

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01486

研究課題名(和文) 光通信伝送容量飛躍的増加のための平面光波回路型光空間状態制御デバイスに関する研究

研究課題名(英文) A research on the planar optical devices for manipulating spatial state of light for large-capacity optical communication system

研究代表者

藤澤 剛 (Fujisawa, Takeshi)

北海道大学・情報科学研究院・准教授

研究者番号：70557660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：光通信大容量化のための平面型光空間状態制御デバイスに関する研究を行った。特に石英系光波回路を用いたモード分割多重通信光デバイスを主な対象とし、申請者らが提案したスクランブル型モード合分波器について、低損失な6モード合分波器が構成可能であることを明らかにした。また、伝送路の中継点において損失や遅延の等価を行うモード交換器について、独自の設計技術である波面整合法を用いて、グレーティング型6モード交換器を考案し、実験によりその効果を実証した。さらには、上記波面整合法を回路中に不連続部がある場合にも適用できるように改良し、世界で初めての、波面整合法設計シリコン導波路型モード交換器を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モード分割多重技術は、空間分割多重技術の一つであり、光通信に残された最後の多重化軸と言われている。従来の長距離通信のみならず、データセンタ内外などあらゆるところに光ファイバ通信が用いられ、その需要が伸び続けている現在、従来と異なる多重化軸で光伝送容量を増やすことは、学術的のみならず、必ず解決しなければならない社会的課題でもある。本研究では、モード分割多重通信を実現する上で必須となる基礎光デバイスを研究、考案し、それを実験により実証した。これらの成果は将来のモード分割多重通信実現のための基礎技術となると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Optical devices for manipulating the spatial state of the light are investigated. Especially, silica-based optical devices for mode-division-multiplexed (MDM) transmission system are intensively investigated. Six-mode scrambling-type mode multiplexers with low insertion loss is proposed. For the compensation of mode dependent loss and differential group delay in the MDM system, 6-mode exchanger based on grating waveguide designed by wavefront matching (WFM) method is proposed and proof-of-concept device was successfully fabricated. Furthermore, the WFM method for the design of mode controlling devices containing waveguide discontinuities is newly developed, and ultrasmall WFM-designed Si waveguide mode exchanger was realized for the first time.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光ファイバ通信 モード分割多重 平面光波回路 シリコンフォトニクス

1. 研究開始当初の背景

近年の、クラウドサービスに代表される、データセンタ事業の爆発的需要増加を受け、センタ内、センタ間など、数 m から数十 km までの幅広い伝送距離通信の光化が急速に進んでいる。特に、LAN 系通信（イーサネット）の光化は目覚ましく、2010 年には 100 ギガビットイーサネット (100GbE) の標準化が完了し商用導入が始まる中、400GbE (<http://www.ieee802.org/3/400GSG/>)、さらには 1TbE の議論も始まっている。そのため、それら LAN 系光通信を束ねる、幹線系光通信の更なる大容量化も必須となり、ペタビットクラスの伝送容量が必要となる。しかし、現在のシングルコア単一モード光ファイバを用いて伝送することのできる情報量は、従来の時間、波長分割多重技術 (WDM) を用いた場合、光ファイバのコアへの入射光強度の物理的限界から 100Tbit/s 程度であり、従来の光通信の物理限界を打ち破り、ペタビットクラスの通信容量を実現するための研究開発が進められている。

モード分割多重技術(MDM)は、伝送路に数モードファイバを用い、伝送路の各モードに情報を載せる技術であり、波長数を増やすことなく、伝送容量を拡大することが可能であり、MDM の利用により、光通信伝送容量増大実現が期待される。MDM 通信においては、異なるモードの光を一つのファイバに合分波するモード合分波器が必要である。原理的には、各モードはモード合分波器により個別送信、受信が可能であるが、実際には、伝送路内でのモード混合の効果により、無線通信の分野で用いられる MIMO (Multiple Input Multiple Output) 受信が必要となることが多い。研究代表者らはこれを逆手にとり、送信時に信号を適度に混ぜ合わせる、スクランブル型モード合分波器を考案し、3 モードまでの原理確認を行ってきた。

今後、更なるモード多重数の増大、伝送距離の延伸が望まれている。そのためには多重モード数を増やすのはもちろんであるが、MIMO 受信を用いる場合には、各モードの伝送路上での損失が同じではないこと (モード依存損失: MDL)、また、各モードごとの群速度が異なることによる (モード間群遅延差: DGD)、受信側への信号の到着時間の違いが受信機に大きな負担を与え、MDM 伝送の伝送距離を制限するとともに、受信機の待機時間の増大による構成の複雑さ、バッファメモリのサイズ、消費電力の増大を招いている。研究代表者らは最近、この問題を解決するために、伝送路の中継点において、モード交換を行うことにより、MDL、DGD の等価を行う、モード交換器の必要性に気づき、方向性結合やモード回転を駆使した、平面光波回路型 3 モード交換器を提案・実証したが、回路構成が複雑で設置面積も大きく、多モードへの拡張が難しいという問題があった。

また、研究代表者らは、上記のデバイス研究を、石英系ファイバと親和性の高い、石英系平面光波回路 (PLC) に対して行ってきたが、導波路のコアとクラッドの屈折率差 Δ が小さいことから、デバイスのサイズが大きく、多重するモードの数が増えると、素子面積も大きくなっていく問題があった。 Δ の大きい、シリコン導波路を用いることで、石英系 PLC に比べ、そのサイズを 100 分の 1 程度に削減できるが、その大きな Δ のために、本質的に波長依存性が大きく、導波路中に存在する不連続部によって、特性が劣化する。そのため、材料限界にせまる素子性能を得るための設計技術が必要である。

2. 研究の目的

このような状況のもと、本研究では、MDM 伝送の伝送容量の飛躍的増加を実現するためのモード合分波器、モード交換器、そしてそれらの設計技術を研究対象とし、具体的に以下の研究を行った: (1) スクランブル型モード合分波器の多重数増大, (2) モード依存損失、モード間群遅延差を補償するモード交換器, (3) 光波回路中に不連続部が存在する場合にも適用可能な波面整合法の開発とシリコン素子への応用。

3. 研究の方法

前項目的(1)については、まず低損失なスクランブル型モード合分波器を構成する条件を探索する。そのうえで、6 モード以上の合分波器を構成する方法を検討する。前項目的(2)については、方向性結合器のように複数の導波路を必要とせず、単一の導波路でモード交換が可能なグレーティング型 6 モード交換器を検討する。前項目的(3)については、いかなる導波路材料、構造にも適用可能なフルベクトル有限要素法を用いた、フルベクトル波面整合法によるモード制御光波回路最適設計技術を新規開発し、それをシリコン導波路型モード制御素子へ応用する。

4. 研究成果

(1) スクランブル型モード合分波器の多重数増大

スクランブル型モード合分波器 (以下、モードスクランブラ) について、まず、どのような場合に、低損失な構成が可能であるかを検討した。スクランブル型モード合分波器においては、MIMO 受信を前提として、出射時に各モードを混ぜ合わせるため、単純な挿入損失だけではなく、回路の伝達行列の特異値の最大、最小値の比から得られる MDL も同時に評価する必要がある。MDL は特定のモードの損失のみが大きい (もしくは小さい) ときに大きくなるため、全モ

ードの損失を平均化することが必要となる。これに対し、図 1 左に、本研究で考える 2 モードスクランブラの上面図を示す。2 入力 1 出力の Y 分岐導波路からなり、出口導波路（システム）には、同図右に示すような断面図を有するモード回転子が装荷されていても良い。どちらかの入力導波路から入力された E_{11} モードは、Y 分岐部において損失がない場合、 E_{11} モードと E_{21} モードを 50%づつ励振する。これが 2 モードスクランブラの動作である。システムにおいて、モード回転子が装荷されている場合は、励振された E_{21} モードは E_{12} モードに変換され、 E_{11} モードは影響を受けない。次に、同図右に示すような、2 モードスクランブラを縦列接続した 4 モードスクランブラを考える。一つの入力導波路から入力された E_{11} モードは、最初の 2 モードスクランブラにおいて、 E_{11} モードと E_{12} モードを 50%づつ励振する。二つ目のモードスクランブラでは、50%の E_{11} モードは E_{11} モードと E_{21} モードを 25%づつ励振する。また、50%の E_{12} モードは E_{12} モードと E_{22} モードを 25%づつ励振し、出口導波路において、 E_{11} , E_{12} , E_{21} , E_{22} モードが 25%づつ励振される理想的な 4 モードスクランブラとして動作する。同様にして、8、16 モードスクランブラを構成可能であり、多重するモード数が 2^N の場合には、常に低損失、低 MDL のモード合波が可能であることを明らかにした。

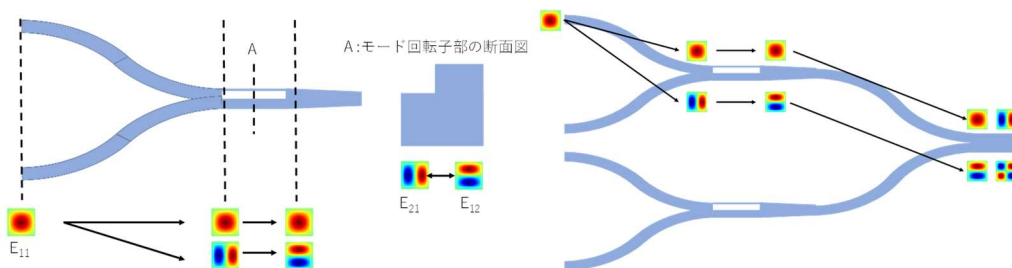


図 1 (左) 2 モードスクランブラの構造図、及び、動作原理
(右) 4 モードスクランブラの構造図、及び、動作原理

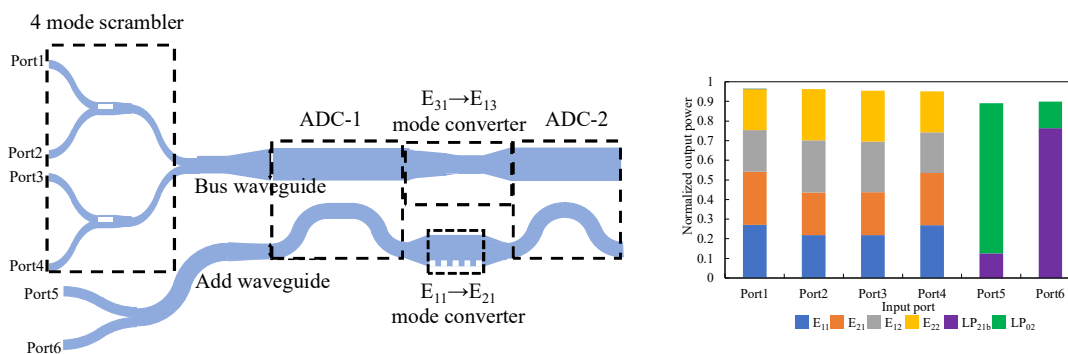


図 2 4+2=6 モードスクランブラの (左) 構造図と (右) 透過特性

ファイバ中のモード数は、偏波に対する縮退を除くと、1, 3, 6, 10 と不連続に変化し、モード数が 2^N にはならない。そこで、すでに原理確認済みの 3 モードスクランブラから多重数を増やした 6 モードスクランブラを検討した。図 2 左に本研究で考案した 6 モードスクランブラの上面図を示す。4 つの入力 (Port1~4) を有する 4 モードスクランブラ部と、二つの入力 (Port5, 6) をもつ 2 モードスクランブラを入力としてもち、2 モードスクランブラからの入力を非対称方向性結合器 (ADC) 等を通して合波する構造となっている。ADC-1,2 はアッド導波路の E_{21} モードがバス導波路の E_{31} モードとして合波されるように設計されている。ここで 4 モードスクランブラでは、図 3 に示すように、 E_{11} , E_{12} , E_{21} , E_{22} モードを励振し、その出力はバス導波路を通して、そのまま出力される。Port5, もしくは 6 から入力された光は、図 5 に示すように、2 モードスクランブラにおいて、 E_{11} モードと E_{21} モードを 50%づつアッド導波路に励振する。次に、ADC-1 において、励振された E_{21} モードを E_{31} モードとして、バス導波路に合波する。合波された E_{31} モードは $E_{31} \rightarrow E_{13}$ モード変換器において E_{13} モードに変換され、ADC-2 では結合せず、そのまま出力される。一方、2 モードスクランブラにおいて励振された、50%の E_{11} モードは ADC-1 では結合せず、アッド導波路を伝搬し、 $E_{11} \rightarrow E_{21}$ モード変換器において E_{21} モードに変換され、ADC-2 において、 E_{31} モードとしてバス導波路に合波され出射する。4 モードスクランブラの出射と合わせて、 E_{11} , E_{12} , E_{21} , E_{22} , E_{31} , E_{13} の 6 モードをスクランブル合波する。この構成では、モード多重数が 2^N であるときは常に低損失な合波が可能であることを生かし、4+2=6 構成のモードスクランブラとしている。図 2 右に 4+2=6 モードスクランブラの透過特性を示す。横軸は入力ポート、縦軸は出力モードパワーとそのモード内訳を示す。Port1~4 入力に対しては、 E_{11} , E_{12} , E_{21} , E_{22} モードがほぼ均等に励振されている。また、Port5, 6 入力に対しては、 LP_{21b} , LP_{02} モードが対称的に励振されているのがわかる。系全体の MDL は 0.48 dB であり、非常に MDL の小さい 6 モードスクランブラが構成可能であることを明らかにした。

(詳細は M. Shirata et al., Optics Express, 2020 を参照)

(2) モード依存損失、モード間群遅延差を補償するモード交換器

以前研究代表者らが提案した 3 モード交換器 (文献①) は方向性結合やモード回転を駆使した、平面光波回路型のものであったが、回路構成が複雑で設置面積も大きく、多モードへの拡張が難しいという問題があった。そこでここでは、より単純な構造で、モード数の拡張が容易と考えられるグレーティング型の 6 モード変換器を検討した。本研究では、マニュアル設計の限界を打破し、究極の導波路構造を得るために、機械学習に基づく最適設計法を用いた。具体的に、スカラビーム伝搬法 (BPM) に基づく波面整合 (WFM) 法によるグレーティングライクな 6 モード交換器の検討を行った。WFM 法は光波回路の損失低減に有効な、自動最適化手法の一つであり、研究代表者らはこれまで、WFM 法を用いて石英系導波路を用いた、各種のモード分割多重通信用光波回路を開発してきた。図 3 (左) に WFM 法により設計されたグレーティングライクな形状を有する 6 モード交換器の導波路外形を示す。グレーティングライクな導波路部に、マニュアル設計ではたどりつくことが困難な複雑な形状が形成されていることがわかる。同図右に、この導波路の出力特性を示す。(LP₀₁→LP₀₂)、(LP_{11a}→LP₀₁)、(LP_{11b}↔LP_{21a})、(LP_{21b}→LP_{11a}, LP_{21b})、(LP₀₂→LP_{11a}, LP_{21b}) の複雑なモード混合が低損失に行われている。図 4 左に、このモード交換器におけるモード遷移図を示す。

全長 150 km の数モードファイバ (FMF) による信号伝送を考え、150 km の間に N 回のモード交換を行うことを考える (その際、各セグメントのファイバ長は 150/(N+1) km となる)。ファイバ中の LP₀₁, LP_{11a}, LP_{11b}, LP_{21a}, LP_{21b}, LP₀₂ モードの損失は典型的な値として、0.15, 0.18, 0.18, 0.2, 0.2, 0.23 dB/km とした。このときの、システム全体の MDL の交換回数依存性を図 4 右に示す。交換により、MDL が減少し、交換回数 3 回で、MDL は 4dB 弱となり、交換しない場合に比べて、8dB もの MDL 減少が可能であることがわかる。本素子も実際に試作し、MDL の測定を行った。図 5 に測定系を示す。まず、PLC モジュールがない場合の MDL をレファレンス値として測定する。次に、FMF 間に単純な直線導波路の PLC モジュール、そして、6 モード交換器を有する PLC モジュールを挿入し、それぞれの MDL を測定し、レファレンス値に対する差分を測定した。その結果、モード交換を行わない直線導波路の PLC モジュールを挿入した際のレファレンスに対する MDL は 2.7dB、6 モード交換器の PLC モジュールを挿入した際のレファレンスに対する MDL は 1.9dB となり、モード交換による MDL の減少を実験により実証した。

(詳細は T. Fujisawa et al., OFC2020, Th1A.5, 2020 を参照)

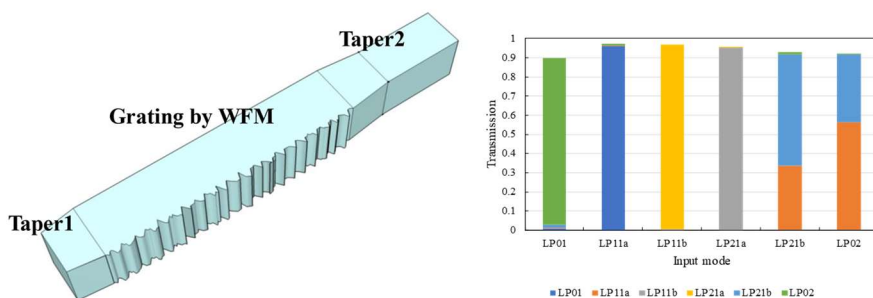


図 3 (左) WFM 法により設計された 6 モード交換器と、(右) その透過特性

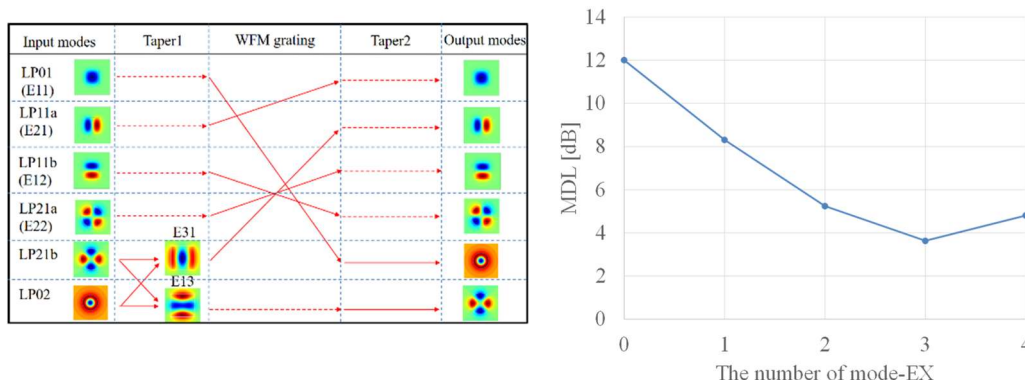


図 4 (左) WFM 法設計 6 モード交換器のモード遷移図と、(右) MDL の交換回数依存性

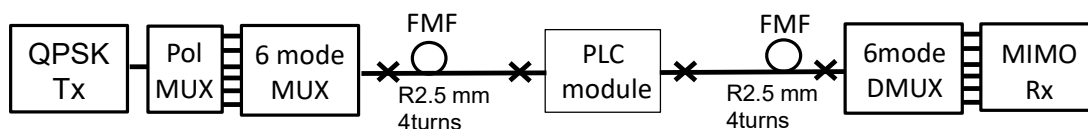


図 5 MDL の測定系

(3) 光波回路中に不連続部が存在する場合にも適用可能な波面整合法の開発とシリコン素子への応用（詳細は雑誌論文番号??を参照）

(1)、(2)で取り扱った、石英系光波回路による PLC は、光ファイバとの親和性が高いという利点がある半面、 Δ が小さいため（通常 1%程度）回路サイズが大きくなってしまいうという問題がある。それに対し、シリコン導波路では、 Δ が 40%と桁違いに大きいことから、光波回路の大きさを、石英系に比べ、100 分の 1 程度に縮小することができ、回路サイズの低減、高密度集積に優れている。しかし、その大きな Δ ゆえに、本質的に波長依存性、散乱損失が大きい。これだけであれば、石英系光波回路の開発に用いてきた、BPM に基づいた WFM 法を用いて、最適設計が可能であるが、シリコン導波路では、導波路の不連続部が存在するとき（例えば、図 9 に示すようなグレーティング導波路）、そこで反射を含む放射光が発生する。これは、BPM では取り扱うことができないため、BPM に基づく WFM 法で、シリコン導波路デバイスの最適設計をすることは難しい。そこで本研究では、不連続部を有する光波回路に適用可能な WFM 法を新たに開発した。具体的に、系に反射点を含む、いかなる導波路形状、材料にも適用可能な、フルベクトル有限要素法（FEM）を用いて、フルベクトル WFM 法の開発に成功した。

フルベクトル WFM 法では、まず入力光と、所望の出力光を設定する。今の場合、入力光はシリコン導波路の基本モードである TE0 モード、そして、所望の出力光を第 1 高次モードである TE1 モードとする。そして、回路の初期形状を設定する。ここでは簡単のため、単純な直線導波路とした。フルベクトル FEM を用いて、(A) 入力光を入射導波路から入射したときの電磁界分布、及び、(B) 所望の出力光を出射導波路から逆入射したときの電磁界分布を、フルベクトル FEM により算出する。このとき、フルベクトル FEM を用いるので、回路の中に、反射点や不連続部があっても構わない。(A)、(B) より、結合効率を算出し、WFM 法のアルゴリズムに従って、屈折率分布を更新し、収束するまで、この手順を続ける。

図 6 左上にフルベクトル WFM 法により設計された 2 モード交換器の導波路外形を示す。初期構造の直線導波路から、周期的な凹凸を有するグレーティングライクな導波路に自動設計されていることがわかる。同図に、この導波路構造に TE0 モードを入射した場合の磁界分布を示す。一山の TE0 モードが二山の TE1 モードに変換されていることがわかる。本設計構造を CMOS ファウンダリーにおいて試作した。試作素子の顕微鏡写真を同図左下に示す。同図右に 2 モード交換器の透過スペクトルの計算値（破線）、測定値（実線）を示す。ここに、Trans は TE0 から TE1 に変換された成分、XT は変換されなかった成分を示す。測定値と計算値は非常によく一致しており、効率的なモード変換が行われていることが確認できる。なお、WFM 法によって設計されたシリコン導波路素子の実現はこれが世界で初めてのものである。

（詳細は Y. Sawada et al., Optics Express, 2021 を参照）

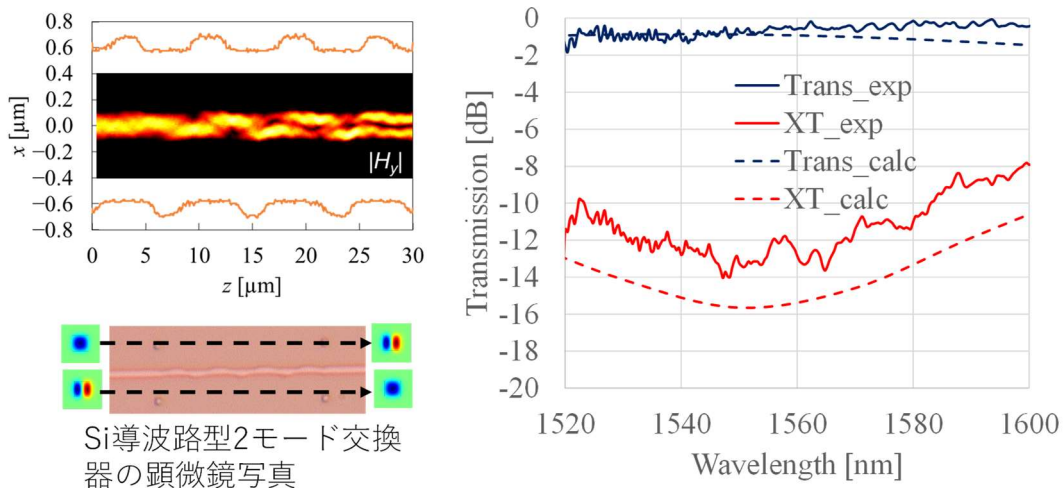


図 6 (左上) フルベクトル WFM 法により設計された 2 モード交換器の導波路外形と磁界分布、(左下) 試作したシリコン導波路型 2 モード交換器の顕微鏡写真と (右) 透過スペクトルの計算値、測定値

<引用文献>

- ① T. Fujisawa, E. Taguchi, T. Sakamoto, T. Matsui, Y. Yamashita, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "One chip, PLC three-mode exchanger based on symmetric and asymmetric directional couplers with integrated mode rotator", Optical Fiber Communication Conference (OFC 2017), W1B.2, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 T. Fujisawa, Y. Yamashita, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh	4. 巻 36
2. 論文標題 Scrambling-type three-mode PLC multiplexer based on cascaded Y-branch waveguide with integrated mode rotator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 1985,1992
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Ohta, T. Fujisawa, S. Makino, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh	4. 巻 26
2. 論文標題 Si-based Mach-Zehnder wavelength/mode multi/demultiplexer for a WDM/MDM transmission system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 15211,15220
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 E. Taguchi, T. Fujisawa, Y. Yamashita, S. Makino, N. Hanzawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, F. Yamamoto, and K. Saitoh	4. 巻 E101-C
2. 論文標題 A review on PLC-based two-mode multi/demultiplexer designed by wavefront matching method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 518,526
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Sawada, T. Sato, T. Fujisawa, and K. Saitoh	4. 巻 36
2. 論文標題 Development of the wavefront matching method based on the 3-D finite-element method and its application to Si-wire mode converters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 3652,3659
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Akie, T. Fujisawa, T. Sato, M. Arai, and K. Saitoh	4. 巻 24
2. 論文標題 GeSn/SiGeSn multiple-quantum-well electroabsorption modulator with taper coupler for mid-infrared Ge-on-Si platform	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics	6. 最初と最後の頁 3400208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Kudo, S. Ohta, E. Taguchi, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh	4. 巻 433
2. 論文標題 Proposal of Mach-Zehnder mode/wavelength multi/demultiplexer based on Si/Silica hybrid PLC platform	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 168,172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujisawa T., Arai M., Saitoh K.	4. 巻 27
2. 論文標題 Microscopic gain analysis of modulation-doped GeSn/SiGeSn quantum wells: epitaxial design toward high-temperature lasing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 2457 ~ 2457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.002457	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sato Takanori, Fujisawa Takeshi, Saitoh Kunimasa	4. 巻 11
2. 論文標題 All-Optical Diode Suppressing Broadband Backward Transmission Using Single- and Four-Port Photonic Crystal Cavities	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JPHOT.2018.2888632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sawada Yusuke, Fujisawa Takeshi, Sato Takanori, Saitoh Kunimasa	4. 巻 16
2. 論文標題 CMOS-compatible Si-wire polarization beam splitter based on wavelength-insensitive coupler	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 20181126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.16.20181126	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujisawa Takeshi, Takano Junya, Sawada Yusuke, Sakamoto Taiji, Matsui Takashi, Nakajima Kazuhide, Saitoh Kunimasa	4. 巻 27
2. 論文標題 A novel Si four-wavelength multiplexer for 100/400GbE using higher-order mode composed of (a)symmetric directional couplers and TE1-TM0 mode converter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 36286 ~ 36286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.036286	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shirata Motoki, Fujisawa Takeshi, Sakamoto Taiji, Matsui Takashi, Nakajima Kazuhide, Saitoh Kunimasa	4. 巻 28
2. 論文標題 Design of small mode-dependent-loss scrambling-type mode (de)multiplexer based on PLC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 9653 ~ 9653
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.387890	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sawada Yusuke, Fujisawa Takeshi, Saitoh Kunimasa	4. 巻 28
2. 論文標題 Broadband and compact silicon mode converter designed using a wavefront matching method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 38196 ~ 38196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.411769	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fujisawa Takeshi、Takano Junya、Sawada Yusuke、Saitoh Kunimasa	4. 巻 39
2. 論文標題 Low-Loss and Small 2 × 4 Multiplexers Based on 2 × 2 and 2 × 1 Mach-Zehnder Interferometers With On-Chip Polarization Multiplexing for 400GbE	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 193 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2020.3025369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Kodai、Fujisawa Takeshi、Sakamoto Taiji、Matsui Takashi、Nakajima Kazuhide、Saitoh Kunimasa	4. 巻 38
2. 論文標題 Tunable broadband mode power dividers based on a wavelength-insensitive coupler using the thermo-optic effect for flexible modal power adjustment in a mode-division multiplexing network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 946 ~ 946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.415499	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計49件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 22件)

1. 発表者名 Y. Sawada, T. Sato, T. Fujisawa, and K. Saitoh
2. 発表標題 A Broadband Silicon Two-Mode Multiplexer Designed by Wavefront Matching Method
3. 学会等名 OptoElectronics and Communications Conference (OECC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh
2. 発表標題 PLC-based Mode Controlling Devices for Mode-Division-Multiplexing
3. 学会等名 OptoElectronics and Communications Conference (OECC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Takano, T. Sato, Y. Sawada, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh
2 . 発表標題 Proposal of Si Four-Wavelength Multiplexer using Higher-Order Mode for 100GbE
3 . 学会等名 OptoElectronics and Communications Conference (OECC) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Takano, T. Fujisawa, T. Sato, Y. Sawada, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh
2 . 発表標題 Low-loss and Fabrication-tolerant Si Four-wavelength Multiplexer Using Higher-order Mode for 100/400GbE
3 . 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (OFC) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Sawada, T. Fujisawa, T. Sato, and K. Saitoh
2 . 発表標題 First Experimental Demonstration of Wavefront-matching-method-designed Silicon Mode Converters
3 . 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (OFC) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Kudo, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh
2 . 発表標題 A Broadband Mode Divider with Arbitrary Branching Ratio Based on Wavelength-insensitive Coupler
3 . 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (OFC) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Fujisawa, M. Arai, and K. Saitoh
2 . 発表標題 Microscopic Gain Analysis of Modulation-Doped GeSn Quantum Well: Epitaxial Design toward High-Temperature Lasing
3 . 学会等名 15th International Conference on Group IV Photonics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Fujisawa, M. Arai, and K. Saitoh
2 . 発表標題 Epitaxial design of GeSn quantum wells for optoelectronic applications
3 . 学会等名 2019 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Shirata, M. Kudo, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh
2 . 発表標題 A Design of Low MDL Scrambling-type PLC 6-mode Multiplexer
3 . 学会等名 Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Sugawara, M. Kudo, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh
2 . 発表標題 3-Mode PLC-Based Mode Dependent Loss Equalizer in MDM Transmission
3 . 学会等名 Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Sato, T. Fujisawa, and K. Saitoh
2 . 発表標題 Ultra-Robust Design of Mode (De)Multiplexer Based on Asymmetrical Directional Coupler Using Wire and One-Side Rib Waveguides
3 . 学会等名 Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Sawada, T. Fujisawa, and K. Saitoh
2 . 発表標題 Fabrication of Ultrasmall Silicon Waveguide Lenses Designed by Wavefront-Matching Method
3 . 学会等名 16th International Conference on Group IV Photonics (GFP) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Shirata, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Nakajima, and K. Saitoh
2 . 発表標題 A design of PLC-based 6-mode exchanger in mode division multiplexed transmission
3 . 学会等名 IEEE Photonics Conference (IPC 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Shirata, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Nakajima, and K. Saitoh
2 . 発表標題 A Broadband PLC-type Mode Converter Designed by Wavefront Matching Method
3 . 学会等名 The 24th Microoptics Conference (MOC2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Takano, T. Fujisawa, Y. Sawada, and K. Saitoh
2. 発表標題 Low-loss silicon 2×4 multiplexers composed of on-chip polarization-splitter-rotator and 2×2 and 2×1 Mach-Zehnder filters for 400GbE
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (OFC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Fujisawa, T. Sakamoto, M. Miyata, T. Matsui, T. Hashimoto, R. Kasahara, K. Nakajima, and K. Saitoh
2. 発表標題 Wavefront-matching-method-designed six-mode-exchanger based on grating-like waveguide on silica-PLC platform
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (OFC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Nakamura, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Nakajima, and K. Saitoh
2. 発表標題 A tunable mode divider based on wavelength insensitive coupler using thermo-optic effect for gain-equalization in MDM network
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (OFC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Sawada, T. Fujisawa, and K. Saitoh
2. 発表標題 Experimental Demonstration of Broadband Silicon Mode Converter Designed by Wavefront-Matching Method
3. 学会等名 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Y. Sawada, T. Fujisawa, and K. Saitoh
2 . 発表標題 Broadband Design of Silicon Photonics Four-Mode (de)Multiplexer by Wavefront Matching Method
3 . 学会等名 2020 Advanced Photonics Congress (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 N. Sugawara , T. Fujisawa, K. Nakamura, Y. Sawada, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Nakajima, and K. Saitoh
2 . 発表標題 Mode Amplitude and Phase Estimation using Multimode NFP by ANN
3 . 学会等名 Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 T. Fujisawa and K. Saitoh
2 . 発表標題 Ultrasmall two-mode dividers based on mosaic structure designed by direct-binary-search algorithm aided by artificial neural network
3 . 学会等名 Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 N. Sugawara , T. Fujisawa, K. Nakamura, Y. Sawada, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Nakajima, and K. Saitoh
2 . 発表標題 Mode amplitude and phase estimation of NFP of six-mode FMF based on artificial neural network with the help of grey-wolf-optimizer
3 . 学会等名 46th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 白田幹、工藤未彩、藤澤剛、坂本泰志、松井隆、辻川恭三、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 低MDL6モードスクランブル型PLCモード合分波器の設計
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤田祐甫、佐藤孝憲、藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 波面整合法設計モード変換器の試作
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原直人、工藤未彩、藤澤剛、坂本泰志、松井隆、辻川恭三、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 3モードPLC型MDL等化器の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤澤剛、坂本泰志、松井隆、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 広帯域TE0-TE1モードディバイダの作製と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 ニューラルネットワーク、ベイズ推定による光デバイスの特性学習の比較
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 最適化手法を用いた空間分割多重通信向け光導波路デバイスの研究
3. 学会等名 第152回微小光学研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤未彩、太多惇、藤澤剛、坂本泰志、松井隆、辻川恭三、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 WINC型3dBモードディバイダに基づく広帯域マッハ・ツェンダー型モード合分波器
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白田幹、工藤未彩、藤澤剛、坂本泰志、松井隆、辻川恭三、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 低MDL 4モードスクランブル型PLCモード合分波器の設計
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤田祐甫、佐藤孝憲、藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 波面整合法設計による広帯域シリコン4モード合分波器の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原広紫、澤田祐甫、藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 波面整合法設計による高トレランス、2 μm 帯Siモード合分波器の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤晋聖、藤澤剛
2. 発表標題 データセンタ間通信におけるSDM 技術の適用可能性
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤澤剛、澤田祐甫、齊藤晋聖
2. 発表標題 最適化手法を用いたモード分割多重通信向け光導波路デバイスの研究
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高野純矢、藤澤剛、澤田祐甫、坂本泰志、松井隆、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 シリコンフォトンクスによる高次モードを用いた 低損失かつ高トレランス100/400GbE 用4 波長合波器
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤孝憲、藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 90° 曲がりSi細線導波路の円筒座標系に基づくビーム伝搬法解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白田幹、藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 ニューラルネットワークによるモザイク型モードディバイダの特性学習
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村航大、藤澤剛、坂本泰志、松井隆、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 熱光学効果を利用したWINC型チューナブルモードディバイダ
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤原広紫、澤田祐甫、藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 DBS法を用いた2um帯モザイク型4モード合波器の設計
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅原直人、藤澤剛、坂本泰志、松井隆、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 ANNによるマルチモードNFPからのモード振幅
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高野純矢、藤澤剛、澤田祐甫、齊藤晋聖
2. 発表標題 2x2/2x1 マツハ・ツェンダーフィル偏波分離回転子を用いた低損失400GbE 用シリコン2 x 4 波長合波器の作製
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田祐甫、藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 シリコン光導波路設計におけるフルベクトル波面整合法の有用性
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村航大、藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 高性能モザイク状素子設計のためのハイブリッド最適化手法
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Wang, Y. Sawada, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Nakajima, and K. Saitoh
2. 発表標題 Proposal of PLC 6-mode-selective photonic lantern mode multiplexer
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村椿太一、澤田祐甫、藤澤剛、佐藤孝憲、齊藤晋聖
2. 発表標題 直接二分探索法を用いた2 μ m帯シリコン4モード交差導波路の設計
3. 学会等名 令和2年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝間友一、菅原直人、藤澤剛、佐藤孝憲、坂本泰志、松井隆、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 PLC型6モード交換器の接続における最適FMF構造の検討
3. 学会等名 令和2年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村航大、藤澤剛、澤田祐甫、佐藤孝憲、齊藤晋聖
2. 発表標題 モザイク状素子を利用した超小型0バンド4波長合波器
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村椿太一、澤田祐甫、藤澤剛、佐藤孝憲、齊藤晋聖
2. 発表標題 直接二分探索法を用いた2um帯シリコン4モード交差導波路の設計
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝間友一、菅原直人、藤澤剛、佐藤孝憲、森崇嘉、坂本泰志、今田諒太、松井隆、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 WFM法設計6モード交換器における導波路長依存性の調査
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計5件

産業財産権の名称 モード交換器	発明者 坂本泰志、松井隆、 辻川恭三、中島和 秀、藤澤剛、齊藤晋	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-080166	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 波長合波器	発明者 坂本泰志、松井隆、 辻川恭三、中島和 秀、藤澤剛、齊藤晋	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-036665	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 モード合分波器	発明者 坂本泰志、松井隆、 辻川恭三、中島和 秀、齊藤晋聖、藤澤	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 実用新案、2018-153033	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 モード分岐デバイス	発明者 坂本泰志、松井隆、 辻川恭三、中島和 秀、藤澤剛、齊藤晋	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-033764	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 モード間損失差補償デバイス	発明者 坂本泰志、松井隆、 辻川恭三、中島和 秀、藤澤剛、齊藤晋	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-047666	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------