

機械学習設計技術による量子情報通信向け SiN 導波路光パワー分岐素子の研究

代表研究者

藤澤 剛

法政大学 理工学部 教授

1 研究概要

量子情報通信用光回路を構成する光ユニタリ変換素子において必要となる、低損失光パワー分岐素子の研究を行う。量子光源等、他の素子との一括集積が可能な SiN 導波路を用いて、独自の機械学習設計技術により、低損失、強波長・製造トレランスを有する光パワー分岐素子の研究を行う。

2 研究背景

量子光技術は室温での実験が可能なることから、超電導などを用いた他の技術に比べ、消費電力の観点から魅力的であり、これまで主にバルクの光学系を用いた実験が行われてきた。それに対し、システムのスケール拡大の容易さから、量子演算処理を、光集積技術を用いた一つのチップ上で実現する研究が検討され始めている。特に、導波路に Si を用いた Si フォトニクスによる集積回路は、他の要素との一括集積が可能であり大きな注目を集めている[1]。しかし、光集積回路に用いられている構成要素は原理確認のためのシンプルなものであり、損失低減や製造トレランスの強化などに大きな課題がある。

量子演算処理の最も基本的な単位は 2×2 のユニタリ変換器であり、導波路型光集積回路では、図1に示すようなマッハツェンダー干渉計(MZI)により実現される。MZIは図に示すように、二つの3dBスプリッタと、その間のアーム導波路からなる。ここで3dBスプリッタには、二つの導波路を近接させる、方向性結合器を用いている。この素子の最初の3dBスプリッタに、図のように単一光子を同時入射すると($|1\rangle + |1\rangle$)、量子干渉により出力のどちらかの導波路から2光子が出射される($|0\rangle + |2\rangle$ or $|2\rangle + |0\rangle$)。これはHOM干渉[2]と呼ばれ、量子情報処理の最も基本的な量子干渉現象である。HOM干渉をMZI中で使用し、さらにMZIを多段に集積することで、様々な量子演算が実行可能になる。そのためには高度に制御されたMZIが必要となり、構成要素の3dBスプリッタでは、正確に50:50に光を分岐する必要がある。しかし、次項で示すように、従来素子には損失や製造トレランスにおいて難点があり、多数のMZIを集積する際、各素子の特性ばらつきを補償するための、調整電極によるキャリブレーションが必要で、高密度集積の妨げになっていた。

本研究では、MZIの3dBスプリッタについて、従来のSi導波路ではなく、SiN導波路を用いることで材料の低損失化、独自の機械学習技術設計による素子の低損失化、製造トレランス強化を図り、キャリブレーションフリー光波回路の実現を目標とする。

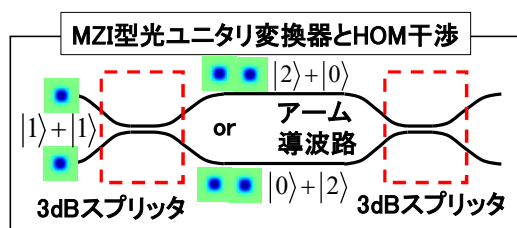


図1 2×2 ユニタリ変換器

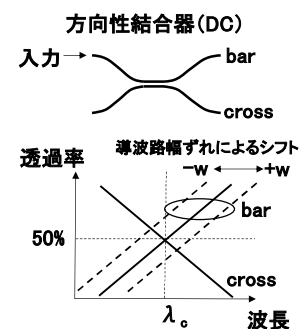


図2 従来スプリッタ（方向性結合器）の問題点

3 SiN 導波路を用いた 3dB パワースプリッタ

3-1 従来素子の問題点と本研究のターゲット

MZI を構成する 3dB スプリッタには、図 1 に示したような方向性結合器 (DC) が広く用いられる。方向性結合器では、導波路が近接した部分の長さ (結合長) を適当に調整することで、入力した光を **bar**、**cross** ポートに 50:50 で分配することができるが、DC はその動作原理から、3dB 分岐されるのはある特定の波長 (λ_c) のみであり、その波長からずれると、3dB 分岐ではなくなってしまう (図 2 実線)。また、製造トレランスにも弱く、導波路幅が理想値からずれると特性がシフトし (図 2 破線、 $\pm w$)、所望の波長 λ_c での分岐比が 50% からずれ、位相調整が必須となる。また、Si 導波路では、材料自体の損失も大きく、量子光回路の大規模化が困難であった。

よって、量子光回路の大規模化には、1) 材料に由来する損失低減、2) 素子自体の損失低減、製造トレランス強化が必要になる。1) は、SiN 導波路を用いて、より低損失な光回路を構成することが可能なが知られている。2) については、Si、SiN 導波路ともに、従来構造を超える素子が強く望まれている。こうした素子の設計には、いわゆる逆設計が有用であり、機械学習技術等に基づく各種技法により、人間のマニュアル設計ではとりつけないような複雑な形状を自動設計することで、目的の素子を実現できる可能性がある。研究代表者らはこれまで、独自の機械学習技術設計法を開発し、各種の独自 Si 導波路素子を実現してきた[3,4]。本研究では、随伴変数法による光波回路形状最適化技術[5]を用いて、上記目的 2) を達成し、人間のマニュアル設計を超える SiN 導波路素子を創出することを目的とする。具体的に、方向性結合器型パワースプリッタを対象として、特に波長依存性を低減した光分岐素子の検討を行った。

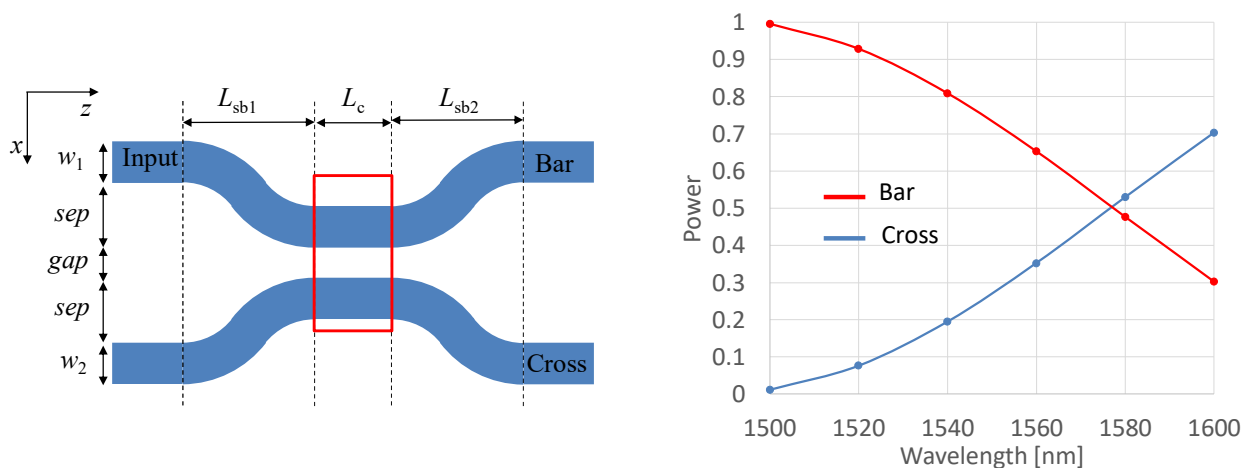


図 3 (左) 方向性結合器の模式図、(右) 初期構造の透過スペクトル

3-2 方向性結合器型 SiN3dB パワースプリッタ

図 3 に SiN を用いた DC の、上面図を示す。2 入力、2 出力の回路であり、中央の結合部(赤四角部)に、S ベンド導波路を介して、4 本の導波路が接続されている。ここで、 $w_1 = w_2 = 1000 \text{ nm}$ とし、S ベンド導波路部は、 $L_{sb1} = L_{sb2} = 100 \text{ }\mu\text{m}$ とし、曲げ半径が $500 \text{ }\mu\text{m}$ となるように $sep = 5 \text{ }\mu\text{m}$ とした。結合部の導波路間ギャップは、 $gap = 400 \text{ nm}$ とし、結合部の長さ L_c を可変にして、3dB 分岐する中心波長を、通信波長帯の 1550 nm 付近にするための設計を行った。図 3 右に、 $L_c = 70 \text{ }\mu\text{m}$ の場合の、DC の透過スペクトルを示す。ここで、入力導波路 (Input) と同じ側の出力導波路への出力パワーを **Bar**、逆側の出力導波路への出力パワーを **Cross** としている。初期構造では波長依存性が大きく、等分岐する波長は 1575 nm 付近の一点しかないことがわかる。この構造を初期構造として、随伴変数法により導波路外形の最適化を行う。

随伴変数法では、導波路設計を行う領域の誘電率 (ここでは屈折率の 2 乗) の分布に関して、目的とする性能を誘電率で微分し、目的関数に対する勾配から、設計領域の誘電率を勾配法により最適化していく [5]。そのため、光集積回路においては、コア、クラッドの 2 材料に対する誘電率しか本来は存在しないが、その間の値を連続にとり、微分可能とし、最終的に 2 値化することで形状の最適設計を行う。具体的に、設計領域の誘電率分布を、

$$n^2(x, z) = n_2^2 + (n_1^2 - n_2^2)H(\rho) \quad (1)$$

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

とあらわす。ここに n_1 、 n_2 はコア、クラッドの屈折率、 H はヘビサイド関数と呼ばれ、0～1 の値をとる。その引数 ρ も 0～1 の値をとり、設計領域の屈折率が n_1 と n_2 の間をとるように調整するパラメータで、具体的な設計対象となる。このように誘電率分布がコアとクラッドの誘電率の間の値を連続的にとるように設定することで、 ρ に関して微分可能となり、勾配計算が可能となる。 m は分布の調整パラメータであり、大きいほど、2 値化に近い分布が得られる。設計の初期段階では小さい m の値から始め、設計後期では大きくして、最終的に 2 値化する。

ここで設計する方向性結合器は、Bar、Cross ポートに所望の分岐比で光を分岐するものである。その目的関数 (FOM) は、

$$FOM = \frac{1}{N_\lambda} \sum_j \sum_i^2 |P_{opt,i}(\lambda_j) - P_{BPM,i}(\lambda_j)| \quad (3)$$

と設定することができる。ここに N_λ は計算する波長の数、 $i = \text{bar or cross}$ である。 $P_{opt,i}$ はポート i に対する目標透過率 (3dB 分岐の場合は 0.5)、 $P_{BPM,i}$ はポート i に対するビーム伝搬法 (BPM) に対する計算値である。理想的な特性となった場合、FOM は 0 となる。ここでは波長として、1500、1520、1540、1560、1580、1600 nm の 6 波長を最適化に用いた。

図 4 に、 $L_c = 70 \mu\text{m}$ の場合の、FOM の反復回数依存性を示す。振動しながらも減少している様子が確認できる。図 5 左に、最適化した結合部の導波路形状、右に透過スペクトルの計算値を示す。形状の変更には制約を課すことができるが、ここでは、DC 結合部の内側の gap 部には変更せず、外側のみを変調するという制約を課した。結合部導波路の外側が変調され、非対称構造になっていることがわかる。また、その透過スペクトルは極めて平坦になっていることがわかる。波長 1520～1560 nm に渡って、ほぼ完全な等分岐素子として動作し、波長に対して極めてトレランスの強い構造になっていることがわかる。

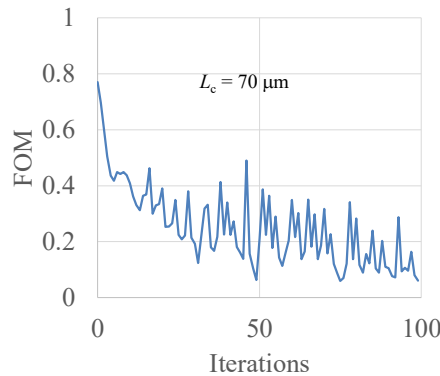


図 4 FOM の反復回数依存性

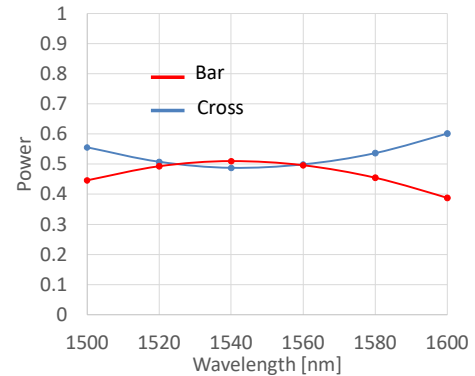
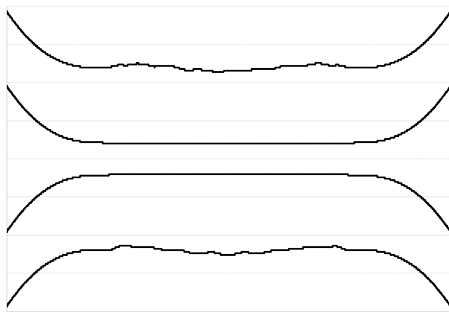
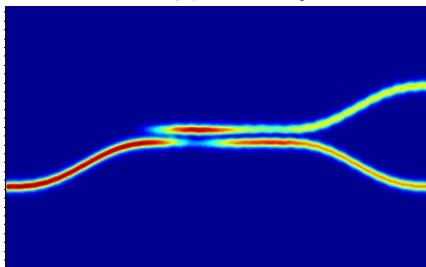
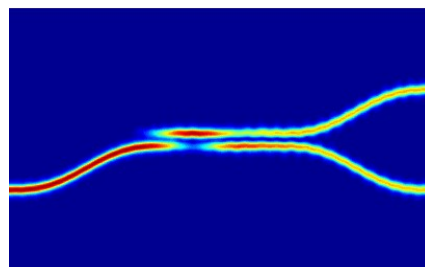


図 5 随伴変数法により最適化した DC の (左) 結合部導波路形状、(右) 透過スペクトル

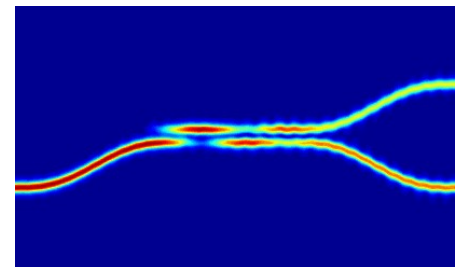
図 6 には波長 1500、1540、1600 nm の場合の界分布を示す。どの波長においても、光をほぼ等分岐できていることが確認できる。



(a) 1500 nm



(b) 1540 nm



(c) 1600 nm

図 6 最適構造の界分布

図 7 には、初期構造の結合部長を、 $L_c = 60, 80 \mu\text{m}$ とした場合の透過スペクトルを示す。初期構造を変えることで、平坦となる波長帯域の中心波長が変わっているのがわかる。また、 $L_c = 60 \mu\text{m}$ の場合には、図 5 の場合に比べ、分岐誤差（透過率 0.5 からのずれ）は大きくなっているが、分岐誤差の許容値を大きくとるならば、さらに使用帯域が拡大している。初期構造を変更することで、様々な帯域、スペクトル形状をもった方向性結合器を設計することが可能であることがわかる。

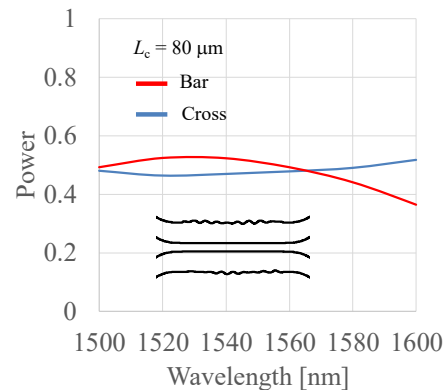
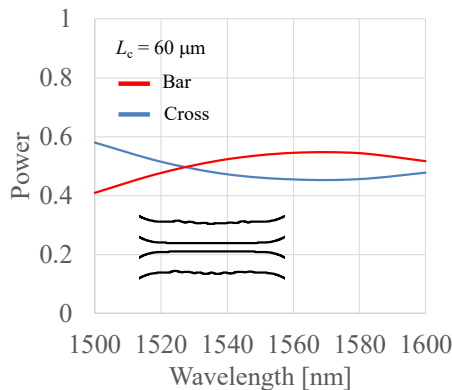


図 7 初期構造の結合部長が (左) $60 \mu\text{m}$ 、(右) $80 \mu\text{m}$ の場合の、最適化した DC の透過スペクトル

図 7 までは、二つの導波路の外側のみの形状を変更した。最適化する領域を変更することによりどんな特性が得られるかを検討する。図 8 に、下側導波路の形状は変更せず、(左) 上側導波路の両側片側、(右) 上側導波路の両側のみを最適化した場合の透過スペクトル、及び、最適化構造示す。(左) は結合部長を $L_c = 60 \mu\text{m}$ 、(右) は $L_c = 70 \mu\text{m}$ としている。どちらも、等分岐のスペクトルが得られている一方、特に、上側導波路の片側のみを最適化した場合には、導波路の凹凸が比較的大きくなっていることがわかる。これは、最適化する領域を限定することにより、より大きな導波路幅の変化が必要になったためと考えられる。このことは、導波路作製の際に、作製可能な導波路幅の凹凸に応じて、最適設計が可能であることを示している。例えば、フォトリソグラフィで作製する場合には少し大きめの凹凸が必要なのに対し、電子ビーム露光で作製する際

には、もっと小さい凹凸でも作製可能であるため、作製方法に応じた設計が可能であることを示している。

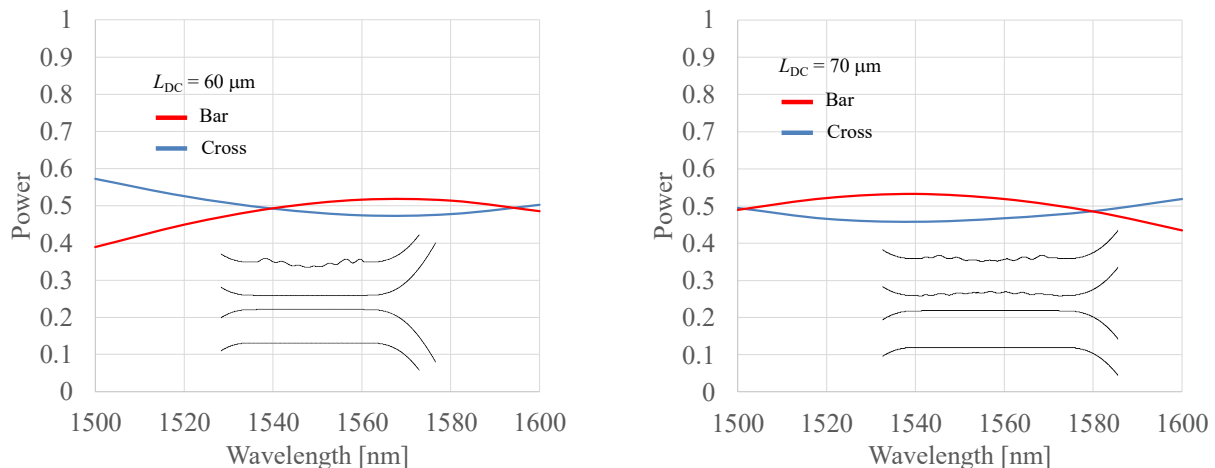


図 8 (左) 60 μm 、(右) 70 μm の場合の、最適化する領域を変更した場合の透過スペクトル

本研究の主検討対象は、3dB 分岐素子であるが、目的によっては、非対称分岐素子が求められる場合もある。方向性結合器では、結合長の調整により、任意の分岐比のカプラを構成可能であるが、等分岐素子の場合と同じく、ある波長付近でしか、その性能を達成できず、使用波長範囲が制限されるという欠点がある。本研究で開発した手法を用いて、SiN 導波路方向性結合器による、非対称分岐パワースプリッタの検討も併せて行った。

図 9 に、72:28、92:8 の分岐比で最適化した構造のスペクトルを実線にて示す。初期構造は、結合部の長さが 60 mm の通常方向性結合器であり、その特性を破線にて示す。ここでは、上側導波路の外側の外形のみを変更するように設定した。図から、初期構造の特性は、図 2 の場合と同様に非常に波長依存性が大きく、所望の分岐比を満足する波長は図内に 1 点しかないことがわかる。それに対し、本研究での随伴変数法による最適化結果は、3dB 分岐の場合と同様に、波長依存性が極めて小さく、また、目的の分岐比で分岐できていることがわかる。同図内に最適化後の構造図を示す。上側導波路の外側のみが変調されていることがわかる。3dB 分岐の場合に比べて、凹凸が大きくなっており、これは、構造を変更する領域がさらに制限されたため、より大きな形状の変更が必要になったためと考えられる。逆に言えば、形状の凹凸の大きさは最適化する領域を制限することにより調整することができる、とも言える。これらの非対称分岐素子は、本研究の目的である、量子情報通信のみならず、通常の光通信に必要な合分波デバイスなどにも用いることが可能な、非常に応用範囲の広いものとなる。

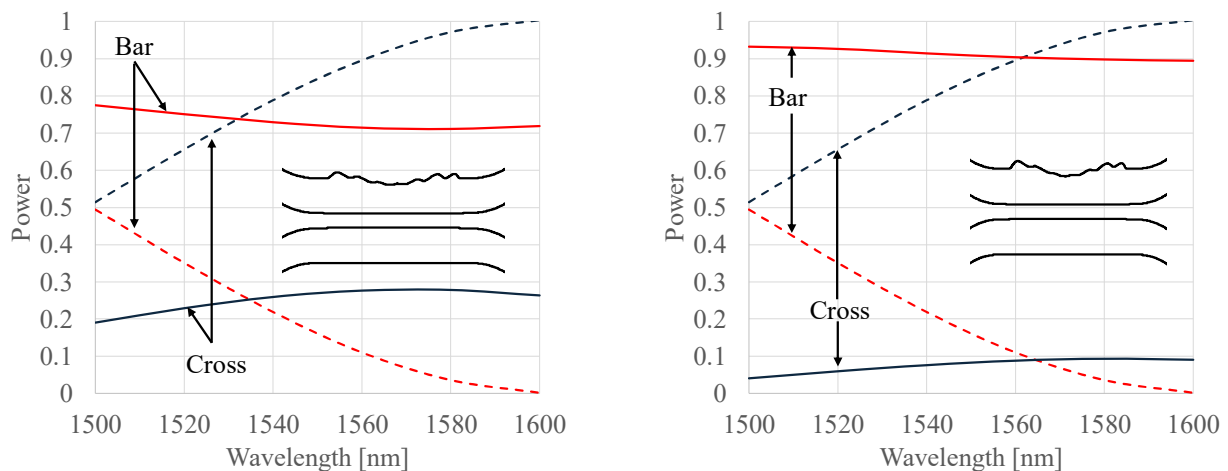


図 9 SiN 導波路型方向性結合器による (左) 72:28、(右) 92:8 の非対称分岐最適設計構造に対する透過スペクトル (実線)、および、初期構造のスペクトル (破線)。最適化構造同図内に示す。

4 まとめと今後の展望

量子情報通信用光回路を構成する光ユニタリ変換素子において必要となる、低損失光パワー分岐素子の研究を行った。Si 導波路より損失を低くできると考えられる SiN 導波路を対象とし、機械学習設計技術に基づく、人間のマニュアル設計ではたどりつけないような形状を有する光分岐素子の検討を行った。具体的に、方向性結合器を対象とし、随伴変数法による形状最適化を行うことで、等分岐する帯域を大幅に拡大した方向性結合器の形状が存在することを見出した。さらには、等分岐だけでなく、任意の非対称分岐構造も、大幅に帯域を拡大した素子形状が存在することを見出した。

今後は、さらなる性能改良を求めて、2 次元の等価屈折率設計ではなく、フルベクトル設計を行うとともに、試作により素子を実現することが課題となる。

【参考文献】

- [1] X. Qiang et al., "Large-scale silicon quantum photonics implementing arbitrary two-qubit processing," Nature Photon., 12, p534, 2018.
- [2] K. Edamatsu et al., "Measurement of the photonic de Broglie wavelength of entangled photon pairs generated by spontaneous parametric down-conversion," Phys. Rev. Lett., 89, p213601, 2002.
- [3] Y. Sawada, T. Sato, T. Fujisawa, and K. Saitoh, "Development of the wavefront matching method based on the 3-D finite-element method and its application to Si-wire mode converters", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no.17, pp.3652-3659, Sept. 2018
- [4] Y. Sawada, T. Fujisawa, T. Sato, and K. Saitoh, "Broadband silicon four-mode multi/demultiplexer designed by wavefront matching method", Optics Express, vol. 29, no. 17, pp. 27322-27331, Aug. 2021.
- [5] A. Iguchi and Y. Tsuji, "Optimal design of optical waveguide devices utilizing beam propagation method with ADI scheme," IEICE Transactions on Electronics, vol. E105-C, no. 11, pp. 644-651, Nov. 2022.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
随伴変数法により形状最適化した SiN 導波路方向性結合器型等分岐素子	電子情報通信学会総合大会	Mar. 2025
Broadband asymmetric directional coupler based on SiN waveguide designed by adjoint method	Optoelectronics and Communications Conference	July, 2025