

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249047

研究課題名(和文) 光ルータ用シリコン光集積回路の開拓

研究課題名(英文) Study of silicon photonic integrated circuits for photonic routers

研究代表者

水本 哲弥 (Mizumoto, Tetsuya)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00174045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円

研究成果の概要(和文)：パイロード部分を光のままルーティング処理する光ルータを構成することを最終目標として、波長変換器、波長選択光スイッチ、経路切替用光スイッチなどの機能素子をシリコン光回路プラットフォーム上で開発することを目的として研究を行った。成果として、波長変換器に必要な光アイソレータを、シリコン導波路上に磁気光学ガーネットを直接接合することによって製作し、TEモード動作、20～60℃の温度範囲で温度によらない一定の阻止特性を実現することに成功した。さらに、光の波長ごとに経路選択する波長選択光スイッチ、自己保持動作を可能とする磁気光学光スイッチの動作実証を行い、光ルータ実現の基礎を構築した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop optical functional devices on a silicon waveguide platform. A wavelength converter, a wavelength-selective optical switch and an optical switch are investigated, which are needed to realize a photonic router. An optical isolator is an important device to construct a wavelength converter. The isolator that provides an isolation of 28 dB for TE-mode lightwave has been successfully demonstrated. Also, an isolator has been successfully fabricated with an athermal isolation performance in a temperature range between 20-60 °C. In the fabrication of these devices, a magneto-optical garnet is directly bonded on a silicon waveguide. A novel wavelength-selective optical switch has been developed to route optical signals depending on their wavelengths. An optical switch that is applicable to realize a self-holding function has been successfully demonstrated based on a magneto-optical effect.

研究分野：オプトエレクトロニクス

キーワード：シリコンフォトンクス 直接接合 磁気光学ガーネット 異種材料集積 光ルータ 移相器 波長選択光スイッチ

1. 研究開始当初の背景

SOI (Silicon On Insulator) 基板上的のシリコン層に光導波路を形成すると、シリコン導波層とクラッド領域 (SiO₂) の間の大きな屈折率差によってシリコン導波路内に光波電磁界が強く閉じ込められる。これにより、ミクロンオーダーの微小な曲率半径で屈曲部を形成しても、低損失な伝搬特性をもつ光導波路を形成することができ、小面積で高密度な光回路の形成が可能になる。これを利用して、研究開発当初は、電子回路と光回路の集積化とともに、さまざまな光機能回路が研究されていた。

また、本研究の目的とする光信号の経路設定 (ルーティング) 機能は、一旦、光信号を電気信号に変換して行われていた。これは、光信号に含まれるアドレス情報の解析、経路設定、信号の衝突回避のためのデータ退避処理など、複雑な処理を光信号のままで行うのに適した光デバイスが十分に開発されていなかったことによる。

しかし、高ビットレートの光信号を大量に処理することが要求されるようになり、ルーティング処理にともなう電力消費が増大し、解決すべき課題としてクローズアップされていた。

2. 研究の目的

このような背景の中、光信号のペイロード部分を光のままルーティング処理する光ルータを構成することを最終目標として、これを実現するために必要なシリコン光回路素子の開発を進め、光ルータ実現の基礎を構築することが本研究の目的である。光ルータを構成する主な機能は、信号のアドレス情報の読取り・解析、これに従った経路設定である。光ルータにおいては、これらの多くを光信号のまま実行することが特徴となる。

すなわち、アドレス情報以外のペイロード部分は電気信号に変換することなく光信号のまま経路設定に従って処理する。経路設定の際、複数の信号の衝突が発生した場合には、信号を一時的に退避して時間軸上で空き時間を作って処理する方法と、波長を変換して波長分割多重で送出する方法が考えられる。現段階では、任意の時間、光信号を光のままバッファ処理する有効なデバイス・方法がないため、本研究では波長変換後に波長分割多重で送出する方法を想定している。

さらに、波長分割多重された信号を波長ごとに独立して経路選択する機能も重要である。このため、波長選択スイッチの開発が必要になる。また、波長分割多重した光信号群を、まとめて経路選択する光スイッチも必要である。

本研究では、このような機能を実現するために必要な光回路素子として、波長変換器、波長選択スイッチ、波長によらず経路を切替る光スイッチなどの機能素子をシリコン光回路プラットフォーム上で開発し、最終的に

これらを集積することを目的とした。なお、ヘッダ部分に含まれるアドレス情報は光信号のまま処理するのではなく、電気信号に変換し高速な電子回路で処理し、光信号の経路設定用の制御信号を生成するのに用いる。

3. 研究の方法

波長変換は、化合物半導体で形成される利得媒質中における相互位相変調を用いて行うが、光波が逆方向に伝搬すると正しく動作しない。これを阻止するためには、光アイソレータを集積する必要があり、これまでこの目的に適した光アイソレータの開拓が遅れていた。その理由は、光アイソレータの伝搬方向によって異なる伝達特性、すなわち非相反な特性を実現するために必要な磁気光学効果をシリコン光導波路で容易に利用することができなかったことによる。本研究グループは、波長 1310 nm 及び 1550 nm 帯の光ファイバ通信波長で大きな磁気光学効果をもち光吸収損失の小さい磁気光学ガーネット (YCe)₃Fe₅O₁₂ (Ce:YIG) の単結晶の成長に成功しており、これを直接接合法によってシリコン光導波路上に集積化する技術も開拓している。本研究では、この異種結晶接合法を用いて、これまでに実現されている光アイソレータの特性改善とこれを III-V 族化合物半導体導波路と集積することについて、検討を行うこととした。

また、光の波長ごとに経路選択する波長選択スイッチについて、光ルータの構成に合致したデバイス構造を検討し、シリコン光回路でこれを実現することを目指した。

波長群として経路選択する光スイッチについては、消費電力の低減に有効な自己保持動作を可能とする磁気光学スイッチについて研究を行った。

4. 研究成果

研究によって得られた主な成果は、次のとおりである。

(1) 波長変換器

波長変換器の構成に必要な光アイソレータの特性改善について検討を行った。これまで、シリコン導波路でマッハツェンダ干渉導波路 (MZI 導波路) を形成し、干渉導波路上に磁気光学材料 Ce:YIG を直接接合して製作したデバイスにおいて、磁気光学効果によって発現する非相反な位相変化を利用して光アイソレータ動作を実現してきた。この光アイソレータは、磁気光学材料を上クラッド層として配置するため、TM モードの光波に対してのみアイソレータとして機能し、TE モード光に対しては非相反な動作を示さない。一方、多くのシリコン導波路光回路素子は TE モードで動作する。波長変換器を形成する利得導波路も、通常の III-V 化合物半導体導波路では TE モードに対して光利得を有するため、TE モード光に対して波長変換機能をもつ。

この問題を解決するため、TMモード光に対して動作する MZI 光アイソレータと TE-TM モード変換器を集積することで、TEモード入力光に対して機能する光アイソレータの実現を検討した。集積する TE-TM モード変換器は、光アイソレータの導波路と一括して形成できる構造が望ましい。本研究では、スリット導波路において、高次 TE モードと基底 TM モードが結合し、入射 TE モードが効率よく基底 TM モードに変換される素子構造を見出し、これを MZI 光アイソレータと集積した[1][2]。TE-TM モード変換器と MZI 光アイソレータを集積化した TE モード入力光アイソレータの全体構造を図 1(a)に示す。また、TE-TM モード変換器の素子構造を図 1(b)に示す。

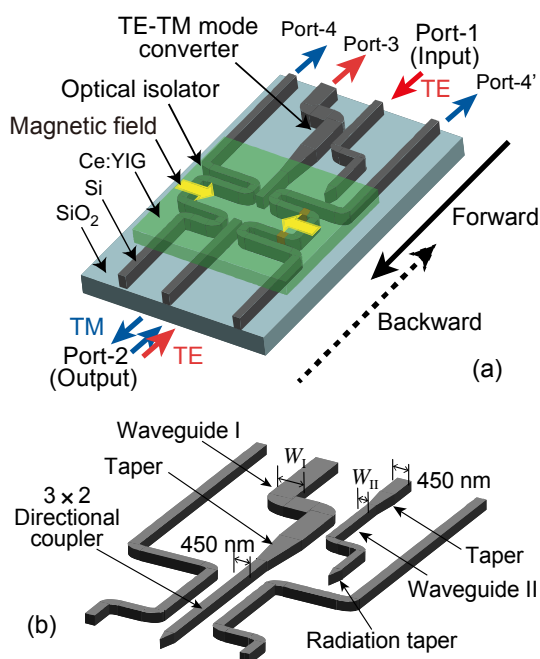


図 1 (a)TEモード入力光アイソレータ (b)TE-TMモード変換器[2]

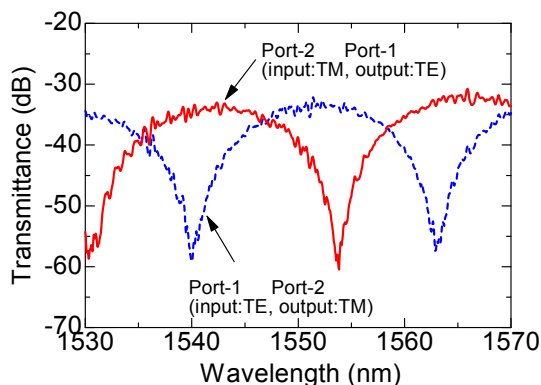


図 2 TEモード入力光アイソレータ伝達特性の波長依存性測定結果[2]

製作した TE モード入力光アイソレータの伝達波長特性を図 2 に示す。波長 1553 nm において 27 dB の良好なアイソレーション特性をもつデバイスの実現に成功した。

さらに、光ルータの用途を考えると、環境温度が動作によって変化することが考えられる。特に、波長変換器などの電流注入で動作する光能動デバイスは、動作にともなって温度が変化する。このような動作温度の変化に対しても、光アイソレータが一定の阻止特性をもつことが重要である。これを実現するため、光アイソレータの温度無依存化について検討を行った。

本研究の対象とする MZI 光アイソレータの温度特性は、導波路を構成する材料の屈折率温度依存性と磁気光学材料 Ce:YIG の磁気光学係数の温度依存性によって決まる。Si および SiO₂ の屈折率温度係数は既知であるが、Ce:YIG の屈折率温度係数及び磁気光学係数の温度依存性は未知であった。本研究では、光アイソレータの動作特性の温度依存性を測定することによって、これらの材料特性の温度係数を明らかにした[3][4]。そして、この結果をもとに、温度上昇とともに減少する磁気光学位相変化を、温度上昇とともに屈折率が增大することでもたらされる位相変化の増加分で相殺することによって、光アイソレータとして重要な逆方向伝搬光の阻止特性が温度変化に依存しないデバイス設計を明らかにした。さらに、シリコン光導波路を適切に設計し、製作した光アイソレータにおいて、図 3 に示すように、20~60 の温度範囲で逆方向伝搬阻止特性が温度に依らず一定となるシリコン導波路形光アイソレータの実現に成功した。

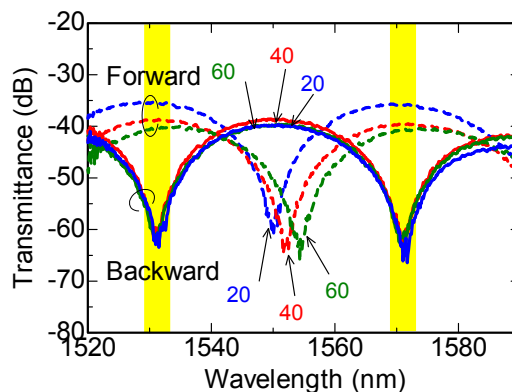


図 3 光アイソレータにおける温度無依存阻止特性[4]

(2)波長選択光スイッチ

本研究で検討している光ルータの構成では、光信号を波長多重化して伝送し、経路設定するため、波長ごとに信号のルーティング先を制御する必要がある。このために、波長ごとに経路選択を行う波長選択光スイッチは基本的な構成要素である。

本研究では、まず、シリコン導波路でマイクロリング共振器を形成し、この共振波長がリング半径によって設定できることを利用して波長選択素子として用い、選択した波長をシリコン光導波路 MZI 形スイッチで経路選択するデバイス構成を検討した(図 4)[5]。

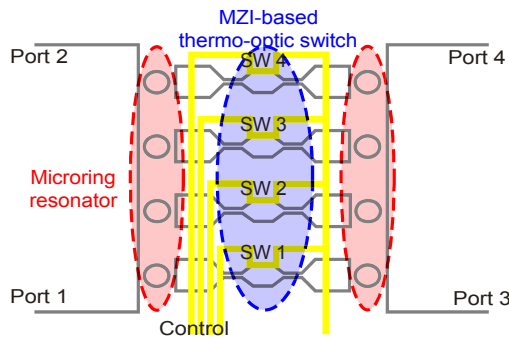


図4 波長選択光スイッチの構造[5]

このデバイスで、基本的な動作原理検証を行い、波長選択光スイッチ動作を実証することができた。すなわち、1550 nm 波長帯において、1540 nm, 1548 nm, 1556 nm, 1564 nm の波長間隔 8 nm で共振する 4 個のマイクロリング共振器を配置し、これによって分波した特定の波長チャンネルに対応した MZI 光スイッチを動作させて、選択した波長チャンネルのみをバー・ポートとクロス・ポートで切替ることができた。経路切替における on/off 消光比は 9 dB であった。

このデバイス構造では、波長チャンネルの分波および合波を行うマイクロリング共振器が離れて配置されており、製作誤差によって合波器と分波器の波長特性を完全に一致させることが困難である。これは、挿入損失につながるため、この問題を解決するデバイス構造を再検討した。

その結果、図 5 に示すような構造を考案した。マイクロリング共振器で合分波を行い、波長選択することは同じであるが、MZI 干渉導波路内部にこれを配置することができるため、2 つのマイクロリング共振器の共振特性を一致させることが容易である。なお、マイクロリング共振器の前後に配置された移相器を制御することによって経路の選択を行う。この素子構造では、1 対のマイクロリング共振器と移相器を波長チャンネルごとに設けて、MZI 干渉導波路中にタンデムに配置することで、容易に波長チャンネルを増設することができる[6]。マイクロリング共振器で合分波する波長選択スイッチに比べ、合分波用の波長選択素子を近接して配置することができるため選択波長のずれが発生しにくく、低損失な波長選択スイッチ動作の実証に成功した。

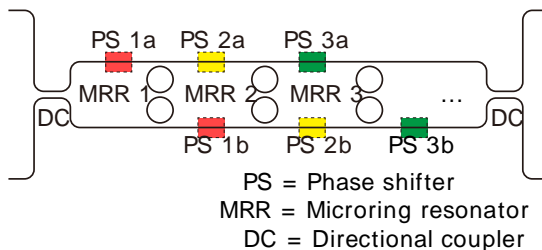


図5 波長選択移相器を用いた波長選択光スイッチの構造[6]

(3)光スイッチ

光信号の経路設定のために、光スイッチは重要な役割をはたす。磁気光学ガーネット単結晶上にアモルファスシリコン導波路を形成し、これを用いて磁気光学導波路形光スイッチを実現した。磁気光学効果と磁気記録材料を組み合わせることによって、将来的に自己保持動作に発展させることができる。これによって、ルータの選択経路の切替時以外には制御用の電力消費を必要とせず、ルータの消費電力を有効に低減することができるようになる。

実現した磁気光学光スイッチの構造を図 6 に示す。MZI の干渉導波路上に設けた電極に流れる電流によって発生する直流磁界が、光の伝搬方向と直交し、基板面に平行な方向に印加される。これによって、磁気光学位相変化が発生する。図の構造では、2 本の干渉導波路において互いに逆向きの磁界が印加されるため、異符号の磁気光学位相変化が発生し、結果として干渉導波路間に位相差が発生する。この位相差と磁界の印加によらずに導波路間に一定の位相差を与える位相バイアスを組み合わせることによって、ある電流方向では 2 本の干渉導波路を伝搬する光波が同位相となり、逆方向の電流では逆位相となるように設定することができる。これによって MZI の伝達ポートをバー・ポートとクロス・ポートで切り替えることができる。

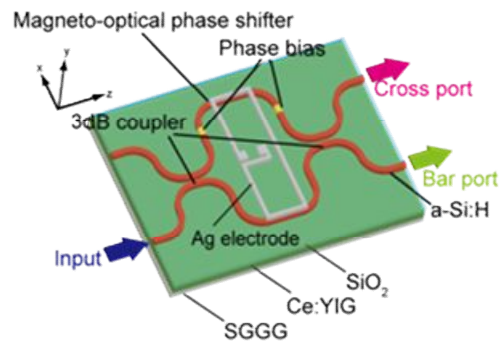


図6 磁気光学光スイッチの構造[7]

製作した磁気光学光スイッチにおいて、電極に流れる制御電流の方向・大きさを変化させた場合のバー・ポート及びクロス・ポートの伝達特性の変化を図 7 に示す。測定波長は 1550 nm である。この結果、電流±70 mA における伝達特性を比較すると、消光比 11.7dB で経路切替を実現することができた。

本研究では、電流駆動によって経路切替を行ったが、電極と磁気光学材料の間に磁気記録材料を配置し、電流によって磁気記録材料の磁化方向を制御することで、経路切替時のみ制御電流が必要で、それ以外の時間では磁気記録材料によって磁気光学材料の磁化が保持さえるため、常時電流を印加する必要がない。すなわち、経路切替時以外には外部駆動電力を必要としない自己保持型の光スイッチとして動作する。

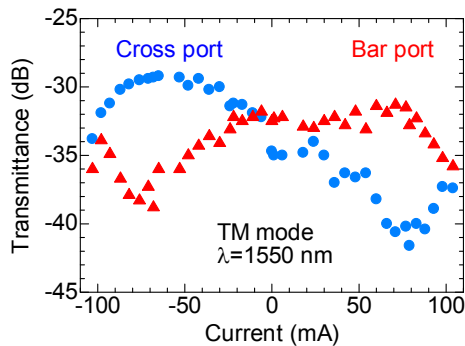


図 7 磁気光学光スイッチの制御電流による伝達特性の変化[7]

(4)今後の課題

光ルータを構成する重要な光デバイスとして、波長変換器、波長選択光スイッチ、光スイッチをシリコン光回路上で形成することについて研究を行った。

今後の課題として、次の事項について検討し、光ルータの実現に向けて研究を推進する必要がある。

局所的な異種材料集積

波長変換器に必要な利得媒質と磁気光学材料を接合によって局所的にシリコン導波路上に配置する技術を開拓し、波長変換器を実現する。

波長選択光スイッチの消光比改善

本研究で実現した波長選択光スイッチは、最大で 9 dB の消光比であった。信号を適切にルーティングするためには、この光スイッチを多段に接続してルータを構成する必要があり、光スイッチには十分な消光比が求められる。MZI 光スイッチデバイスの特性改善を進めて、これを実現する。

光デバイスの集積化

個別の機能光デバイスの実現には一定の見通しを得ることができた。今後は、これら機能光デバイスを同一のシリコン光回路上に集積して、光ルータに必要な光回路をワンチップで形成する。

<引用文献>

- [1] A. Fujie, et al., “Silicon waveguide optical isolator integrated with TE-TM mode converter,” Optical Fiber Communication Conference and Exposition and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2015), Los Angeles, USA, WA.7 (March 25, 2015).
- [2] Y. Shoji, et al., “Silicon waveguide optical isolator operating for TE mode input light,” IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 22, 4403307 (Nov. 2016).
- [3] K. Furuya, et al., “Demonstration of an

athermal waveguide optical isolator on silicon platform,” 41st European Conference on Optical Communication (ECOC 2015), Valencia, Spain, Th.2.4.2 (Oct. 1, 2015).

- [4] K. Furuya, et al., “Athermal operation of a waveguide optical isolator based on canceling phase deviations in a Mach-Zehnder interferometer,” J. Lightwave Technology, vol. 34, no. 8, pp. 1699-1705 (April 2016).
- [5] K. Miura, et al., “Silicon on-chip wavelength-selective switch composed of Mach-Zehnder interferometer-based switches and microring resonators,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, 068001 (May 2016).
- [6] K. Miura, et al., “Mach-Zehnder wavelength selective switch embedded with microring resonators,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 022201 (Jan. 2017).
- [7] E. Ishida, et al., “Magneto-optical switch with amorphous silicon waveguides on magneto-optical garnet,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, 088002 (July 2016).

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 7 件)

- [1] M. Yanaga, Y. Shoji, Y. Takamura, S. Nakagawa, and T. Mizumoto, “Compact magneto-optical isolator with cobalt ferrite on silicon photonic circuits,” Applied Physics Express (APEX), vol. 8, No.8, 082201 (July 2015). (査読有)
DOI: 10.7567/APEX.8.082201
- [2] Y. Shoji, K. Miura, and T. Mizumoto, “(Topical Review) Optical nonreciprocal devices based on magneto-optical phase shift in silicon photonics,” J. Optics, vol. 18, no. 1, 013001 (Jan. 2016). (査読有)
DOI: 10.1088/2040-8978/18/1/013001
- [3] K. Furuya, T. Nemoto, K. Kato, Y. Shoji, and T. Mizumoto, “Athermal operation of a waveguide optical isolator based on canceling phase deviations in a Mach-Zehnder interferometer,” J. Lightwave Technology, vol. 34, no. 8, pp. 1699-1705 (April 2016). (査読有)
DOI: 10.1109/JLT.2015.2505538
- [4] K. Miura, Y. Shoji, and T. Mizumoto, “Silicon on-chip wavelength-selective switch composed of Mach-Zehnder interferometer-based switches and microring resonators,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, 068001 (May

2016). (査読有)

DOI: 10.7567/JJAP.55.068001

- [5] E. Ishida, K. Miura, Y. Shoji, T. Mizumoto, N. Nishiyama, and S. Arai, "Magneto-optical switch with amorphous silicon waveguides on magneto-optical garnet," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, 088002 (July 7, 2016).

(査読有) DOI: 10.7567/JJAP.55.088002

- [6] Y. Shoji, A. Fujie, and T. Mizumoto, "(Invited Paper) Silicon waveguide optical isolator operating for TE mode input light," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 22, 4403307 (Nov. 2016). (査読有)

DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2574678

- [7] K. Miura, Y. Shoji, and T. Mizumoto, "Mach-Zehnder wavelength selective switch embedded with microring resonators," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 022201 (Jan. 2017). (査読有) DOI: 10.7567/JJAP.56.022201

[学会発表](計7件)

- [1] T. Mizumoto and Y. Shoji, "(Invited) Optical isolators and circulators on Si platforms," International Conference on Solid State Devices and Materials 2014 (SSDM2014), Tsukuba, Japan, B-4-2 (Sept. 10, 2014).

- [2] A. Fujie, Y. Shoji, and T. Mizumoto, "Silicon waveguide optical isolator integrated with TE-TM mode converter," Optical Fiber Communication Conference and Exposition and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2015), Los Angeles, USA, WA.7 (March 25, 2015).

- [3] K. Furuya, K. Kato, Y. Shoji, and T. Mizumoto, "Demonstration of an athermal waveguide optical isolator on silicon platform," 41st European Conference on Optical Communication (ECOC 2015), Valencia, Spain, Th.2.4.2 (Oct. 1, 2015).

- [4] T. Mizumoto and Y. Shoji, "(Invited) Recent progress in optical nonreciprocal devices for silicon photonics," 28th IEEE Photonics Conference (IPC 2015), Reston, USA, WD3.2 (Oct. 7, 2015).

- [5] T. Mizumoto and Y. Shoji, "(Invited) Optical isolators and circulators for Si photonics," 18th European Conference on Integrated Optics (ECIO 2016), Warsaw, Poland, ECIO I-14 (May 19, 2016).

- [6] T. Mizumoto and Y. Shoji, "(Invited) Magneto-optical nonreciprocal devices on silicon," Progress in Electromagnetics Research Symposium 2016 (PIERS 2016),

Shanghai, China, 1A5-5H4 (Aug. 8, 2016).

- [7] E. Ishida, K. Miura, Y. Shoji, H. Yokoi, T. Mizumoto, N. Nishiyama, and S. Arai, "TE Mode operation of non-reciprocal phase shift optical isolator with amorphous silicon waveguide," Optical Fiber Communication Conference (OFC 2017), Los Angeles, USA, Th3.E.4 (March 23, 2017).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水本 哲弥 (MIZUMOTO TETSUYA)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号: 00174045

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

庄司 雄哉 (SHOJI YUYA)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号: 00447541