

法政大学学術機関リポジトリ  
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-12-13

フルベクトル型改良差分式を導入したビーム  
伝搬法による光導波路解析

荒井, 貴宏 / ARAI, Takahiro

---

(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

(巻 / Volume)

56

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

2

(発行年 / Year)

2015-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00011075>

# フルベクトル型改良差分式を導入した ビーム伝搬法による光導波路解析

ANALYSIS OF AN OPTICAL WAVEGUIDE USING THE BEAM-PROPAGATION METHOD  
WITH A FULL-VECTORIAL IMPROVED FINITE-DIFFERENCE FORMULA

荒井 貴宏

Takahiro ARAI

指導教員 山内 潤治

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

A new full-vectorial improved finite-difference formula is proposed to analyze tilted interfaces between two different dielectric media. To demonstrate the validity of the present scheme, a rib waveguide with a sloped sidewall is analyzed by the full-vectorial beam-propagation method. It is found that the present scheme achieves higher accuracy than the previous scheme.

**Key Words :** full-vectorial improved finite-difference formula, tilted interfaces, eigenmode analysis, propagation analysis

## 1. まえがき

偏光依存デバイスを効率よく解析する手法に、フルベクトル差分ビーム伝搬法(FV-BPM)がある。高橋ら[1]は、屈折率の不連続性を考慮したセミベクトル(SV)型改良差分式を(IFD)を応用し、電界型のFV-BPMを提案した。また、Xiaoら[2]は磁界を用いて、偏波結合項である混合微分に屈折率の平均を用いる手法を提案した。両者の精度は同程度である。さらに、Thomasら[3]はFV型の境界条件(BC)を考慮して、屈折率の平均を用いることなく、新たなFV型IFDを提案した。文献[4]では、文献[3]の手法と従来のFV-BPM[2]との比較が行われ、同等の精度を有することが示されている。

他方、傾斜屈折率境界を有する構造を解析するための有限差分式が検討されている。文献[5]では、傾斜屈折率境界を考慮したSV型2次精度改良差分式(IFD2)が提案されているが、FV型への応用は未検討である。

本稿の目的は、傾斜屈折率境界を考慮したFV型改良差分式を提案することである[6]。まず始めに、階段近似に基づくFV型IFD[3]を、傾斜屈折率境界を考慮した差分式に拡張する。次に、本手法の有効性を実証するために、台形リブ導波路を例にとり、適用した手法と従来のFV解析手法との精度を比較する。

## 2. 定式化

磁界の  $H_y$  成分(以降の式では  $H^y$  と標記)について差分式を導出する。 $x$  方向の2階微分に対してFV型IFD[3]を適用すると次式を得る。

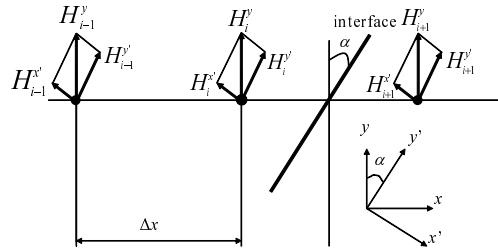


図1 傾斜屈折率境界付近の磁界ベクトル

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_{i,j}^y}{\partial x^2} = & PH_{i-1,j}^y + QH_{i,j}^y + RH_{i+1,j}^y \\ & + U(H_{i-1,j+1}^x - H_{i-1,j-1}^x) \\ & + V(H_{i,j+1}^x - H_{i,j-1}^x) + O(h) \end{aligned} \quad (1)$$

界の係数表記は文献[3]と同一である。ここで、式(1)は屈折率境界が標本点間に垂直に存在する前提で導出されている点に注意を払う必要がある。そこで、傾斜屈折率境界を考慮したFV型IFDを導出する。図1に傾斜屈折率境界付近の磁界ベクトルを示す。傾斜屈折率境界に対し法線方向の軸を  $H^x'$ 、接線方向の軸を  $H^y'$  と定義すると、 $H^y$  は  $H^x'$  と  $H^y'$  に分解される。その結果、 $H^y = H^x' \sin\alpha + H^y' \cos\alpha$  と表現できるため、傾斜境界部において  $H^y$  の2階微分は、

$$\frac{\partial^2 H_{i,j}^y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 H_{i,j}^x}{\partial x^2} \sin\alpha + \frac{\partial^2 H_{i,j}^y}{\partial x^2} \cos\alpha \quad (2)$$

と書き換えられる。式(2)に式(1)を代入すると、次式を得る。

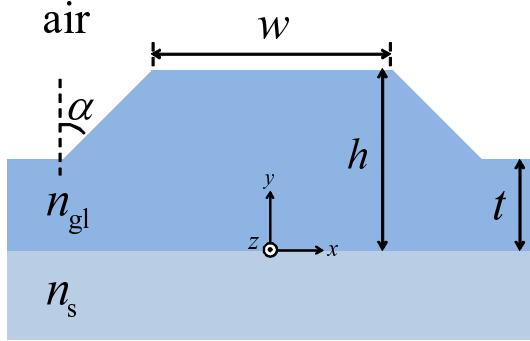


図 2 台形リブ導波路の構造

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 H_{i,j}^y}{\partial x^2} = & (P\cos^2\alpha + P\sin^2\alpha)H_{i-1,j}^y \\
 & + (Q\cos^2\alpha + Q\sin^2\alpha)H_{i,j}^y \\
 & + (R\cos^2\alpha + R\sin^2\alpha)H_{i+1,j}^y \\
 & + (U\cos^2\alpha + U\sin^2\alpha)H_{i-1,j+1}^x \\
 & + (U\cos^2\alpha + U\sin^2\alpha)H_{i-1,j-1}^x \\
 & + (V\cos^2\alpha + V\sin^2\alpha)H_{i,j+1}^x \\
 & + (V\cos^2\alpha + V\sin^2\alpha)H_{i,j-1}^x
 \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)には偏波結合の効果が考慮されており、傾斜境界を有する構造においてもFV解析が可能となる。尚、式(3)は文献[3]と同様に屈折率境界に対して平行な界成分を扱う際に適用され、垂直な界成分を扱う際にはSV型が適用される。

### 3. 解析結果

本手法の有効性を確認するために、図2の導波路を解析する。導波層と基板の屈折率はそれぞれ  $n_{\text{gl}} = 3.44$ ,  $n_s = 3.40$ 、使用波長を  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$  に設定する。また、リブの幅を  $w = 3.0 \mu\text{m}$ 、中心のリブの高さを  $h = 1.0 \mu\text{m}$ 、両脇のリブの高さを  $t = 0.5 \mu\text{m}$  とする。刻み幅を  $\Delta x = \Delta y \tan\alpha$  とする。本解析では傾斜角度を  $\alpha = 45^\circ$  に設定するので、 $\Delta x = \Delta y (= \Delta)$  となる。伝搬方向の刻み幅を  $\Delta z = 0.1 \mu\text{m}$  にする。以下の議論では、準TEモードの結果を示す。

まず、虚軸法を導入したFV-BPMを用いて固有モード解析を行う。図3に、 $\Delta$ に対する正規化伝搬定数  $B$  の収束の様子を示す。 $\Delta = 0.0 \mu\text{m}$  で示されている値は、 $\Delta = 0.01 \mu\text{m}$  と  $\Delta = 0.02 \mu\text{m}$  での値より算出した外挿値である。比較のため、偏波結合項の評価に屈折率の平均を使用したFV-BPM[2]、階段近似に基づくFV型IFD[3]、YM-BPM[7]の結果も併記する。図より、本手法は従来手法とほぼ同等の精度を有し、YM-BPMに比べて収束の速いことが見出せる。

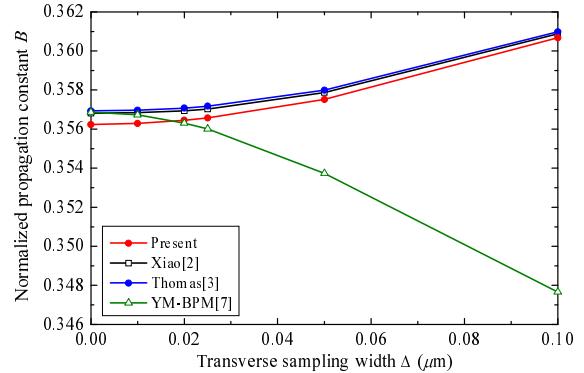


図 3  $\Delta$  に対する正規化伝搬定数

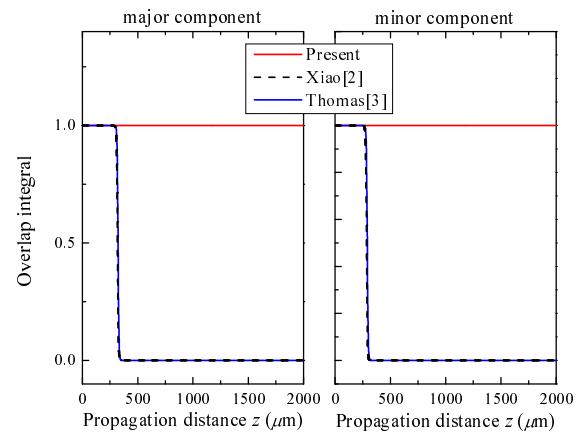


図 4 重なり積分

次に、 $\Delta = 0.02 \mu\text{m}$  とし、伝搬ビーム解析を行う。図4に、重なり積分を示す。図より、従来手法では  $z = 250 \mu\text{m}$  付近で計算の破綻する様子が観察される。他方、本手法を適用することで、 $z = 2000 \mu\text{m}$  以上でも安定した解析が行える。

尚、本稿では議論しなかったが、準TMモードにおいても本手法の有効性を確認した。

### 4. まとめ

傾斜屈折率境界を考慮した差分式を導出した。まず、台形リブ導波路を固有モード解析し、従来手法とほぼ同等の精度を有することを明示した。次に、台形リブ導波路を伝搬ビーム解析し、本手法を用いることで計算の安定性が改善されることを明示した。

### 参考文献

- 1) J. Yamauchi *et al.*, *JLT*, 16(12), pp. 2458-2464, 1998.
- 2) J. Xiao *et al.*, *Opt. Commun.*, 266, pp. 505-511, 2006.
- 3) N. Thomas *et al.*, *IEEE PTL*, 21(20), pp. 1505-1507, 2009.
- 4) 仁藤, 荒井, 山内, 中野, 信学ソ大, C-15-3, 2013.
- 5) J. Yamauchi *et al.*, *IEEE PTL*, 21(24), pp. 1867-1869, 2009.
- 6) 仁藤, 荒井, 山内, 中野, 信学総大, C-1-5, 2014.
- 7) J. Yamauchi *et al.*, *JLT*, 23(5), pp. 1947-1955, 2005.