

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01378

研究課題名（和文）テラビット級光イーサネットを実現する波長、モード分割多重伝送融合光波回路の研究

研究課題名（英文）A research on the optical circuits for Tbit/s optical Ethernet system using wavelength/mode division multiplexing

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） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：テラビット光イーサネットを実現するための、波長・モード分割多重伝送用光波回路の研究を行った。モード多重伝送用素子として、申請者らの独自設計技術である波面整合法を用いたシリコンテーパー導波路型、機械学習設計モード合波器を実現した。さらに、波長多重伝送用素子として、導波路幅の変化に対するトレランスを大幅に低減した強トレランスマッハ・ツェンダー合波器を設計し、2モード、4波長合波器を一つのチップにモノリシック集積した、波長・モード分割多重伝送用小型合波器を実現した。さらに、将来のチップ間イーサネットに適用可能な、超小型モザイク素子をも研究し、マルチバンドモード合波器、及び、超小型波長合波器を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

データセンタにおける通信容量は急激に伸びており、その伝送容量増大は喫緊の課題となっている。これまで用いられてきた波長分割多重技術だけでは、将来のテラビットクラスイーサネットを実現するのは困難になりつつある。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、波長分割多重技術と合わせて用いることで、伝送容量の飛躍的増大が可能であるが、そこに用いる素子は使用帯域が広く、なおかつ製造トレランスに強くなければならない。本研究では、これらの要求に応える素子を考案し、実現した。これらの成果は将来のテラビットクラスイーサネット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 wavelength/mode division multiplexing (WDM/MDM) for future Tbit/s optical Ethernet system are investigated. For MDM, Si-waveguide based mode multiplexers (MUX) designed by wavefront matching method are demonstrated. For WDM, a Mach-Zehnder wavelength MUX with strong fabrication tolerance is designed. An optical multiplexer, in which these mode and wavelength MUXs are monolithically integrated, is successfully fabricated and demonstrated. Furthermore, for future optical Ethernet for chip-to-chip communication, ultrasmall mosaic-based devices are investigated, and multiband mode MUX, and ultrasmall wavelength MUX based on mosaic structure are demonstrated.

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 波長分割多重 モード分割多重 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に伴い、2017年には一月100エクサバイト程度だった通信量が、2022年には一月400エクサバイト程度になると予想されており(Cisco社試算)継続的かつ、大幅な通信量増大が見込まれている。それを受け、データセンタ内、センタ間など、数mから数十kmまでの幅広い伝送距離に対するLAN系通信(イーサネット)の光化が急速に進んでいる。2010、2017年には100、400ギガビットイーサネット(100、400GbE)の標準化が完了した。100GbEにおいては、1波長の光で100-Gbit/sの信号を生成することが困難であったため、4波長の光(4 λ)それぞれに、25-Gbit/sの信号を載せて多重化する波長分割多重技術(WDM)が導入された。400GbEにおいては、光源の更なる高速化(1波長当たり50、100-Gbit/s)が進むとともに、4、8波長のWDM規格が導入されている。

今後の伸び続ける伝送容量への需要に対し、テラビット級イーサネット(TbE)の実現が強く望まれている。そのためには、更なる光部品の高性能化が必須であるが、光源そのものの高速化は材料限界に達しはじめている。また、多重化する波長数を増やすことで伝送容量を増やすことは可能であるが、波長数を増やすほどに、送受信機に必要となる波長合分波器のサイズの増大、損失の増加、製造トレランスの劣化が生じ、その実現が困難になっていく。そのため、400GbEまでは既存の技術の延長で実現できるが、その先、TbEに進むためには従来とは別の次元での伝送容量の増加が強く望まれている。

モード分割多重技術(MDM)は、光の有する物理的資源(時間、空間、波長、振幅、位相、偏波)のうち、空間を用いて信号の多重化を行う技術である。光ファイバ中で光は、導波モードと呼ばれる特別な偏波・空間形状を保ったまま伝搬し、各導波モードごとに信号を送信することで、波長数を増すことなく信号の多重度を増すことが可能であり、近年、従来の長距離通信向けに盛んに研究が行われてきた。

MDMを用いることで、多重するモード数と波長数の掛け算で伝送容量を増大することが可能であるが、実用的なTbEを実現するためには、光送受信機における、(1)素子の小型化・集積化、(2)モード合分波器の広帯域化、(3)波長合波器の高トレランス化、(4)ファイバ中継点におけるモード制御を実現する必要がある。以下、それらの課題を説明する。

(1) 素子の小型化、集積化

イーサネット用光送受信機の大きさは規格で定められているため、特に小型光送受信機実現には、波長、モード合分波器は別々の部品ではなく、一つのチップ上に一括集積することが必須となる。従来、長距離通信向け部品は、ファイバとの親和性の良い石英系導波路を用いられてきたが、コアとクラッドの比屈折率差(Δ)が小さく、小型化が難しい。そこで、 Δ が大きく、導波路断面を石英系導波路の100分の1に小型化可能な、Si導波路素子の使用がほぼ必須であるが、その大きな Δ のため、本質的に波長依存性、損失が大きく、製造トレランスに弱い。

(2) モード合分波器の広帯域化

WDMとの併用、特に、400GbEの8波多重規格の場合には、広い波長範囲を使用するため、モード合分波器はその全ての帯域をカバーする必要がある。通常の非対称方向性結合型モード合分波器は設計波長から離れるほど特性が劣化し、特に、Si導波路ではその影響が顕著なため、その波長依存性を極限まで小さくする必要がある。

(3) 波長合分波器の高性能化、強トレランス化

波長、モード合分波器を一括集積する場合、どちらかが製造誤差等により所望の動作をしない場合、たとえ片方の特性が良かったとしても、その素子を用いることはできない。Si導波路を用いた波長合波器は、導波路幅に対する製造トレランスが非常に弱いため、単にモード合波器を集積するだけでなく、波長合波器部を、既存のものよりも、高性能化、強トレランス化することが必須となる。

(4) ファイバ中継点におけるモード制御

MDM伝送では、各モードの伝送路上での損失・利得が同じではないことが(モード依存損失・利得:MDL、MDG)、受信機に大きな負担を与える。それに対し、図2に示すように、伝送路と伝送路の間で、光波回路を用いたモード交換や利得等化などを行うことで、電気段の中継を用いることなくMDL、MDGの補償が可能であるが、特に、利得等化器については、小型化、集積化が可能な導波路型素子については世界的にほとんど研究されていない。

2. 研究の目的

このような状況のもと、実用に耐えうるTbEを構築するには、単なるWDMとMDM技術の組

み合わせではなく、互いの技術を援用しながら、相互の性能を高めていくことが必須となる。本研究では、これを実現する素子を、単なる組み合わせではないという意味において、「波長・モード多重伝送融合デバイス」と呼ぶ。具体的に、以下の項目について研究を行った。

- (A) 波長分割多重との併用に耐えうる超広帯域モード合分波器
- (B) 高密度集積に耐えうる、小型、高性能、強トレランス波長合波器
- (C) 交換、利得等化など各種のモード制御機能を実現するデバイス
- (D) こうしたデバイスを自在に創出していくための理論設計基盤の構築

3. 研究の方法

前项目的(A)については、代表者らの独自機械学習設計技術である波面整合法を用いることで、波長依存性の大きなシリコン導波路の物理限界に迫る超広帯域モード合分波器の実現を検討する。(B)については、シリコン導波路の強い波長依存性を逆に利用し、導波路幅に対する特性の変化を打ち消すような素子設計を行う。(C)については、通常の導波路素子での実現が困難なため、モザイク素子と呼ばれる新世代素子を用いて検討した。(D)については、前項のモザイク素子を設計するための独自設計技術の開発を行う。

4. 研究成果

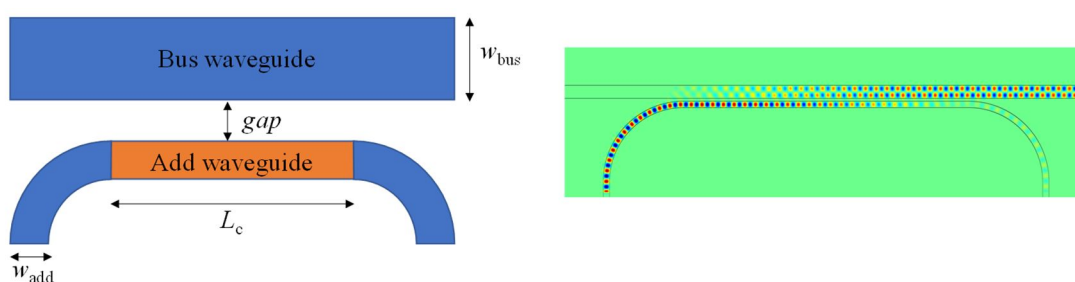


図1 (左) 非対称方向性結合器の構造図、(右) TE₁モードの励振例

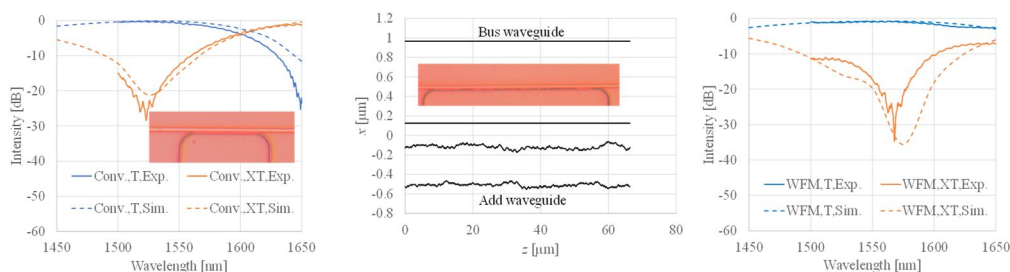


図2 (左) 通常ADCの透過スペクトルと顕微鏡写真、(中央) WFM法により設計されたADCの構造図と顕微鏡写真、(右) WFM法設計ADCの透過スペクトル

(A) 波長分割多重との併用に耐えうる超広帯域モード合分波器

ここでは超広帯域モード合分波器として、図1(左)に示すような、非対称方向性結合器(ADC)を考える。アッド導波路と、幅の異なるバス導波路からなり、 gap を介して、方向性結合器を構成している。ここで、導波路幅をうまく調整し、例えば、アッド導波路のTE₀モードとバス導波路のTE₁モードの実効屈折率が等しくなるようにすると、同図右に示すように、アッド導波路のTE₀モードはバス導波路のTE₁モードに結合する。一方、バス導波路に入射されたTE₀モードはアッド導波路に結合しないため、2モードの合分波器として機能する。図2左破線に、Si厚さ210nm、シリカクラッドのSi細線導波路において、 $w_{add} = 400$ nm、 $w_{bus} = 837$ nm、 $gap = 200$ nm、 $L_c = 18.2$ μmの場合の透過スペクトルの計算値を示す。図中、Tが、アッド導波路からTE₀モードを入射した際に、バス導波路からTE₁モードが出射される透過率、XTが、アッド導波路からTE₀モードが出射される透過率を示す。その動作原理から明らかなように、Tは、位相整合波長から離れるほど、その性能は劣化する。図2では長波側ほど、その劣化が顕著になっており、用いることのできる波長帯に限りがあることがわかる。同図実線は、実際に製造した素子の透過スペクトルの実測値であり、理論値と計算値が極めて良く一致していることが分かる。また、同図に試作した素子の顕微鏡写真を示す。

そこで、使用可能波長帯域を拡大するために、光波回路自動設計技術の一つである波面整合法(WFM法)を用いて、人間のマニュアル設計ではたどり着くことのできないような広帯域モード合分波器を検討した。図2中央に、WFM法設計によって得られた、結合部の導

波路の外形と、試作した素子の顕微鏡写真を示す。ここではアッド導波路のみに導波路の幅変更を加えることで、素子の広帯域化を図った。同図から、アッド導波路の導波路幅が複雑に変化していることが分かる。この構造の透過スペクトルの計算値、実測値を図 2 右の破線、実線に示す。通常構造に見られる長波側の落ち込みが大幅に改善し、使用帯域が大幅に増加していることが分かる。また、計算と実測はやはり良く一致しており、WFM 法設計の効果が実証出来ていることが分かる。ここでは省略するが、より高次のモード、TE₂、TE₃ モードのための WFM 法設計 ADC、及び、それらをモノリシック集積した 4 モード合分波器も実現しており、将来のテラビットクラスイーサネットに使用可能な超広帯域モード合分波器を実現した。

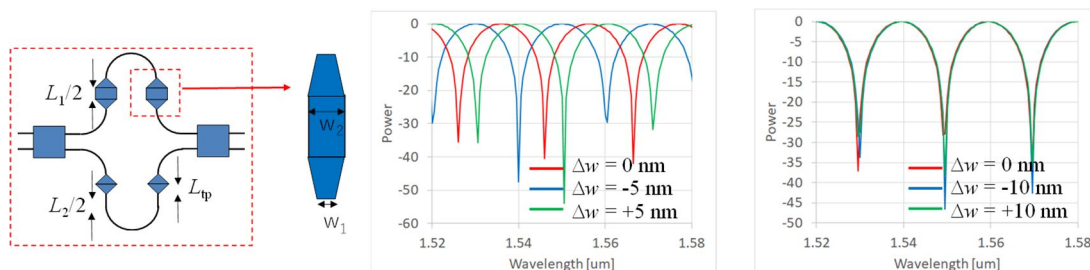


図 3 (左) MZI 干渉計型波長合波器、(中央) 通常設計の MZI 合波器の透過スペクトル、(右) 強トレランス設計 MZI 合波器の透過スペクトル

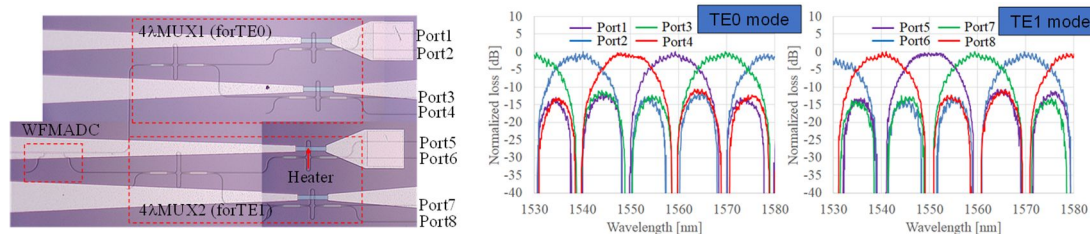


図 4 (左) 2 モード 4 波長合波器の顕微鏡写真と、(右) 規格化透過スペクトル

(B) 高密度集積に耐えうる、小型、高性能、強トレランス波長合波器

将来のテラビットクラスイーサネットを実現するための波長合分波器には、小型でなおかつ、製造トレランスに強いことが求められる。現状のイーサネットで用いられる WDM の波長数は 4、8 であり、この程度の波長数では、図 3 左に示すような、2 波長の合波が可能なマッハ・ツェンダー干渉計 (MZI) を多段に縦列接続した波長合波器がよく用いられる。MZI 合波器は、二つの 3dB カプラと、それに挟まれた遅延導波路からなり、構成は簡易であるが、遅延導波路の導波路幅の変化によってスペクトルが大きく変化するという問題があった。図 3 中央に、通常の MZI 合波器を用いた場合の、導波路幅変化に対する透過スペクトルの変化を示す(理論値)。ここで、導波路幅は $w_1 = w_2 = 400$ nm とし、ピーク波長間隔が 20 nm となるように遅延線長を調整した。図からわかるように、導波路幅がわずか 5 nm 変化しただけでスペクトルがおおきくずれることがわかる。それに対して、図 3 左に示すように、遅延線中に導波路幅テーパを導入することにより導波路幅変化に対するピーク波長変化の抑制を試みた。具体的に、シリコン導波路の実効屈折率の導波路幅微分値を算出し、MZI 全体で、ピーク波長の導波路幅微分が 0 となるように、導波路幅、遅延線長を調整する。 $w_1 = 400$, $w_2 = 600$ nm, $L_1 = 45.2$, $L_2 = 14.2$ μm の場合の透過スペクトルの計算値を図 3 右に示す。導波路幅が 10 nm 変化してもスペクトルの位置がほぼ変化してないことが分かる。つまり、この設計の MZI 合波器は導波路幅変化に対して非常に大きなトレランスを有している。

(A)、(B)で開発したモード合波器、波長合波器を一つのチップにモノリシック集積して、本研究課題の目的である波長・モード多重伝送融合デバイスの核となる、波長・モード合波器を試作した。図 4 左にその顕微鏡写真を示す。ここでは原理確認のため、モード数は 2 とし、WFM 法設計 TE₀-TE₁ モード合波器を用い、それぞれのモードに 4 波長合波器を接続し、2 モード・4 波長多重器とした。ここでは分波側の動作を測定し、チップに入射された光は、TE₀ モードの場合、チップ上側の Port1~4、TE₁ モードの場合、チップ下側の Port5~8 から出力される。同図右に、各スペクトルのピーク損失で規格化した透過スペクトルの実測値を示す。どちらのモードの場合でも、きれいな 4 波長の分波が実現できていることがわかる。これにより、広帯域モード合波器、強トレランス波長合波器の集積による波長・モード合波器を実証した。

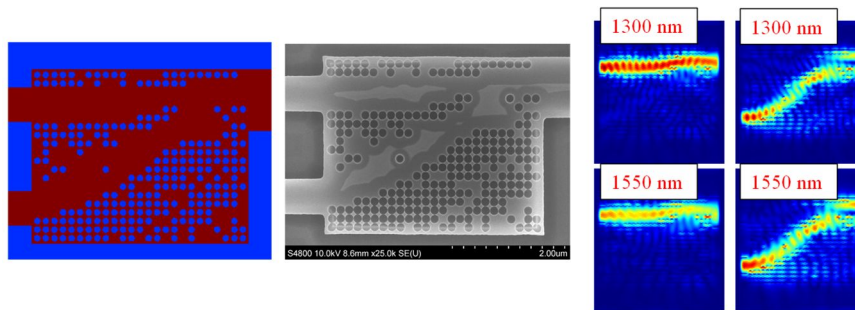


図5 (左) C+O バンド設計モザイク型モード合波器、(中央) 試作した素子の SEM 写真、(右) 1300, 1550 nm における界分布

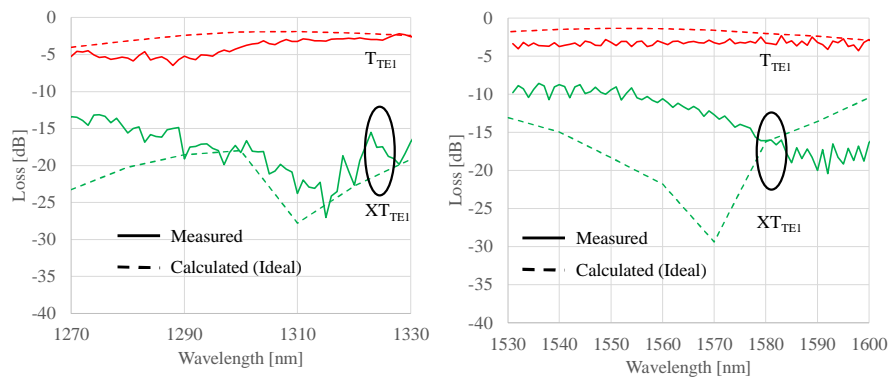


図6 試作した C+O バンド設計モード合波器の TE1 モード透過率
(左) O バンド、(右) C バンド

(C) 交換、利得等化など各種のモード制御機能を実現するデバイス

(D) こうしたデバイスを自在に創出していくための理論設計基盤の構築

実際に MDM を導入するには、単純なモード合分波だけではなく、モードの交換などの複雑なモード制御素子が必要となる。こうした制御を通常の導波路型素子で行うのはもちろん不可能ではないが、機能が複雑化するほど、その構成も複雑になり、そして回路の大きさも大きくなっていく。そこで、光波回路の大きさをさらに小さくしながら、より複雑な機能を実現していくために、ここではモザイク素子による波長・モード多重伝送融合素子の研究を行った。

モザイク素子とは、Si のプレート上をサブ波長程度 (~ 100 nm) のピクセルで分割し、各ピクセルに 0 (シリコンを削る)、1 (シリコンを残す) を適切に割り当てることにより、モザイク状パターン(シリコンメタマテリアル)を生成し、目的の性能をもつ素子を実現するものである。通常の Si 導波路型デバイスに比べ、その大きさを 10 分の 1 以下にすることが可能であり、多様な光波の制御、及び、通常導波路素子の究極の小型化に有効と思われる、本研究の波長・モード多重伝送融合デバイスの基本プラットフォームとなる可能性を秘めている。但し、そのパターンは複雑であり、マニュアル設計により所望のパターンを見つけ出すのはほぼ不可能であるため、なんらかの機械学習技術を用いた自動設計技術が必須となる。本研究では、モザイク素子設計のためのベイズ推定、進化的手法等を用いた各種の独自の設計手法を開発してきた。ここでは特に、ベイズ推定を用いて生み出したマルチバンドモード合波器を示す。

図 5 左に検討したモザイク型モード合波器の設計図を示す。左側に 2 入力導波路があり、右側に一つの出力導波路、その間に、Si プレートがはさまれている。上側の入力導波路から光が入射された場合には出力導波路の TE0 モードが、下側の入力導波路から光が入射された場合には、出力導波路の TE1 モードが励振されるようにモザイクパターンを設計する。ここでは、モザイク素子の柔軟性を示すため、C、O バンドの両方で動作可能なように、モザイクパターンを、研究代表者が開発したベイズ直接 2 分探索法により設計した。そのパターンを図 5 左、実際に試作した素子の SEM 写真を中央に示す。設計したパターンがきれいに試作できていることがわかる。同図右に、波長 1300, 1550 nm における界分布を示す。どちらの波長でも、意図したとおりのモード合波機能を有することがわかる。図 6 破線、実線に、設計、試作した素子の TE1 モード励振時の透過スペクトルの計算値、実測値を示す。ここで、測定は、図 5 中央のモード合波器を対向して二つ置き、下側の導波路から入射し、対向したモード合波器の下側から出力された光を T、逆側から出力された光を XT としている。図から、理論値と実測値は概ね一致し、モザイク素子によるモード制御法の原理確認を達成した。

このモザイク素子は更なる小型化が要求される将来のテラビットクラスイーサネットを実現するための基本プラットフォームになりうる可能性を秘めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fujisawa Takeshi, Mitarai Takuya, Sawada Yusuke, Okimoto Takuya, Kono Naoya, Fujiwara Naoki, Muratsubaki Taichi, Yagi Hideki	4. 巻 35
2. 論文標題 Ultrasmall Power Splitters With Triangular Lattice Mosaic Patterns Designed by Bayesian DBS Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 1139 ~ 1142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LPT.2023.3306313	査読の有無 無
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, Mitarai Takuya, Okimoto Takuya, Kono Naoya, Fujiwara Naoki, Sato Takanori, Yagi Hideki, Saitoh Kunimasa	4. 巻 31
2. 論文標題 Bayesian design of mosaic-based mode multiplexers for various wavelength bands	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 26842 ~ 26842
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.492673	査読の有無 無
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, Saitoh Kunimasa	4. 巻 39
2. 論文標題 Hybrid algorithm based on the grey wolf optimizer and direct binary search for the efficient design of a mosaic-based device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 1329 ~ 1329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.451593	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, Saitoh Kunimasa	4. 巻 4
2. 論文標題 Bayesian direct-binary-search algorithm for the efficient design of mosaic-based power splitters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 1258 ~ 1258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OSAC.422116	査読の有無 無
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 Sawada Yusuke, Fujisawa Takeshi, Sato Takanori, Saitoh Kunimasa	4. 巻 29
2. 論文標題 Broadband silicon four-mode multi/demultiplexer designed by a wavefront matching method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 27322 ~ 27322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.434178	査読の有無 無
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12件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Y. Sawada, T. Fujisawa, T. Mitarai, T. Okimoto, H. Yagi, and N. Fujiwara
2. 発表標題 Mosaic-based power splitters with asymmetric splitting ratios designed on triangular lattice
3. 学会等名 13th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Mitarai, T. Fujisawa, T. Okimoto, N. Kono, N. Fujiwara, Y. Sawada, T. Muratsubaki, T. Sato, K. Saitoh, and H. Yagi
2. 発表標題 Experimental demonstration of mosaic-based ultra-small power splitters designed by Bayesian direct-binary-search method
3. 学会等名 12th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Mitarai, T. Fujisawa, Y. Sawada, T. Okimoto, N. Kono, N. Fujiwara, T. Muratsubaki, T. Sato, K. Saitoh, and H. Yagi
2. 発表標題 Compact passive waveguides using mosaic-based device with triangular lattice photonic crystal-like structure
3. 学会等名 Solid State Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Mitarai, T. Fujisawa, T. Okimoto, N. Kono, N. Fujiwara, Y. Sawada, T. Muratsubaki, T. Sato, K. Saitoh, and H. Yagi
2. 発表標題 Compact power splitters with mosaic-based structure designed by Bayesian direct-binary-search method
3. 学会等名 Optoelectronics and Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Fujisawa, and K. Saitoh
2. 発表標題 Fabrication-tolerant, 2-mode, 4 multiplexer based on Si waveguides for beyond Tbit/s optical Ethernet
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤澤剛、御手洗拓矢、沖本拓也、河野直哉、藤原直樹、佐藤孝憲、八木英樹、齊藤晋聖
2. 発表標題 C、0、C+0バンド向け超小型モザイクモード合波器
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤澤剛、齊藤晋聖
2. 発表標題 シリコン導波路型モード制御素子
3. 学会等名 光通信インフラの飛躍的な高度化に関する特別研究専門委員会 (EXAT) 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤澤剛、御手洗拓矢、沖本拓也、河野直哉、藤原直樹、澤田祐甫、村椿太一、佐藤孝憲、八木英樹、齊藤晋聖
2. 発表標題 ベイズ型直接2分探索法により設計した超小型モザイクパワースプリッタの試作
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 2022年

1. 発表者名 藤澤剛、御手洗拓矢、沖本拓也、河野直哉、藤原直樹、澤田祐甫、村椿太一、佐藤孝憲、八木英樹、齊藤晋聖
2. 発表標題 ベイズ最適化法を用いたモザイク状素子の設計技術
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤澤剛
2. 発表標題 モザイク状素子の研究動向
3. 学会等名 2021年度第3回フォトニックデバイス・応用技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 御手洗拓矢、藤澤剛、澤田祐甫、沖本拓也、八木英樹、藤原直樹
2. 発表標題 微細円孔が最密充填構造に配列されたモザイク状素子による非対称パワースプリッタ
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 2023年

1. 発表者名 澤田祐甫、藤澤剛、御手洗拓矢、沖本拓也、八木英樹、藤原直樹
2. 発表標題 ベイズDBS設計による2段モザイク型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 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------