

誘電体導波路における複素モードの固有モード解析

朝生, 龍也 / ASO, Tatsuya

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

2

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010456>

誘電体導波路における複素モードの固有モード解析

EIGENMODE ANALYSIS OF COMPLEX MODES IN A DIELECTRIC WAVEGUIDE

朝生 龍也

Tatsuya ASO

指導教員 山内潤治

法政大学大学院理工学研究科情報電子工学専攻修士課程

A dielectric waveguide supporting complex modes is investigated using the imaginary-distance beam propagation method based on Yee's mesh (YM-BPM). In order to evaluate the complex modes in a dielectric waveguide, an amplification factor is introduced into YM-BPM. The characteristics of the complex modes, including the propagation constant and the field distribution, are discussed.

Key Words : Yee's mesh, Complex mode, Amplification factor, Beam propagation method

1. はじめに

誘電体導波路の比屈折率差が大きくなると、複素モードと呼ばれる特殊なモードが生成される [1]. 進行波のみが仮定されるビーム伝搬 (BPM) 解析では、共役複素数のペアで固有値を持つ複素モードが一度励振されると、界が指数関数的に増幅する場合がある. 著者はこの現象に着目し、伝搬ステップ毎に界を正規化しながら伝搬ビーム解析を行うことで複素固有モードの抽出に成功した [2],[3]. また、増幅係数を用いた虚軸 BPM [4] によって複素固有モードを抽出し、変分表現式から複素伝搬定数を評価してきた [5]. 増幅係数を用いた虚軸 BPM は求める固有モードの実効屈折率を予想することで、所望のモードを効率的に算出する手法であり、漏れモードなど損失を伴う固有モードの算出も可能である. しかしながら、増幅係数を用いた Yee 格子に基づく BPM (YM-BPM) は開発されていなかった.

本稿の目的は、増幅係数を用いた YM-BPM を開発し、複素モードを抽出することにある. はじめに、文献 [6] の YM-BPM の基本式から増幅係数を導出する. そして、複素モードを評価し、大きな減衰定数を持つモードであることを明らかにし、虚軸 BPM で得られる複素モードと同一のモードであることを明示する.

2. 本論

複素固有モードを有する導波路として、図 1 に長方形の Si コア (屈折率 3.5) とエアクラッドから成る強導波構造 [1] を取り扱う. コアの高さ h を $0.4 \mu\text{m}$, 幅 w を $0.5 \mu\text{m}$ に設定する. 波長を $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$ に選ぶ. 解析領域端には完全整合層を設置する.

(1) 増幅係数

解析に使用する陰的 YM-BPM の基本式を以下に示す.

$$-2j\beta_0 \frac{\partial E_x}{\partial z} - \beta_0^2 E_x + \bar{D}_{xx} E_x + \bar{D}_{xy} E_y = -jk_0 \left(\frac{\partial H_y}{\partial z} - j\beta_0 H_y \right) \quad (1)$$

$$-2j\beta_0 \frac{\partial E_y}{\partial z} - \beta_0^2 E_y + \bar{D}_{yy} E_y + \bar{D}_{yx} E_x = jk_0 \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - j\beta_0 H_x \right) \quad (2)$$

$$-2j\beta_0 \frac{\partial H_x}{\partial z} - \beta_0^2 H_x + D_{xx} H_x + D_{xy} H_y = jk_0 \epsilon_r \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - j\beta_0 E_y \right) \quad (3)$$

$$-2j\beta_0 \frac{\partial H_y}{\partial z} - \beta_0^2 H_y + D_{yy} H_y + D_{yx} H_x = -jk_0 \epsilon_r \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - j\beta_0 E_x \right) \quad (4)$$

ここで、 k_0 は自由空間波数、 ϵ_r は比誘電率、 n_0 は参照屈折率、 β_0 は参照伝搬定数である. D は微分演算子を意味している. 虚軸法とするため伝搬軸を $z = j\Delta\tau$ と置き換える. 陰的 YM-BPM は電磁界 4 成分を用いた伝搬式を計算することで解析を行う. 式 (1) から式 (4) の伝搬式を Crank-Nicolson 法により離散化すると、基本式は $\phi_{\tau+\Delta\tau} = A_{CN} \phi_{\tau}$ と表すことができる. A_{CN} が増幅係数である. 所望のモードを一度の解析で抽出するためには、所望の実効屈折率 n_{eff} に対して A_{CN} が最大となるように、 τ 方向の刻み幅 $\Delta\tau$ を適切に設定する必要がある. A_{CN} が最大となる $\Delta\tau$ は次式で与えられる.

$$\Delta\tau = \frac{2(\sqrt{\epsilon_r} + 2n_0)}{n_e k_0 (n_e + \sqrt{\epsilon_r}) - n_0 k_0 (n_0 + \sqrt{\epsilon_r})} \quad (5)$$

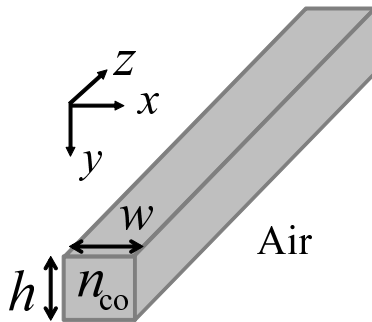


図 1 導波路構造

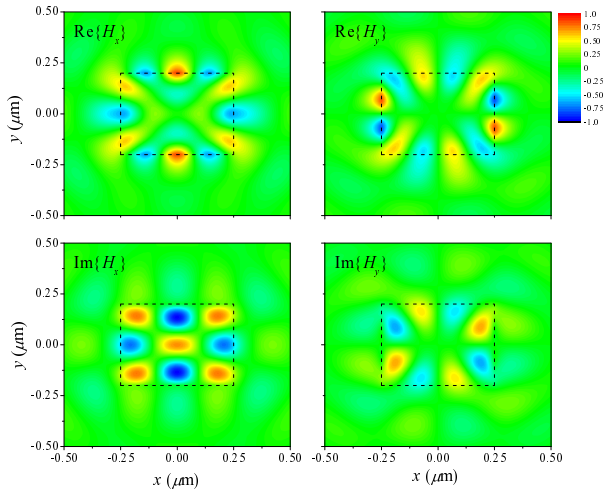


図 2 界分布

ここで、 n_e は予想される実効屈折率、 ϵ_r は解析する構造の比誘電率である。 ϵ_r は誘電率分布であるため、解析を行う際には $\sqrt{\epsilon_r}$ を予想される実効屈折率 n_e として置き換える。本稿では、複素モードを抽出するため予想される実効屈折率 n_e を文献 [1] から引用する。

(2) 固有モード解析

図 2 に得られる複素モード界の磁界成分を示す。複素モード界は実部と虚部に有意な値を持ち、横方向に激しく変化する複素モードであることが分かる。次に伝搬定数を評価する。伝搬定数の評価には文献 [7] より以下の伝搬定数算出式を用いる。

$$\beta = \frac{\iint_S (k_0 \epsilon_r \mathbf{E}_t^2 + k_0 \mathbf{H}_t^2 + j \mathbf{E}_t \times \nabla_t H_z \cdot \mathbf{u}_z - j \mathbf{H}_t \times \nabla_t E_z \cdot \mathbf{u}_z) ds}{2 \iint_S (\mathbf{E}_t \times \mathbf{H}_t \cdot \mathbf{u}_z) ds} \quad (6)$$

$$E_z = -\frac{j}{k_0 \epsilon_r} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad (7)$$

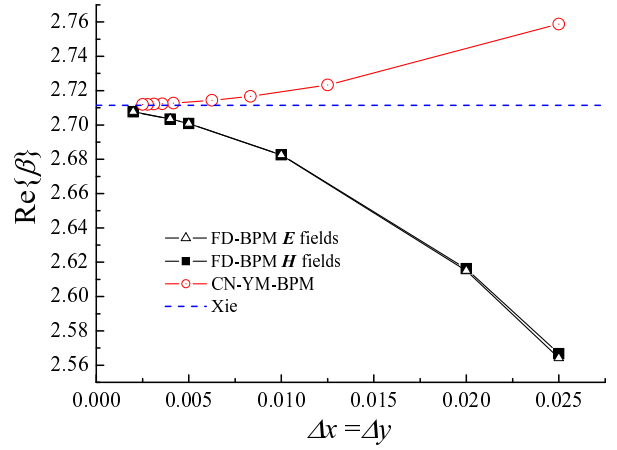
$$H_z = \frac{j}{k_0} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{u}_z$ は z 方向単位ベクトル、添字の t は横方向成分を意味している。陰的 YM-BPM では E_z, H_z は伝搬式中に存在しないため、式 (7),(8) より算出する。

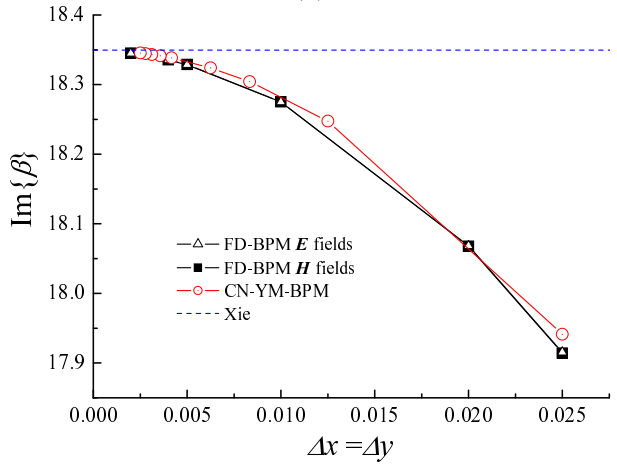
次に、算出される複素モードの刻みに対する伝搬定数の収束を調べる。図 3(a) に算出される伝搬定数の実部を、図 3(b) に伝搬定数の虚部をそれぞれ示す。比較のため、波動方程式に基づく差分 BPM(FD-BPM) によって得られる電界、磁界それぞれの伝搬定数を併記している。図より、刻み幅が小さくなるにつれて、Xie ら [1] の算出した伝搬定数に収束することが分かる。解析手法に依らず複素モードの伝搬定数が収束しており、複素モードが導波路に固有のモードであることが分かる。

3. まとめ

誘電体導波路の複素モードを抽出した。まず、陰的 YM-BPM をクランクニコルソン法を用いて離散化し、増幅係数を導出した。複素モードの刻みに対する伝搬定数の収束を評価し、誘電体導波路に存在する複素モードが導波路に固有のモードであることを示した。



(a)



(b)

図 3 複素モード伝搬定数 (a) 実部 (b) 虚部

参考文献

- 1) H. Xie, W. Lu, and Y. Y. Lu, "Complex mode and instability of full-vectorial beam propagation methods," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 13, pp. 2474-2476, Jul. 2011.
- 2) 仁藤 雄大, 朝生 龍也, 山内 潤治, 中野 久松, "光導波路の複素モードとビーム伝搬法の計算不安定性," 2012 年電子情報通信学会総合大会, C-3-20.
- 3) 朝生 龍也, 山内 潤治, 中野 久松, "複素モードの発生に伴うビーム伝搬法の計算不安定性について," 2012 年光エレクトロニクス研究会
- 4) S. Jüngling and J. C. Chen, "A study and optimization of eigenmode calculations using the imaginary-distance beam-propagation method," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 9, pp. 2098-2105, Sep. 1994.
- 5) 仁藤 雄大, 朝生 龍也, 山内 潤治, 中野 久松, "誘電体導波路における複素モードの虚軸 BPM 解析," 2013 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-1-14.
- 6) J. Yamauchi, T. Mugita, and H. Nakan, "Implicit Yee-mesh-Based finite-difference full-vectorial beam-propagation method," *J. Lightw. Technol.*, vol. 23, no. 5, pp. 1947-1955, May 2005.
- 7) R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, McGRAW-HILL, p. 347, 1961.