

関数展開法に基づくトポロジー最適化による 光導波路デバイスの最適設計に関する検討

A Study on Topology Optimization Based on Function Expansion Method for Photonic Waveguide Devices

辻 寧英¹
Yasuhide TSUJI

木島涼輔²
Ryosuke KIJIMA

佐藤慎悟²
Singo SATO

平山浩一²
Koichi HIRAYAMA

室蘭工業大学¹
Muroran Institute of Technology

北見工業大学²
Kitami Institute of Technology

1 まえがき

光通信の高性能化を目指して光導波路デバイスの小型化、高性能化の検討が盛んに行われている。こうした状況の中、既存の設計理論に頼らない計算機を利用した自動最適設計に対する関心も高まっている [1]-[3]。本研究では、2次元問題でその有効性が確認されている関数展開法を用いたトポロジー最適化による3次元光導波路デバイスの最適設計についての検討を行うとともに、導波モードの分散特性に対する最適設計についても検討を行っている。

2 関数展開法に基づくトポロジー最適化

2.1 屈折率分布の表現

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。

$$\varepsilon_r(y, z) = \varepsilon_{ra} + (\varepsilon_{rb} - \varepsilon_{ra})H(w(x, y, z)) \quad (1)$$

ここで、 ε_{ra} 、 ε_{rb} は使用可能な2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。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。

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

ここで h は $H(\xi)$ が連続関数となるように導入された量であり、 $-h < w(x, y, z) < h$ となる領域において比誘電率は中間的な値をとりうるが、 h を十分に小さくすることでグレイ領域を小さくでき、最終的に $h \rightarrow 0$ とすることでグレイ領域を除去することができる。図1に、2次元問題の場合に対して、関数 $w(x, z)$ とそれにより定義される屈折率分布の関係を示す。関数 $w(x, z)$ の零等値線が媒質境界を与える。

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

$$w(x, y, z) = \sum_i a_i f_i(x, y, z) \quad (3)$$

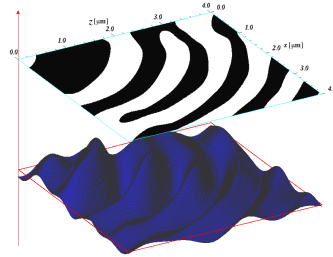


図1 $w(x, z)$ により定義される屈折率分布

の形で与えられる。感度解析に基づき係数 a_i を更新していくことにより最適な光導波路デバイス構造を見出すことができる。

2.2 透過・反射特性に対する最適設計

図2に示すような光導波路デバイスを考え、port 1から入射した光を port 2~4に等分配させるような設計領域内の屈折率分布を求める。コア、クラッドの屈折率は $n_1 = 3.4$ 、 $n_2 = n_3 = 1.45$ とし、設計領域内は屈折率 n_1 、 n_2 の2つの材料のみで構成されるものとする。入出力導波路の幅と高さをそれぞれ $w = 0.4 \mu\text{m}$ 、 $h = 0.2 \mu\text{m}$ 、最適化領域のサイズを $W_x = W_y = 2 \mu\text{m}$ とし、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の E^x 基本モードが入射する場合を考える。対称な出力を得るために、実際の解析領域は x 方向、 y 方向に対称条件を利用して $1/4$ の領域としている。目的関数は port 2~4へ等分配させるように

$$C = 1 - (2|S_{21}|^2 + |S_{31}|^2) + ||S_{21}|^2 - |S_{31}|^2| \quad (4)$$

とし、最適化領域内の屈折率表現は、 x, z 面内の分布には文献 [2] と同じフーリエ級数を用い、 y 方向には一様と

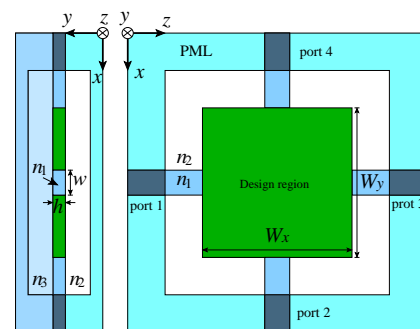


図2 3分岐光導波路の最適設計モデル

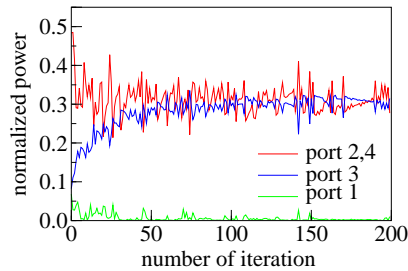


図 3 最適化における透過・反射パワーの収束の様子

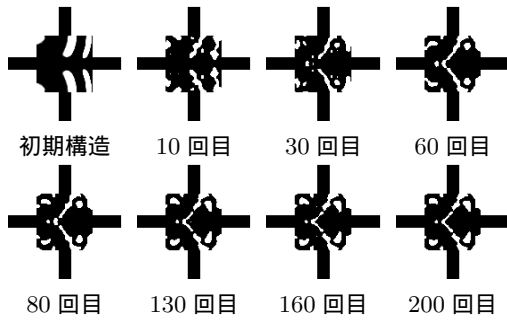


図 4 最適化の過程における屈折率分布の変化

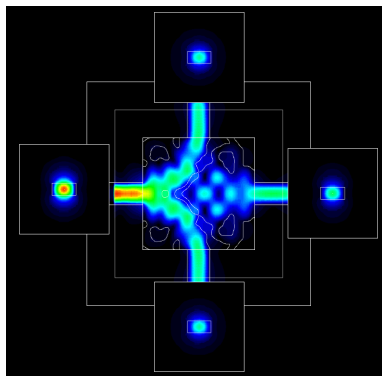


図 5 最適化された 3 分岐光導波路中の伝搬界分布

した．図 3 に最適化の過程における各ポートへの規格化透過パワーの変化を示す．また，図 4 にはそのときの屈折率分布の変化の様子を示す．反復計算により，port 2 ~ 4 への出力が等しくなっていくことがわかる．最終的に port 2,4 への規格化透過パワーは 0.309，port 3 には 0.308 であった．図 5 に最適化により得られた構造中での光波の伝搬の様子を示す．3 つの出力導波路に光がほぼ等分配されていることがわかる．

2.3 導波モード分散特性に対する最適設計

図 6 に示すようなフォトニック結晶導波路を考え，目的とする分散特性が得られるような最適化領域内の屈折率分布を求める．構造パラメータは，格子定数を a ，空孔直径を $d = 0.58a$ ，屈折率を $n_1 = 3.4, n_2 = 1.0$ とし，TM 偏波したモードを考える．ここでは，フォトニックバンドギャップ内の広い帯域での動作を考え，図 7 の破線（緑線）で示される初期構造の分散曲線を初期状態として，一点鎖線（赤線）で示される特性を目標とした最適化を行った．最適化領域内の屈折率表現は，文献 [3] で示

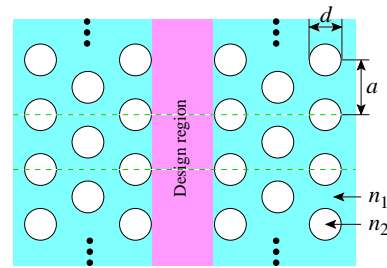


図 6 導波モードの最適化モデル

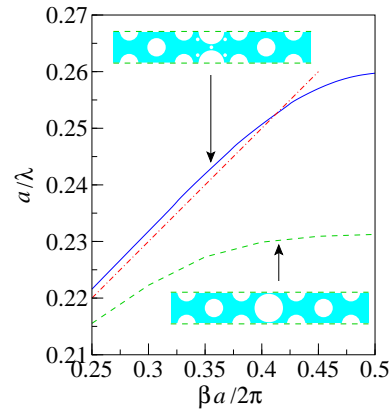


図 7 導波モードの分散特性

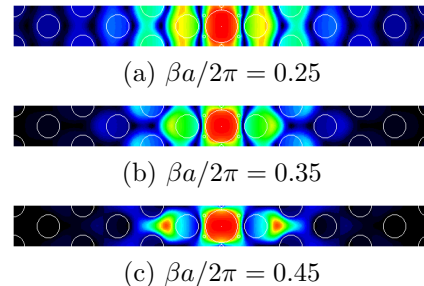


図 8 最適化された導波路の導波モード分布

されている三角錐形の関数を用いた．最適化により得られた分散曲線を図 7 に実線で示す．今回の検討では，作製のことを考え構造の自由度を低く抑えたため，十分な一致とは言えないが，目的とする特性に近い特性が得られている．最終的に得られた構造を図 7 中に，導波モードの界分布を図 8 に示している．

3 まとめ

関数展開法に基づくトポロジー最適化による光導波路デバイスの設計についての検討を行った．反射・透過特性の最適化問題および導波路の分散特性の最適化問題に本手法を適用し，その有効性について検討を行った．

参考文献

1. J.S. Jensen, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, pp.2022-2024, Mar. 2004.
2. Y. Tsuji, *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, pp.982-984, June 2008.
3. 藤本他，電磁界理論研究会資料，EMT-11-101，2011年7月．