

関数展開法に基づく3次元光導波路デバイスのトポロジー最適設計

辻 寧英^{†a)}

A Study on Function-Expansion-Based Topology Optimization Method for Three-Dimensional Photonic Circuit Devices

Yasuhide TSUJI^{†a)}

あらまし 本論文では、関数展開法に基づくトポロジー最適化を用いて、深さ方向にも光の閉じ込めを有する3次元光導波路の最適設計を効率的に行う方法について検討を行っている。ここでは、等価屈折率法に基づき初期設計を行い、得られた構造を初期構造とし、深さ方向の閉じ込めを考慮した3次元解析に基づく設計を行う。トポロジー最適化においてはしばしば構造が複雑化することが問題となるため、展開関数として局所化された関数を使用し、最適化の反復において構造平滑化フィルタを用いることで、より単純な構造で目的とする特性を実現するための検討を行っている。

キーワード トポロジー最適化, 有限要素法, 光導波路デバイス, 関数展開法

1. まえがき

近年のインターネットの普及に伴い光通信の更なる高速大容量化への要求が高まっている。光通信の大容量化のためには伝送路である光ファイバの高性能化に加えて、様々な機能をもった光導波路デバイスの高性能化が必須である。光導波路デバイスの開発・設計には、計算機の発展とシミュレーション技術の進展により、現在では計算機シミュレーションが広く用いられている。更に、デバイスの設計技術も進展し、寸法最適化、形状最適化に加えて、デバイス構造のトポロジーまで含めてより自由度の高い設計を可能とする自動最適設計法が種々提案されている [1]~[16]。

本研究では、3次元光導波路デバイスの効率的な自動最適設計を目的として、関数展開法に基づくトポロジー最適化 [11]~[15] による効率的な設計法についての検討を行っている。ここでは、光導波路解析に有限要素法 (FEM: Finite Element Method) を用いているが、3次元光導波路の数値解析は一般に計算負荷が大きいので、まず等価屈折率法 (EIM: Effective Index Method) による2次元近似設計を行い、得られた構造

を3次元設計の初期構造とすることで設計の効率化を図る検討を行っている。また、関数展開法に基づくトポロジー最適化では、特に強導波路の最適化問題において、目的関数の多峰的な性質により最適化形状が複雑化することがしばしば問題となる。ここでは、展開関数により局所化された関数を用いることの有効性について検討するとともに、最適化の反復に構造平滑化フィルタを導入した構造単純化についても検討を行っている。

2. 3次元光導波路のトポロジー最適設計

ここでは、3次元光導波路デバイスの最適設計の流れとトポロジー最適化のための定式化を簡単に示す。

2.1 トポロジー最適化の流れ

図1にトポロジー最適化の流れを示す。ここでのトポロジー最適化では、まず設計領域及び目的関数を設定する。目的関数は得たい特性が実現されたときに最小値あるいは最大値をとるような関数を設定する。本論文では入出力特性により目的関数を表現している。その後、まず設計領域内の初期構造をなんらかの方法で定義し、与えられた構造に対して有限要素法による光導波路解析を実行し、目的関数を評価する。この目的関数が目標とする値に達していれば最適化を終了し、まだ改善の余地がある場合には、構造の微小変化に対する目的関数の感度を求め、特性が改善する方向に構

[†] 室蘭工業大学大学院工学研究科, 室蘭市

Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran-shi, 050-8585 Japan

a) E-mail: y-tsuji@mmm.muroran-it.ac.jp

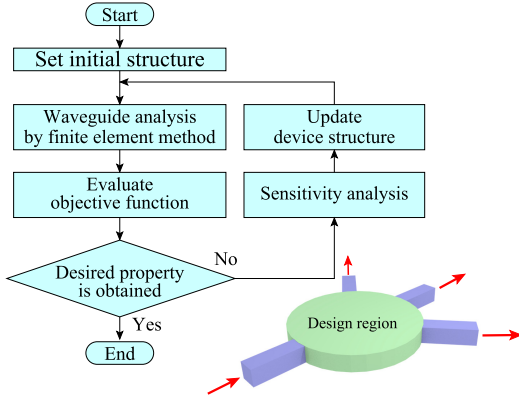


図1 トポロジー最適化の流れ

Fig. 1 Flowchart of the topology optimization.

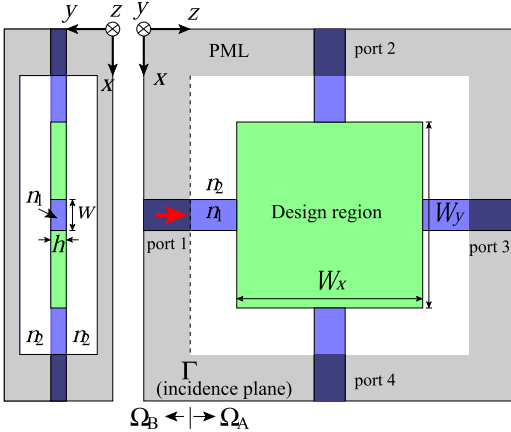


図2 3次元光導波路デバイス設計の問題設定

Fig. 2 Design problem of three-dimensional optical waveguide devices.

造を更新する。

2.1.1 有限要素法による3次元光導波路解析

図2に示すような3次元光導波路デバイスの最適化問題を考える。光波の振る舞いはマクスウェルの方程式より以下のベクトル波動方程式により記述することができる。

$$\nabla \times ([p]\nabla \times \Phi) - k_0^2 [q]\Phi = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここに k_0 は自由空間波数であり、 Φ , p , q は未知変数を電界とするか磁界とするかにより

電界未知変数: $\Phi = \sqrt{\varepsilon_0} \mathbf{E}$, $[p] = [\mu]^{-1}$, $[q] = [\varepsilon]$

磁界未知変数: $\Phi = \sqrt{\mu_0} \mathbf{H}$, $[p] = [\varepsilon]^{-1}$, $[q] = [\mu]$

と表される。 ε_0 , μ_0 はそれぞれ真空の誘電率、透磁

率であり、 $[\varepsilon]$, $[\mu]$ はそれぞれ比誘電率テンソル、比透磁率テンソルである。ここでは等方性材料のみを考えているが、解析領域端からの非物理的な反射を抑圧するために置かれている完全整合層 (PML: Perfectly Matched Layer) 領域においては複素の異方的な比誘電率、比透磁率となる。

いま、解析領域を四面体エッジ要素を用いて離散化すると、要素内の電磁界ベクトルは、ベクトル形状関数 $\{\mathbf{N}\}$ を用い

$$\Phi = \{\mathbf{N}\}^T \{\Phi\}_e \quad (2)$$

と表される。ここに $\{\Phi\}_e$ は各要素内辺上での電磁界の辺方向の大きさであり、 T は転置することを意味する。いま、解析領域を光の入射面を境に二つの領域 Ω_i ($i = A, B$) に分け、式(2)を式(1)に対応する汎関数に代入し変分を取ると、各領域に対して以下の連立一次方程式を得る。

$$[P_i] \{\Phi_i\} = \{u_i\} \quad (3)$$

ここに

$$[P_i] = [K_i] - k_0^2 [M_i]$$

$$[K_i] = \sum_{e_i} \iiint_{e_i} (\nabla \times \{\mathbf{N}\}) \cdot ([p]\nabla \times \{\mathbf{N}\}^T) dV$$

$$[M_i] = \sum_{e_i} \iiint_{e_i} \{\mathbf{N}\} \cdot ([q]\{\mathbf{N}\}^T) dV$$

$$\{u_i\} = \sum_{e_i} \iint_{\Gamma} \{\mathbf{N}\}_{\Gamma} \cdot \{\mathbf{i}_n \times ([p]\nabla \times \Phi)\}_{\Gamma} dS$$

であり、 \sum_{e_i} は領域 Ω_i に関する要素の和を表す。いま光の入射方向を領域 Ω_A の方向のみとして、入射面 Γ における境界条件を用いて領域 Ω_A , Ω_B に対する方程式を結合すると、最終的に以下の連立一次方程式を得る [17]。

$$[P] \{\Phi\} = \{u\} \quad (4)$$

$$[P] = \begin{bmatrix} [P_A]_{00} & [0] & [P_A]_{0\Gamma} \\ [0] & [P_B]_{00} & [P_B]_{0\Gamma} \\ [P_A]_{\Gamma 0} & [P_B]_{\Gamma 0} & [P_A]_{\Gamma\Gamma} + [P_B]_{\Gamma\Gamma} \end{bmatrix}$$

$$\{\Phi\} = \begin{bmatrix} \{\Phi_A\}_0 \\ \{\Phi_B\}_0 \\ \{\Phi_{\text{scat}}\}_{\Gamma} \end{bmatrix}$$

$$\{u\} = \begin{bmatrix} \{u_A\}_0 - [P_A]_{0\Gamma} \{\Phi_{A,\text{in}}\}_{\Gamma} \\ \{u_B\}_0 \\ \{u_{A,\text{in}}\}_{\Gamma} - [P_A]_{\Gamma\Gamma} \{\Phi_{A,\text{in}}\}_{\Gamma} \end{bmatrix}$$

ここに下添字 Γ , 0 はそれぞれ入射面 Γ に関する行列成分, その他の行列成分であることを表している.

2.1.2 設計領域内の屈折率表現

標準的な2媒質を対象とした関数展開法では最適化領域内の比誘電率分布を適当な解析関数 $w(x, y, z)$ を用いて以下のように表現する [11].

$$\varepsilon_r(x, y, z) = \varepsilon_{ra} + (\varepsilon_{rb} - \varepsilon_{ra})H(w(x, y, z)) \quad (5)$$

ここで, ε_{ra} , ε_{rb} は使用可能な二つの材料の比誘電率, $H(\xi)$ は ξ の値によって0か1かの値を取る関数であり, ε_r は $w(x, y, z)$ の値によって ε_{ra} あるいは ε_{rb} のどちらかの比誘電率となる. 図3に関数 $w(x, z)$ と射影して得られる屈折率分布の例を示す. ただし, 実際には ε_r が微分可能となるように, $H(\xi)$ は以下のように定義される連続関数とする [11].

$$H(\xi) = \begin{cases} 0 & (\xi \leq -t) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\xi+t}{t} \right)^2 & (-t < \xi < 0) \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\xi-t}{t} \right)^2 & (0 \leq \xi < t) \\ 1 & (\xi \geq t) \end{cases} \quad (6)$$

ここに t は $H(\xi)$ が連続関数となるように導入された量であり, $|w(x, y, z)| < t$ となる領域において比誘電率は中間的な値をとるが, t を十分に小さく取ることによってグレイ領域を縮小でき, 最終的に $t \rightarrow 0$ とすることでグレイ領域を除去することができる. t の具体的な大きさは, 最適化領域内のグレイ領域の占める割合を指定することで決定することもでき, 最適化の進行に伴い t の値を小さくしていくことで, 設計の初期段階

においては大域的な探索, 設計の後半では局所的探索を行うようにすることもできる [13].

最適化領域内の屈折率分布を決める関数 $w(x, y, z)$ は一般的に

$$w(x, y, z) = \sum_i c_i f_i(x, y, z) \quad (7)$$

という形で与えられる. 本研究では, 実際の作製を考えてコア高さは一定とし, xz 面内の屈折率分布のみを設計するものとする. このとき, $w(x, y, z) = w(x, z)$ の形として, 以下の2通りの表現を考える [15].

フーリエ級数

$$w(x, z) = \sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=-N_x}^{N_x-1} (a_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}),$$

$$\theta_{ij} = \frac{2\pi i}{L_x} x + \frac{2\pi j}{L_z} z$$

標本化関数

$$w(x, z) = \sum_{i=-N_x}^{N_x} \sum_{j=-N_z}^{N_z} a_{ij} \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi(x-x_i)}{\Delta x} \right) \times \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi(z-z_j)}{\Delta z} \right)$$

前者は基底関数が設計領域全体に広がっているため, より大域的な最適解を求めやすいが, その一方で問題によっては最適化構造が複雑化する. 後者はより局所化された基底関数であり, 主に材料境界形状を更新することを意図しているが, 設計の初期段階でグレイ領域を広く取ることによってトポロジーの変化を生み出すこともできる. 局所化した基底関数を用いることで構造の複雑化をある程度抑圧できることが報告されている [15].

2.1.3 感度解析

光導波路デバイスの特性を改善する方向に構造を更新していくためには, 構造が変化したときにどのように特性が変化するかを知らなければならない. この方法として, 実際に構造を変化させてみて特性を調べるのも一つの方法であるが, そのためには新たな光導波路解析が必要であり, 最適化するパラメータが増えるとその計算量は膨大になる. ここでは, 構造の変化に対する特性の変化を効率的に調べる方法として, 随伴変数法 (AVM : Adjoint Variable Method) [5]~[15] を用いる.

いま port 1 から光を入射したとして式 (4) を解い

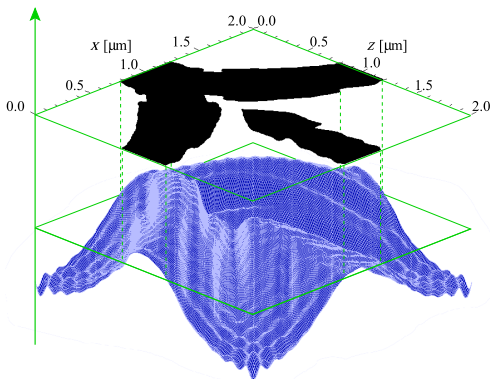


図3 関数 $w(x, z)$ と射影された屈折率分布
Fig. 3 $w(x, z)$ and projected refractive index distribution.

て伝搬界分布 $\{\Phi\}$ が求まると、第 n 番目の port への固有モードの振幅透過係数 S_{n1} は

$$S_{n1} = \{\Phi\}^T \{g_n\} \quad (8)$$

として求めることができる。ここにベクトル $\{g_n\}$ は port n の固有ベクトルを用いて表現される。このとき、 i 番目のパラメータ c_i が微小変化したときの S_{n1} の変化はAVMを用いると

$$\frac{\partial S_{n1}}{\partial c_i} = -\{\lambda_n\}^T \frac{\partial [P]}{\partial c_i} \{\Phi\} \quad (9)$$

と書ける。ここで $\{\lambda_n\}$ は

$$[P]^T \{\lambda_n\} = \{g_n\} \quad (10)$$

で表され、一度 $\{\lambda_n\}$ が求まると、各パラメータ c_i に対する感度は単純なベクトル同士の積で計算できることがわかる。なお、等方性材料からなる光導波路デバイスの場合には、 $[P]$ は対称行列であるため、連立一次方程式を直接法で解く場合には、導波路解析及び感度解析を通して行列の LU 分解は一度でよく、感度解析の負荷はほとんど無視できる。

3. 最適設計例

3.1 問題の設定

図2のような最適化問題を考え、3分岐光導波路の設計を行う。構造パラメータは文献[13]を参考に、 $n_1 = 3.4$, $n_2 = 1.45$, $w = 0.4 \mu\text{m}$, $h = 0.2 \mu\text{m}$, $W_x = W_y = 2 \mu\text{m}$ とし、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の E^x 基本モードが port 1 に入射するものとする。目的関数 C は三つの出力 port への出力がそれぞれ $1/3$ となるように

$$\text{Minimize } C = \sum_{n=2}^4 \left| |S_{n1}|^2 - \frac{1}{3} \right|^2 \quad (11)$$

とした。

設計パラメータの更新は、AVMにより求まる感度を基に、ここでは最急降下法を用いて以下の式により行う。

$$c_i \rightarrow c_i - K \cdot \frac{|C - C_{\text{opt}}|}{|\nabla C|} \cdot \frac{\partial C}{\partial c_i} \quad (12)$$

ここに K は更新の幅を決める係数であり、ここでは $K = 10$ とした。 $|\nabla C|$ は目的関数の感度ベクトルの大きさ、 C_{opt} は目的関数の最適値 (ここでは $C_{\text{opt}} = 0$) であり最適値に近づくに従って更新幅を小さくして

いる。なお、 c_i は設計パラメータであり、展開関数にフーリエ級数を用いている場合には a_{ij} , b_{ij} であり、標本化関数の場合には a_{ij} である。また、3分岐素子の設計においては、 x 方向に対称な構造を得るため、 $w(x, z)$ が x 方向に偶関数となるような制約条件を設計パラメータに課している [12]。

3.2 等価屈折率法による2次元近似設計

弱導波路に対してはしばしばEIMを用いた2次元近似解析が行われる。強導波路に対してはEIMの精度が十分ではない場合があることが報告されている [13] が、ここでは3次元設計の際の初期構造を決めるために2次元近似設計を行う。図4(a)に示すような断面を有する導波路を図4(b)のようにEIM近似する。このとき、標準的なEIMを用いると、等価屈折率は $n_{\text{eq},1} = 2.70332$, $n_{\text{eq},2} = 1.45$ である。EIMから求まる実効屈折率と、直接3次元導波路に対してベクトル波解析して求まる実効屈折率の導波路幅依存性を図5に示す。EIMを用いると実効屈折率が高めに見積もられていることがわかる。ここでは、3次元解析の結果により近づけるため、等価屈折率を $n_{\text{eq},1} = 2.586$, $n_{\text{eq},2} = 1.45$ とした場合 (EIM #1) と $n_{\text{eq},1} = 2.68$, $n_{\text{eq},2} = 1.185$ とした場合 (EIM #2) の結果を併せて

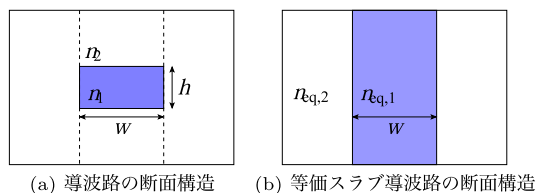


図4 等価屈折率近似
Fig. 4 Effective index approximation.

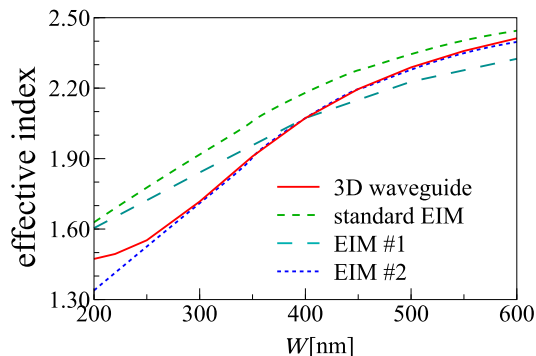
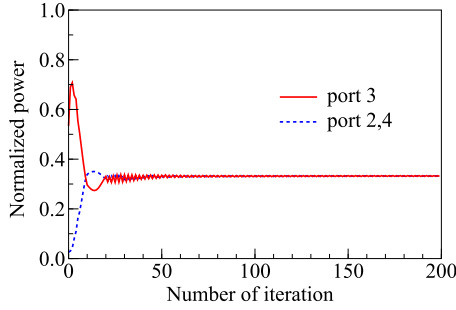
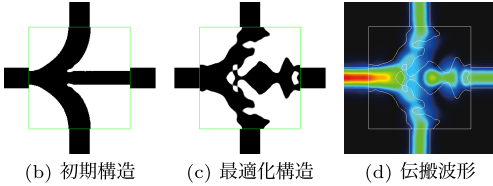


図5 等価屈折率法とベクトル波解析の比較
Fig. 5 Comparison between EIM and full-vectorial analysis.



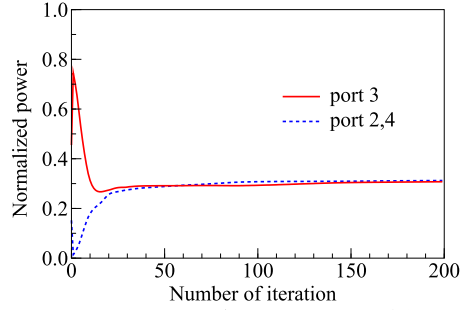
(a) 最適化における各 port への出力の変化



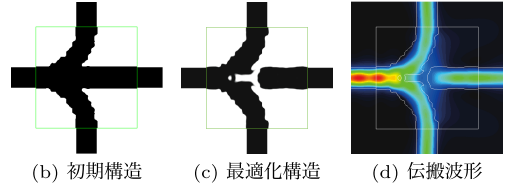
(b) 初期構造 (c) 最適化構造 (d) 伝搬波形

図 6 フーリエ級数を展開関数としたときの 2 次元近似最適化結果

Fig. 6 2D optimization using Fourier series.



(a) 最適化における各 port への出力の変化



(b) 初期構造 (c) 最適化構造 (d) 伝搬波形

図 7 標本化関数を展開関数としたときの 2 次元近似最適化結果

Fig. 7 2D optimization using sampling functions.

示している．前者はコアの等価屈折率のみを調整して $w = 200 \text{ nm}$ でベクトル波解析の結果に一致するようにした場合であり，後者はコアとクラッドの両方の屈折率を調整して実効屈折率の導波路幅依存性が一致するようにした場合である．EIM #2 の場合には，導波路幅の比較的広い範囲に渡って実効屈折率がよく一致していることがわかる．これは，クラッド領域においても光の深さ方向への閉じ込め分布があるため，クラッドの等価屈折率もまた一様媒質の屈折率よりも低くなると考えると自然である．以降の 2 次元近似解析では EIM #2 を用いることにする．

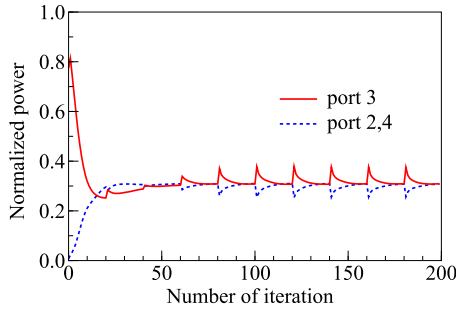
EIM 近似を用いて 2 次元設計した 3 分岐デバイスの最適化結果として，最適化の初期構造，最適化途中の各 port への出力パワーの変化，最適化構造，伝搬波形を図 6，図 7 に示す．図 6 は展開関数にフーリエ級数を用いた場合であり，図 7 は標本化関数を用いた場合である．いずれの場合も関数展開法の展開項数は $N_x = N_y = 16$ とし，最適化のための反復計算は 200 回とした．最適化構造に対する port 2, 3, 4 への出力パワーは，フーリエ級数の場合それぞれ 0.333, 0.331, 0.333 であり，標本化関数の場合にはそれぞれ 0.312, 0.307, 0.312 である．フーリエ級数を用いた場合の方が特性自体は良いが構造が複雑化している．一方，標本化関数を用いた場合には特性はわずかに劣るものの，フーリエ級数の場合に比べて構造が単純化していることがわかる．

3.3 構造平滑化フィルタを用いた設計

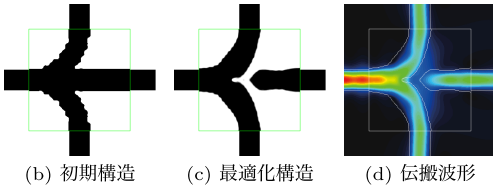
画像処理の分野において画像の輝度値を平滑化して雑音を除去するためのフィルタが種々考案されているが，ここでは，ガウシアンフィルタを用いることにする [14]．最適化の反復の全てのステップにおいて平滑化フィルタを適用することもできるが，平滑化の効果が強く効き過ぎると特性が改善されない可能性がある．ここでは，20 回の反復ごとに平滑化フィルタを適用することにする．このときの最適化結果を図 8 に示す．関数展開法の基底関数には標本化関数を用い，構造平滑化フィルタを用いる以外の設計条件は 3.2 と同じとした．このときの各 port への規格化出力パワーは port 2, 3, 4 に対してそれぞれ 0.308, 0.309, 0.308 であり，ほとんど特性は劣化せずに最適化構造が平滑化されていることがわかる．

3.4 2 次元近似設計結果を初期構造とした 3 次元設計

まず，EIM の精度を確かめるために，2 次元近似設計された最適化構造に対して，3 次元ベクトル波解析を行い得られた電磁界分布を図 9 に示す．各 port への透過率は port 2, 3, 4 に対してそれぞれ 0.270, 0.308, 0.270 であり，2 次元近似設計の結果に対して特性がわずかに劣化しているものの，2 次元近似設計がある程度有効であると思われる．次に，この構造を初期構造として 3 次元設計を行って得られた最適化構造と伝搬波形を図 10 に示す．最適化のための反復回



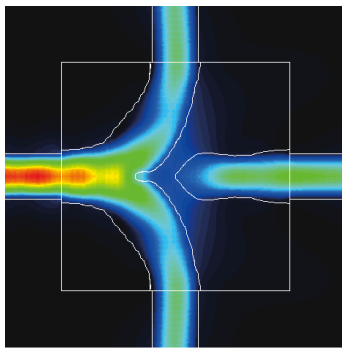
(a) 最適化における各 port への出力の変化



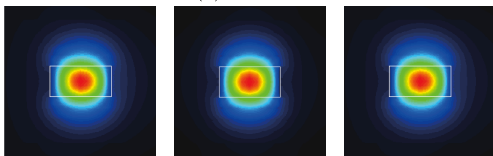
(b) 初期構造 (c) 最適化構造 (d) 伝搬波形

図 8 構造平滑化フィルタを用いた場合の 2 次元近似最適化結果

Fig. 8 2D optimization using smoothing filter.



(a) 伝搬波形

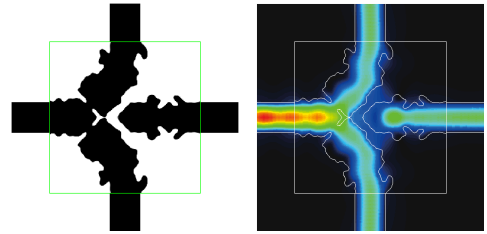


(b) port 2 (c) port 3 (d) port 4

図 9 2 次元近似最適設計された構造に対する 3 次元解析により得られた界分布

Fig. 9 Propagating field obtained by 3D analysis for the 2D optimized structure.

数は 100 回とし、構造平滑化フィルタは用いずに最適化を行った。このときの port 2, 3, 4 への規格化出力は 0.321, 0.320, 0.321 であり、特性は改善されているが構造の境界形状が複雑化していることがわかる。次に、最適化の反復の 5 回おきに平滑化フィルタを導入した場合の最適化の結果を図 11 に示す。このと

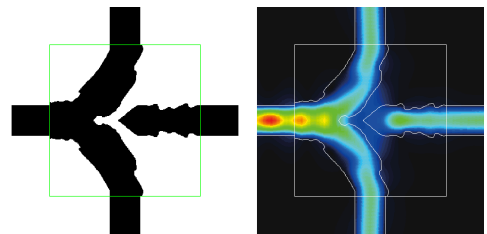


(a) 最適化構造

(b) 伝搬波形

図 10 3 次元トポロジー最適化結果

Fig. 10 3D topology optimization.



(a) 最適化構造

(b) 伝搬波形

図 11 平滑化フィルタを用いた 3 次元トポロジー最適化結果

Fig. 11 3D topology optimization using smoothing filter.

きの port 2, 3, 4 への規格化出力はそれぞれ 0.308, 0.308, 0.308 であった。平滑化フィルタを用いない場合に比べて構造境界が単純化されているが、2 次元設計の場合に比べると境界にわずかに凹凸が現れている。これらの凹凸をより効率的に除去するための平滑化フィルタの検討が必要である。

ここまでの設計例では波長 $1.55 \mu\text{m}$ においてのみ特性が改善するように最適化を行っているため、その波長特性については何も考慮されていないが、一般には波長平坦性が求められる場合も多い。本手法では、波長平坦性を考慮した最適設計も可能であり [12]、図 11 の最適化構造を初期構造として波長平坦性を考慮した設計を行った。ここでは波長 $1.55 \mu\text{m}$ を中心としてより広い帯域で動作するように、波長 $1.525 \mu\text{m}$, $1.550 \mu\text{m}$, $1.575 \mu\text{m}$ の三つの波長において同時に特性を改善するように最適化を行った。図 12 にそのときの最適化構造及び伝搬波形を示す。図 11 の構造を初期構造としているため、大きな形状の変化は生じておらず、分岐部の構造と直進方向の導波路の形状がわずかに修正された程度である。このときの出力特性の波長依存性を図 13 に示す。図 10, 図 11 の構造に対する波長依存性も併せて示している。構造平滑化を行

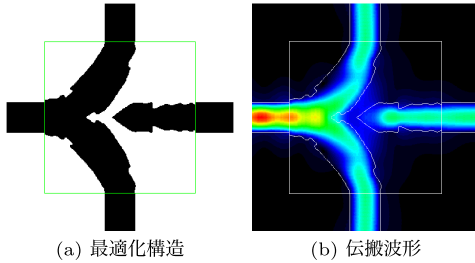


図 12 波長平坦化を考慮した 3 次元トポロジー最適化結果
 Fig. 12 3D topology optimization considering broad band operation.

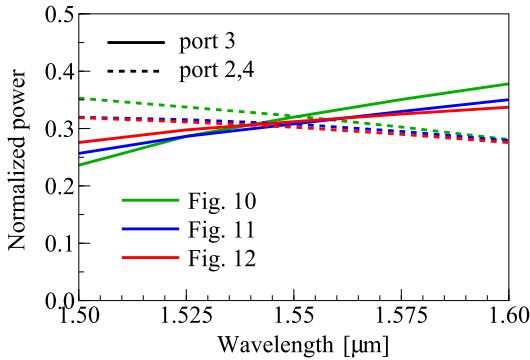


図 13 最適設計された 3 分岐素子の波長特性
 Fig. 13 Wavelength dependence of normalized output power of the designed 3-branch waveguide.

わない図 10 に示した最適化構造では比較的波長依存性が大きく、構造平滑化を行った図 11 の構造では波長平坦性が改善されていることがわかる。波長平坦性を考慮して得られた図 12 の構造では他の構造に比べて波長特性が平坦化されてはいるが、構造平滑化を行った場合に比べてはそれほど大きな改善は得られなかった。

3.5 3 波長分離素子の設計

最後に、波長依存性を考慮したもう一つの設計例として、文献 [15] で報告されている 3 波長分離素子の設計を、より実際の 3 次元構造として行った。構造パラメータは、設計領域の大きさを $W_x = W_y = 4 \mu\text{m}$ とした以外は 3.4 までの設計例と同じとし、波長 $1.31 \mu\text{m}$, $1.49 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ の光をそれぞれ port 2, 3, 4 に分離するように最適化を行った。深さ方向への光閉じ込めにより面内の光閉じ込めが弱まるため、ここでは文献 [15] の 2 次元設計例に対して導波路幅を 2 倍にしている。得られた構造と光の伝搬の様子を図 14 に示す。伝搬界分布は波長 $1.31 \mu\text{m}$, $1.49 \mu\text{m}$,

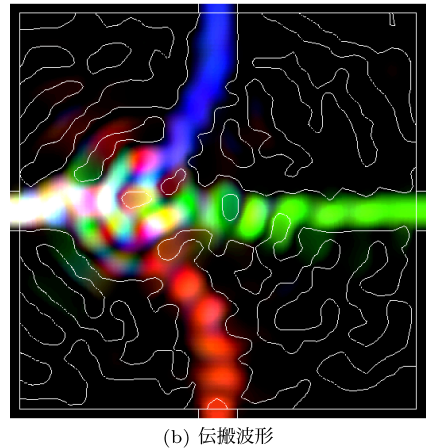
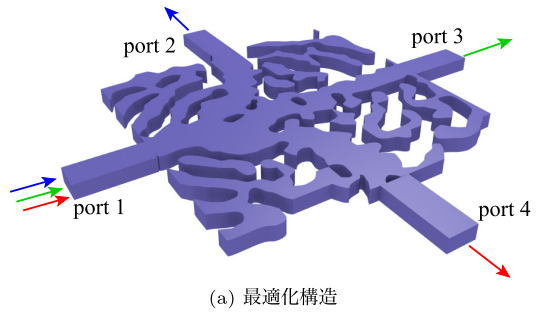


図 14 3 波長分離素子のトポロジー最適化結果
 Fig. 14 Topology optimization for the triplexer.

$1.55 \mu\text{m}$ の光をそれぞれ青、緑、赤で表し重ねて表示している。各波長の目的のポートへの規格化出力は 0.74 , 0.66 , 0.66 とまだ十分に高いとは言えないが、それぞれ目的とするポートに光が分離されていることがわかる。2 次元設計に比べて特性が十分でないのは、深さ方向の閉じ込めにより光の導波路内への閉じ込めが弱くなるためと考えられ、設計領域を広げることで特性を改善できると考えられる。

4. む す び

関数展開法に基づくトポロジー最適化を用いて 3 次元光導波路デバイスを効率的に設計するための検討を行った。EIM 近似による 2 次元近似設計が強導波路の場合に対してある程度の精度で成り立つことが確認され、2 次元近似設計により得られる構造を初期構造として 3 次元設計することにより、設計を効率化できる可能性があることを示した。また、最適化構造が複雑化することを避けるための検討として、展開関数に局所化した関数を用い、最適化の過程で平滑化フィルタを適用することで最終的に得られる最適化構造をあ

る程度簡単化できる可能性を示した。今後は本手法を更に拡張し様々な光デバイスの設計に応用していく予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15K06009 の助成を受けたものであり、ここに謝意を表します。

文 献

- [1] J. Jiang, J. Cai, G.P. Nordin, and L. Li, "Parallel microgenetic algorithm design for photonic crystal and waveguide structures," *Opt. Lett.*, vol.28, pp.2381–2383, Dec. 2003.
- [2] Y. Sakamaki, T. Saida, T. Shibata, Y. Hida, T. Hashimoto, M. Tamura, and H. Takahashi, "Y-branch waveguides with stabilized splitting ratio designed by wavefront matching method," *Photonics Technol. Lett.*, vol.18, pp.817–819, April 2006.
- [3] W.R. Frei, D.A. Tortorelli, and H.T. Johnson, "Geometry projection method for optimizing photonic nanostructures," *Opt. Lett.*, vol.32, pp.77–79, Jan. 2007.
- [4] J. Liu and J. Vuckovic, "Nanophotonic computational design," *Opt. Express*, vol.21, no.11, pp.13351–13367, May 2013.
- [5] 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, March 2004.
- [6] J.S. Jensen, O. Sigmund, L.H. Frandsen, P.I. Borel, A. Harpoth, and M. Kristensen, "Topology design and fabrication of an efficient double 90° photonic crystal waveguide bend," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.17, no.6, pp.1202–1204, June 2005.
- [7] F. Wang, J.S. Jensen, and O. Sigmund, "Robust topology optimization of photonic crystal waveguides with tailored dispersion properties," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol.28, pp.387–397, March 2011.
- [8] H. Men, K.Y.K. Lee, R.M. Freund, J. Paire, and S.G. Johnson, "Robust topology optimization of three-dimensional photonic-crystal band-gap structures," *Opt. Express*, vol.22, no.19, pp.22632–22648, Sept. 2014.
- [9] Y. Elesin, B.S. Lazarov, J.S. Jensen, O. Sigmund, "Time domain topology optimization of 3D nanophotonic devices," *Photonics Nanostruct. Fundam. Appl.*, vol.12, no.1, pp.23–33, Feb. 2014.
- [10] Y. Tsuji, K. Hirayama, T. Nomura, K. Sato, and S. Nishiwaki, "Design of optical circuit devices based on topology optimization," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.18, no.7, pp.850–852, April 2006.
- [11] Y. Tsuji and K. Hirayama, "Design of optical circuit devices using topology optimization method with function-expansion-based refractive index distribution," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.20, no.12, pp.982–984, June 2008.
- [12] K. Fujimoto, Y. Tsuji, K. Hirayama, T. Yasui, S. Sato, and R. Kijima, "A study on topology optimization of optical circuits consisting of multi-materials," *J. Lightwave Technol.*, vol.30, no.13, pp.2010–2215, July 2012.
- [13] T. Yasui, Y. Tsuji, J. Sugisaka, and K. Hirayama, "Design of three-dimensional optical circuit devices by using topology optimization method with function-expansion-based refractive index distribution," *J. Lightwave Technol.*, vol.31, no.23, pp.3765–3770, Dec. 2013.
- [14] H. Goto, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, "A study on optimization of waveguide dispersion property using function expansion based topology optimization method," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E97-C, no.7, pp.670–676, July 2014.
- [15] 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.3936–3950, Feb. 2015.
- [16] A. Iguchi, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, "Topology optimization of optical waveguide devices based on beam propagation method with sensitivity analysis," *J. Lightwave Technol.*, vol.34, no.18, pp.4214–4220, Sept. 2016.
- [17] N. Kono and Y. Tsuji, "A novel finite-element method for nonreciprocal magneto-photonic crystal waveguides," *J. Lightwave Technol.*, vol.22, no.7, pp.1741–1747, July 2004.

(平成 28 年 7 月 29 日受付, 10 月 10 日再受付,
29 年 1 月 13 日公開)



辻 寧英 (正員)

平 3 北大・工・電子卒。平 5 同大学院修士課程了。平 8 同博士課程了。同年北海道工大・応用電子助手, 同年同講師。平 9 北大大学院工学研究科助教, 平 16 北見工業大学電気電子工学科准教授, 平 23 室蘭工業大学大学院工学研究科教授, 現在に至る。光・波動エレクトロニクスに関する研究に従事。博士(工学)。平 8 年度, 平 10 年度本会論文賞, 平 10 年度本会学術奨励賞受賞。平 12 年 IEEE Third Millennium Medal 受賞。応用物理学会, IEEE, OSA 各会員。