関数展開法に基づくトポロジー最適化による偏波分離素子の設計

関数展開法に基づくトポロジー最適化による偏波分離素子の設計

千田　宏幸†a)　　辻　　寧英†b)　　佐藤　慎悟†c)

Design of Polarization Splitter Using Function-Expansion-Based Topology Optimization Method

Hiroyuki CHIDA†a), Yasuhide TSUJI†b), and Shingo SATO†c)

あらまし　光通信の高速大容量化を目指して，小型で高性能な光デバイスの開発が活発に行われている．目的とする特性を実現するデバイスの構造を自動最適設計できれば設計者の経験に依存せずに高性能な光デバイスを実現できる可能性がある．本研究では，関数展開法に基づくトポロジー最適化を TE，TM 両方の偏波に対して適用し，偏波分離素子の最適設計について検討を行っている．数値解析に有限要素法，感度解析に随伴変数法を用い，関数展開法の展開関数による最適化構造の違いについても検討を行っている．

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，偏波分離素子

1. まえがき

近年，スマートフォンなどの情報端末の普及による情報通信技術の急激な発展に伴い，通信の高速大容量化が求められている．通信の大容量化には基幹となる光通信の大容量化は必須であり，そのための高性能な光デバイスの開発が盛んに進められている．光デバイスの開発では，現在は，計算機及びシミュレーション技術の発展により計算機シミュレーションが広く用いられているが，デバイスの開発においては既存の構造の改良であったり発見的な方法であるなど，設計者の経験に依るところも大きい．

既存の概念を超えたより高性能な光デバイスの開発には，設計者の経験に頼らない最適設計手法もまた有効である．近年，光デバイスの最適設計技術も発展し，寸法や形状のみならず，トポロジーまでを含めた最適設計法が開発されており，様々な興味深いデバイスが提案されている [1]～[14]．中でも関数展開法に基づくトポロジー最適設計法 [8]～[12] は，通常の密度法で現れるグレイ領域の問題を回避することができ，選択する関数系により構造の自由度を制限することも比較的容易である．しかしながら，関数展開法に基づくトポロジー最適化の二次元光回路設計への適用はこれまで主に TE 波のみに対して検討されている [8], [9], [12]．近年，強導波路を用いたデバイスの小型化が盛んに検討されるなか，偏波無依存化や偏波分離といった偏波の違いを考慮した設計もまた重要になっている．

本研究では，関数展開法に基づくトポロジー最適設計法を TE，TM 両方の偏波に対して適用し，小型な偏波分離素子の設計について検討を行っている．本検討では，数値解析に有限要素法，感度解析に随伴変数法を用いている．

2. 二次元光導波路のトポロジー最適設計

2.1 設計領域内の屈折率分布の表現

図 1 に示すような二次元光導波路デバイスの設計問題を考える．標準的な二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 $w(x,y)$ を用いて以下のように表現する [8]．

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

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 $w(x,y)$ 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，実際には感度解析の際に 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 [8]．

† 室蘭工業大学情報電子工学系専攻，室蘭市
Muroran Institute of Technology, Mizumoto 27–1, Muroran-shi, 050–8585 Japan
a) E-mail: 15043040@mmm.muroran-it.ac.jp
b) E-mail: y-tsuji@mmm.muroran-it.ac.jp
c) E-mail: satoshingo@mmm.muroran-it.ac.jp

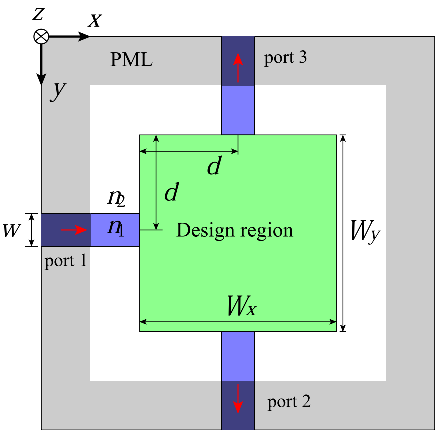


図 1　二次元光導波路デバイス設計の問題設定
Fig. 1　Design problem of two-dimensional optical waveguide devices.

$$H(\xi)=\begin{cases}0 & (\xi\le -t)\\ \frac{1}{2}\left(\frac{\xi+t}{t}\right)^2 & (-t<\xi<0)\\ 1-\frac{1}{2}\left(\frac{\xi-t}{t}\right)^2 & (0\le\xi<t)\\ 1 & (\xi\ge t)\end{cases} \tag{2}$$

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，$|w(x,y)|<t$ となる領域において比誘電率は中間的な値をとるが，ここでは t を

$$t=t_0\exp\left(-\alpha n/N\right) \tag{3}$$

に従って変化させることで最適化の反復とともにグレイ領域を縮小し，得られた構造に対して $t\rightarrow 0$ とすることでグレイ領域を除去している [10]．ここで，N は最大反復回数，n は現在の反復回数であり，本論文では $t_0=0.1$，$\alpha=4$ としている．

最適化領域内の屈折率分布を決める関数 $w(x,y)$ は一般的に

$$w(x,y)=\sum_i c_i f_i(x,y) \tag{4}$$

という形で与えられる．$w(x,y)$ の具体的な形として，フーリエ級数や標本化関数による表現が提案されている [13]．

2. 2　有限要素法による光導波路解析

図 1 に示すような z 方向に対して構造が一様な等方性誘電体からなる二次元光導波路を考える．このとき，マクスウェル方程から，光波の伝搬を表す波動方程式は以下のように与えられる．

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(p_x\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(p_y\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)+k_0^2q\Phi=0 \tag{5}$$

ここに k_0 は自由空間波数であり，Φ，p_x，p_y，q は TE 偏波に対して

$$\Phi=E_z,\quad p_x=\frac{s_y}{s_x},\quad p_y=\frac{s_x}{s_y},\quad q=s_xs_y\varepsilon_r$$

TM 偏波に対して

$$\Phi=H_z,\quad p_x=\frac{s_y}{s_x}\frac{1}{\varepsilon_r},\quad p_y=\frac{s_x}{s_y}\frac{1}{\varepsilon_r},\quad q=s_xs_y$$

で与えられる．ここで，s_x，s_y はスプリアス反射を抑圧するために解析領域端に置かれた完全整合層 (PML：Perfectly Matched Layer) に関するパラメータであり，PML 以外では $s_x=s_y=1$ である [15]．

いま，解析領域を三角形二次節点要素を用いて分割し，各要素内において Φ を

$$\Phi_e=\{N\}^T\{\Phi\}_e \tag{6}$$

と近似する．ここで $\{N\}$ は三角形節点要素の形状関数である．これを式 (5) に代入し，ガラーキン法に基づく有限要素法を適用すると以下の式を得る [15]．

$$[P]\{\Phi\}=\{u\} \tag{7}$$

ここに

$$[P]=[K]-k_0^2[M] \tag{8}$$

$$[K]=\sum_e\iint_e\left[p_x\frac{\partial\{N\}}{\partial x}\frac{\partial\{N\}^T}{\partial x}+p_y\frac{\partial\{N\}}{\partial y}\frac{\partial\{N\}^T}{\partial y}\right]dxdy \tag{9}$$

$$[M]=\sum_e\iint_e q\{N\}\{N\}^Tdxdy \tag{10}$$

$$\{u\}=\sum_\Gamma\int_\Gamma -p_n\frac{\partial\Phi_{\rm in}}{\partial n}d\Gamma \tag{11}$$

であり，$\sum_e$ は全ての要素に関する和を，$\int_\Gamma d\Gamma$ は入射境界上での線積分を，$\sum_\Gamma$ は入射境界に接する要素に関する和を表す．また，$\partial/\partial n$ は入射境界辺上での外向き法線微分を表し，$\Phi_{\rm in}$ は入射電磁界を表す．

2. 3　随伴変数法による感度解析

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]～[12] を用いる．

いま図 1 の port 1 から光を入射したとして式 (7) を解いて伝搬界分布 $\{\Phi\}$ が求まると，port n への固有モードの振幅透過係数 S_{n1} は

$$S_{n1} = \{\Phi\}^T \{g_n\} \tag{12}$$

により求めることができる．$\{g_n\}$ は二次元解析の場合は以下のように与えられる．

$$\{g_n\} = \frac{\beta_i}{k_0} [M] \{\Phi_n^*\} \tag{13}$$

ここに $\{\Phi_n\}$ は n 番目の port における固有モード界振幅からなるベクトルである．このとき，i 番目の設計パラメータ c_i が微小変化したときの規格化出力パワー $|S_{n1}|^2$ の変化は

$$\frac{\partial |S_{n1}|^2}{\partial c_i} = S_{n1} \frac{\partial S_{n1}^*}{\partial c_i} + \frac{\partial S_{n1}}{\partial c_i} S_{n1}^* \tag{14}$$

と表され，式 (14) の $\dfrac{\partial S_{n1}}{\partial c_i}$ は c_i の変化による電磁界振幅の変化を用いて

$$\frac{\partial S_{n1}}{\partial c_i} = \left\{ \frac{\partial S_{n1}}{\partial \Phi} \right\}^T \frac{\partial \{\Phi\}}{\partial c_i} = \{g_n\}^T \frac{\partial \{\Phi\}}{\partial c_i} \tag{15}$$

と表すことができる．一方，式 (7) を c_i で微分し，入出力境界が最適化領域に含まれないとすると

$$\frac{\partial \{\Phi\}}{\partial c_i} = -[P]^{-1} \frac{\partial [P]}{\partial c_i} \{\Phi\} \tag{16}$$

が得られ，式 (16) を式 (15) に代入すると

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{n1}}{\partial c_i} &= -\{g_n\}^T [P]^{-1} \frac{\partial [P]}{\partial c_i} \{\Phi\} \\ &= \{\lambda_n\}^T \frac{\partial [P]}{\partial c_i} \{\Phi\} \end{aligned} \tag{17}$$

が得られる．$\{\lambda_n\}$ は以下の式を解くことで得られる．

$$[P]^T \{\lambda_n\} = \{g_n\} \tag{18}$$

一度 $\{\lambda_n\}$ が求まると，パラメータ c_i に対する感度は式 (17) より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 分解は一度で良く，感度解析の負荷はほとんど無視できる．

なお，式 (17) の計算では有限要素行列 $[P]$ の設計パラメータでの微分が必要であるが，これは解析的に計算することができ，TE 波に対して

$$\frac{\partial [P]}{\partial c_i} = -k_0^2 \sum_e \iint_e \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial c_i} \{N\}\{N\}^T dxdy \tag{19}$$

TM 波に対して

$$\begin{aligned} \frac{\partial [P]}{\partial c_i} = &-\sum_e \iint_e \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial c_i} \frac{1}{\varepsilon_r^2} \left[\frac{\partial \{N\}}{\partial x} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} \right. \\ &\left. + \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \right] dxdy \end{aligned} \tag{20}$$

で与えられる．ここで，$\partial \varepsilon_r / \partial c_i$ は

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial c_i} = (\varepsilon_{rb} - \varepsilon_{ra}) f_i(x,y) \frac{\partial H(\xi)}{\partial \xi} \tag{21}$$

である．

3. 偏波分離素子の最適設計

3.1 問題の設定

図 1 に示す 1 入力 2 出力の二次元光導波路デバイスの設計問題を考え，波長 $\lambda = 1.55\ \mu$m の TE 基本モードを port 2 へ，TM 基本モードを port 3 へ出力するようなデバイスの最適設計を行う．材料の屈折率は $n_1 = 3.4$，$n_2 = 1.45$，構造パラメータは $w = 0.2\ \mu$m，$W_x = W_y = 3\ \mu$m，$d = W_x/2$ とし，目的関数は偏波分離を実現するように以下のように設定する．

$$\begin{aligned} \text{Minimize } C = &\left(1 - \left|S_{21}^{\mathrm{TE}}\right|^2\right)^2 + \left(1 - \left|S_{31}^{\mathrm{TM}}\right|^2\right)^2 \\ &+ W\left(\left|S_{31}^{\mathrm{TE}}\right|^4 + \left|S_{21}^{\mathrm{TM}}\right|^4\right) \end{aligned} \tag{22}$$

ここに右辺第 1 項，第 2 項は各偏波の目的の port への出力を最大化するための項，第 3 項はクロストークを最小化するための項である．また，$W\ (>0)$ はそのどちらに重みを置くかの係数であり W が大きいほどクロストーク抑圧効果が高くなる．ここでは事前の検討で $W = 1$ とした場合のクロストーク抑圧効果が不十分であったため $W = 4$ としている．理想の特性においては $C = 0$ となる．出力パワーが最大化される

と反射は必然的に低減されると考えられるため，ここでは明示的に反射に関する項を目的関数には加えていないが必要に応じて目的関数に加えることもできる．設計パラメータの更新は，AVM により求まる感度を基に，最急降下法を用いて以下の式により行う．

$$c_i \quad \rightarrow \quad c_i + K \cdot \frac{|C - C_{\mathrm{opt}}|}{|\nabla C|} \cdot \frac{\partial C}{\partial c_i} \tag{23}$$

ここに K は更新の幅を決める係数であり，ここでは直線探索は行わず $K = 20$ で一定としている．$|\nabla C|$ 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 $C_{\mathrm{opt}} = 0$) 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．

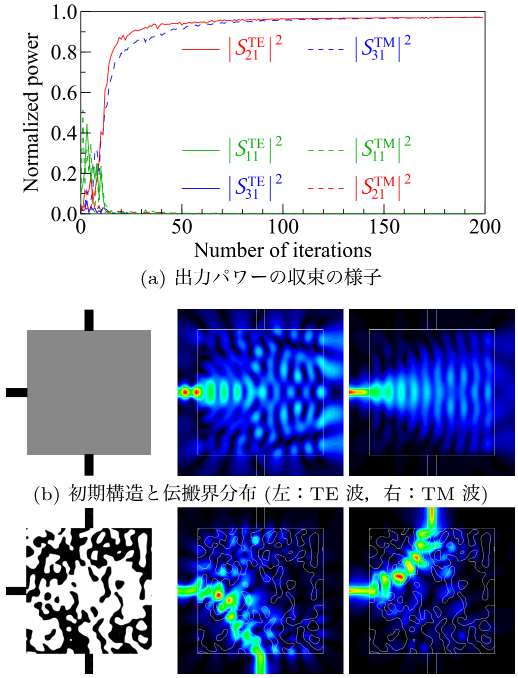
3. 2　関数展開法にフーリエ級数を用いた場合

ここでは，$w(x, y)$ として，以下のフーリエ級数を考える [8]．

$$w(x, y) = \sum_{i=0}^{N_y-1} \sum_{j=-N_x}^{N_x-1} (a_{ij} \cos\theta_{ij} + b_{ij} \sin\theta_{ij}),$$
$$\theta_{ij} = \frac{2\pi i}{L_x} x + \frac{2\pi j}{L_y} y$$

この場合，基底関数が設計領域全体に広がっているため，トポロジーを大きく変化させ，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場合がある．

図 2 に，初期構造を一様媒質としてトポロジー最適設計を行った結果を示す．フーリエ級数の展開項数を多くとると設計の自由度は増すが，短い距離で屈折率変化が生じ微細な構造が生じやすい．ここでは構造変化の最小周期が導波路幅と同じ 200 nm 程度以上になるように，$N_x = N_y = 2^4 = 16$ とした．また，最適化に要する反復回数は問題に依存しあらかじめわからないため，ここでは充分な収束が得られるように反復回数は多めに 200 回と設定した．図 2 (a) に最適化の反復における解の収束の様子を示している．最適化の初期段階ではパラメータの更新幅を大きくしているため多少振動が見られるが反復とともに特性が改善していることがわかる．図 2 (b) に初期構造，図 2 (c) に最適化構造とそのときの光の伝搬の様子を示す．初期構造に何も設定していなくても自動的に構造が現れていることがわかる．最適化構造において，TE 波と TM 波の目的とする port への規格化出力はそれぞれ 0.972，0.973 であった．ただし，得られた構造はかなり複雑なものであることがわかる．



(a) 出力パワーの収束の様子

(b) 初期構造と伝搬界分布 (左：TE 波，右：TM 波)

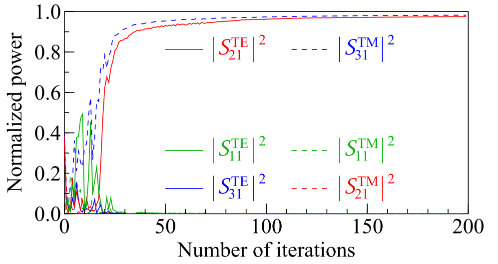
(c) 最適化構造と伝搬界分布 (左：TE 波，右：TM 波)

図 2　構造表現にフーリエ級数を用いたときの最適化結果 (初期構造：一様媒質)

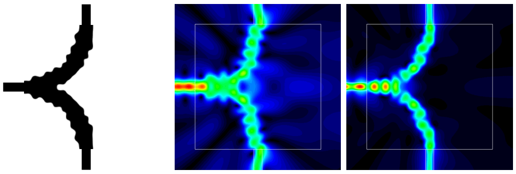
Fig. 2　Topology optimization results using Fourier series with uniform initial structure.

初期構造を設定していないときに構造が複雑化するため，入出力導波路の 2 倍の幅の二分岐導波路を初期構造に設定し，その他の設計条件は変えずに最適設計を行った．初期構造において分岐導波路の境界が波打っているのは，$w(x, y)$ をステップ関数として与え，それをフーリエ級数で表現したためである．最適化結果を図 3 に示す．最適化構造において，TE 波と TM 波の目的とする port への規格化出力はそれぞれ 0.975，0.982 であり，特性はわずかに改善しているが，構造の複雑さは解消されていない．

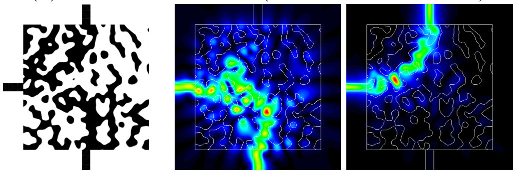
ここまでの設計例では波長 1.55 μm においてのみ特性が改善するように最適化を行っているが，一般には動作波長帯域での波長平坦性が求められる．また，複雑な構造では一般に波長依存性が強いため，波長平坦化することで構造を単純化できる場合もある．そのため，図 3 (c) の最適化構造を初期構造とし，波長 1.5 μm〜 1.6 μm の帯域で平坦な特性を実現する偏波分離素子の設計を行った．このときの目的関数 C_λ は波長 $\lambda_1 = 1.5$ μm，$\lambda_2 = 1.55$ μm，$\lambda_3 = 1.6$ μm として



(a) 出力パワーの収束の様子



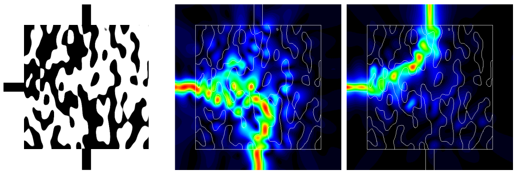
(b) 初期構造と伝搬界分布 (左：TE 波，右：TM 波)



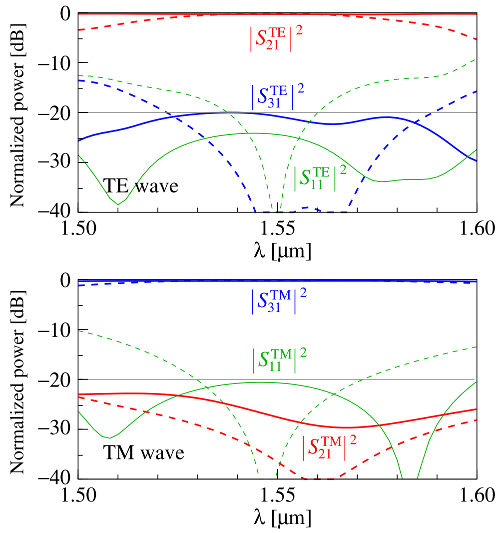
(c) 最適化構造と伝搬界分布 (左：TE 波，右：TM 波)

図 3　構造表現にフーリエ級数を用いたときの最適化結果 (初期構造：2 分岐導波路)

Fig. 3　Topology optimization results using Fourier series with 2-branching initial structure.



(a) 最適化構造と伝搬界分布 (左：TE 波，右：TM 波)



(b) 波長特性 (実線：最適化構造，破線：初期構造)

図 4　構造表現にフーリエ級数を用い波長平坦性を考慮したときの最適化結果 (初期構造：図 3 (b))

Fig. 4　Topology optimization results using Fourier series considering wavelength insensitivity.

$$\text{Minimize}\quad C_\lambda = \sum_{i=1}^{3} C(\lambda_i) \tag{24}$$

とした．図 4 にその最適化結果を示す．最適化された偏波分離素子の波長特性を実線で，初期構造の波長特性を破線で示している．結果的に構造の複雑さは解消されていないが，設定した帯域において挿入損失 -0.40 dB 以下，クロストーク -20.0 dB，反射率 -20.4 dB 以下を実現している．

3.3　関数展開法に標本化関数を用いた場合

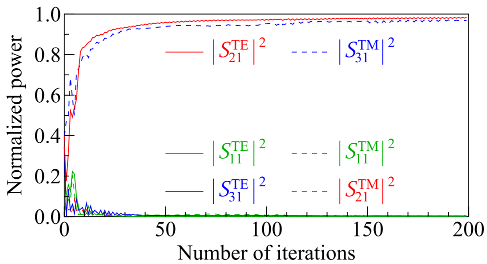
前小節の構造表現にフーリエ級数を用いた設計では，制約条件を課さない場合には複雑な構造が得られている．本小節では，$w(x,y)$ の形とし，以下の標本化関数による表現を考える [12]．

$$w(x,y) = \sum_{i=-N_x}^{N_x} \sum_{j=-N_z}^{N_y} a_{ij} \mathrm{sinc}\left(\frac{\pi(x-x_i)}{\Delta x}\right) \times \mathrm{sinc}\left(\frac{\pi(y-y_j)}{\Delta y}\right)$$

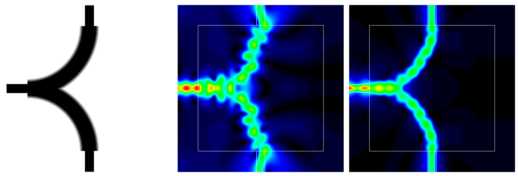
フーリエ級数の場合に比べて基底関数が局所化されているため，主に材料境界形状を更新することを意図しており，設計領域内に不要な構造が現れづらく，構造の複雑化の抑圧に有効であることが示されている [12]．

図 5 に初期構造を図 3 の場合と同様な二分岐導波路とした場合の最適化結果を示す．分岐部の導波路は，最適化の過程で導波路が分断されるのを避けるため，あらかじめ入出力導波路の幅の 2 倍として設定した．設計パラメータの数は $N_x = N_y = 16$ とし，最適化の反復は 200 回とした．最適化構造において，TE 波と TM 波の目的とする port への規格化出力はそれぞれ 0.983，0.968 であり，フーリエ級数を用いた場合に比べて特性はわずかに劣化しているが，構造は大幅に単純化していることがわかる．

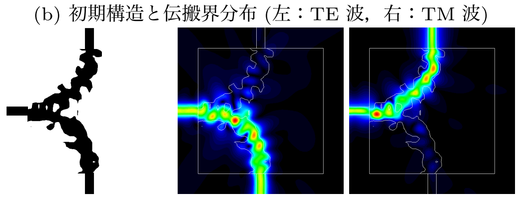
次に，図 5 の最適化構造を初期構造として，波長平坦性を考慮した最適設計を行った．初期構造において比較的平坦な波長特性が得られているため，このときの最適化の反復は 50 回とした．図 6 にその最適化結果を示す．最適化された偏波分離素子の波長特性を



(a) 出力パワーの収束の様子



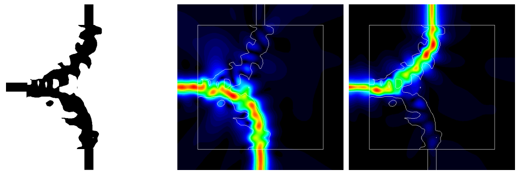
(b) 初期構造と伝搬界分布 (左：TE 波，右：TM 波)



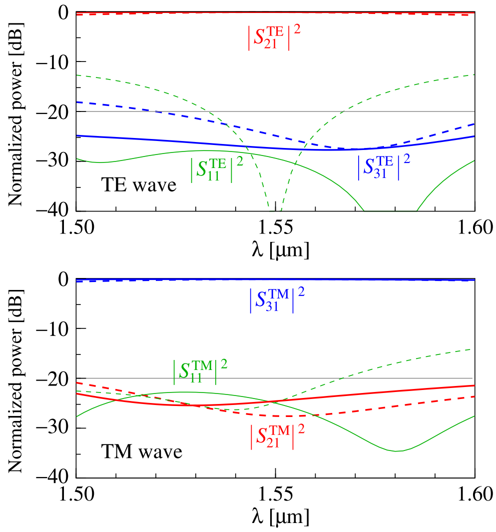
(c) 最適化構造と伝搬界分布 (左：TE 波，右：TM 波)

図 5　構造表現に標本化関数を用いたときの最適化結果 (初期構造：二分岐導波路)

Fig. 5　Topology optimization results using sampling function with 2-branching initial structure.



(a) 最適化構造と伝搬界分布 (左：TE 波，右：TM 波)



(b) 波長特性 (実線：最適化構造，破線：初期構造)

図 6　構造表現に標本化関数を用い波長平坦性を考慮したたときの最適化結果 (初期構造：図 5 (c))

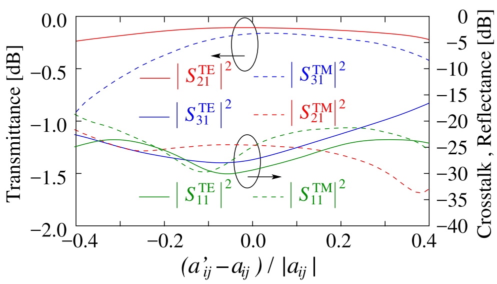
Fig. 6　Topology optimization results using sampling function considering wavelength insensitivity.

実線で，初期構造の波長特性を破線で示している．一見すると構造の変化はわかりづらいが，導波路境界形状が変化しており，透過率の波長依存性をみても波長 1.5 μm～ 1.6 μm の間で平坦な特性が実現され，設定した帯域において挿入損失 −0.031 dB 以下，クロストーク −21.5 dB，反射率 −22.8 dB 以下を実現している．

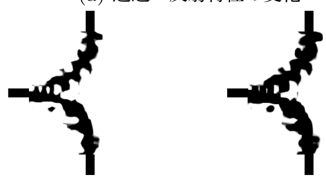
この構造の作製許容誤差に対する指針を得るために，設計パラメータ a_{ij} を a'_{ij} に変化させたときの相対変化率に対する特性の変化と相対変化率が ±0.4 のときの構造を図 7 に示す．相対変化率が負のときには導波路領域が細くなり，正のときには太くなっていることがわかる．図より，設計パラメータの相対変化率が −0.4～0.4 において透過率は −1 dB 以上，クロストーク及び反射率は −15 dB 以下であることがわかる．

3. 4　グレイ領域の設定と最適化結果

本論文では，式 (2) のグレイ領域の幅を決める t の値を最適化の反復とともに縮小することでグレイ領域を段階的に除去している．最適化において t の値を固定した場合と本手法の場合で最適化の進行と最終的に



(a) 透過・反射特性の変化



(b) 構造の変化 (左： 相対変化率 −0.4，右： 相対変化率 0.4)

図 7　設計パラメータの偏差に対する特性

Fig. 7　Tolerance for optimized design parameters.

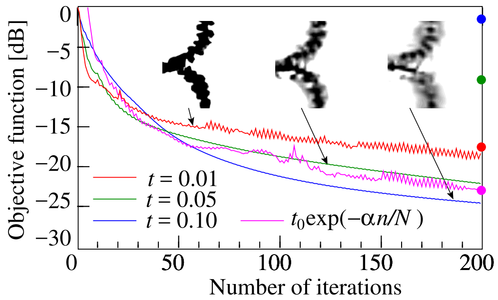


図 8　グレイ領域幅の設定による最適化結果の比較
Fig. 8　Dependence of gray setting on optimization results.

表 1　グレイ領域の除去による特性の変化
Table 1　Property degradation by eliminating gray region.

t	二値化	透過率 [dB]	XT [dB]	反射率 [dB]
0.1	前	−0.171	−19.93	−35.53
	後	−6.101	−20.96	−8.015
0.05	前	−0.171	−19.93	−35.53
	後	−1.787	−20.32	−7.620
0.01	前	−0.254	−18.19	−28.90
	後	−0.232	−18.10	−28.30
可変	前	−0.143	−27.07	−26.05
	後	−0.143	−27.07	−26.05

XT：クロストーク

得られる特性がどのように異なるかを比較する．図 5 の設計例を考え，目的関数の収束の様子を $t = 0.1$, 0.05, 0.01 に固定した場合と比較し図 8 に示す．図には，200 回目に得られた 2 値化前の構造を示し，$t \to 0$ として 2 値化したときの目的関数の値を図の右側に丸で示している．グレイ領域を広く取る方が目的関数の収束は滑らかであるが，2 値化したときに特性が大きく劣化している．表 1 に 2 値化前後での透過率，クロストーク，反射率の具体的な値を示す．t を段階的に小さくした場合には 2 値化してもほとんど特性の劣化せず，2 値化した場合まで考えると t を段階的に縮小した場合が最も特性が良いことがわかる．

4. む す び

二次元光導波路に対する関数展開法に基づくトポロジー最適化を用いて，偏波依存デバイスの最適設計について検討を行い，TE 波と TM 波の特性を同時に最適化できることを示した．最適化構造が複雑化することを避けるため，関数展開法により局所化された標本化関数を用いることで，得られる最適化構造を大幅に単純化できることを示した．実際の作製を考えたときには屈折率分布の最小線幅を考慮することも必要であるが，今回の設計ではそこまでは考慮していない．構造平滑化 [11] などによる最小線幅を考慮した最適設計については今後検討する予定である．また，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,” IEEE 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] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 辻 寧英，“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，” 信学論（C），vol.J100-C, no.2, pp.53–60, Feb. 2017.

[14] 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.

[15] Y. Tsuji and M. Koshiba, “Finite element method using port truncation by perfectly matched layer boundary conditions for optical waveguide discontinuity problems,” J. Lightwave Technol., vol.20, no.3, pp.463–468, March 2002.

（平成 28 年 8 月 31 日受付，12 月 21 日再受付，
29 年 4 月 12 日公開）

千田　宏幸　（学生員）

平 27 室蘭工大・情報電子卒．同年同大学院博士前期課程入学，現在に至る．光デバイスの最適設計に関する研究に従事．

辻　　寧英　（正員）

平 3 北大・工・電子卒．平 5 同大大学院修士課程了．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授，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 Millenium Medal 受賞．応用物理学会，IEEE，OSA 各会員．

佐藤　慎悟　（正員）

平 14 室蘭工大・工・電気電子卒．平 16 同大大学院修士課程了．平 19 同博士課程了．同年釧路高専・電子講師．平 22 北見工大・工・電気電子助教．平 24 室蘭工大・工・情報電子助教．現在に至る．周期構造に関する研究に従事．博士 (工学)．OSA, IEEE 各会員．