

令和元年6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：2016～2018

課題番号：16H04340

研究課題名(和文) 光ファイバ通信の限界を打ち破るマルチコアマルチモードフォトニクス

研究課題名(英文) Multicore and multimode photonics for breakthrough in limitation of optical fiber communications

研究代表者

齊藤 晋聖 (Saitoh, Kunimasa)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：20333627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マルチコアファイバ技術、およびマルチモード制御技術に関する研究を実施した。非結合型マルチコアファイバにおいて、6モード19コアファイバにより従来の単一モードファイバと比較して60倍以上、10モード12コアファイバにより90倍以上の空間多重密度が実現可能であることを明らかにした。また、結合型マルチコアファイバにおいて、強結合状態となるか弱結合状態となるかはファイバの曲げ半径に大きく依存しており、伝送路の曲げ状態を考慮して構造設計する必要があることを明らかにした。さらに、平面光波回路に基づくモードスクランブル型モード合分波器の構成法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、マルチコアファイバ技術とマルチモード伝送技術の融合による空間分割多重伝送における多重効率の上限を明確化することができた。また、光ファイバ単体での大容量化のみならず、モード制御デバイスまでも含めて空間分割多重伝送のための基盤技術を確立し、将来の毎秒ペタビットからエクサビット級の光ファイバ通信実現に向けての研究開発環境を整えた。

研究成果の概要(英文)：In this research, space division multiplexing by using multicore fiber technology and mode division multiplexing technology has been investigated for overcoming capacity limit of conventional fibers. For uncoupled multicore fibers, it was found that the spatial multiplicities of 60 times larger and 90 times larger than that of conventional single-core single-mode fibers can be achieved by using a 6-mode 19-core fiber and a 10-mode 12-core fiber, respectively. For coupled multicore fibers, it was shown that the multicore fiber parameters such as core-to-core distance should be carefully determined depending on the bending condition of the transmission line. In addition, for multimode controlling devices in mode division multiplexing transmission, a mode-scrambling-type mode multi/demultiplexer based on planar lightwave circuit has been proposed.

研究分野：光ファイバ通信、光エレクトロニクス、光ファイバ応用技術

キーワード：光デバイス・光回路 光ファイバ 空間分割多重 マルチコアファイバ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでの光ファイバ通信の伝送用量は、時間分割多重と波長分割多重により拡大してきたが、多重数の増大とともに入力光パワーが増大し、非線形効果による信号劣化やファイバフェーズ現象による伝送路の熱損傷が問題になっており、変復調方式や中継器の雑音特性の改善等を考慮しても、伝送用量の上限は 100 Tbps 程度と予想されている。こうした状況のもとで、光通信システムに残された最後の多重軸である空間分割多重 (SDM) の導入による、伝送容量の増大に関する研究開発が活発に行われている。SDM には、1 本の光ファイバに多数のコアを収容したマルチコアファイバ技術と、一つのコアの中を伝搬する複数の固有モードを利用したマルチモード伝送技術があるが、この両者を組み合わせることにより、SDM 技術の飛躍的な高度化が期待される状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、マルチコアファイバ技術とマルチモード伝送技術との融合により、従来の光ファイバ通信の限界を打破する空間分割多重伝送技術を確立することを目的とする。具体的には、マルチコア多重とマルチモード多重を融合した超大容量マルチコアマルチモードファイバを新たに提案・設計し、SDM 伝送用光ファイバとしての極限性能を明らかにするとともに、導波路型のモード制御デバイスを新規に提案・実現し、モード依存特性の低減化手法を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) マルチコアファイバは、非結合型マルチコアファイバと結合型マルチコアファイバに大別することができる。非結合型マルチコアファイバについては、これまで独自に開発を進めてきた有限要素法と電力結合方程式に基づくマルチコアファイバのための設計理論を駆使して、空間・周波数利用効率を最大化するマルチコアマルチモードファイバの最適構造を明らかにする。また、結合型マルチコアファイバについては、その群遅延広がりを高精度に算出可能な解析手法を新たに開発し、群遅延広がり低減のための設計指針を明らかにする。

(2) モード分割多重伝送においては、それぞれの空間モードを励振・分離できるモード合分波器が必要不可欠であるとともに、伝送路におけるモード間群遅延時間差やモード依存損失がモード数拡大、および伝送距離拡大の大きな制限要因となる。本研究では、平面光波回路に基づくスクランブル型モード合分波器 (モードスクランブラ) を提案し、マルチモード伝送路におけるモード依存特性を低減可能なモードスクランブラの構成法を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 非結合型マルチコアファイバ

各コアに複数のモードが伝搬するマルチコアマルチモードファイバにおいては、クロストークの低減のみならず、モード間群遅延時間差 (DMGD) の低減も重要であるので、本研究では、トレンチ付与グレーデッドインデックス屈折率分布を採用した。基本モードの実効コア断面積がおよそ $80 \mu\text{m}^2$ 、コア間の最悪クロストークが $-30 \text{ dB}/100 \text{ km}$ 以下となることを目標とした。また、実効的 3 モード (2LP)/6 モード (4LP)/10 モード (6LP) 伝送条件を、 $\text{LP}_{21}/\text{LP}_{31}/\text{LP}_{41}$ モードの曲げ損失が、曲げ半径 $R=140 \text{ mm}$ 、波長 $\lambda=1530 \text{ nm}$ において $1.0 \text{ dB}/\text{m}$ 以上 (カットオフ条件) とするとともに、低曲げ損失条件を、 $\text{LP}_{11}/\text{LP}_{02}/\text{LP}_{12}$ モードの曲げ損失が、 $R=30 \text{ mm}$ 、 $\lambda=1565 \text{ nm}$ で $0.5 \text{ dB}/100 \text{ turns}$ 以下とした。さらに、コア間隔はトレンチの幅によって決定されるが、クロストーク条件とカットオフ条件を満足する構造の中で、コア間隔を最小とするようなトレンチ幅を特定した。

図 1 に、六方最密配置を想定した 7~37 コアファイバにおいて、各コアを 2LP モード、4LP モード、および 6LP モードとしたマルチコアマルチモードファイバにおける相対コア多重度指数 (RCMF) のクラッド外形依存性を示す。ここで、RCMF とは、従来の単一モードファイバを基準とした相対的な空間多重密度のことであり、RCMF がコア数の増加と共に増大していくことがわかる。図 1 より、例えば、クラッド外形 $250 \mu\text{m}$ 以下という条件では、4LP モード 19 コアファイバにおいて RCMF が 60 以上となり、チャンネル数 114 が実現可能であることがわかる。また、6LP モード 12 コアファイバにおいて RCMF が 90 以上となり、チャンネル数 120 が実現可能であることがわかる。

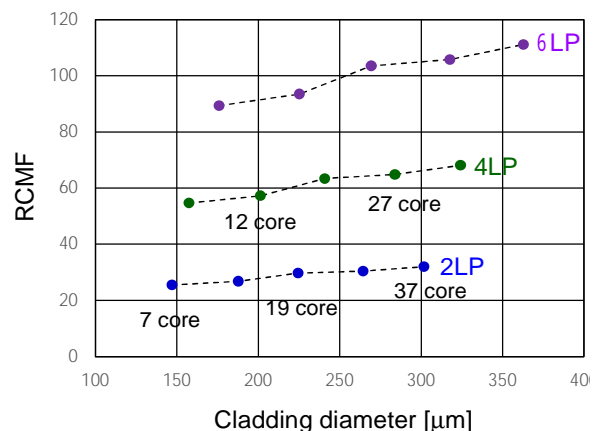


図 1 非結合型マルチコアマルチモードファイバにおける RCMF とクラッド外形の関係

(2) 結合型マルチコアファイバ

結合型マルチコアファイバは、複数の同種コアを近接して配置するため、各コアでの結合モード(スーパーモード)がコア数と同じだけ存在することになり、1種のマルチモードファイバとして利用することができる。結合型マルチコアファイバの大きな特徴として、DMGDによる群遅延広がり(GDS)をシングルコアのマルチモードファイバに比べて大幅に低減可能という特性がある。結合型マルチコアファイバのGDSは、伝搬モード数をMとすると、次式で与えられるフィールド結合方程式から算出することができる。

$$\frac{da_m}{dz} = -j\beta_m a_m - j \sum_{m \neq n}^M \kappa_{mn} a_n$$

ここで、 a_m 、 β_m はそれぞれ m 次モードの振幅、伝搬定数であり、 κ_{mn} は m、n 次モード間の結合係数である。ここで、ファイバ長を L とし、ファイバ長全体を伝搬方向(z方向)に N 個のセグメントに分割すると、上式の解は、伝達行列 T を用いて表すことができる。本研究では、各セグメントにおいて、曲げやねじれなどのランダムな摂動を与えた上で、伝達行列 T から算出される群遅延オペレータの固有値から、GDS を算出する解析手法を確立した。

一例として、結合型 2 コアファイバにおける GDS の構造依存性を考える。ここで、コア半径は $4.5 \mu\text{m}$ 、コア-クラッド間の比屈折率差は 0.35% とする。また、波長は 1550 nm、ファイバのランダム性として、平均 $0.6\pi \text{ rad/m}$ 、分散 $0.2\pi \text{ rad/m}$ のガウス分布を有するねじれ率を想定し、GDS の値は、100 回の計算の平均として算出する。図 2 に、結合型 2 コアファイバにおける $L=1 \text{ km}$ 伝搬後の GDS の曲げ半径 R 依存性を示す。ここで、2つのコア径の製造誤差は $\pm 1.0\%$ とした。コア間隔 Λ が大きい場合 ($\Lambda=30 \mu\text{m}$) および Λ が小さい場合 ($\Lambda=22 \mu\text{m}$)、GDS の R 依存性は小さく、弱結合領域となっている。一方、 $\Lambda=24 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ の場合、GDS は R に大きく依存しており、 $R=400 \sim 500 \text{ mm}$ に設定すると、1 ps 程度の GDS となる。これは、言い換えると、結合型マルチコアファイバの設計においては、GDS を低減するにはコアパラメータやコア間隔を伝送路の曲げ状態を考慮して設計することが重要であることを意味している。

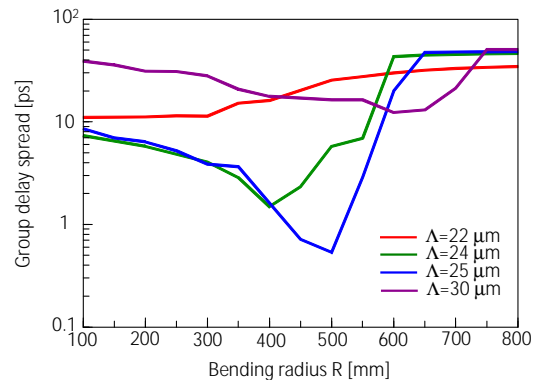


図 2 結合型 2 コアファイバの GDS の曲げ半径 R 依存性

(3) 平面光波回路(PLC)に基づくモード制御デバイス

マルチモードファイバ中のモード間結合の影響を取り除くために受信側で行われている MIMO (Multi Input Multi Output) 信号処理では、モード依存損失 (MDL) による SN 比の劣化が課題の一つである。そこで、本研究では、MIMO 受信を前提とし、その負荷となる MDL の影響を緩和するために、あえてモード間クロストークを生じさせ、各信号をモードが適当な割合で交じり合った信号として出力する、Y カスケード型モードスクランブラを提案した。例として、図 3 に、Y カスケード型 4 モードスクランブラの構造図を示す。Y 分岐と S 字導波路を多段に接続した構造を持ち、 LP_{01} モード、 LP_{11a} モード、 LP_{11b} モード、 LP_{21a} モードを混ざり合わせて励振する。各ポートに LP_{01} モードを入射すると、一つ目の Y 分岐導波路で LP_{01} モードと LP_{11a} モードが等しく 50% ずつ励振される。 LP_{11a} モードはモード回転子で LP_{11b} モードへと 100% 変換される。二つ目の Y 分岐導波路で、 LP_{01} モードは LP_{01} モードおよび LP_{11a} モードへ、 LP_{11b} モードは LP_{11b} モードおよび LP_{21a} モードへとそれぞれ等しく結合するため、出射ポートで 4 モードが 25% ずつ均一の割合で励振可能である。

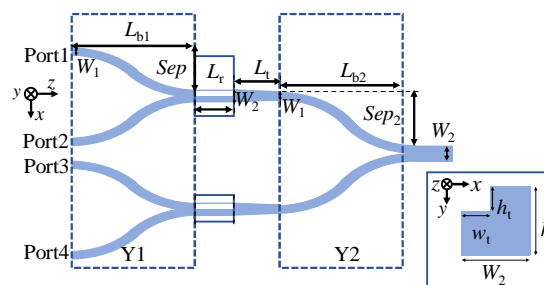


図 3 Y カスケード型 4 モードスクランブラの構造図

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13 件)

- [1] M. Kudo, S. Ohta, E. Taguchi, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Proposal of Mach-Zehnder mode/wavelength multi/demultiplexer based on Si/Silica hybrid PLC platform", Optics Communications, vol. 433, pp.168-172, Feb. 2019. (査読有)
- [2] M. Nooruzzaman, K. Saitoh, Y. Sasaki, K. Takenaga, K. Aikawa, and T. Morioka, "Non-circular multi-core fibers for super-dense SDM", IEICE Electronics Express, vol. 15, no. 19, pp. 1-12, Sep. 2018. (査読有)
- [3] E. Taguchi, T. Fujisawa, Y. Yamashita, S. Makino, N. Hanzawa, T. Sakamoto, T.

- Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, F. Yamamoto, and K. Saitoh, "A review on PLC-based two-mode multi/demultiplexer designed by wavefront matching method", *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E101-C, no. 7, pp. 518-526, July 2018. (査読有)
- [4] S. Ohta, T. Fujisawa, S. Makino, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Si-based Mach-Zehnder wavelength/mode multi/demultiplexer for WDM/MDM transmission system", *Optics Express*, vol. 26, no. 12, pp. 15211-15220, Jun. 2018. (査読有)
- [5] T. Fujisawa, Y. Yamashita, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Scrambling-type three-mode PLC multiplexer based on cascaded Y-branch waveguide with integrated mode rotator", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 10, pp. 1985-1992, May 2018. (査読有)
- [6] K. Saitoh, T. Fujisawa, and T. Sato, "Coiling size dependence of group delay spread in coupled multicore fibers without intentional twisting", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 20, pp. 4559-4566, Oct. 2017. (査読有)
- [7] T. Fujisawa, Y. Amma, Y. Sasaki, S. Matsuo, K. Aikawa, K. Saitoh, and M. Koshiba, "Crosstalk analysis of heterogeneous multicore fibers using coupled-mode theory", *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 5, pp. 7204108, Oct. 2017. (査読有)
- [8] Y. Yamashita, S. Makino, T. Fujisawa, N. Hanzawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, F. Yamamoto, K. Nakajima, and K. Saitoh, "PLC-based LP11 mode rotator with curved trench structure devised from wavefront matching method", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 13, pp. 1063-1066, July 2017. (査読有)
- [9] Y. Yamashita, T. Fujisawa, S. Makino, H. Hanzawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, F. Yamamoto, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Design and fabrication of broadband PLC-based 2-mode multi/demultiplexer using wavefront matching method", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 11, pp. 2252-2258, June 2017. (査読有)
- [10] T. Fujisawa and K. Saitoh, "Group delay spread analysis of coupled-multicore fibers: A comparison between weak and tight bending conditions", *Optics Communications*, vol. 393, pp. 232-237, June 2017. (査読有)
- [11] Y. Tobita, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, S. Saitoh, K. Takenaga, K. Aikawa, S. Aozasa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Optimal design of 4LP-mode multicore fibers for high spatial multiplicity", *Optics Express*, vol. 25, no. 5, pp. 5697-5709, Mar. 2017. (査読有)
- [12] K. Saitoh, N. Hanzawa, T. Sakamoto, T. Fujisawa, Y. Yamashita, T. Matsui, K. Tsujikawa, and K. Nakajima, "PLC-based mode multi/demultiplexers for mode division multiplexing", *Optical Fiber Technology*, vol. 35, pp. 80-92, Feb. 2017. (査読有)
- [13] T. Fujisawa and K. Saitoh, "A group delay spread analysis of strongly coupled 3-core fibers: A effect of bending and twisting", *Optics Express*, vol. 24, no. 9, pp. 9593-9591, May 2016. (査読有)

〔学会発表〕(計 42 件)

- [1] M. Kudo, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "A Broadband Mode Divider with Arbitrary Branching Ratio Based on Wavelength-insensitive Coupler", *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Paper Th2A.4, San Diego, USA, Mar. 3-7, 2019.
- [2] Y. Sawada, T. Fujisawa, T. Sato, and K. Saitoh, "First Experimental Demonstration of Wavefront-matching-method-designed Silicon Mode Converters", *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Paper W3B.4, San Diego, USA, Mar. 3-7, 2019.
- [3] 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, "低 MDL6 モードスクランブル型 PLC モード合分波器の設計", *電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2018-76*, 佐賀市, Oct. 18-19, 2018.
- [4] T. Sato, K. Yoshida, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Suppression of Group-Delay Spread in Coupled Two-LP-Mode Four-Core Fiber", *IEEE Photonics Conference (IPC 2018)*, Paper MA4.2, Reston, USA, Sept. 30-Oct. 4, 2018.
- [5] 澤田祐甫, 佐藤孝憲, 藤澤 剛, 齊藤晋聖, "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", *電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-20*, 金沢市, Sep. 11-14, 2018.
- [6] 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, "低 MDL 4 モードスクランブル型 PLC モード合分波器の設計", *電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-2*, 金沢市, Sep. 11-14, 2018.
- [7] 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, "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",

- 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-1, 金沢市, Sep. 11-14, 2018.
- [8] 吉田一希, 佐藤孝憲, 藤澤 剛, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 中島和秀, 齊藤晋聖, “ 結合型マルチコアファイバ設計のための最適コア配置に関する検討 ”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-1, 金沢市, Sep. 11-14, 2018.
- [9] 齊藤晋聖, “ 空間分割多重伝送用光ファイバの現状と課題 ”, 電子情報通信学会フォトニクスネットワーク研究会, PN2018-18, 帯広市, Sep. 3-4, 2018.
- [10] 齊藤晋聖, “ 空間分割多重伝送のためのマルチコア/マルチモードファイバ ”, 技術レーザー学会「ファイバーレーザー技術」専門委員会第2回委員会, 千歳市, July 26-27, 2018.
- [11] Y. Sawada, T. Sato, T. Fujisawa, and K. Saitoh, “ A Broadband Silicon Two-Mode Multiplexer Designed by Wavefront Matching Method ”, OptoElectronics and Communications Conference (OECC), Paper 5E4-4, Jeju, Korea, July 2-6, 2018.
- [12] T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, “ PLC-based Mode Controlling Devices for Mode-Division-Multiplexing ”, OptoElectronics and Communications Conference (OECC), Paper 6E1-2, Jeju, Korea, July 2-6, 2018.
- [13] 齊藤晋聖, “ 空間分割多重伝送のための光ファイバ技術 ”, 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会創立20周年記念シンポジウム, OFT-T1, 東京, May 17, 2018.
- [14] 齊藤晋聖, 藤澤 剛, 竹永勝宏, 愛川和彦, 坂本泰志, 松井 隆, 中島和秀, “ 高密度空間分割多重マルチコアファイバの設計技術 ”, 電子情報通信学会光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究会, EXAT2017-13, 那覇市, Feb. 15, 2018.
- [15] 藤澤 剛, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 中島和秀, 齊藤晋聖, “ 石英系平面光波回路を用いた3モードスクランブル型モード合分波器 ”, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2017-182, 那覇市, Feb. 15-16, 2018.
- [16] 齊藤晋聖, “ Multicore Fiber Technology for Space Division Multiplexing (SDM) ”, 第31回光通信システムシンポジウム, 三島市, Dec. 19-20, 2017.
- [17] 工藤未彩, 太多 惇, 田口恵梨, 藤澤 剛, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 中島和秀, 齊藤晋聖, “ Si/Silica ハイブリッド PLC プラットフォームを用いたマッハ・ツェンダー型モード/波長合分波器 ”, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2017-99, 宮古島, Dec. 7-8, 2017.
- [18] 太多 惇, 牧野俊太郎, 藤澤 剛, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 中島和秀, 齊藤晋聖, “ テーパー導波路型 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の作製 ”, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2017-94, 宮古島, Dec. 7-8, 2017.
- [19] T. Fujisawa, E. Taguchi, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, “ Proposal of compact three-mode exchanger based on symmetric and asymmetric directional couplers with integrated mode rotator ”, The 22nd Microoptics Conference (MOC 2017), Paper B-4, Tokyo, Japan, Nov. 19-22, 2017.
- [20] 齊藤晋聖, “ 空間分割多重伝送の現状とモード制御デバイス ”, 集積光デバイスと応用技術研究会, IPDA17-2-11, 加賀市, Nov. 9-10, 2017.
- [21] M. Kudo, S. Ohta, E. Taguchi, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, “ A Mach-Zehnder mode multi/demultiplexer based on Si/Silica hybrid PLC platform for WDM/MDM transmission ”, IEEE Photonics Conference (IPC 2017), Paper ThF1.3, Lake Buena Vista, USA, Oct. 1-5, 2017.
- [22] K. Yoshida, T. Fujisawa, T. Sato, and K. Saitoh, “ Group delay spread analysis of few-mode, coupled 3-core fibres: Optimum index profile and maximum transmission distance for strong coupling regime ”, European Conference on Optical Communications (ECOC 2017), Paper P1.SC1.8, Gothenburg, Sweden, Sept. 17-21, 2017.
- [23] S. Ohta, T. Fujisawa, S. Makino, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, “ Mach-Zehnder mode/wavelength (de)multiplexer for WDM/MDM optical transmission ”, European Conference on Optical Communications (ECOC 2017), Paper W.2.C.4, Gothenburg, Sweden, Sept. 17-21, 2017.
- [24] 工藤未彩, 太多 惇, 田口恵梨, 藤澤 剛, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 中島和秀, 齊藤晋聖, “ Si/Silica ハイブリッド PLC プラットフォームを用いたマッハ・ツェンダー型モード合分波器 ”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-36, 東京, Sep. 12-15, 2017.
- [25] 吉田一希, 藤澤 剛, 佐藤孝憲, 齊藤晋聖, “ GI 型数モード結合型3コアファイバの群遅延時間解析 ”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-9, 東京, Sep. 12-15, 2017.
- [26] K. Saitoh, T. Fujisawa, and T. Sato, “ Weakly-coupled and strongly-coupled multicore fibers ”, OptoElectronics and Communications Conference (OECC), Paper Oral 2-3B-2, Singapore, July 31-Aug 4, 2017.
- [27] S. Ohta, S. Makino, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, “ A proposal of Mach-Zehnder mode multi/demultiplexer for WDM/MDM optical transmission system ”, OptoElectronics and Communications Conference (OECC), Paper P3-131, Singapore, July 31-Aug. 4, 2017.

- [28] K. Saitoh, T. Fujisawa, and T. Sato, "Design and analysis of weakly- and strongly-coupled multicore fibers", OSA Advanced Photonics Congress (APC), Paper NeTu2B.5, New Orleans, USA, July 24-27, 2017.
- [29] 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), Paper W1B.2, Los Angeles, USA, Mar. 19-23, 2017.
- [30] T. Fujisawa, Y. Yamashita, T. Sakamoto, T. Matsui, S. Makino, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Scrambling-type three-mode multiplexer based on cascaded Y-branch waveguide with integrated mode rotator on PLC platform", Optical Fiber Communication Conference (OFC 2017), Paper W1B.1, Los Angeles, USA, Mar. 19-23, 2017.
- [31] K. Saitoh, "Multicore fibers for high density space division multiplexing", 11th International Workshop on Optical Signal Processing and Optical Switching (IWOO), Sapporo, Japan, Nov. 16-17, 2016.
- [32] 太多 惇, 牧野俊太郎, 藤澤 剛, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 中島和秀, 齊藤晋聖, "テーパ導波路型 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の提案", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2016-93, 宮崎, Oct. 27-28, 2016.
- [33] 田口恵梨, 山下陽子, 牧野俊太郎, 藤澤 剛, 半澤信智, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 中島和秀, 山本文彦, 齊藤晋聖, "波面整合法設計 PLC 型 2 モード合分波器の試作結果と広帯域化理由に関する考察", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2016-92, 宮崎, Oct. 27-28, 2016.
- [34] Y. Yamashita, S. Makino, T. Fujisawa, K. Saitoh, N. Hanzawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, F. Yamamoto, and K. Nakajima, "A compact and low-loss PLC-based LP11a/LP11b mode rotator with curved trench structure", IEEE Photonics Conference (IPC 2016), Paper ThA1.2, Hawaii, USA, Oct. 2-6, 2016.
- [35] Y. Tobita, T. Sakamoto, T. Matsui, S. Saitoh, K. Takenaga, K. Aikawa, T. Fujisawa, S. Aozasa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Optimum design of 4LP-mode multicore fibers with low differential mode delay for high spatial multiplicity", IEEE Photonics Conference (IPC 2016), Paper WF2.3, Hawaii, USA, Oct. 2-6, 2016.
- [36] 山下陽子, 牧野俊太郎, 半澤信智, 藤澤 剛, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 山本文彦, 中島和秀, 齊藤晋聖, "波面整合法設計 PLC 型 2 モード合分波器の広帯域化理由に関する考察", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-22, 札幌, Sep. 20-23, 2016.
- [37] 田口恵梨, 山下陽子, 牧野俊太郎, 藤澤 剛, 半澤信智, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 中島和秀, 山本文彦, 齊藤晋聖, "波面整合法による PLC 型 2 モード合分波器の試作結果", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-21, 札幌, Sep. 20-23, 2016.
- [38] 太多 惇, 牧野俊太郎, 藤澤 剛, 坂本泰志, 松井 隆, 辻川恭三, 中島和秀, 齊藤晋聖, "テーパ導波路型非対称方向性結合器に基づく広帯域 3dB モードディバイダの提案", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-20, 札幌, Sep. 20-23, 2016.
- [39] T. Fujisawa, Y. Amma, S. Matsuo, K. Aikawa, K. Saitoh, and M. Koshiba, "A crosstalk analysis of heterogeneous 30-core fibre", European Conference on Optical Communications (ECOC 2016), Paper Th.2.P2.SC1.7, Düsseldorf, Germany, Sept. 18-22, 2016.
- [40] K. Saitoh, "Multicore multimode fibers with high spatial density", IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM), Paper TuE4.1, Newport Beach, USA, July 11-13, 2016.
- [41] Y. Yamashita, Y. Ishizaka, N. Hanzawa, T. Fujisawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, F. Yamamoto, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Excitation of LP 21b and LP02 modes with PLC-based tapered waveguide for mode-division multiplexing", OptoElectronics and Communications Conference (OECC), Paper TuE3-4, Niigata, Japan, July 3-7, 2016.
- [42] Y. Chida, T. Fujisawa, and K. Saitoh, "Impulse response analysis of air-hole added coupled six-core fibers", OptoElectronics and Communications Conference (OECC), Paper MC2-2, Niigata, Japan, July 3-7, 2016.

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。