

エアホールをもつ誘電体円柱配列による誘電体光導波路のエネルギー分布

Energy Distribution of Dielectric Optical Waveguides Formed by Dielectric Circular Cylinder Array with Air-hole

○尾崎亮介¹, 山崎恆樹¹

Ryosuke Ozaki¹, Tsuneki Yamasaki¹

Abstract: In this paper, we have analyzed the guiding problem for dielectric optical waveguide composed of dielectric circular cylinder array and air-hole circular cylinder in all regions, and investigated the influence of energy distribution for the defect area by using the complex propagation constants at the first stop band regions.

Numerical results are given by complex propagation constants at the first stop band regions and energy distribution for defect area.

1. はじめに

周期構造系における電磁波の散乱問題や導波問題は、光波や電磁波の振る舞いを調べる上で大変興味深く、理論的かつ実用的にも重要な研究課題である。ここで、任意な方向に周期性を有する構造は、フォトニック結晶構造として知られている^[1,2]。ある方向に周期性を有するフォトニック結晶では、完全周期配列を用いて電磁モードの存在できない周波数領域(フォトニックバンドギャップ)を作り出す事が可能であり、完全周期配列中の構造中に意図的に乱れ(欠陥)を導入すると、ある周波数帯域をもつ光や電磁波は、微小な領域に閉じ込められて伝搬不可能な状態となる。従って、これらの性質を巧みに利用すれば、従来実現する事が出来なかった種々の光デバイスを設計製作する事が可能となるため、フォトニック結晶の性質から集積化や小型化に繋がり、将来の光デバイスとして様々な分野に展開されることが期待されている^[3,4]。

著者らは、これまでに誘電体円柱が多層配列された誘電体導波路中の中間層領域に不均質誘電体構造を内蔵して誘電率変化や形状変化した場合における伝搬特性を解析し、出来るだけ多くのエネルギーを欠陥部に集中できるように構造の最適化を検討してきた^{[5][8]}。

本文では、先に検討してきた構造(誘電体円柱配列の構造, エアホール円柱配列の構造)を踏まえて、誘電体円柱とエアホール円柱配列で構成した誘電体導波路を提案し、欠陥部に対するエネルギー分布について従来構造との影響を比較検討する^[8]。

2. 解析法

本文で検討するエアホールをもつ誘電体円柱配列による誘電体光導波路の構造と座標系を Fig.1 に示す。図中に示した構造は、z 軸方向に周期 p をもち、y 軸方向に一樣とした構造とする。内部領域の影響のみを検討するため外部領域 S₁(x ≥ 0) と領域 S₃(x ≤ -D) は、真空の誘電率 ε₀ とし、内部領域 S₂(-D < x < 0) は、各層の幅を d とした背景媒質 ε₁ 内に円形空孔(エアホール)を

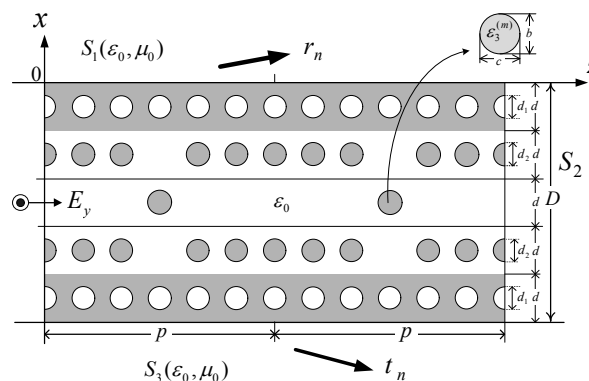


Fig.1 Structure of dielectric optical waveguide consisting of dielectric circular cylinder and air hole cylinder array

周期内に配列した層と周期内の誘電体円柱を 1 つ取り除いた誘電体円柱配列の層で構成される対称構造とする。ここで、エアホール層と欠陥層に配置した円柱直径をそれぞれ d₁, d₂ とした。ここで、本文における電磁界の時間因子は exp(-iωt) として以下省略する。次に、TE モードを解析する為の定式化の要点を簡単に述べる。z 軸方向の伝搬定数を γ(≡ β + iα) とすると、各領域における電磁界は次の通り表現できる^{[5][8]}。

$$E_y^{(1)} = e^{iyz} \sum_{n=-N}^N r_n \exp\{ik^{(n)}x + i2n\pi z/p\}, \quad (1)$$

$$E_y^{(3)} = e^{iyz} \sum_{n=-N}^N t_n \exp\{-ik^{(n)}(x+D) + i2n\pi z/p\}, \quad (2)$$

$$E_y^{(2)} = \sum_{v=1}^{2N+1} [A_v^{(l)} e^{-ik_v^{(l)}\{x+(l-1)d_\Delta\}} + B_v^{(l)} e^{ik_v^{(l)}\{x+ld_\Delta\}}] f_v^{(l)}(z), \quad (3)$$

$$H_x^{(j)} \triangleq \frac{-1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial E_y^{(j)}}{\partial z}, \quad H_z^{(j)} \triangleq \frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial E_y^{(j)}}{\partial x}, \quad (4)$$

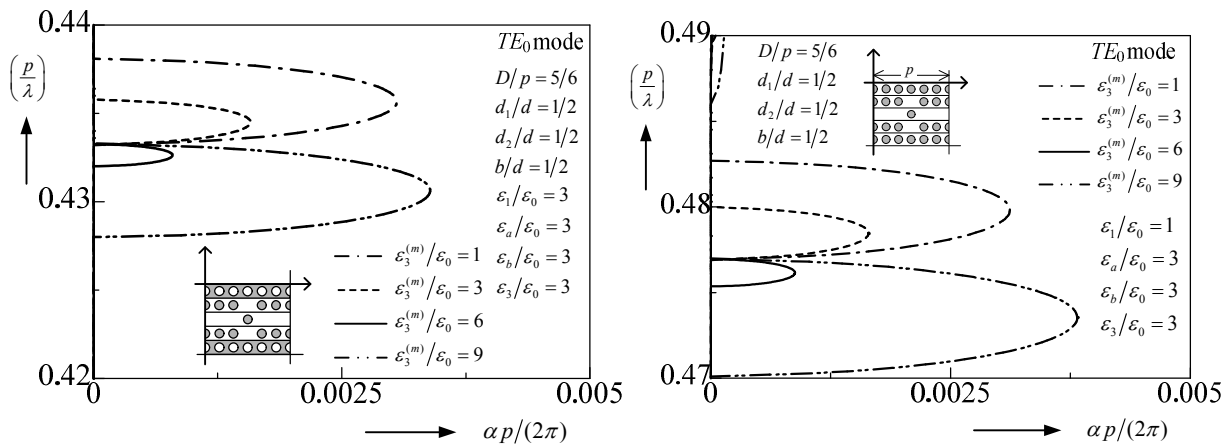
但し、

$$f_v^{(l)}(z) \triangleq e^{iyz} \sum_{n=-N}^N u_n^{(v,l)} e^{i2n\pi z/p}, \quad d_\Delta \triangleq d/M,$$

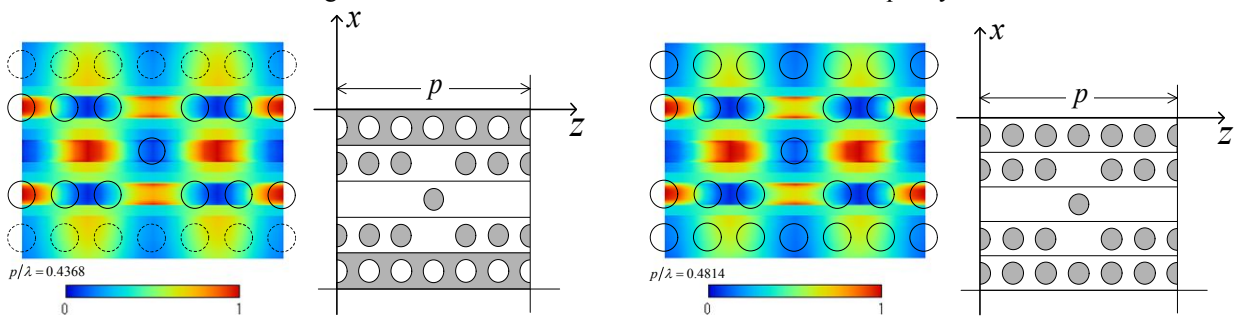
$$k^{(n)} \triangleq \sqrt{k_0^2 - (\gamma + 2n\pi/p)^2}, \quad k_0 \triangleq \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 2\pi/\lambda,$$

$$1 \leq l \leq M, \quad j = 1 \sim 3,$$

である。



(a) Dielectric and air cylinders array (b) Dielectric circular cylinder array
Fig.2 Normalized attenuation constants vs. normalized frequency



(a) Dielectric and air cylinders array (b) Dielectric circular cylinder array
Fig.3 Distribution of energy flow and structure for dielectric and air cylinders array

ここで、式(1)~(3)中における係数($r_n, t_n, A_n^{(l)}, B_n^{(l)}$)は、境界条件式によって定まる未定係数である。

次に、層内部における境界条件式を適用し、電磁界の未知係数の関係式を中間層の最終層内で整理すると、次式の行列方程式を得る^{[5]~[8]}。

$$\mathbf{W} \cdot \mathbf{A}^{(3M)} = \mathbf{0}, \quad (5)$$

式(5)を数値的に計算すると複素伝搬定数が求まる。また、エネルギー分布解析のため、ポインティングベクトルを次式の通り定義する^{[5]~[8]}。

$$\mathbf{S} \triangleq S_x^{(TE)} \mathbf{a}_x + S_z^{(TE)} \mathbf{a}_z, \quad (6)$$

$$S_x^{(TE)} \triangleq \text{Re} [E_y^{(2)} \times \{H_z^{(2)}\}^*] / 2, \quad (7)$$

$$S_z^{(TE)} \triangleq \text{Re} [E_y^{(2)} \times \{H_x^{(2)}\}^*] / 2. \quad (8)$$

$\gamma, h_n, u_n^{(l)}$ を用いてエネルギー分布は次式から求めた^{[5]~[8]}。

$$P^{(TE)} \triangleq \sqrt{\{S_x^{(TE)}\}^2 + \{S_z^{(TE)}\}^2}. \quad (9)$$

3. 数値結果

本文で検討した構造パラメータは、 $D/p=5/6, d_1/d=0.5, d_2/d=0.5, b/d=0.5, \epsilon_1/\epsilon_0=3$ として解析を行った。Fig.2(a),(b)は、中間層領域に誘電体円柱を内蔵しその誘電率変化した場合における規格化周波数に対する規格化減衰定数を第 1 stop band 領域付近の結果を示したものである。Fig.2(a)がエアホールを持つ誘電体円柱配列における構造の結果で、Fig.2(b)が誘電体円柱配列のみで構成した構造の結果である。Fig.2 よ

り、誘電率を大きくしていくと、stop band 領域における減衰定数は周波数の低い方にシフトしながら、その最大値は大きくなっており、両特性ともに同様の特性を得られている事が確認できる。次に、Fig.3 は、中間層の誘電体円柱の誘電率を $\epsilon_3^{(m)}/\epsilon_0=3$ とした場合の、伝搬域中におけるエネルギー分布の結果を示したものである。また、比較として Fig.3(b)に誘電体円柱のみで配列した構造の結果も示した。Fig.3 より次の事がわかる。

- (1)欠陥部のエネルギーは、誘電体円柱のみによる構造に比べて、誘電体円柱とエアホール円柱によって配列した構造の方が、集中している事が確認できる。
- (2)Fig.3(b)の構造に比べて Fig.3(a)の構造における中間層外部(エアホール層)へのエネルギー放射も大きくなっている事がわかる。

4. まとめ

本文では、エアホールをもつ誘電体円柱配列による誘電体光導波路の構造を提案し、欠陥部のエネルギー集中度の効果を従来の誘電体円柱配列のみによる構造と比較検討した。

参考文献

- [1]K. Sakoda: Optical Properties of Photonic Crystals, Springer, 2008.
- [2]J. D. Joannopoulos et al.: Photonic Crystals, Princeton, 2008.
- [3]M. Koshiba et al.: J. Light. Tech., vol.18, 2002.
- [4]中, 西本: 電学研資, EMT-13-130, 2013.
- [5]尾崎, 山崎: 日大理工学術講演会, L-13, pp.973-974, 2011.
- [6]R. Ozaki and T. Yamasaki: IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, 2012.
- [7]尾崎, 山崎: 日大理工学術講演会, L-31, pp.987-988, 2013.
- [8]尾崎, 山崎: 電学研資, EMT-12-175, 2012.