



有限差分ビーム伝搬法を用いた強導波路デバイスの 感度解析に基づくトポロジー最適設計

メタデータ	言語: jpn 出版者: 電子情報通信学会 公開日: 2017-09-26 キーワード (Ja): トポロジー最適化, ビーム伝搬法, 随伴変数法, 密度法, 光導波路デバイス キーワード (En): Topology optimization, Beam propagation method, Adjoint variable method, Density method, Optical waveguide devices 作成者: 井口, 亜希人, 辻, 寧英, 安井, 崇, 平山, 浩一 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009453

有限差分ビーム伝搬法を用いた強導波路デバイスの 感度解析に基づくトポロジー最適設計

井口亜希人[†] 辻 寧英[†] 安井 崇^{††} 平山 浩一^{††}

[†] 室蘭工業大学情報電子工学系専攻
〒 050-8585 北海道室蘭市水元町 27 番地 1 号
^{††} 北見工業大学電気電子工学科
〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地

E-mail: [†]{15043003,y-tsuji}@mmm.muroran-it.ac.jp, ^{††}{yasui,hirakc}@mail.kitami-it.ac.jp

あらまし 本論文では、伝搬解析手法にセミベクトル有限差分ビーム伝搬法 (Semi-Vectorial Finite Difference Beam Propagation Method; SVFD-BPM) を用いた 3 次元強導波路デバイスのトポロジー最適設計手法について検討を行っている。筆者らはこれまでに、伝搬解析手法に BPM を用いたトポロジー最適設計について検討を行ってきたが、本手法をコアとクラッドの屈折率差が比較的大きい強導波路デバイスの設計に適用する検討は行っていなかった。本論文では、屈折率の伝搬方向に対する微分項を考慮するパワー保存型 SVFD-BPM を適用した強導波路デバイスのトポロジー最適設計について検討を行っている。また本研究では、構造表現方法に密度法、感度解析に随伴変数法を用いてトポロジー最適設計を行っている。

キーワード トポロジー最適化, ビーム伝搬法, 随伴変数法, 密度法, 光導波路デバイス

A gradient based topology optimal design of optical waveguide devices with high refractive index contrast using FD-BPM

Akito IGUCHI[†], Yasuhide TSUJI[†], Takashi YASUI^{††}, and Koichi HIRAYAMA^{††}

[†] Muroran Institute of Technology
Mizumoto-cho 27-1, Muroran, Hokkaido, 050-8585 Japan
^{††} Kitami Institute of Technology
Koen-cho 165, Kitami, Hokkaido, 090-8507 Japan

E-mail: [†]{15043003,y-tsuji}@mmm.muroran-it.ac.jp, ^{††}{yasui,hirakc}@mail.kitami-it.ac.jp

Abstract In this paper, we study on a design of an optical waveguide device with high refractive index contrast based on a gradient-based topology optimization using a semi-vectorial finite-difference beam propagation method (SVFD-BPM). We have reported a topology optimal design of an optical waveguide device using the BPM. However, our approach has not been employed to an optical waveguide device with high refractive index contrast. In this paper, we study on the topology optimal design of strongly guiding waveguide devices using a power-conserving SVFD-BPM which retain an effect of longitudinal field component. In addition, the density method is selected to represent refractive index distribution and the adjoint variable method is employed for the sensitivity analysis.

Key words Topology optimization, Beam propagation method, Adjoint variable method, Density method, Optical waveguide devices

1. はじめに

トポロジー最適設計は非常に自由度の高い設計手法であり、理論的なアプローチでは得られ難い、斬新かつ高性能な光導波

路デバイスが得られる可能性を有している。すでに光導波路デバイスの設計にトポロジー最適設計を適用した例はいくつか報告されており [1]- [8], その有効性が示されてきた。

ビーム伝搬法 (Beam Propagation Method; BPM) [9] - [16]

は光導波路の解析に広く用いられている解析手法であり、BPMを用いた感度解析に基づく寸法最適設計 [17], [18] が報告されている。筆者らはこれまでに、解析手法に BPM を用いたトポロジー最適設計について検討を行い、有限要素法などでは計算時間やメモリの制約上解析が困難な素子長を持つデバイスが設計可能であることを報告した [19], [20]。しかし、それらの報告ではコアとクラッドの屈折率差が比較的小さい弱導波路デバイスを設計例として示しており、強導波路デバイスへの適用については検討を行っていなかった。本論文では、解析手法にセミベクトル有限差分 BPM (Semi-Vectorial Finite-Difference BPM; SVFD-BPM)、構造表現手法に密度法、感度解析手法に随伴変数法 (Adjoint Variable Method; AVM) を用いた 3 次元強導波路デバイスのトポロジー最適設計について検討を行っている。

BPM を用いた強導波路デバイスの解析では、光の伝搬に伴ってスプリアスなパワーの増幅・減衰が生じ、パワーが保存されない問題がしばしば生じる [21]-[23]。そのため本論文では、文献 [23] で提案されている、屈折率の伝搬方向に対する微分項を考慮するパワー保存型セミベクトル BPM を適用してトポロジー最適設計を行う。また、最適化の過程で何度もデバイスの伝搬解析および感度解析を行う必要があるため、本論文では交互方向陰的差分法 (Alternating Direction Implicit Method; ADIM) を適用している。

本稿では最初に ADIM に基づくパワー保存型 BPM の定式化を示し、次に密度法による構造表現方法について述べる。続いて ADIM に基づく BPM と密度法を用いた場合の感度解析方法を示し、本感度解析手法の強導波路デバイスへの適用について検討を行う。最後に本手法の強導波路デバイスへの適用例として、パワー 2 分岐素子、偏波分離素子の設計例を示し、本手法の有効性を示す。

2. SVFD-BPM に基づくトポロジー最適設計

2.1 パワー保存型セミベクトル ADI-BPM

図 1 に示すような 3 次元光導波路デバイスの最適設計を考える。また、導波路の材料は等方性で線形無損失であるとする。周波数領域での Maxwell 方程式より、未知変数を境界として伝搬解析を行う場合、解くべきセミベクトル波動方程式は以下のように与えられる。

x -polarized wave :

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} - \frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial x} \frac{\partial H_y}{\partial x} + k_0^2 n^2 H_y + \frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial z} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

y -polarized wave :

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} - \frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial y} \frac{\partial H_x}{\partial y} + k_0^2 n^2 H_x - \frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial z} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) = 0 \quad (2)$$

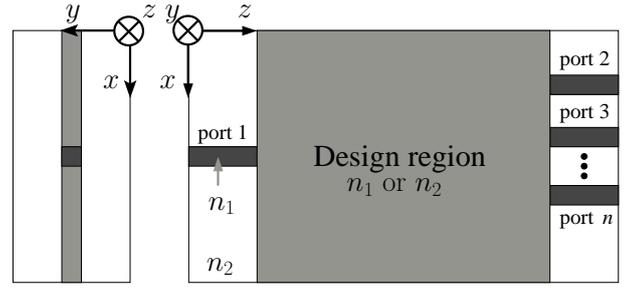


図 1 設計する 3 次元光導波路モデル

ここで、 n は屈折率分布、 k_0 は自由空間波数である。参照屈折率を n_0 として、 $+z$ 方向に伝搬する光波 H を伝搬定数 $k_0 n_0$ で激しく振動する因子と緩やかに振動する因子にわけて次のように表す。

$$H(x, y, z) = \phi(x, y, z) \exp(-jk_0 n_0 z) \quad (3)$$

式 (3) の仮定およびガウスの法則から、微小な項を無視すると次のパワー保存型 BPM の基本方程式を得る。

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + j2k_0 n_0 \frac{\partial \phi}{\partial z} = (D_{xx} + D_{yy} + \nu + jk_0 n_0 \partial n_z) \phi \quad (4)$$

ここで、未知変数によって D_{xx} と D_{yy} は、

x -polarized wave ($\phi = \phi_y$) :

$$D_{xx} = n^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} \right)$$

$$D_{yy} = \left(1 + \frac{1}{jk_0 n_0 n^2} \frac{\partial n^2}{\partial z} \right) \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

y -polarized wave ($\phi = \phi_x$) :

$$D_{xx} = \left(1 + \frac{1}{jk_0 n_0 n^2} \frac{\partial n^2}{\partial z} \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

$$D_{yy} = n^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} \right)$$

であり、 ν 、 ∂n_z は

$$\nu = k_0^2 (n^2 - n_0^2)$$

$$\partial n_z = \frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial z}$$

である。本論文では、式 (4) の左辺第 1 項 ($\partial^2 \phi / \partial z^2$) を無視する近軸式を採用する。伝搬方向を Crank-Nicolson 法によって離散化し、さらに ADIM を適用すると、BPM 逐次更新式は次のように得られる。

1st step

$$\phi^{k+\frac{1}{2}} = \Gamma_2^{(k)-1} \Gamma_1^{(k)} \phi^k \quad (5)$$

2nd step

$$\phi^{k+1} = \Gamma_4^{(k)-1} \Gamma_3^{(k)} \phi^{k+\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ここで、上添字 k は伝搬方向 (z 方向) の離散点番号を表す。ADIM における分割演算子 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ は次のようになる。

$$\Gamma_1 = \frac{jk_0 n_0}{\Delta z} + \left(D_{yy} + \frac{\nu}{2} + \frac{jk_0 n_0}{2} \partial n_z \right)$$

$$\Gamma_2 = \frac{jk_0 n_0}{\Delta z} - \left(D_{xx} + \frac{\nu}{2} + \frac{jk_0 n_0}{2} \partial n_z \right)$$

$$\Gamma_3 = \frac{jk_0 n_0}{\Delta z} + \left(D_{xx} + \frac{\nu}{2} + \frac{jk_0 n_0}{2} \partial n_z \right)$$

$$\Gamma_4 = \frac{jk_0 n_0}{\Delta z} - \left(D_{yy} + \frac{\nu}{2} + \frac{jk_0 n_0}{2} \partial n_z \right)$$

本論文では、横方向の差分は Stern による方法 [24] を用い、屈折率の微分項 ∂n_z は屈折率の平均を用いる方法 [22] によって差分化する。また、解析領域端には Hadley が考案した透明境界条件 (TBC) [11] を用いて解析を行う。

2.2 設計領域の構造表現手法

密度法を用いて設計領域の構造表現を行うと、グレイ領域の発生が問題になる。そのため本論文では、改良した Heaviside 関数 $H(\rho)$ を用いて、設計領域の屈折率分布を次のように表現する。

$$n^2(x, z) = n_2^2 + (n_1^2 - n_2^2) H(\rho) \quad (7)$$

$$H(\rho) = \begin{cases} 0.5(2\rho)^p & (0 \leq \rho \leq 0.5) \\ 1 - 0.5(2 - 2\rho)^p & (0.5 \leq \rho \leq 1) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 ρ は正規化密度パラメータであり、離散点ごとに割り当てられると仮定する。 p はペナルティ係数であり、 p を無限大にすることで 2 値化した屈折率分布を表現できる。しかし、最適化の初めから p を大きくして設計すると、最適化の過程で特性の改善が進まない。そのため本研究では、最適化の初期段階では p を小さな値に設定して最適化を行い、最適化の反復に伴って p を大きくし、最終的に p を十分大きな値にすることで構造の 2 値化を図っている。

2.3 AVM に基づく感度解析

最適化の目的関数が正規化透過パワーで表現される場合、S パラメータの感度計算が必要になる。セミベクトル解析の場合、S パラメータは出力ポートまで伝搬したフィールド $\phi^{k=Nz}$ と出力ポート (port n) の固有モードフィールド ψ_n を用いて次のように表せる。

$$S_{n1} = \iint \phi^{Nz} \psi_n^* dx dy \quad (9)$$

ここで、* は複素共役をとることを意味している。ただし、入射フィールド ϕ^0 と ψ_n のパワーはそれぞれ 1 に正規化されていると仮定している。設計領域内においてコアの高さが一樣で、構造の変位が x 方向にのみ現れるデバイスの設計を行う場合、

ADI-BPM 逐次更新式 (5), (6) より、正規化密度パラメータ ρ に対する S_{n1} の感度は以下の式で計算できる。

$$\frac{\partial S_{n1}}{\partial \rho_i^k} = \iint \left(-\lambda_n^{k+\frac{1}{2}} \frac{\partial \Gamma_4^{(k)}}{\partial \rho_i^k} \phi^{k+1} + \lambda_n^{k+\frac{1}{2}} \frac{\partial \Gamma_3^{(k)}}{\partial \rho_i^k} \phi^{k+\frac{1}{2}} - \lambda_n^k \frac{\partial \Gamma_2^{(k)}}{\partial \rho_i^k} \phi^{k+\frac{1}{2}} + \lambda_n^k \frac{\partial \Gamma_1^{(k)}}{\partial \rho_i^k} \phi^k \right) dx dy \quad (10)$$

ここで、正規化密度パラメータ ρ_i^k の下添字 i は基板に平行な方向 (x 方向) の離散点番号である。 $\lambda_n^{k+\frac{1}{2}}, \lambda_n^k$ は随伴変数フィールドであり、次のように定義している。

$$\lambda_n^{k+\frac{1}{2}} = \psi_n^* \Gamma_4^{(Nz-1)-1} \Gamma_3^{(Nz-1)} \Gamma_2^{(Nz-1)-1} \Gamma_1^{(Nz-1)} \Gamma_4^{(Nz-2)-1} \dots \Gamma_1^{(k+1)} \Gamma_4^{(k)-1} \quad (11)$$

$$\lambda_n^k = \lambda_n^{k+\frac{1}{2}} \Gamma_3^{(k)} \Gamma_2^{(k)-1} \quad (12)$$

すなわち、順方向伝搬解析に加えて、 ψ_n^* を出力ポートより $-z$ 方向に逆伝搬させることによって、式 (10) により全ての設計パラメータの感度が計算できる。ところで、3. 節の設計例において、感度解析のための逆伝搬解析では、次の 2 ステップにより逐次伝搬解析を行っている。

1st step

$$\lambda_n^{k+\frac{1}{2}} = \Gamma_4^{(k)-1} \Gamma_1^{(k+1)} \lambda_n^{k+1} \quad (13)$$

2nd step

$$\lambda_n^k = \Gamma_2^{(k)-1} \Gamma_3^{(k)} \lambda_n^{k+\frac{1}{2}} \quad (14)$$

ただし、 $\Gamma_1^{(Nz)} = 1, \lambda_n^{Nz} = \psi_n^*$ とする。式 (13), (14) に示すように、順方向伝搬とは異なり、逆方向伝搬では 1 つのステップの更新式において D_{xx} と D_{yy} が混在する式になっていない。そのため、とりわけ強導波路デバイスにおいては、逆方向伝搬波形は順方向伝搬波形に比べて数値ノイズが多くなり、数値的に安定した逆伝搬解析ができない場合がある。安定した逆伝搬解析を行うため、本論文では ADIM における分割演算子を入れ替えて、以下の近似に基づき感度解析を行う。

$$\Gamma_4^{(k)-1} \Gamma_1^{(k+1)} \lambda_n^{k+1} \approx \Gamma_2^{(k)-1} \Gamma_1^{(k+1)} \lambda_n^{k+1}$$

$$\Gamma_2^{(k)-1} \Gamma_3^{(k)} \lambda_n^{k+\frac{1}{2}} \approx \Gamma_4^{(k)-1} \Gamma_3^{(k)} \lambda_n^{k+\frac{1}{2}}$$

3. 強導波路デバイスのトポロジー最適設計例

本節では、パワー保存型 SVFD-BPM と AVM を用いて、コアとクラッドの屈折率差がおよそ 28% の 3 次元強導波路デバイスのトポロジー最適設計を行う。設計例として、パワー 2 分岐導波路と偏波分離素子の設計例を示す。以降の設計例では、BPM 解析において、参照屈折率 n_0 は入射モードの実効屈折率を用い、離散点幅は $\Delta x = \Delta y = 0.01 \mu\text{m}, \Delta z = 0.04 \mu\text{m}$ としている。また、設計パラメータの更新には最大勾配法を用

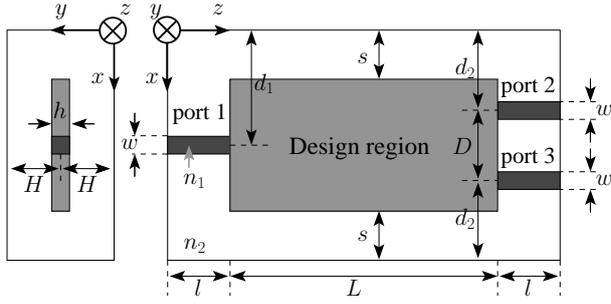


図 2 1 入力 2 出力の 3 次元光導波路素子の設計モデル

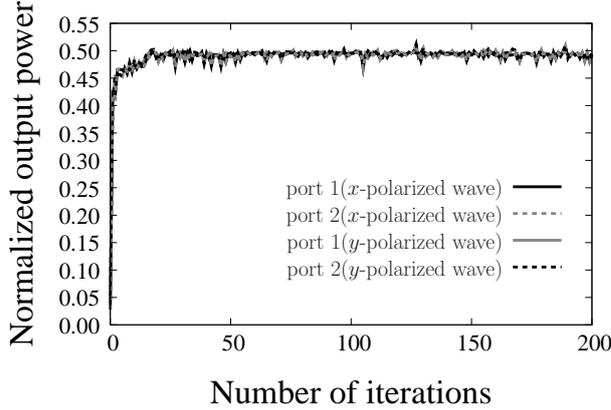


図 3 パワー 2 分岐素子の最適化の反復回数に対する透過パワー特性

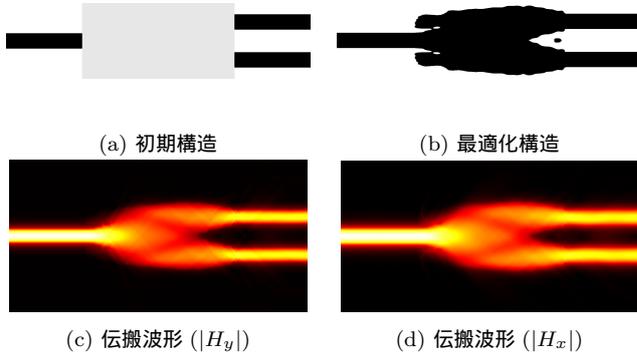


図 4 パワー 2 分岐素子の最適化構造と伝搬波形

いている。

トポロジー最適設計において、最適化の過程で微細な構造がしばしば出現する。微細な構造の出現はパワー保存特性を満たすように BPM 解析を行うことが困難となるだけでなく、実際の作製を困難にさせるため、その出現を避けるのが望ましい。そのため本論文では、感度空間を平滑化する感度平滑化フィルタ、および正規化密度パラメータ空間を平滑化する構造平滑化フィルタを最適化の反復毎に適用して設計を行う。

3.1 3次元パワー 2 分岐素子

パワー 2 分岐素子の設計モデルを図 2 に示す。コア、クラッドの屈折率をそれぞれ $n_1 = 2.2$, $n_2 = 1.445$ とする。入出力ポートのコア幅とコア高さを、 x 偏波、 y 偏波の両偏波に対して基本モードのみが伝搬するように、 $w = 0.8 \mu\text{m}$, $h = 0.4 \mu\text{m}$ とする。デバイス長を $L = 10 \mu\text{m}$ 、その他構造パラメータを

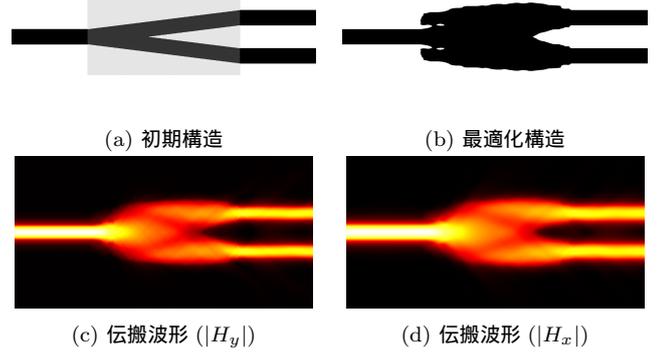


図 5 初期構造に直線 Y 分岐導波路を与えた場合のパワー 2 分岐素子の最適化構造と伝搬波形

それぞれ $d_1 = 4 \mu\text{m}$, $d_2 = 3 \mu\text{m}$, $D = 2 \mu\text{m}$, $l = 5 \mu\text{m}$, $H = 2 \mu\text{m}$, $s = 2 \mu\text{m}$ とする。動作波長を $1.55 \mu\text{m}$ とする。最適化の目的関数は、入力した光波のパワーが 2 分岐され、さらに偏波依存性が低減するように、

$$\text{Minimize } C = W_1 C_1 + W_2 C_2$$

$$C_1 = \sum_{m=2}^3 \left| \frac{1}{2} - |S_{m1(x\text{-polarized wave})}|^2 \right|^2$$

$$C_2 = \sum_{m=2}^3 \left| \frac{1}{2} - |S_{m1(y\text{-polarized wave})}|^2 \right|^2$$

と設定する。ここで、 W_1 , W_2 は重みであり、

$$W_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad W_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

とする。また、パワーが等しく 2 分されるように、 x 方向に対称条件を課して設計を行う。

設計領域の初期構造を一樣媒質にした場合の最適化の反復回数に対する透過パワー特性のグラフを図 3 に示す。図 3 より、平滑化フィルタの影響で反復回数に対する特性の変化に振動が見られるものの、反復回数に応じて特性が改善するように最適化が進んでいることがわかる。最適化構造およびその伝搬波形を図 4 に示す。図 4(b) の最適化構造において、 x 偏波を入射した場合、正規化出力パワーは port 2, port 3 とともに 0.493, y 偏波を入射した場合も同様に 0.493 であり、偏波依存性の無いパワー 2 分岐素子が実現されている。

次に、初期構造の違いによる最適化構造の影響を調べるため、初期構造を直線 Y 分岐導波路として設計を行った。初期構造では、 x 偏波を入射した場合、正規化出力パワーは 1 つの出力ポートあたり 0.444, y 偏波を入射した場合は 0.499 であり、出力パワーに偏波依存性がある。最適化構造およびその伝搬波形を図 5 に示す。図より、初期構造を一樣媒質とした場合の最適化構造と類似した構造が得られていることがわかる。図 5(b) の最適化構造において、 x 偏波を入射した場合、正規化出力パワーは 0.496, y 偏波を入射した場合は 0.497 であり、初期構造と比較して出力パワーの偏波依存性が低減されている。

3.2 3次元偏波分離素子

図 2 の設計モデルを用いて偏波分離素子の設計を行う。デバイス長を $L = 40 \mu\text{m}$ とし、屈折率およびその他の構造パラ

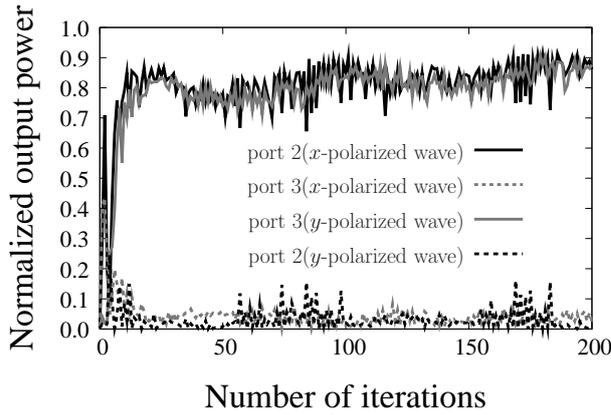


図 6 偏波分離素子の最適化の反復回数に対する透過パワー特性

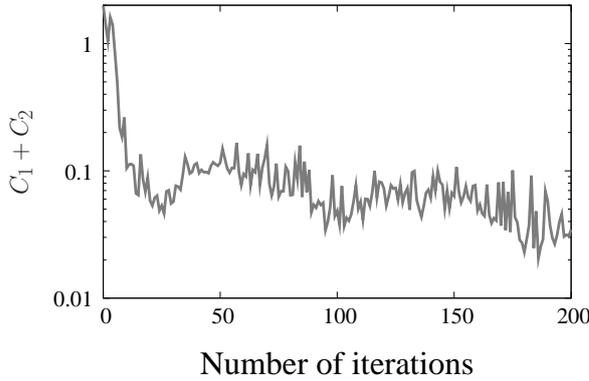


図 7 偏波分離素子の設計における最適化の反復回数に対する目的関数 ($C_1 + C_2$)

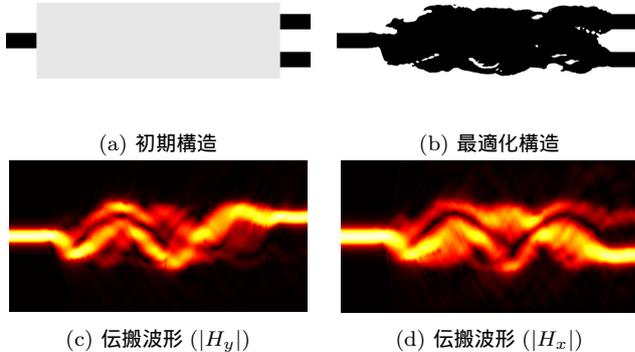


図 8 偏波分離素子の最適化構造と伝搬波形

メータは 3.1 節で行った設計と同じパラメータを選ぶ．動作波長を $1.55 \mu\text{m}$ とし，目的関数は x 偏波の光波は port 2 に， y 偏波の光波は port 3 にそれぞれ分離されるように次のように設定する．

$$\begin{aligned} \text{Minimize } C &= W_1 C_1 + W_2 C_2 \\ C_1 &= \left| 1 - |S_{21(x\text{-polarized wave})}|^2 \right|^2 \\ C_2 &= \left| 1 - |S_{31(y\text{-polarized wave})}|^2 \right|^2 \end{aligned}$$

設計領域の初期構造を一様媒質にした場合の最適化の反復回数に対する透過パワー特性のグラフを図 6 に示す．図より，パワー分岐デバイスの設計例の場合と比較して特性がセンシティブ

であるためか，目的のパワー透過出力は最適化の反復にともなって 10% 程度の変動がある．しかし，図 7 に示すように，目的関数 ($C_1 + C_2$) は多少の変動を伴いつつ反復回数を重ねるにつれて最小化されていることがわかる．最適化構造およびその伝搬波形を図 8 に示す．図 8 (b) の最適化構造において， x 偏波を入射した場合，port 2 への正規化出力パワーは 0.890， y 偏波を入射した場合の port 3 への出力パワーは 0.828 であった．port 3，port 2 におけるクロストークはそれぞれ -29.5 dB ， -11.3 dB であった．構造の更なる単純化および出力パワーとクロストークの改善は今後の課題である．

4. まとめ

パワー保存型 SVFD-BPM と AVM を用いた強導波路デバイス のトポロジー最適設計についていくつかの検討を行い，設計例としてコアとクラッドの比屈折率差がおよそ 28% のパワー 2 分岐素子と偏波分離素子の設計を行った．偏波分離素子の設計に関しては出力パワーとクロストークに改善の余地があるものの，2 つの設計例において最適化の反復にともなって特性が改善するように最適化が進んだため，本手法の有効性を確認できた．本手法のフルベクトル BPM への拡張は今後の課題とする．

文 献

- [1] J. S. Jensen and O. Sigmund, "Systematic design of photonic crystal structures using topology optimization: Low-loss waveguide bends," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, No. 12, pp. 2022-2024, Mar. 2004.
- [2] P. I. Borel, A. Harpth, L. H. Frandsen, M. Kristensen, P. Shi, J. S. Jensen, and O. Sigmund, "Topology optimization and fabrication of photonic crystal structures," *Opt. Express*, Vol. 12, No. 9, pp. 1996-2001, May 2004.
- [3] P. I. Borel, L. H. Frandsen, A. Harpth, M. Kristensen, J. S. Jensen, and O. Sigmund, "Topology optimized broadband photonic crystal Y-splitter," *Electron. Lett.*, Vol. 41, No. 2, pp. 69-71, Jan. 2005.
- [4] J. S. Jensen, O. Sigmund, L. H. Frandsen, P. I. Borel, A. Harpth, and M. Kristensen, "Topology design and fabrication of an efficient double 90° photonic crystal waveguide bend," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 17, No. 6, pp. 1202-1204, June 2005.
- [5] R. Matzen, J. S. Jensen, and O. Sigmund, "Systematic design of slow-light photonic waveguides," *J. Opt. Soc. Amer. B*, Vol. 28, No. 10, pp. 2374-2382, Oct. 2011.
- [6] L. H. Frandsen, Y. Elesin, L. F. Frellsen, M. Mitrovic, Y. Ding, O. Sigmund, and K. Yvind, "Topology optimized mode conversion in a photonic crystal waveguide fabricated in silicon-on-insulator material," *Opt. Express*, Vol. 22, No. 7, pp. 8525-8532, Apr. 2014.
- [7] Y. Tsuji and K. Hirayama, "Design of optical circuit devices using topology optimization method with function-expansion-based refractive index distribution," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 20, No. 12, pp. 982-984, June 2008.
- [8] Z. Zhang, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, "Design of ultra-compact triplexer with function-expansion based topology optimization," *Opt. Express*, Vol. 23, No. 4, pp. 3937-3950, Feb. 2015.
- [9] M. D. Feit and J. A. Fleck, "Light propagation in graded-index optical fibers," *Appl. Opt.*, Vol. 17, No. 24, pp. 3990-3998, Dec. 1978.
- [10] Y. Chung and N. Dagli, "An assessment of finite difference beam propagation method," *IEEE J. Quantum. Electron.*, Vol. 26, No. 8, pp. 1335-1339, Aug. 1990.

- [11] G. R. Hadley, "Transparent boundary condition for beam propagation," *Opt. Lett.*, Vol.16, No. 9, pp. 624-626, May. 1991.
- [12] J. Yamauchi, T. Ando, H. Nakano, "Beam-propagation analysis of optical fibers by alternating direction implicit method," *Electron. Lett.*, Vol. 27, No. 18, pp. 1663-1665, Aug. 1991.
- [13] P. L. Liu and B. J. Li, "Study of form birefringence in waveguide devices using the semivectorial beam propagation method," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 3, No. 10, pp. 913-915, Oct. 1991.
- [14] P. L. Liu and B. J. Li, "Semivectorial beam-propagation method for analyzing polarized modes of rib waveguides," *IEEE J. Quantum. Electron.*, Vol. 28, No. 4, pp. 778-782, Apr. 1992.
- [15] Y. Tsuji and M. Koshiba, "A finite element beam propagation method for strongly guiding and longitudinally varying optical waveguides," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 14, No. 2, pp. 217-222, Feb. 1996.
- [16] Y. Tsuji, M. Koshiba, and T. Shiraishi, "Finite element beam propagation method for three-dimensional optical waveguide structures," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 15, No. 9, pp. 1728-1734, Sept. 1997.
- [17] M. A. Swillam, M. H. Bakr, and X. Li, "Efficient adjoint sensitivity analysis exploiting the FD-BPM," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 25, No. 7, pp. 1861-1869, July 2007.
- [18] M. A. Swillam, M. H. Bakr, and X. Li, "Full vectorial 3-D sensitivity analysis and design optimization using BPM," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 26, No. 5, pp. 528-536, Mar. 2008.
- [19] 辻 寧英, 井口 亜希人, 安井 崇, 平山 浩一, "ビーム伝搬解析を用いた光導波路デバイスのトポロジー最適設計," 信学技報, Vol. 115, No. 213, EST2015-64, pp. 57-61, Sept. 2015.
- [20] 井口 亜希人, 辻 寧英, 安井 崇, 平山 浩一, "FD-BPMと随伴変数法に基づく感度解析を用いた3次元光導波路デバイスのトポロジー最適設計," 信学技報, Vol. 115, No. 434, EST2015-113, pp. 141-146, Jan. 2016.
- [21] C. Vassallo, "Difficulty with vectorial BPM," *Electron. Lett.*, Vol. 33, No. 1, pp. 61-62, Jan. 1997.
- [22] J. Yamauchi, K. Matsubara, T. Tsuda, and H. Nakano, "Norm-conserving finite-difference beam-propagation method for TM wave analysis in step-index optical waveguides," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 18, No. 5, pp. 721-727, May. 2000.
- [23] 山内潤治, 仁藤雄大, 中野久松, "z成分の影響を考慮したパワー保存型セミベクトル差分ビーム伝搬法," 信学技報, Vol. 108, No. 155, OPE2008-43, pp. 73-78, July 2008.
- [24] M. S. Stern, "Semivectorial polarised H field solutions for dielectric waveguides with arbitrary index profiles," *IEE Proc. J.*, Vol. 135, No. 5, pp. 333-338, Oct. 1988.