

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420366

研究課題名(和文) 導波路型空間モード合分波器の構成法とその評価法に関する研究

研究課題名(英文) Study on PLC based mode demultiplexer and its evaluation technique

研究代表者

久保田 寛和 (Kubota, Hirokazu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70501063

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：モノリシックな平面導波路型構造によりLP01モードと縮退した2つのLP11モードを分離する3モード分離器の構成を提案し数値解析により特性を評価した。光通信で使用するC帯において挿入損失1 dB以下、モードクロストーク-20 dB以下が実現できる可能性を示した。またPLC型モード分波器を多段構成にすることで広帯域化を図ることを考案し直列型、直並列型の2種類の構造を提案してその特性の数値解析を行った。直並列型は波長依存性の低減に加えて製造時の許容度が大きい構造であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We proposed a monolithic PLC-based 3-mode DEMUX. We qualitatively described the wavelength dependence and numerically investigated the wavelength dependent insertion loss of the DEMUX. It showed an insertion loss less than 1 dB and a wavelength dependent loss of less than 0.5 dB for all of the 3 modes in C band. By cascading two DEMUXes of different center wavelengths and numerically investigated mode separation characteristics. This simple design enhances wavelength dependence and may extend the fabrication tolerance of the mode DEMUX.

研究分野：工学

キーワード：モード分波器 平面光波回路 ファイバグレーティング

1. 研究開始当初の背景

モード分割多重伝送実現にモード合分波器は必須の構成要素であるが、挿入損失、汎用性等、現在は実験室レベル以上のものは実現できていない。申請者はこれまで平面光波回路を用いた導波路型モード合分波器の構造を提案し、提案した素子によるモード分割多重伝送実験を行ってきたが、利用可能なモードが限定され汎用性に欠けていた。本研究ではこれまで未検討であった複数の導波路が3次元的に結合する構造に関する検討を行い、2次元、3次元の両面から導波路型モード合分波器を進展させ、汎用性の高いモード合分波素子の実現をめざす。また、モード合分波素子の特性評価系構築を行いモード多重伝送による情報通信のさらなる発展に寄与する。

2. 研究の目的

近年、空間分割多重(SDM)伝送の研究が盛んになってきている。単一モード光ファイバー(SMF)は長距離にわたり大容量の情報を伝送できるため情報社会の不可欠な構成要素である。数年前から現在の情報量の爆発にSMFの伝送容量の増加が追いつかない状況が危惧されており、その解決策の有力候補がSDM伝送である。

SDM伝送は大別するとコア多重とモード多重が有る。日本では2008年に世界に先駆けてNICTが主催するEXATイニシアチブにてSDM伝送に関する検討が始まった。2年間の検討の中で成熟したSMFの技術を活用できるマルチコア光ファイバ(MCF)伝送の研究を中心にすすめることとなり、2010年から3年計画でMCFの研究を行う受託研究が開始された。一方、欧州では2009年からMode Gapプロジェクトが中心となってモード分割多重(MDM)伝送の研究を開始している。

我々はMCF伝送の研究を行いつつ、ファイバの構造が簡単であるMDM伝送の研究にも力を注いできた[1-3]。図1がMDM伝送の模式構成図である。光ファイバ中の異なる空間モード(以下モード)を活用することで、従来の波長多重伝送を複数組束ねて1本の光ファイバで送ることができ、伝送容量の拡大とともに、敷設・保守コストの低減が可能である。

モード分割多重伝送では、モードの合波・分波、伝送中のモードの混合等の問題を解決する必要がある。

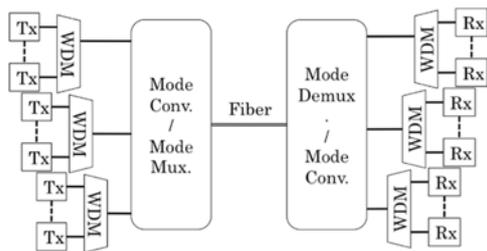


図1 MDM伝送の模式構成図

モード多重伝送では光ファイバ中のモードクロストークが存在するために、各モードに載せた信号の分離は困難であると考えられていた。このため、海外ではデジタル信号処理により混合したモードを分離することでモード多重伝送を実現する研究が進められている。

我々は光ファイバ中でのモードクロストークは伝搬モード数を数個に制限した光ファイバ(ヒューモードファイバ)を用いることにより小さくできる事を提案してきたが、昨今の伝送実験によりこれが実証されている。ヒューモードファイバとモードクロストークの小さいモード合分波器の組み合わせによれば、デジタル信号処理によらないMDM伝送が実現できる。

すなわち、残されたMDMの鍵はモード合分波器である。海外の研究では主に空間光学系を用いたモード合分波器が用いられているが、ハーフミラーを複数使うため原理的に挿入損失が大きい。申請者はこれまで平面光波回路(PLC)を使ったモード合分波器を提案し実証してきたが[1]、PLCが平面構造であることから電解分布が横方向の分布をもつモードしか分離できなかった。そこで本課題では(1)通常のファイバに適合する合分波可能なモード数多いモード合分波器を提案し、(2)その特性評価法の確立する、ことを到達目標とし、これにより情報通信のさらなる発展に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題は

- A. 円形のコアをもつFMFのモードに適合した導波路型モード合分波素子を考案しとその特性の数値解析
- B. 合分波素子の特性を評価するための評価方法の考案
- C. モード混合を光学的に低減する方法に関する検討

の3つのテーマからなり、(A)の多モード合分波素子の提案と(B)の評価方法の確立が2本柱である。

(A)に関しては現有資産のワークステーションを利用し、本研究費で導波路構造に特化したシミュレーションソフトを導入する事で効率的な解析を行う。(B)に関しては、現有資産の遠視野像測定系を活用し、本研究費で購入する波長可変光源を使用する事で波長依存性が評価可能な評価系の構築を計画していたが、査定により研究費が減額されたため波長可変光源を用いない方法に変更した。具体的にはファイバの曲げ損失のモード依存性を利用してモードの存在比率を測定する方補であり、他の研究課題と重複するためその成果[4]は本課題の成果には含めないこととした。(C)に関しては(A)で用いるソフトウェアを利用した数値解析を中心に行う計画であったが、想定した効果を得ることができなかったため、長周期ファイバグレーティングを用いた方法を考案し、実験により効果を確認することと

した。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 平面導波路型 3 モード(2LP モード)分離器

導波路型モード合分波器の動作原理はモード結合である。数モード導波路と単一モード導波路を平行に配置し、単一モード導波路の伝搬定数を数モード導波路のある高次モードの伝搬定数と一致させることにより、そのモードのパワーを単一モード導波路に結合させて抜き出すが、伝搬定数を一致させるとともに、モードの重なり積分がゼロにならないことが必要である。

光ファイバの  $LP_{01}$ 、 $LP_{11}$  モードを分離するために  $E_{11}$ 、 $E_{12}$ 、 $E_{21}$  モードを伝搬させる数モード導波路が必要になる。この3つのモードのうち図 4.1 に示すように  $E_{21}$  モードは単

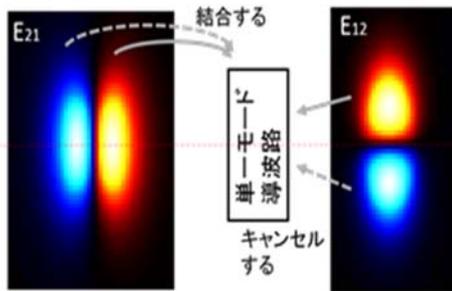


図 4.1 高次モードと単一モード導波路の結合

一モード導波路と結合が生じるが  $E_{12}$  モードでは対称性から単一モード導波路と結合が生じない。ここで3つのモードのうち  $E_{21}$  モードを抜き出すと、のこりは2モードのみとなるため、結合長の違いを利用して分離できる。

3モード導波路から  $E_{21}$  モードはあらかじめ抜き出されているとし、 $E_{11}$  と  $E_{12}$  の2モードを分離するシミュレーションを行った。図 4.2 は導波路長をかえた場合に入射導波路に残留する  $E_{12}$  モードのパワー(実線)と  $E_{11}$  モードのパワー(点線)を描いたグラフである。各導波路は幅  $15 \mu\text{m}$ 、高さ  $10 \mu\text{m}$ 、比屈折率差は  $0.4\%$  である。減衰分はこれに平行する導波路に移行している。約  $15 \text{ mm}$  の導波路長で各モードが分離できることがわかる。このとき平行する導波路側に混在する高次モード

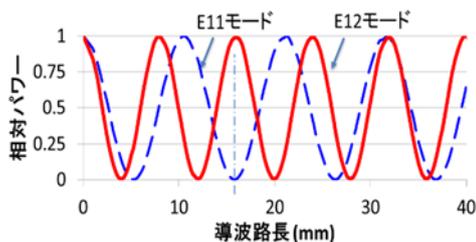


図 4.2 基本モードと  $E_{12}$  モードの分離特性

は導波路をテーパ状に狭め単一モード化することで除去可能である。

本方法により分離した  $E_{12}$  モードは、単一モード光ファイバに直接結合させると  $3 \text{ dB}$  の結合損失を生じるため、低損失化のためにはモード変換を行う必要があることが今後の課題

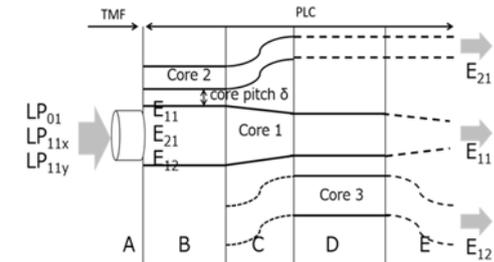


図 4.3 モード分波器の平面構造

の一つとしてあげられる。

図 4.3 は提案したモード分波器の平面構造を示した図である。図中の点線部分は計算時間の関係で計算モデルから除いている。便宜上 A から E の5つの部分に分けて説明する。以下それぞれ、A セクションないし E セクションと呼称する。A セクションはモード多重信号が伝搬してきた2 LPモードファイバであり、伝搬モードは  $LP_{01}$ 、 $LP_{11x}$ 、 $LP_{11y}$  の3つのモードである。B セクションはこのなかから  $LP_{11x}$  モードを分離する部分である。2 LPモードファイバからの  $LP_{01}$ 、 $LP_{11x}$ 、 $LP_{11y}$  モードの光はそれぞれモード分離器のコア1の  $E_{11}$ 、 $E_{21}$ 、 $E_{12}$  モードに結合する。 $E_{21}$  モードの伝搬定

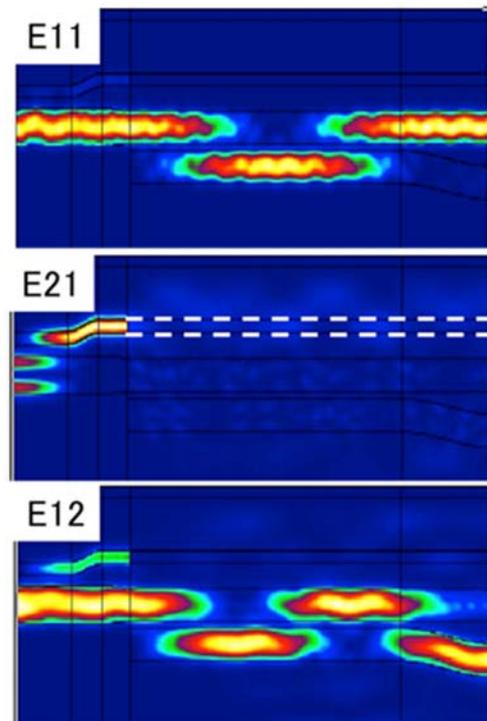


図 4.4 3モード分離器のモード分離の様子

数とコア2の伝搬定数が近い場合  $E_{21}$  モードの光はコア2へ結合して抜き出される。伝搬定数と結合長を調整することで原理的には  $E_{21}$  モードの光は100%コア2へ移行する。Cセクションはコア2へ移行した  $E_{21}$  モードの光がコア1へ再結合することを防ぐための部分であり、コアの間隔を広げて結合を弱めるとともにコア1の幅を減少させることで伝搬定数差を生じさせ、再結合を防ぐようにしている。

Dセクションが本研究成果の中心部分である。コア3の寸法は幅を減少させた後のコア1の寸法と同じであり、コア1に存在するすべてのモードがコア3に結合する。ここで先に見た通り、伝搬定数の違いにより結合長が異なるため、適切な長さを選び  $E_{12}$  モードのみをコア3へ抜き出すようにする。EセクションはCセクションと同様に再結合を防ぐとともに、コア1の出口を単一モードとすることで、コア1に残った高次モードの成分を除去するようにしている。前述のとおり、今回は計算時間の都合でこの部分の計算は行っていない。

図4.4はこの分波器よりのモードを分離する様子を数値解析により求めたものである。導波路に  $E_{11}$ ,  $E_{21}$ ,  $E_{12}$  モードそれぞれを入射させた場合に導波路のなかで光パワーが移動する様子を示している。 $E_{11}$  モードはDセクションいったんコア3に全パワーが移動するがその後コア1に戻り、中央の導波路から出力される。 $E_{21}$  モードはBセクションでコア2へ移動し、そのまま一番上のコアから出力される。前述のとおり、今回は計算時間の都合で  $E_{21}$  モードに関してはDセクション以降の計算を行っていない。 $E_{12}$  モードはDセクションでコア1とコア3の間でパワーの移動を繰り返し、最終的に一番下のコアから出力されている。Cセクションでコア2へわずかなパワー移動がみられるが、今回円形の光ファイバを長方形に区切って近似して計算したための計算誤差であると考えている。その大きさは1%以下である。

#### 4.2 平面導波路型3モード(2LPモード)分離器の波長依存性解析

本モード分離器はモード結合を利用しているため、2つの原因で波長依存性が生じる。一つは伝搬定数の波長依存性がモードにより異なること、一つは結合長が波長により異なることである。後者はモード結合理論より波長差の4乗に比例することが示されるが[文献]前者は理論的な解析が困難であり、両者を複合した波長依存性の大きさは数値解析により求める必要がある。また、挿入損失のみではなく、クロストーク(分離特性)も調べる必要がある。

コア3におけるモードクロストークはコア3への  $E_{11}$  モードの混入が主要因である。そこ

で  $E_{11}$  モードの混入が最小になるようにDセクションの長さを調整して設計する。このため、 $E_{21}$  モードの一部はコア1に残留するが、コア1に残留した  $E_{21}$  モードはEセクションでコア1を単一モード化することで除去することができ、クロストークとはならない。しかし、 $E_{21}$  モードの挿入損失がわずかに劣化することは避けられない。

図4.5はこの特性を示したものである。この計算ではEセクション部分を付加して計算している。一番上は各コア出力部での光強度とAセクションへの入力との比率をあらわしたものであり、挿入損失とみることができる。ここにはAセクションとBセクション間の接続損失も含んでいる。光通信で使用する帯域のうち、C帯、および図にはしめしていないが、L帯において挿入損失は1dB程度以下と良好な特性が期待できる。2番目はコア1の出力への各モードの出力パワーである。 $E_{11}$  モードの最大値を基準とすることでクロストークとして評価できるように描いている。このため、 $E_{11}$  モード以外は計算誤差程度となってお

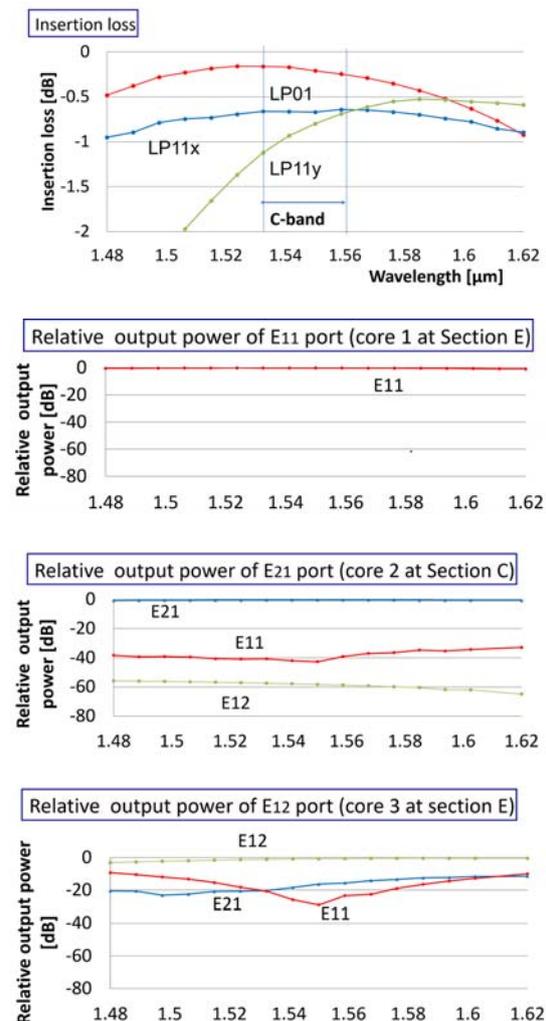


図 4.5 分離器の波長特性

り、グラフにあらわれていない。3番目はコア2へ出力される各モードのパワーであり、Cセクションの出口で評価している。モード結合の強さは伝搬定数差とモードの電界分布から決まるため、非常に選択性がよい。他モードの混入は設計波長から大きくずれた波長1620 nmにおいてE<sub>11</sub>モードが-30 dB以下混入するにとどまっている。最後はコア3へ出力される各モードのパワーである。この部分は残留するモードの影響を最も受けやすく、E<sub>11</sub>-E<sub>12</sub>分離の設計波長の1550 nmにおいてE<sub>11</sub>モードが-30 dB混入し、波長がずれるに従い混入量が増加している。光通信のC帯においては-20 dB以下が確保されているが、L帯まで広げて使うことは難しいことがみてとれる。E<sub>21</sub>モードの混入が大きい最も混入が少ない部分では-20 dB以下が確保されているため、寸法の最適化によりC帯でこの値を確保できるものと考えている。

#### 4.3 平面導波路型モード分離器の広帯域化

当初計画では4.2を発展させてLP<sub>21</sub>モードの分離を可能とする分離器の構成を検討する計画であったが、LP<sub>11y</sub>モードの分離との兼ね合いが難しいことがわかった。代案として楕円コアファイバに適した4モード分離器の検討を開始し、基本構造は確認できた。しかし本課題の前提である通常の光ファイバの使用と合致しないため4モード分離器の詳細検討は本課題終了後に行うこととし、本課題ではここまで得られたモード分離器の特性を改善する検討を行うこととした。

特性改善として広帯域化と作成時の許容度の拡大を目指した検討をおこなった。基本的なアイデアは中心波長のわずかに異なる2つのモード分離器を直列接続して特性を改善することである。2つのモード分離器の出力を並列に取り出す直並列型、および出力を一つにまとめる直列型の2通りの構造で検討を行った。なお、これらの構成はモードクロストークの低減のために考案した構造であるが期待した効果が得られなかったため、広帯域化への適用を行うこととした。ここでは直並列型についてのみ述べる。

図4.6に直並列型の模式構造図(平面図)とその波長依存性を示す。直並列型は1段目で残留した光パワーを2段目で抜き出す構造で有り、簡便に広帯域化できることが期待される。しかし出力は格段の出力を並列した2コアの合成電界で取り出すため単一モードとはならず、再度光ファイバに結合させる用途には向かない。直接受光する受信部での使用を想定している。波長依存性の数値計算では、直並列型の効果を示すために、1段目を最適設計からずらして、光パワーが残留するようにしているが、2段化することで広帯域・高効率化が計られていることが見て取れる。このことから、直並列型は設計・製作のマー

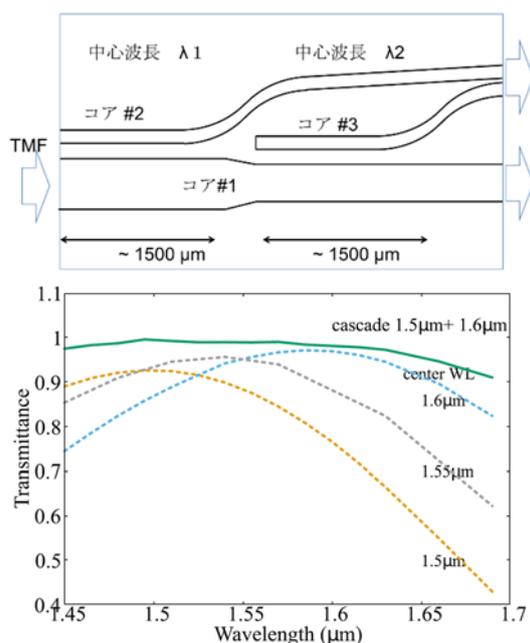


図 4.6 直並列型モード分波器の模式構造図と波長依存性

ジンを大きい構造であると言える。

#### 4.4 モードフィルタ

前述のとおり当初計画では直並列型モード分離器の構成を工夫することでモードクロストークの低減を行う予定であったが、期待した効果が得られなかった。そのため、代替案として考えていた特定のモードのみを減衰させることでモードの純度を上げる方法の検討を行った。高次モードを選択的に減衰させる方法は各種提案され実証されているため、本課題では基本モードのみを減衰させるモードフィルタの検討を行い、実験的な検証も行った。

長周期ファイバグレーティング(LPFG)は、光ファイバのコアの屈折率を周期的に変化させ、特定の波長の光だけを減衰させる光デバイスである。その特性を利用し、特定のモードを変換、減衰させる研究がなされている。本研究では、LP<sub>01</sub>およびLP<sub>11</sub>モードの2つのモードが伝搬する2モードファイバ(TMFG)を用いたMLPFGにおいて、基本モードのみを減衰させるモードフィルタへの適用を検討した。

LPFGのグレーティング周期・と共振波長・の関係は式(1)のように表される。ここで、 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ はそれぞれコア、クラッドの実効屈折率を表している。 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ の値は伝搬モードにより異なるため、周期を工夫することにより基本モードのみを選択的に減衰させられる。

$$= (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}}). \quad (1)$$

今回 LPFG は光ファイバの側面から機械的に周期的な圧力変化を加える方法で作成した。この方法によれば、加圧の有無でフィルタの

オンオフを行うことができる。周期的な圧力はジュラルミンの板に CNC ルータを用いて  $\approx 0.75\text{mm}$  の周期溝を加工し、これを光ファイバの側面から押し当て、加圧することにより発生させた。グレーティング長は  $55\text{mm}$  である。加圧の有無による基本モードと高次モードの比率の変化を測定したものが図 4.7 である。加圧することにより共振波長において基本モードが多く減衰し、高次モードの比率が向上している。提案法の原理確認を行うことができた。

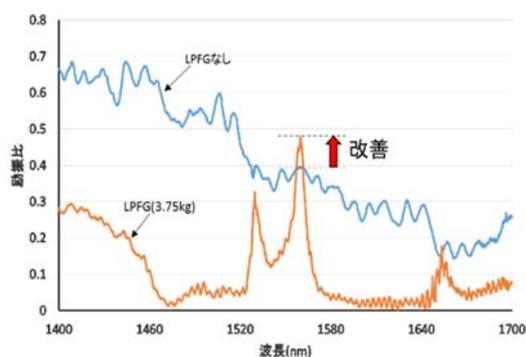


図 4.7 加圧の有無による基本モードと高次モードの比率の変化

#### 参考文献

1. H. Kubota, M. Oguma, and H. Takara, "Three-mode multi / demultiplexing experiment using PLC mode multiplexer and its application to 2+1 mode bi-directional optical communication." IEICE Electronics Express vol. 10, no. 12, 2013.
2. H. Kubota, and T. Morioka, "Few-Mode Fibers for Mode Division Multiplexing Transmission," SPIE Photonics West, paper 82840E, San Francisco, 2012 (招待講演)
3. 小熊学, 久保田寛和, 高橋浩, 橋詰泰彰: 特開 2013-152272 (特願 2012-011988) 高次モード平面光波回路
4. H. Kubota, Y. Miyoshi, M. Ohashi, T. Mori, T. Matsui, H. Nakajima, Mode-dependent loss measurement of a few-mode fiber using a conventional OTDR," IEICE Communications Express, Vol.5, No.11, pp.429-434, 2016.
5. 左貝潤一「導波光学」共立出版、2004年.

#### 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 0 件)

[学会発表](計 8 件)

- 1) 塩路基之、久保田寛和, 三好悠司, 大橋正治, MLPFG を用いたモードフィルタ」電子情報通信学会関西支部学生研究発表会 2017年2月22日, (京都)

- 2) 山村祥太, 久保田寛和, 三好悠司, 大橋正治, PLC を用いた 2 モード合分波器の広帯域化の検討, 平成 28 年電気関係学会関西連合大会, 2016 年 11 月 23 日, (堺市)
- 3) H. Kubota, S. Yamamura, Y. Miyoshi, and M. Ohashi, Wide-Passband PLC-Based Two Mode Demultiplexer, Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2016, December 4, 2016. (Wuhan, China) 査読有
- 4) K. Kataoka, H. Kubota, Y. Miyoshi, and M. Ohashi, Wavelength dependence of the PLC-based 3-mode demultiplexer, Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2015, (Hong Kong, China) November 22, 2015. 査読有
- 5) 片岡慶人, 久保田寛和, 三好悠司, 大橋正治, PLC を用いた 3 モード分離器の波長依存性の検討, 平成 27 年電気関係学会関西連合大会 G8-7, 2015 年 11 月 15 日(寝屋川市)
- 6) K. Kataoka, H. Kubota, Y. Miyoshi, and M. Ohashi, Proposal of a PLC-based 3-mode (2 LP modes) demultiplexer, CLEO Pacific-Rim, Paper T12 1071, (Busan, Korea) August 27, 2015. 査読有
- 7) K. Kataoka, H. Kubota, Y. Miyoshi, and M. Ohashi, Proposal of a PLC-based 3-mode (2 LP modes) demultiplexer, ISUPT-EXAT2015 Symposium, (Kyoto, Japan) July 13, 2015. 査読有
- 8) 片岡慶人, 久保田寛和, 三好悠司, 大橋正治, 平面導波路型 3 モード(2LP モード)分離器の提案、レーザー学会年次大会 2015 年 1 月 12 日(東京都)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

久保田 寛和 (KUBOTA, Hirokazu)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 70501063

##### (2) 研究分担者

##### (3) 連携研究者

##### (4) 研究協力者 (所属は 2014 年 6 月当時)

高良秀彦 (TAKARA, Hidehiko)

NTT 未来ねっと研究所

小熊学 (OGUMA, Manabu)

NTT フォトニクス研究所

開 達郎 (HIRAKI, Tatsurou)

NTT マイクロシステムインテグレーション研究所

盛岡 敏夫 (MORIOKA, Toshio)

デンマーク工科大学