

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賅うことができず、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

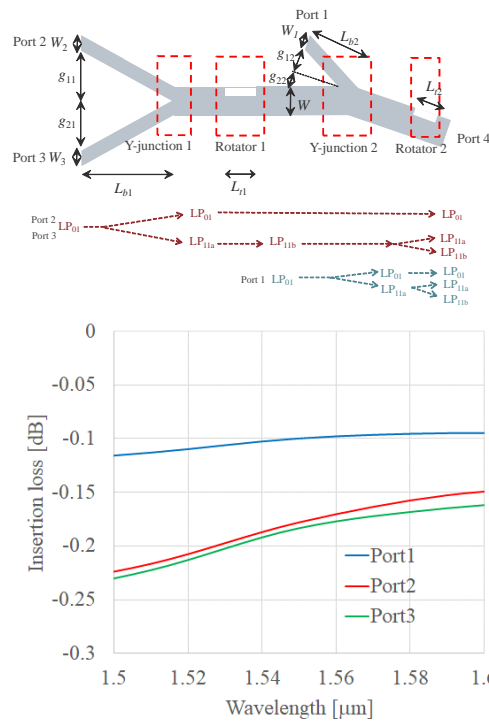


図1 提案した3モードスクランブラの上面構造図とその損失スペクトル(計算値)。

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

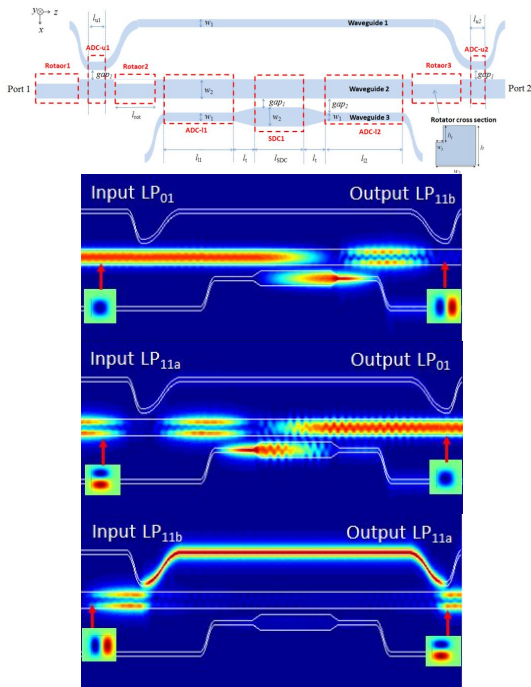


図2 提案した3モード交換器の上面構造図と各モード入力に対する界分布(計算)。

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

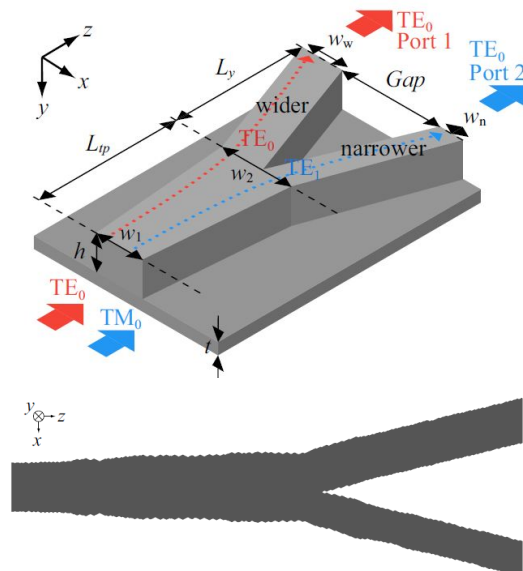


図3 シリコン導波路を用いたY分岐偏波制御素子の構造図とWFM法によって設計されたY分岐偏波制御素子の上面図

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ー型的设计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ー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、従来のスカラー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：