



## ビーム伝搬解析と随伴変数法による感度解析を用いた非線形光学デバイスのトポロジー最適設計に関する検討

メタデータ	言語: ja 出版者: 電子情報通信学会 公開日: 2018-07-04 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, 全光型デバイス キーワード (En): 作成者: 森, 洸遥, 辻, 寧英 メールアドレス: 所属: 室蘭工業大学
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00009656">http://hdl.handle.net/10258/00009656</a>

ビーム伝搬解析と随伴変数法による感度解析を用いた非線形光学デバイス  
のトポロジー最適設計に関する検討森 洗遥<sup>†a)</sup> 辻 寧英<sup>†b)</sup>A Study on Topology Optimization of Nonlinear Optical Device Using Beam  
Propagation Method and Sensitivity Analysis Based on Adjoint Variable MethodKoyo MORI<sup>†a)</sup> and Yasuhide TSUJI<sup>†b)</sup>

あらまし Kerr型非線形媒質を用いた光デバイスは、光による高速な光制御を行うことが可能であるため、全光型ネットワークの重要な素子である光スイッチや光論理ゲートを実現するため盛んに研究が行われている。しかしながら非線形媒質では、通常の線形デバイスの設計理論を直接応用できない場合も多く、汎用的で効率的な設計法が求められている。本論文では伝搬解析手法に有限差分ビーム伝搬法、感度解析に随伴変数法を用いたトポロジー最適設計法をKerr型非線形媒質を含む場合に拡張し、光スイッチ及び全光型論理ゲートの最適設計に関する検討を行っている。

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、全光型デバイス

## 1. ま え が き

近年、情報通信サービスが急速に普及しており、通信の高速、大容量化が求められている。従来の光ネットワークの中継ノードにおいては、電子回路によるルータが使用されており光ファイバで伝送されてきた光信号を一度電気信号に変換し、ルーティング処理を施した後、再度光信号に変換し、選択されたノード出力に伝送される。そのため、電気信号への変換及び電気的処理速度によるボトルネックが存在し、光信号を光のまま処理する全光型ネットワークの実現が重要となってきた。全光型ネットワークの実現のためには、電子処理に依存していた波長変換、ラベル認識やノードにおける信号切り替えを光信号のみで実現する必要があり、高速処理が可能な全光型デバイスの開発が求められている。これらの全光型デバイスとしては、非線形媒質を用いた研究が盛んに行われている[1]~[7]。非線形媒質で生じる非線形効果のうち、光Kerr効果

は光強度によって屈折率が変化する現象である。この効果を利用すると光により光を直接制御することが可能となるため、これを応用した光スイッチ素子[1]~[3]や、光論理ゲート[5]~[7]が数多く提案されている。しかしながら非線形デバイスは線形デバイスとは異なり、重ね合わせの理が成り立たず入射光強度により特性が変化するなど、線形光デバイスの設計理論を直接応用できない場合も多く、汎用的で効率的な設計法が求められている。

これまで光デバイスの設計は、既存のデバイス構造の改良や発見的な方法により行われてきたが、近年の計算機シミュレーション技術の発展と計算機の高速大容量化に伴って、計算機にデバイス構造を考えさせる自動最適設計法の研究が盛んに行われている[8]~[12]。自動最適設計法は、目的とする特性を与えることでそれを実現するデバイス構造を自動的に発現させ、既存の概念では考えつのが困難である新しい構造を見出す可能性がある。本論文では、光デバイスの解析法としては、計算効率の点から有用であるビーム伝搬法(Beam Propagation Method: BPM)[13]~[15]、感度解析には随伴変数法(Adjoint Variable Method: AVM)を用いた最適設計法[12]を、Kerr型非線形媒質が含まれる問題へと拡張し、全光型デバイスの最適

<sup>†</sup> 室蘭工業大学大学院情報電子工学系専攻、室蘭市

Division of Information and Electronic Engineering, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran-shi, 050-8585 Japan

a) E-mail: 17043055@mmm.muroran-it.ac.jp

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

設計に関する検討を行っている。

## 2. 解析手法

本章では、デバイスの特性解析に用いている有限差分ビーム伝搬法 (Finite Difference BPM: FD-BPM) [13], [14] 及び, Kerr 型非線形媒質への拡張について簡単に示す。

### 2.1 有限差分ビーム伝搬解析

図 1 に示すような  $x$  方向には一様な二次元光導波路を考え、光の伝搬方向は  $z$  方向とする。このときマクスウェル方程式から 2 次元光導波路解析のための波動方程式は以下のように書ける。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( p \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( p \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + k_0^2 q \Phi = 0 \quad (1)$$

ここに  $k_0$  は自由空間波数であり、 $\Phi$ ,  $p$ ,  $q$  は, TE 波, TM 波に対してそれぞれ

$$\begin{aligned} \Phi &= E_x, \quad p = 1, \quad q = n^2 && \text{for TE modes} \\ \Phi &= H_x, \quad p = 1/n^2, \quad q = 1 && \text{for TM modes} \end{aligned}$$

で与えられる。 $E_x$ ,  $H_x$  はそれぞれ電界及び磁界の  $x$  成分,  $n$  は屈折率を表す。

ここで適当な参照屈折率  $n_0$  を用いて、電磁界振幅  $\Phi$  を,  $z$  方向に伝搬定数  $\beta_0 = k_0 n_0$  で定常伝搬する項と、緩慢変化する包絡線振幅  $\phi$  の積として

$$\Phi(y, z) = \phi(y, z) \exp(-jk_0 n_0 z) \quad (2)$$

のように表し、式 (1) に代入しフレネル近似を用いることで以下のビーム伝搬解析のための基本式を得る。

$$\begin{aligned} -j2pk_0 n_0 \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left( p \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \\ + k_0^2 (q - pn_0^2) \phi = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) の微分項に対して、差分法を適用することにより、ビーム伝搬解析では最終的に以下の逐次計算を行うことになる。

$$[A(\phi_{j+1})]_j \{\phi\}_{j+1} = [B(\phi_j)]_j \{\phi\}_j \quad (4)$$

ここに  $[A(\phi_{j+1})]_j$ ,  $[B(\phi_j)]_j$  は横方向の離散化により得られる演算子行列であり、電磁界振幅に依存する。 $j$  は  $z$  方向のステップ番号を表している。

### 2.2 非線形媒質への拡張

Kerr 型非線形媒質の屈折率は電界振幅の 2 乗に依

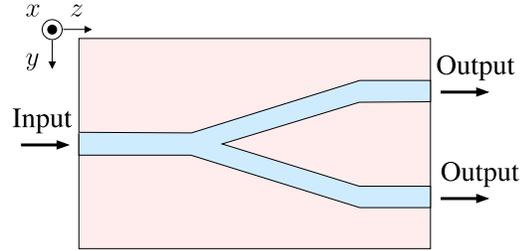


図 1 二次元光導波路  
Fig. 1 Two-dimensional optical waveguide.

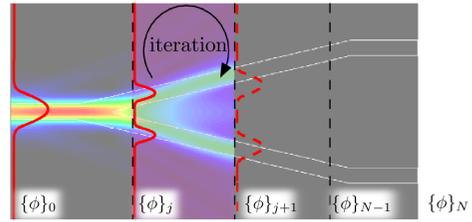


図 2 非線形解析のためのステップ内での反復改良  
Fig. 2 Iterative scheme within single step propagation for nonlinear analysis.

存して変化し、TE 波の場合以下のように表される。

$$\begin{aligned} n &= n_0 + \frac{1}{2} cn_0 n_2 \varepsilon_0 |\phi|^2 \\ &= n_0 + n_2 I \end{aligned} \quad (5)$$

ここに  $n_0$  は線形屈折率,  $n_2$  は非線形屈折率,  $c$  は光速,  $\varepsilon_0$  は真空中の誘電率,  $I$  は光強度である。

非線形媒質は光強度によって屈折率が変化するが、式 (4) の  $[A(\phi_{j+1})]_j$  の評価の際に  $\phi_{j+1} \simeq \phi_j$  と伝搬前の界分布で近似すると、伝搬方向のステップ幅  $\Delta z$  を十分に短く取らなければ解析精度の劣化が生じる問題がある [16]。トポロジー最適設計では、最適化の過程で伝搬解析を繰り返し行う必要があるため、 $\Delta z$  を短く取ると計算量は膨大なものになってしまう。そのため、 $\Delta z$  伝搬の中で反復法を適用することで通常の線形媒質の場合と同程度の  $\Delta z$  でも十分な精度が得られるように改良を行っている。図 2 に反復法の様子を示す。式 (4) の逐次計算をステップ間で繰り返し行うことで、屈折率近似の精度を保っている。本論文ではステップ間の反復の回数を、文献 [16] で示されているソリトン波が斜めに伝搬する問題の解析を行い、 $\Delta z = 0.4 \mu\text{m}$  で解析精度が十分であった 3 回としている。文献 [16] は広角ビーム伝搬に対応するため 2 階微分項を漸化式で扱うパテ近似が用いられているが、

このソリトン波伝搬の例ではソリトン伝搬角は6度程度と小さく2階微分項を無視するフレネル近似の結果とパテ近似の結果は良く一致していた。本論文で扱うデバイスは伝搬角度が十分に小さいため、フレネル近似を採用している。

### 3. トポロジー最適設計手法

トポロジー最適設計では適当な初期構造を与え、特性解析と構造の更新を繰り返すことで最適な構造を得る。本研究では構造表現には**3.1**で説明する密度法を用い、特性解析には前章で述べたFD-BPMを用いる。特性を改善するための構造の更新のためには、設計パラメータの変化に対する特性の変化を知るための感度解析が必要であり、この感度解析には**3.2**で説明するAVMを用いる。屈折率分布の更新は、この感度に基づき最大勾配法により設計パラメータを最適化することで行う。

#### 3.1 密度法

最適設計を行うために、最適化領域内の屈折率分布を幾つかの数値パラメータで表現する必要がある。ここでは2媒質(屈折率が $n_a = n_{a0} + n_{a2}I$ ,  $n_b = n_{b0} + n_{b2}I$ )問題を対象とするが、最適化過程においては、**3.2**で述べる感度の計算を行うため屈折率が $n_a$ から $n_b$ まで連続的に変化するようにする。差分法で離散化したときの $y, z$ 方向のステップ番号を $i, j$ とし、設計領域内の節点 $(i, j)$ における屈折率 $n_{ij}$ を密度パラメータ $\rho_{ij}$ で表現する。屈折率 $n_{ij}$ は、 $\rho_{ij} = 0$ のとき $n_a$ 、 $\rho_{ij} = 1$ のとき $n_b$ となるように、以下の式で表されるものとする。

$$\begin{aligned} n_{ij} &= n_{0,ij} + n_{2,ij}I \\ n_{0,ij}^2 &= n_{a0}^2 + (n_{b0}^2 - n_{a0}^2)H(\rho_{ij}) \\ n_{2,ij} &= n_{a2} + (n_{b2} - n_{a2})H(\rho_{ij}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$H(\rho_{ij}) = \begin{cases} \frac{1}{2}(2\rho_{ij})^m & (0 \leq \rho_{ij} < \frac{1}{2}) \\ 1 - \frac{1}{2}(2 - 2\rho_{ij})^m & (\frac{1}{2} \leq \rho_{ij}) \end{cases}$$

ここに $H(\rho_{ij})$ はヘビサイド関数であるが、密度パラメータでの微分を可能とするため、 $0 \leq \rho_{ij} \leq 1$ の範囲で連続的に変化するようにしている。このとき、 $0 < \rho_{ij} < 1$ のときに $n_{ij}$ は $n_a$ と $n_b$ の間の中間的な値をとり、その領域はグレイ領域と呼ばれる。このグレイ領域はペナルティ係数 $m$ の値によって制御できる。 $m$ の値を大きくとることによりグレイ領域を縮小できるが、最適化の初期段階から $m$ の値を大きく設

定すると導波路境界の感度だけが高くなり、最適化が進まない場合がある。このため、本論文では最適化の反復とともに $m$ の値を1から64まで線形に増加させている。また、最適設計後に残っているグレイ領域を密度パラメータの値が0.5以上かそれ未満かで二値化して、材料の屈折率を $n_a$ 若しくは $n_b$ にする。

#### 3.2 非線形媒質の場合の随伴変数法に基づく感度解析

BPMによる光導波路解析では、式(4)の逐次計算式を解く。以下に密度法を用いたときの具体的な計算式を導く。各離散点での密度パラメータは $\rho_{ij}$ であり目的関数 $C$ は規格化透過パワー $|S_{n1}|^2$ を用いて表せるとする。このとき、 $\rho_{ij}$ に対する規格化透過パワーの感度は

$$\frac{\partial |S_{n1}|^2}{\partial \rho_{ij}} = \text{Re} \left\{ 2S_{n1}^* \frac{\partial S_{n1}}{\partial \rho_{ij}} \right\} \quad (7)$$

と書ける。ここに、\*は複素共役を示す。 $S_{n1}$ は基本モードの透過振幅係数であり、モードの規格化直交関係から以下のように書ける。

$$\begin{aligned} S_{n1} &= \int \psi_n^* \phi_N dy = \int p \phi_n^* \phi_N dy \\ &= \{g_n\}^T \{\phi\}_N \end{aligned} \quad (8)$$

ここに $\psi_n$ は、 $n$ 番ポートの基本モードフィールドであり、TE波では基本モード電界 $\phi_n$ に対する磁界、TM波では磁界 $\phi_n$ に対する電界に対応する規格化フィールドを表している。 $\{g_n\}$ の具体的な表現は、FD-BPMを用いる場合には

$$\{g_n\} = \Delta y \{\psi_n^*\} = p \Delta y \{\phi_n^*\} \quad (9)$$

である[12]。ここに $\Delta y$ は、 $y$ 方向のステップ幅を表し、 $p$ は式(1)で定義されている。また $\{\phi\}_N$ は、ビーム伝搬解析したときの出力端での界振幅を表しており、式(4)より

$$\{\phi\}_N = \left\{ \prod_{j=0}^{N-1} ([A]_j^{-1} [B]_j) \right\} \{\phi\}_0 \quad (10)$$

と書ける。式(10)を式(8)に代入すると

$$\begin{aligned} S_{n1} &= \{g_n\}^T [A]_{N-1}^{-1} [B]_{N-1} \cdots [B]_0 \{\phi\}_0 \\ &= \{\lambda_n\}_j^T [B]_j \{\phi\}_j \end{aligned} \quad (11)$$

と書ける。ここに

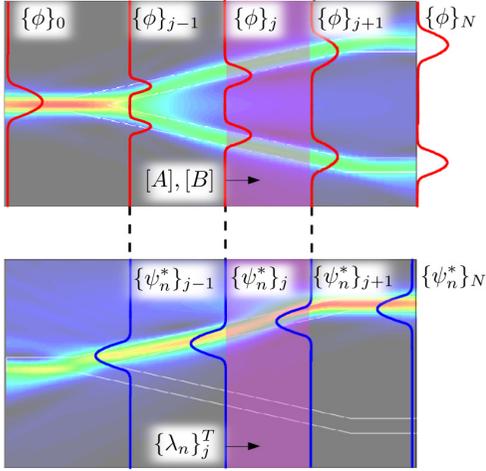


図3 随伴変数法による感度解析

Fig. 3 Sensitivity analysis by adjoint variable method.

$$\{\lambda_n\}_j^T = \{g_n\}^T [A]_{N-1}^{-1} [B]_{N-1} \cdots [B]_{j+1} [A]_j^{-1} \quad (12)$$

であり、随伴変数を表している。また  $\{\lambda_n\}_j$  は、次の随伴方程式を解くことによって求めることができる。

$$[A]_j^T \{\lambda_n\}_j = [B]_{j+1}^T \{\lambda_n\}_{j+1} \quad (13)$$

$\rho_{ij}$  に依存する項は  $[A]_j$ ,  $[B]_j$  のみであるので、最終的に  $S_{n1}$  に対する感度は、式 (11) を  $\rho_{ij}$  で微分することにより、以下の式で求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{n1}}{\partial \rho_{ij}} &= \frac{\partial \{\lambda_n\}_j^T}{\partial \rho_{ij}} [B]_j \{\phi\}_j + \{\lambda_n\}_j^T \frac{\partial [B]_j}{\partial \rho_{ij}} \{\phi\}_j \\ &= \{\lambda_n\}_j^T \left( -\frac{\partial [A]_j}{\partial \rho_{ij}} \{\phi\}_{j+1} + \frac{\partial [B]_j}{\partial \rho_{ij}} \{\phi\}_j \right) \end{aligned} \quad (14)$$

この感度解析の様子を図3に示す。出力端から  $\{\psi_n^*\}$  を逆伝搬させながら  $\{\phi\}$  との間で式 (14) を計算することで、密度パラメータに対する感度を知ることができる。波面整合法では、出力端から理想フィールドを逆伝搬させ、理想の出力波形が得られるように各点で波面整合するように屈折率が調整される。これに対してAVMでは各出力ポートのパワーを直接目的関数にできる。また、目的関数の直接微分による感度解析では設計パラメータ数を  $N$  としたとき  $2N+1$  回の伝搬解析が必要となるが、AVMでは一つの目的関数に対して計2回の伝搬解析で全ての設計パラメータに対

する感度を効率良く計算できる。

非線形デバイスの解析では行列  $[A]_j$ ,  $[B]_j$  は光強度に依存する。出力ポートが複数存在する場合には個々のポートの出力波形をそれぞれ別々に逆伝搬する必要がある。このとき順方向伝搬と同じように逆伝搬中の界分布を用いて非線形効果を見積もると他のポートへ出力される光波による屈折率変化を見積もれないことになる。ここでは、逆方向伝搬の際の非線形効果は順方向伝搬光により考慮することとしている。実際には、 $(i, j)$  番目の屈折率が変化するとそれ以降の光強度分布が変化するが、ここではその効果は小さいとして無視している。

### 3.3 屈折率分布の更新方法

本研究では、密度パラメータの更新方法として最大勾配法を用いている。ここでは、密度パラメータベクトルを  $\rho = \{\rho_{11}, \rho_{12} \cdots \rho_{N_y N_z}\}^T$  として次式により密度パラメータの更新を行う。

$$\rho^{\text{post}} = \rho^{\text{pre}} + \alpha \times (-\nabla_\rho C) \quad (15)$$

ここに  $\rho^{\text{pre}}$ ,  $\rho^{\text{post}}$  はそれぞれ更新前と更新後の密度パラメータベクトル、 $\nabla_\rho$  は各密度パラメータに対する勾配を表す演算子、 $C$  は目的関数である。また  $N_y$ ,  $N_z$  はそれぞれ設計領域内の  $y$  方向、 $z$  方向の格子点の数を表している。密度パラメータの更新の大きさは比例係数  $\alpha$  によって決まる。本論文では、 $\alpha$  を次のように設定する。

$$\alpha = \frac{C_{\text{opt}} - C}{\|\nabla_\rho C\|} \delta \quad (16)$$

ここに  $C_{\text{opt}}$  は目的関数  $C$  の目標値、 $\|\nabla_\rho C\|$  は最大勾配方向ベクトル  $\nabla_\rho C$  のノルム、 $\delta$  は経験的に決める定数であり4.の各数値計算例において具体的な値を示す。 $\alpha$  を式 (16) のように設定するのは、 $C$  が  $C_{\text{opt}}$  に近づくとつれて移動量が小さくなるようにするためである。

### 3.4 構造平滑化フィルタ

トポロジー最適設計では、その自由度の高さから微細な構造が現れる場合がある。本論文では最適化構造単純化のために、 $3 \times 3$  のカーネルをもつ加重移動平均フィルタを用いている。フィルタ適用後の密度パラメータ  $\tilde{\rho}_{ij}$  は、適用前の密度パラメータ  $\rho_{ij}$  と周辺八つの密度パラメータを用いて以下のように与えられる。

$$\tilde{\rho}_{ij} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 w_{mn} \rho_{(i+m)(j+n)} \quad (17)$$

$$w_{mn} = \frac{1}{W+8} \times \begin{cases} W & (m=n=0) \\ 1 & (m \neq 0 \text{ or } n \neq 0) \end{cases}$$

式 (17) は、注目している密度パラメータの周囲 8 点との間で密度パラメータ値を重み付け平均して平滑化を行うことを表している。また  $W$  の大きさを調整することで、平滑化の強さを制御することができ、本論文では、 $W = 5$  としている。

#### 4. 全光型デバイスの最適設計例

##### 4.1 光スイッチ

図 4 に示す二次元設計モデルを考え、入射光パワーによって出力を切り替える光スイッチを設計する。材料パラメータを、 $n_a = n_{a0} + n_{a2}I$ ,  $n_{a0} = 1.57$ ,  $n_{a2} = 1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $n_b = 1.55$ , 構造パラメータを、 $L = 200 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $l = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $w = 2.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $s = 10 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $d = 20 \text{ }\mu\text{m}$  とする。また波長  $1.30 \text{ }\mu\text{m}$  の TE 基本モードが入射する場合を考え、差分法の離散化を  $\Delta y = 0.1 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\Delta z = 0.3 \text{ }\mu\text{m}$  とする。入射光パワーが  $P_{\text{low}} = 10 \text{ W/m}$  のときに port 2 へ、 $P_{\text{high}} = 30 \text{ W/m}$  のときに port 3 へ出力されるように設計領域内の構造を最適化する。目的関数  $C$  はクロストークを考慮して次式のように設定する。

$$C = C_{\text{low}} + C_{\text{high}}$$

$$C_s = \sum_{n=2}^3 (P_{n,s}^{\text{opt}} - |S_{n1}^{P_s}|^2)^2 \quad (s = \text{low, high})$$

ここに  $P_{n,s}$  は  $P_s$  入射に対する  $n$  番ポートへの目標規格化出力であり、 $(P_{2,s}^{\text{opt}}, P_{3,s}^{\text{opt}})$  は  $s = \text{low}$  のとき  $(1, 0)$ ,  $s = \text{high}$  のとき  $(0, 1)$  である。また  $C_s$  の計算で電力差の 2 乗をとっているのは、目標値との差が大きいものほどより特性を改善するためである。

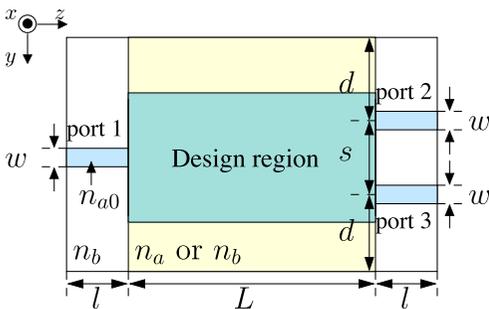


図 4 光スイッチの設計モデル  
Fig. 4 Design model of optical switch.

最適化の反復回数を 2000 回とし、構造平滑化フィルタを反復 10 回ごとに適用する。また、式 (16) 中の  $\delta$  は  $\delta = 3.0$  としている。最適化過程における出力パワーの変化を図 5 に示す。図より、反復とともに特性が改善していることがわかる。図 6 に初期構造と最適

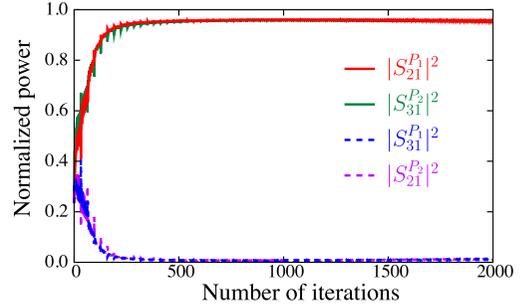
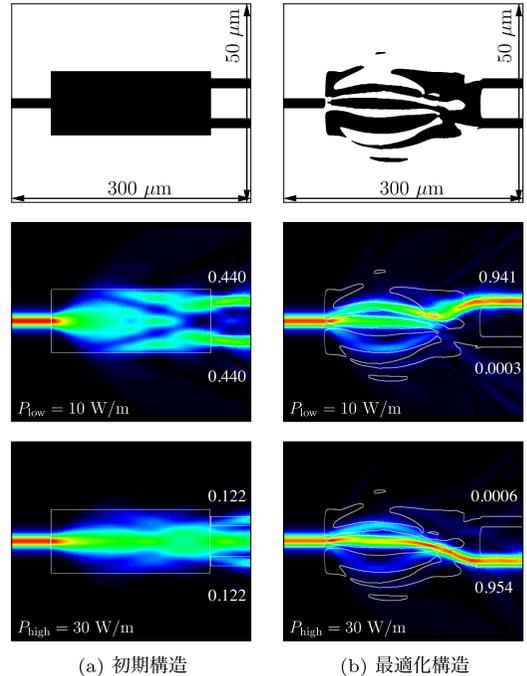


図 5 光スイッチの最適設計過程における出力パワーの変化  
Fig. 5 The normalized output power of the optical switch as a function of the number of iterations.



(a) 初期構造 (b) 最適化構造  
図 6 光パワーによる光スイッチの最適化結果 (上段から、構造と各入射光パワーのときの伝搬界分布)

Fig. 6 Optimization result of optical switch by optical power. (From the top, the structure, the propagation field distribution at each incident light power.)

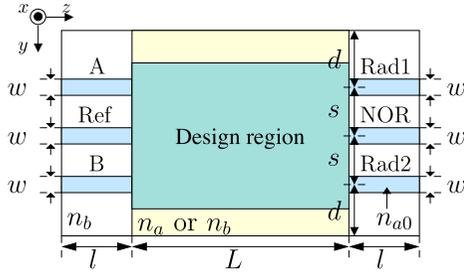


図7 全光型 NOR ゲートの設計モデル  
Fig. 7 Design model of all-optical NOR gate.

表1 全光型 NOR ゲートの真理値表  
Table 1 Truth table of all-optical NOR gate.

Input side			Output side		
$P_{\text{Ref}}$	$P_A$	$P_B$	$P_{\text{NOR}}^{\text{opt}}$	$P_{\text{Rad1}}^{\text{opt}}$	$P_{\text{Rad2}}^{\text{opt}}$
1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	2
1	1	0	0	2	0
1	1	1	0	1.5	1.5

( $P_{\text{in}}$  での規格化パワー)

化構造及びそれらに対する光の伝搬の様子を示す。初期構造では対称な出力であるが、最適化構造では目的ポートへの透過率 94%、消光比  $-32.0$  dB 以上の特性が得られている。光の伝搬を見ると、入射光が幾つかの導波路に分かれて伝搬し、パワーに依存して異なる位相差を受けることで出力導波路が切り替わるように見える。

#### 4.2 全光型 NOR ゲート

図7に示す設計モデルを考え、全光型 NOR ゲートの設計を行う。材料パラメータ及び入射波長と入射モードは前小節と同じとし、構造パラメータを、 $L = 300 \mu\text{m}$ ,  $l = 50 \mu\text{m}$ ,  $w = 2.5 \mu\text{m}$ ,  $s = 10 \mu\text{m}$ ,  $d = 15 \mu\text{m}$  とし、差分法の離散化を  $\Delta y = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $\Delta z = 0.4 \mu\text{m}$  とする。また、各ポートの入射光パワー  $P_{\text{in}}$  は  $15 \text{ W/m}$  とし、入出力は  $P_{\text{in}}$  で規格化して表す。入出力ポートと NOR ゲートの対応を表した真理値表を表1に示す。A, B で記したポートを論理ゲートの入力ポートとし、Ref と記したポートは論理 00 のときに出力 1 を実現するために、常時光を入射しておくポートとする。Rad1, Rad2 は、不要な光パワーを逃す放射ポートとする。目的関数は、表1で示した特性を実現するため、次式のように設定する。

$$C = 2 \times C_{00} + C_{10} + C_{11}$$

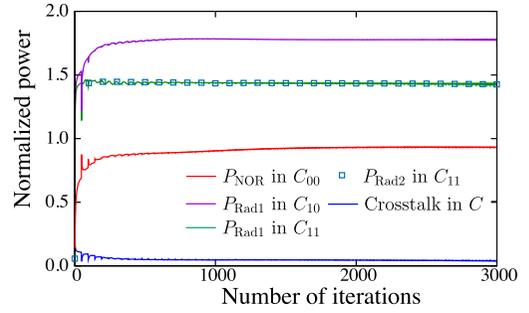
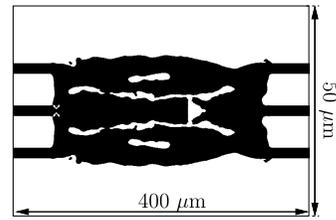
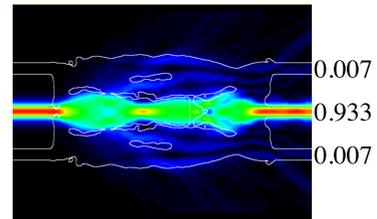


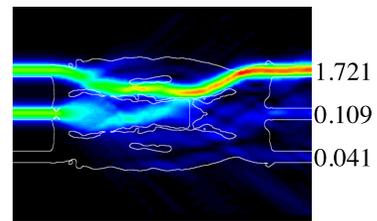
図8 全光型 NOR ゲートの最適化過程における出力パワーの変化  
Fig. 8 The normalized output power of all-optical NOR gates as a function of the number of iterations.



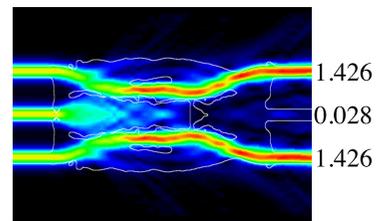
(a) 最適化構造



(b) 論理 00



(c) 論理 10



(d) 論理 11

図9 全光型 NOR ゲートの最適化結果  
Fig. 9 Optimization result of all-optical NOR gate.

$$C_{AB} = \sum_X (P_{X,AB}^{\text{opt}} - P_{X,AB})^2$$

( $X = \text{NOR, Rad1, Rad2}$ )

ここに、 $C_{AB}$  は論理 AB を実現するための目的関数である。 $P_{X,AB}$  は、AB 入力の際の  $X$  ポートの規格化出力を表し、また、 $y$  方向に対称条件を課すことで論理 10 と論理 01 は同時に実現される。

最適化の反復回数を 3000 回、 $\delta = 2.0$  とし、構造平滑化フィルタを反復 10 回ごとに適用する。最適化過程における出力パワーの変化を図 8 に示す。図中の Crosstalk は、NOR ポートの最大クロストークを示している。図より反復とともに特性が改善していることがわかる。図 9 に最適化構造及び光の伝搬の様子を示す。最適化構造では、NOR 出力 93%以上、消光比  $-9.33$  dB 以上の特性が得られている。クロストークが大きいように見えるが、実際には出力 50%を判定しきい値に設定すれば誤りなく判定可能である。またこの素子の多段接続は、二段まで可能である。

## 5. む す び

FD-BPM と AVM を組み合わせた自動最適設計法を Kerr 型非線形媒質が含まれる場合に対して拡張を行った。拡張した設計法を用いて、入射光パワーの違いにより出力を切り替える光スイッチ及び全光型 NOR ゲートの設計を行い、Kerr 型非線形媒質が含まれる場合に対しても自動最適設計が可能であることが確かめられた。AVM による感度解析では入出力ポート数、透過率を任意に設定できるため、他の論理ゲートを含む様々な非線形光学デバイスについても適用可能だと考えられる。しかしながら、論理ゲートのように同時に実現すべき特性が多い場合には、大域的な最適解ではなく局所解に陥りやすく、一般に解探索が難しくなるため、今後は大域的な解探索の手法の検討も含めて他の論理ゲートの設計を行っていく予定である。

## 文 献

- [1] Y. Wu and M. Huang, "All-optical switch based on the local nonlinear Mach-Zehnder interferometer," *Opt. Express*, vol.15, no.16, pp.9883–9892, Aug. 2007.
- [2] S. Karimi, M.E. Heidari, and F. Forootan, "Design and modelling of a  $1 \times N$  all-optical nonlinear Mach-Zehnder switch controlled by wavelength and input power," *PIER M.*, vol.28, pp.101–113, Jan. 2013.
- [3] G. Berrettini, G. Meloni, A. Bogoni, and L. Poti, "All-optical  $2 \times 2$  switch based on Kerr effect in highly nonlinear fiber for ultrafast applications," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.18, no.23, pp.2439–2441, Nov. 2006.
- [4] E. Yaghoubi, L.A. Bakhtiar, A. Adami, S.M. Hamidi, and M. Hosseinzadeh, "All optical OR/AND/XOR gates based on nonlinear directional coupler," *J. Opt.*, vol.43, no.2, pp.146–153, June 2014.
- [5] Y.H. Pramono, M. Geshiro, T. Kitamura, and S. Sawa, "Optical logic OR-AND-NOT and NOR gates in waveguides consisting of nonlinear material," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E83-C, no.11, pp.1755–1762, Nov. 2000.
- [6] Z.F. Chaykandi, A. Bahrami, and S. Mohammadnejad, "MMI-based all-optical multi-input XOR and XNOR logic gates using nonlinear directional coupler," *Opt. Quantum. Electron.*, vol.47, no.11, pp.3477–3489, Nov. 2015.
- [7] K. Li, H. Ting, M.A. Foster, and A.C. Foster, "High-speed all-optical NAND/AND logic gates using four-wave mixing Bragg scattering," *Opt. Lett.*, vol.41, no.14, pp.3320–3323, July 2016.
- [8] 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.
- [9] A. Tetu, M. Kristensen, L.H. Frandsen, A. Harpøth, P.I. Borel, J.S. Jensen, and O. Sigmund, "Broadband topology-optimized photonic crystal components for both TE and TM polarizations," *Opt. Express*, vol.13, no.21, pp.8606–8611, Oct. 2005.
- [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] 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.
- [12] 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.
- [13] Y. Chung and N. Dagli, "An assessment of finite difference beam propagation method," *IEEE Quantum Electron.*, vol.26, no.8, pp.1335–1339, Aug. 1990.
- [14] J. Yamauchi, S. Harada, S. Kobori, and H. Nakano, "Semivector finite-difference formula for the analysis of a step-index waveguide with a tilted interface," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.21, no.24, pp.1867–1869, Dec. 2009.
- [15] Y. Tsuji and M. Koshiba, "A finite element beam

propagation method for strongly guiding and longitudinally varying optical waveguides,” J. Lightwave Technol., vol.14, no.2, pp.217–222, Feb. 1996.

- [16] T. Yasui, M. Koshiba, and Y. Tsuji, “A wide-angle finite element beam propagation method with perfectly matched layers for nonlinear optical waveguides,” J. Lightwave Technol., vol.17, no.10, pp.1909–1915, Oct. 1999.

(平成 29 年 8 月 30 日受付, 12 月 22 日再受付,  
30 年 4 月 11 日公開)



森 洸遥 (学生会員)

平 29 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. 光導波路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.