: 「2次元フォトニック結晶ナノ共振器の開発」SEI テクニカルレビュー, 第 165 号, 2004.
- 11) 野田 進: 「フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス」戦略的創造研究推進事業チーム型研究 CREST 平成 17 年度 研究終了報告書, 2005.
- 12) A. Taflov, S. C. Hagness: "Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method (Second Edition)", Artech House Publishers, 2000.
- 13) T. Tanabe, M. Notomi, E. Kuramochi, A. Shinya, H. Taniyama: 「超小型高 Q フォトニック結晶ナノ共振器における 1 ナノ秒間の光子の捕捉と遅延」 <http://www.nature.com/nphoton/journal/v1/n1/full/nphoton.2006.51.ja.html>, 2006.