

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18083

研究課題名(和文)次世代大容量光通信システム実現に向けたモード分割多重通信光波回路に関する研究

研究課題名(英文)A research on the optical circuits for large capacity, mode-division multiplexed optical communication system

研究代表者

藤澤 剛 (Fujisawa, Takeshi)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：70557660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：光通信大容量化のためのモード分割多重通信光デバイスに関する研究を行った。従来の低モードクロストークを追求するモード合分波器とは異なり、MIMO受信の使用を前提とし、適度にモードをまぜあわせる、石英系材料を用いた平面光波回路型スクランブル型モード合分波器を提案、3モードの原理確認素子を実現した。また、モード依存損失、モード間群遅延差を補償する、石英系材料を用いた平面光波回路を用いた、方向性結合型3モード交換器を提案、原理確認素子を実現した。さらに、Si導波路など、導波路の比屈折率差が大きい場合のモード制御光波回路の設計に対応するために、フルベクトル型の波面整合法技術の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：Optical devices for mode-division-multiplexed (MDM) transmission are investigated. Scrambling-type mode multiplexers using silica-based planar lightwave circuit is proposed and 3-mode proof-of-concept device was successfully fabricated. For the compensation of mode dependent loss and differential group delay in the MDM system, 3-mode exchanger based on directional couplers is proposed and proof-of-concept device was successfully fabricated. Furthermore, to design mode controlling optical devices with large relative index difference, such as Si waveguides, full-vector wavefront matching method was successfully developed.

研究分野：Optical device

キーワード：光通信 モード分割多重 平面光波回路

1. 研究開始当初の背景

近年のクラウドサービスの普及などに伴い、長距離系光通信、LAN系光通信ともに伝送容量拡大が強く求められている。2010年に標準化が完了した100ギガビットイーサネットでは、もはや1波で必要な伝送容量を賄うことができず、25G×4波の波長分割多重システムを採用した。今後、400G、1Tのシステムへと拡大していくためには、波長軸だけではなく、別の軸での多重化が必要となっている。

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が、現在の設計指針では可能な限りモード間クロストークを小さくする必要があり、モードの多重数が増すにつれ、低クロストークのモード合分波器を実現することが難しくなっている。さらには、石英系材料を用いたPLCにおいては、そのコアとクラッドの屈折率差が小さいことから、光波回路自体が非常に大きくなるのが問題になっている。また、MDMにおいては一般に、無線通信の分野で用いられるMIMO(Multiple Input Multiple Output)受信が用いられるが、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。

2. 研究の目的

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)モードの多重数増大、小型化が容易な、ツリー状構成を有するスクランブル型モード合分波器、(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)モード制御光波回路最適設計のためのフルベクトル波面整合法の開発。

3. 研究の方法

前項目的(1)については、研究代表者が独自開発してきた、独自設計技術を駆使し、低損失なY分岐導波路、モード回転子などを縦列接続したモード合分波器の構造を探索する。前項目的(2)については、方向性結合器を駆使した、3モード交換器光波回路を考案する。前項目的(3)については、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、モー

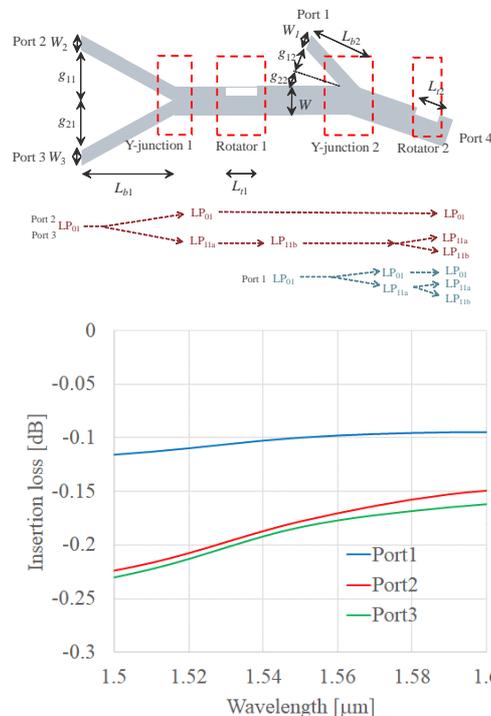


図1 提案した3モードスクランブラの上面構造図とその損失スペクトル(計算値)。

ド制御光波回路最適設計技術を新規開発する。

4. 研究成果

(1)図1上段に考案した、3モードスクランブル型モード合分波器の構造図を示す。本デバイスは3つの入力導波路(Port1, 2, 3、導波路幅 $W_{1,2,3}$)と一つの出力(パス)導波路(Port4、導波路幅 W)からなる。一つの入力導波路から入射された光は、幅の広いパス導波路において、高次モードを励起し、3つのモードが混ざった状態でPort4から出射される。ここで、デバイスの動作原理を説明する。Port1からLP₀₁モードが入射された場合、Y分岐2において、図3(a)に示すようにLP₀₁とLP_{11a}モードが励起される。モード回転子2の長さを結合長の半分にするすることで、励起されたLP_{11a}モードの半分がLP_{11b}モードへと変換され、3モードが混ざった出力が得られる。次に、Port2, 3からLP₀₁モードが入射された場合、Y分岐1において、LP₀₁とLP_{11a}モードが励起される。分岐がほぼ対称であれば、損失はほぼなく、励振比は50:50になる。もしこのまま、LP₀₁とLP_{11a}モードをY分岐2に入射すると、図3(b)に示すように、LP_{11a}モードがE₃₁モードを励起してしまうため、損失が非常に大きくなってしまふ。そこで、Y分岐2の前にモード回転子1を配置し、Y分岐1で励起されたLP_{11a}モードをLP_{11b}モードへと変換する。LP_{11b}モードは、図3(c)に示すように、Y分岐2を低損失で透過可能であり、Y分岐2を通ったあと、モード回転子2において、半分のパワーがLP_{11a}モードへと変換され、3モードが混ざった出

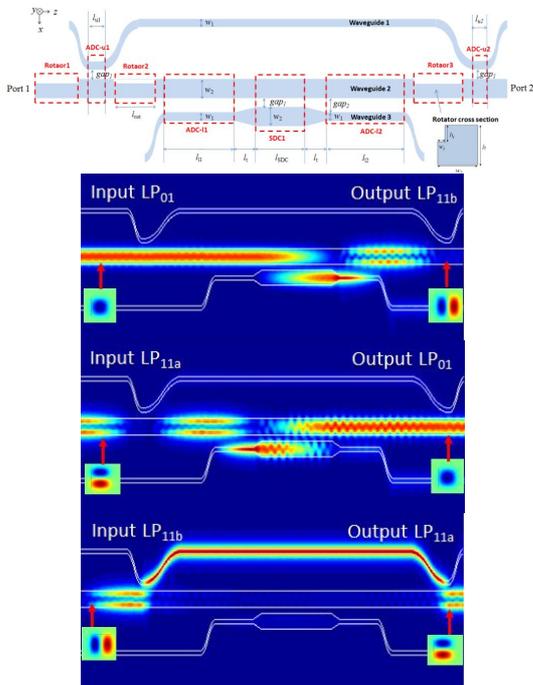


図2 提案した3モード交換器の上面構造図と各モード入力に対する界分布（計算）。

力が得られる。図1下段に、各ポートから光を入射した場合の損失スペクトルの計算値を示す。低損失、波長無依存な特性が得られていることがわかる。本提案素子は実際に試作し、スクランブル型モード合分波の原理確認に成功している。

(2) 図2上段に考案した、3モード交換器の上面構造図を示す。中央のバス導波路に入射された3つのモードは、サイクリックに交換され、Port2から出射される。モード交換のために、バス導波路の上下に二つの導波路があり、方向性結合器を縦列接続した構成となっている。図2下段には、3つのモードを入射した場合の、ビーム伝搬法によって算出した界分布を示す。LP₀₁モードを入射した場合、中央の対称方向性結合器で下側導波路に結合し、その後の非対称方向性結合器でバス導波路のLP_{11a}モードに結合し、最後のモード回転子でLP_{11b}モードへと変換される。LP_{11a}モードを入射した場合、二つ目の非対称方向性結合器で下側の導波路のLP₀₁モードに結合し、真ん中の対称方向性結合器で、バス導波路に結合し、そのままLP₀₁モードとして出射される。LP_{11b}モードを入射した場合、最初のモード回転子でLP_{11a}モードに変換され、最初の非対称方向性結合器で上側の導波路に結合し、最後の非対称方向性結合器でバス導波路のLP_{11a}モードに結合する。本提案素子は実際に試作し、3モード交換の原理確認に成功している。

(3) 石英系材料を利用した、モード制御平面光波回路は損失が少ないなど、優れた特性を有しているが、導波路の比屈折率差()が小さいことから、回路の大規模化が避けられ

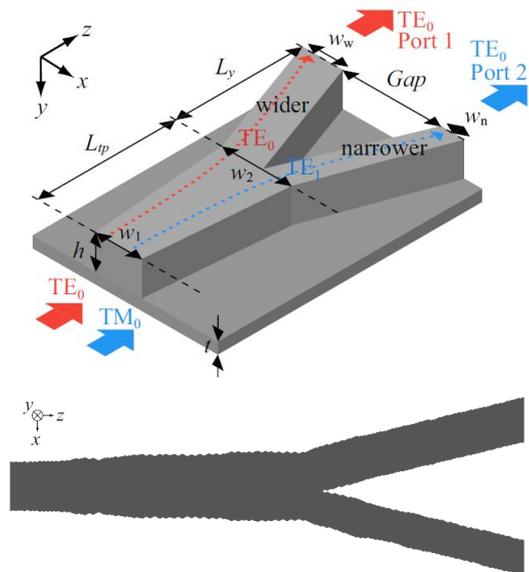


図3 シリコン導波路を用いたY分岐偏波制御素子の構造図とWFM法によって設計されたY分岐偏波制御素子の上面図

ない。Si導波路など、の大きな導波路で光波回路を構成することにより、回路規模を大幅に縮小可能である。しかし、このような大きな導波路の設計に当たっては、我々がこれまで開発してきたスカラ型の設計法を用いることはできない。特に、モード制御光波回路の最適設計に開発した波面整合法もスカラ型解法に基づいており、高の導波路には対応できなかった。そこで、本研究において、高導波路や偏波変換デバイスにも対応可能なように、フルベクトル有限要素ビーム伝搬法(引用文献)を元にした、フルベクトル波面整合法を新規開発した。

図3上段に、解析対象とした、Y分岐型Si導波路偏波分離素子の構造図を示す。入射されたTMモードは断熱変換により、Y分岐の手前でTE₁モードへと変換されるが、TE₀モードはTE₀モードのまま伝搬する。Y分岐においてはモードソーティングの原理により、TE₀モードが太い導波路の枝へ、TE₁モードは細い導波路の枝へTE₀モードとして結合する。この素子は高であり、偏波変換を伴うことから、従来のスカラ型解法で取り扱うことはできない。図2下段に、開発したWFM法によって得られた導波路構造の上面図を示す。特に、Y分岐の枝の前の導波路で、導波路幅に変調がかかっているのがわかる。最適化した素子の特性は、最適化前に比べて大幅に広帯域化されている(雑誌論文)。

<引用文献>

T. Fujisawa and M. Koshihara, "Full-vector finite-element beam propagation method for three-dimensional nonlinear optical

waveguides," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 20, no. 10, pp. 1876-1884, Oct. 2002.

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

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 WFM method," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 29, no. 13, pp. 1063-1066, July 2017 (査読有).

S. Makino, **T. Fujisawa**, and K. Saitoh, "Wavefront matching method based on full-vector finite-element beam propagation method for polarization control devices," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 35, no. 14, pp. 2840-2845, July 2017 (査読有).

Y. Yamashita, **T. Fujisawa**, S. Makino, N. 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).

T. Fujisawa, S. Makino, T. Sato, and K. Saitoh, "Low-loss, compact, and fabrication-tolerant Si-wire 90° waveguide bend using clothoid and normal curves for large scale photonic integrated circuits," Optics Express, vol.25, no.8, pp. 9150-9159, Apr. 2017 (査読有).

(Invited paper) 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).

〔学会発表〕(計 9 件)

S. Makino, M. Suga, T. Sato, **T. Fujisawa**, and K. Saitoh,

"Ultimately low-loss and compact Si wire 90° waveguide bend composed of clothoid and normal curves for dense optical interconnect PICs", Optical Fiber Communication Conference (OFC 2017), Paper Th3E.2, Los Angeles, USA, Mar. 19-23, 2017.

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.

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.

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 LP_{11a}/LP_{11b} mode rotator with curved trench structure," 2016 IEEE Photonics Conference (IPC2016), ThA1.2, Hawaii, USA, Oct. 2-6, 2016.

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," 21th Optoelectronics and Communications Conference (OECC), TuE3, Niigata, Japan, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 2 件)

名称：モード変換器及びモード変換方法並びにモード合分波器及びモード合分波方法

発明者：坂本泰志、半澤信智、松井隆、辻川恭三、中島和秀、山本文彦、齊藤晋聖、**藤澤剛**

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2015-164393

出願年月日：2015年8月24日

国内外の別：国内

名称：モード合分波器及びモード分波器の製造方法

発明者：坂本泰志、半澤信智、松井隆、辻川恭三、**藤澤剛**、齊藤晋聖

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2015-028893

出願年月日：2015年2月17日

国内外の別：国内

取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://icp.ist.hokudai.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤澤剛 (Fujisawa Takeshi)

北海道大学大学院・情報科学研究科・准教授

研究者番号：70557660

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：