

非線形フォトニック結晶を用いた方向性結合器の基本特性

下村 正樹¹⁾ ・ 横田 光広²⁾**Fundamental Properties of Directional Coupler Constructed by Nonlinear Photonic Crystal Waveguides**

Masaki Shimomura, Mitsuhiro Yokota

Abstract

The design and the experiments of the microscopic devices have attracted the attention of many researchers. The photonic crystal structure is one of the candidates from the practical point of view. In this paper, the lightwave transmission and coupling in the nonlinear photonic crystal waveguides is examined by the finite difference time domain (FDTD) method. The 2nd Mur absorbing boundary condition is applied. The structure to be considered is pillar type directional coupler. The nonlinearity is assumed to be of the Kerr-type, whose relative dielectric constant depends on the light intensity. Since the resonance frequency and the coupling length are changed due to the input light intensity, the optical switching can be observed. We also examined the air hole type directional coupler and showed some numerical results.

Key Words :

Photonic crystal waveguide, directional coupler, Kerr-type medium

1. まえがき

光通信は、情報通信のブロードバンド化を支える最も重要な技術となっており、将来のより高度化した光サービス実現のためには、光による小型大規模集積回路が必要になる。しかしながら、現状での光集積回路はLSIなどのシリコンウエハ上の電子集積回路に比べると集積密度が低く、高性能化を要求するとどうしてもチップサイズが大きくなり機能も限られたものになってしまうという問題がある。なぜなら、従来の光回路では屈折率差による全反射により光閉じ込めを行っており、この方法では閉じ込めサイズは波長に比べてはるかに大きくなってしまい、光回路における光導波路を数サイズで急激に曲げることができないためである。このような限界を打破し、困難とされていた大規模光集積回路(光LSI)を実現する可能性を持つと期待されているのが、フォトニック結晶^{?)}である。

フォトニック結晶とは屈折率が異なる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結晶構造を持たない欠陥と呼ばれる構造を導入すると、光がこの欠陥部分に完全に閉じ込められる。例えば線状に連なった形状の欠陥(線欠陥)であった場合には、光がその線欠陥に沿って伝搬するため光導波路として動作する。これを利用すると放射による光の損失を抑制できるため光導波路を急激に曲げることが可能となる。このように自然界には存在しない光絶縁体として機能するため、フォトニック結晶の応用範囲は極めて広く、新概念の電子デバイス、スーパープリズム、マイクロ波デバイス、光トランジスタ、光回路、光論理素子、光記録、無しきい値レーザー、非線形光学素子、光電変換デバイス、更には機能構造材料など多岐にわたる。現在、フォトニック結晶構造を利用した研究が活発化しており、フォトニック結晶光導波路中に分散性、非線形性^{?)}、異方性媒質^{?)}を導入した場合やフォトニック結晶により構成される共振器^{?)}を用いた場合の種々の基本特性やそれらの応

¹⁾電気電子工学専攻²⁾電気電子工学科助教授

用について報告が多くなされている。また、超微細構造デバイスの実現に向けて解析法⁵⁻⁷⁾や作製方法⁸⁾の開発も進められている。

非線形光学 (nonlinear optic) 現象は、入射光に依存した分極が媒質中に誘起され、この分極中の非線形成分によって生じる。非線形光学効果として、光の強さの2乗に比例する2次非線形光学効果には第2高調波発生などがあげられ、これに対して3乗に比例する3次非線形光学効果では、光の強度によって材料の屈折率等が変化するなどの効果がある。非線形光学効果による光スイッチやメモリーなどの機能は、高速性、並列・空間処理性など、光の持つ特徴を最大限に活用したオプティクス技術の鍵であり、大容量情報処理を可能とする光コンピューティングの中核光デバイスを実現するものと期待されている。そのためフォトニック結晶内における非線形光学現象の解析は新デバイス実現への大きなステップとなる。

本報告ではカー媒質が含まれた2次元フォトニック結晶導波路のスイッチング動作について、FDTD法(時間領域差分法)⁹⁾を用いて数値的に調べている。境界条件としてMurの2次の吸収境界条件を用いている。

2. ピラー型方向性結合器

図1に示すようにピラー型方向性結合器を取り扱う。パラメータとして、ロッド半径 $r = 0.18a$, 比誘電率 $\epsilon = 11.56$, $a/\lambda = 0.355$ に設定している。結合部分にロッド半径 $r = 0.18a$, 比誘電率 $\epsilon = \epsilon_0 + \alpha|E|^2(\epsilon_0 =$

$11.56, \alpha = 0.6377 \times 10^{-11}[\text{m}^2/\text{V}^2])$ のカー媒質ピラーを170本配置している。解析領域は $102\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$ である。FDTD法において $\Delta t = 5.84 \times 10^{-17}[\text{s}]$ とし、Port1から光を入射する。

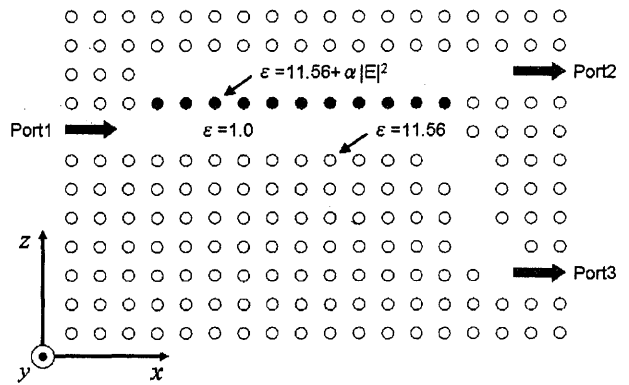


図1 ピラー型方向性結合器

図2, 3は入射電界の強さが $E = 7.3 \times 10^5[\text{V/m}]$ および $E = 14.2 \times 10^5[\text{V/m}]$ のときの電界分布図を示している。これより $E = 7.3 \times 10^5[\text{V/m}]$ の場合にPort2に出力されていた光が、 $E = 14.2 \times 10^5[\text{V/m}]$ の場合ではPort3に出力されていることがわかる。これは、入射電界の強さにより結合長が変化していることによる。 $E = 7.3 \times 10^5[\text{V/m}]$ のときの結合長は $3.62\mu\text{m}$, $E = 14.2 \times 10^5[\text{V/m}]$ のときは $3.76\mu\text{m}$ である。結合長は入射電界の強さによる比誘電率の変化が伝搬定数に影響を与え、結合係数が変化するため、入射電界に依存する。そのため結合路の長さが $94\mu\text{m}$ で出力をPort2からPort3に切り替えることができると考えられる。

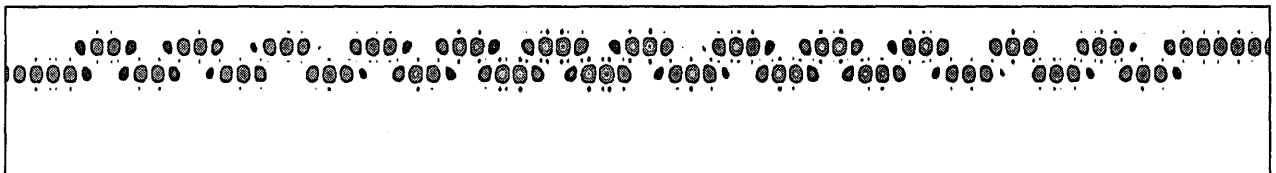


図2 ピラー型方向性結合器において $E = 7.3 \times 10^5[\text{V/m}]$ の場合の光波伝搬

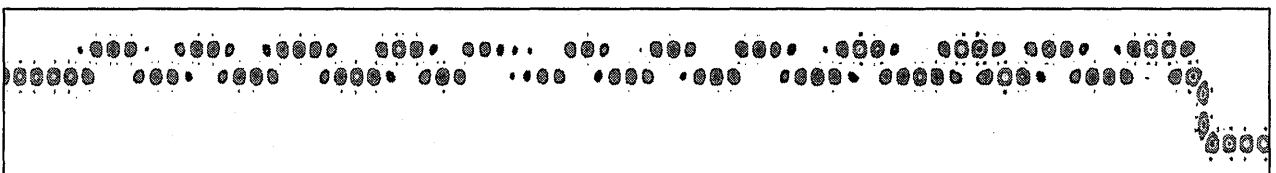


図3 ピラー型方向性結合器において $E = 14.2 \times 10^5[\text{V/m}]$ の場合の光波伝搬

Port i ($i=2,3$) の出力部の電界を E_i とすると分配率 P_i ($i=2,3$) を次のように定義する。

$$P_i = \frac{\int_{\text{Port}i} E_i dz}{\int_{\text{Port}2} E_2 dz + \int_{\text{Port}3} E_3 dz} \quad (i=2,3) \quad (1)$$

図4に入射電界の強さに対する分配率を示す。これより、 $E = 7.3 \times 10^5$ [V/m] のとき Port2 の出力が最大、Port3 の出力が最小となり、 $E = 14.2 \times 10^5$ [V/m] のとき Port2 の出力が最小、Port3 の出力が最大となることが確認できる。電界が $E = 4.0 \times 10^5$ [V/m] のとき Port3 の出力が最小とならず、電界が $E = 7.3 \times 10^5$ [V/m] と大きくなるにつれ、小さくなっている理由を以下に説明する。

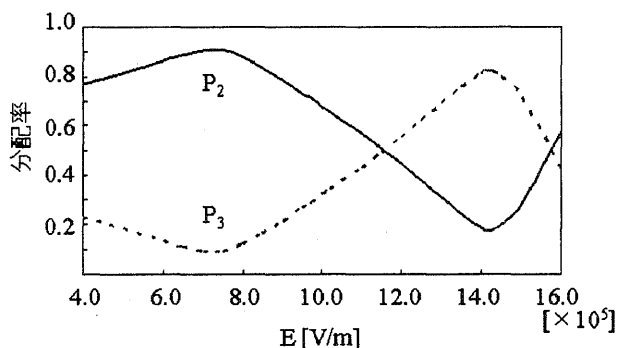


図4 入射電界の強さに対する分配率

カー媒質ピラーを線形媒質ピラーで置き換えた線形方向性結合器において、結合部での比誘電率を変化させたときの分配率 P_i を図5に示す。これより比誘電率が 11.64 のとき Port2 の出力が最大、Port3 の出力が最小となり、比誘電率が 11.93 のとき Port2 の出力が最小、Port3 の出力が最大となることがわかる。以上より、線形媒質の比誘電率変化による分配率の変化は、電界の強さによりカー媒質ピラーの比誘電率を変化させることによる分配率の変化に類似しており、同様の物理現象が生じていると考えられる。

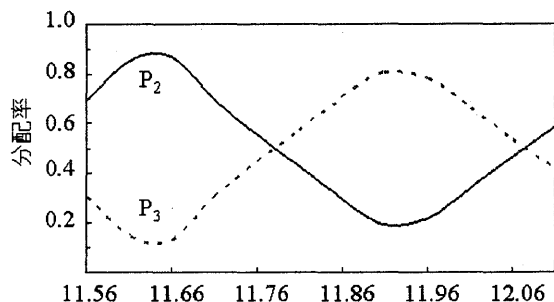


図5 結合部の比誘電率に対する分配率

図6は光波伝搬が安定した後に、それぞれのカー媒質ピラーでの比誘電率の時間平均を示している。本来

ならば、その比誘電率は一定の値に収束するはずだが、グラフをより波打っていることがわかる。これは導波路に曲がり角の不連続部を導入してしまったことにより、反射が起こっているためと考えられる。フォトニック結晶では放射による光の損失はないが、反射は存在する。ピラー型導波路においては、曲がり角にピラーを配置することで放射を防ぎ、反射を抑える方法が報告されているが、この方法はフォトニックバンドギャップの閉じ込めが強い場合にその効果を最大限に発揮するものである。フォトニックバンドギャップの端で解析を行った今回の場合では10~20パーセント程度の反射があらわれた。しかし、フォトニックバンドギャップの閉じ込めが強い周波数帯で解析を行うと、光カー効果による結合長の変化が弱められる傾向があり、スイッチングにはさらに長い結合路が必要となる。反射はスイッチング動作を不安定にするだけでなく、光源を破壊してしまう可能性があるため、光カー効果の影響を弱めず、反射が軽減できる構造を設計する必要がある。また、ピラー番号165から170までの比誘電率変化が小さくなるのは、Port3へ光波が移行し、Port2の電界が小さくなるためと考えられる。

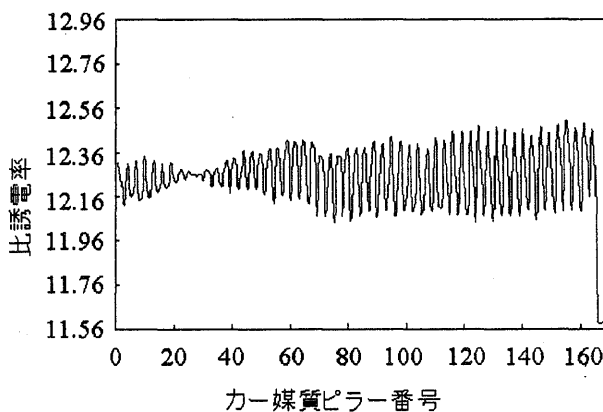


図6 比誘電率変化

3. エアホール型方向性結合器

図7に示すように誘電体に周期的に穴を開けたエアホール型フォトニック結晶を用いて方向性結合器を設計する。パラメータとして比誘電率 $\epsilon = 11.56$ 、エアホール半径 $r = 0.475a$ 、導波路幅 $W_1 = W_2 = 0.85a$ 、 $a/\lambda = 0.246$ 、 $D/a = 0.8$ に設定している。このときフォトニックバンドギャップは $0.245 \leq \lambda \leq 0.306$ に形成される¹⁰⁾。導波路Iを比誘電率 $\epsilon = \epsilon_0 + \alpha|E|^2$ ($\epsilon_0 = 11.56$ 、 $\alpha = 0.6377 \times 10^{-11}$ [m²/V²]) のカー媒質を用いて構成する。解析領域は $26\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ である。FDTD法において $\Delta t = 8.98 \times 10^{-17}$ [s] とし、Port1から光を入射

する。

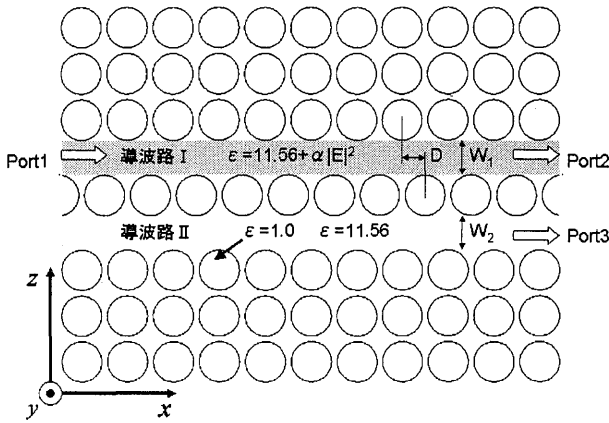


図7 エアホール型方向性結合器

図8, 9は入射電界の強さが $E = 7.0 \times 10^5$ [V/m] および $E = 18.0 \times 10^5$ [V/m] のときの電界分布図を示している。 $E = 7.0 \times 10^5$ [V/m] の場合は線形方向性結合器として機能し、Port3 から出力する。 $E = 18.0 \times 10^5$ [V/m] の場合は導波路 I を光が伝搬することで比誘電率が増加し、自己収束効果が現れるため Port2 から出力が得られる。

図10に入射電界の強さに対する分配率を示す。入射電界の強さを上げていくにつれて Port2 の出力が大きくなり、Port3 の出力が小さくなっていくことが確認できる。しかし、 $E = 18.0 \times 10^5$ [V/m] 以上の電界を加えると、比誘電率変化により不安定性が生じ、解が発散してしまう。不安定性の対処法として、一般に FDTD 法では Courant の安定条件より下記の時間ステップ Δt を小さくする方法がとられている。

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{(1/\Delta z)^2 + (1/\Delta x)^2}} \quad (2)$$

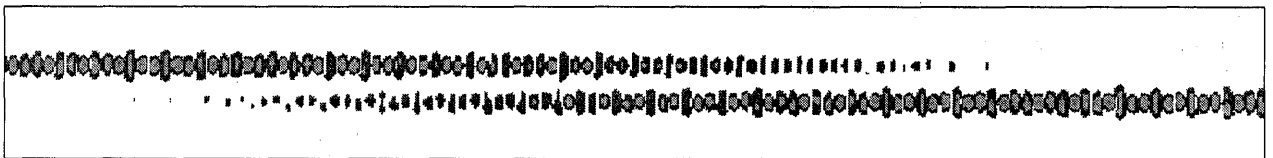


図8 エアホール型方向性結合器において $E = 7.0 \times 10^5$ [V/m] の場合の光波伝搬

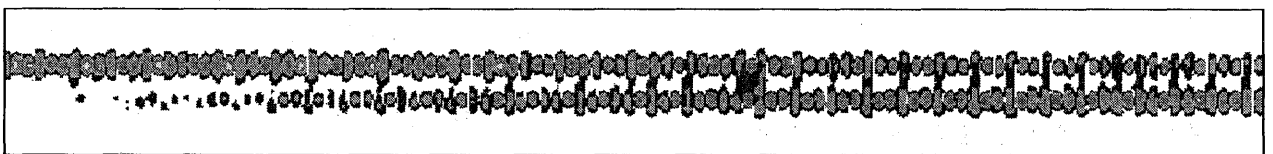


図9 エアホール型方向性結合器において $E = 18.0 \times 10^5$ [V/m] の場合の光波伝搬

どれくらい小さくしなければならないかについては正確な基準はなく問題に応じて確かめる必要がある。しかし、同じ時間 t を解析する場合に時間ステップ Δt を小さくするとステップ数が大きくなり解析時間が膨大になる。今回は時間ステップを Courant の安定基準(= の場合)の 1/20 にしても不安定性は解消されなかった。

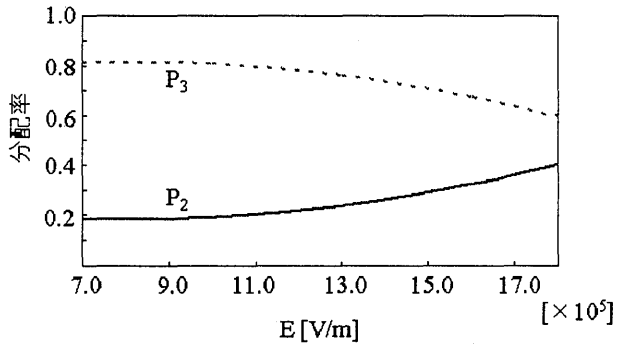


図10 入射電界の強さに対する分配率

カー媒質を線形媒質で置き換えた線形方向性結合器において、導波路 I での比誘電率を変化させたときの分配率 P_i を図11に示す。これよりピラー型方向性結合器と同じように線形媒質の比誘電率変化による光波伝搬の変化が、ピラー型方向性結合器の結果に類似しているのであれば、エアホール型方向性結合器においてもスイッチング動作が可能であると思われる。また、比誘電率が 11.86 以上に変化した場合に、分配率が一定とならずに周期的に変動していることがわかる。これは導波路 I と導波路 II の比誘電率差が大きくなることにより比誘電率分布の対称性がくずれ、伝搬定数が増加することにより、分配率が周期的に変化していると考えられる。

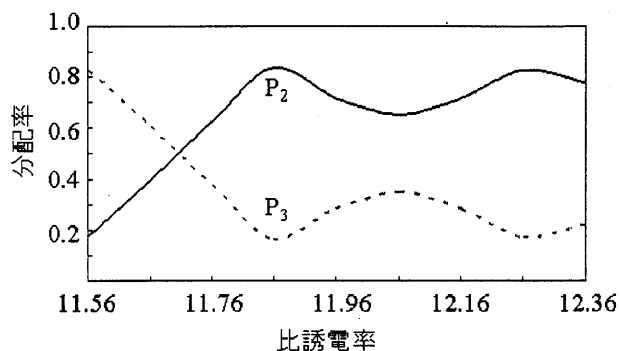


図 11 導波路 I の比誘電率に対する分配率

図 12 は $E = 18.0 \times 10^5$ [V/m] の場合に光波伝搬が安定した後に、導波路 I での比誘電率の時間平均を示している。比誘電率が大きくなるにつれて閉じ込め効果が強くなるため、自己収束が起こり結合長も長くなる。伝搬距離が $20 \sim 26 \mu\text{m}$ では比誘電率変化が 11.7 程度であり、スイッチング動作が可能となる 11.86 より小さくなっているため、入射電界を $E = 18.0 \times 10^5$ [V/m] より大きくする必要がある。また、入射電界を弱めて比誘電率変化を小さくしても、伝搬距離を長くすれば結合長変化よりスイッチングが可能であると思われるが、伝搬距離を長くした場合も同様に不安定性が生じた。

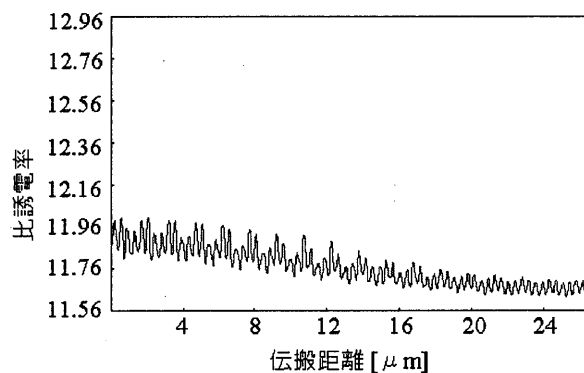


図 12 比誘電率変化

4. まとめ

本報告では、フォトニック結晶を用いた全光型光スイッチを実現するため、光カー媒質を用いた 2 つの構造の光導波路における伝搬特性を FDTD 法により数値解析した。ピラー型方向性結合器においては、光カー媒質を方向性結合器の結合部分に配置し、比誘電率を増加させることで閉じ込め効果を強め、結合長が長くなることを利用して出力ポートを切り替えるというス

イッチング動作を確認した。エアホール型方向性結合器においては、片方の導波路を光カー媒質にすることで自己収束効果による出力の変化を確認したが、閉じ込め効果が弱く、光出力がすべて入れ替わるという完全なスイッチング動作にはなっていない。また、FDTD 法において比誘電率変化により不安定性が生じることが確認された。これらの解決は今後の課題である。

参考文献

- 1) 藤井 壽崇, 井上 光輝: フォトニック結晶—光の流れを型にはめ込む—, コロナ社, 2000
- 2) 李 雪峰, 前田 洋: 「非線形誘電体を用いた 2 次元フォトニック結晶方向性結合器の数値解析」, EMT-03-87, pp.19-24, 2003
- 3) 佐藤 弘明, 吉田 則信, 宮永 喜一: 種々の異方性媒質を含むフォトニック結晶光導波路の基本特性解析とその応用」, EMT-02-89, pp.75-80, 2002
- 4) 中 良弘, 生野 浩正: 「共振器を用いた 2 次元フォトニック結晶直角曲がり光導波路の導波特性解析」, 平成 15 年度電気関係学会九州支部連合大会論文集, 01-2P-17, 2003
- 5) 前田 洋, 李 雪峰, 渡辺 仰基: 「フーリエ級数展開法によるフォトニック導波路の解析」, 平成 15 年度電気関係学会九州支部連合大会論文集, 01-2P-18, 2003
- 6) 川上 彰二郎, スティーブン・ジョンソン, 大寺 康夫, 佐々木 良裕: 「3 次元フォトニック結晶導波路の基準解析解について」, 電子情報通信学会総合大会, C-3-133, 2003
- 7) 藤澤 剛, 小柴 正則: 「非線形光波伝搬解析のための時間領域ビーム伝搬法とフォトニック結晶光波回路への応用」, 電子情報通信学会総合大会, C-4-32, 2003
- 8) 野田 進: 新しい光ナノ構造—フォトニック結晶—, 電子情報通信学会誌, Vol.87, No1, 2004
- 9) 宇野 亨: FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998
- 10) 中 良弘, 生野 浩正: 「2 次元エアホール型フォトニック結晶を用いた方向性結合器の特性解析」, EMT-02-90, pp.81-86, 2002