

平成21年5月27日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360033

研究課題名（和文） シリコンフォトニクス光集積回路の開拓

研究課題名（英文） Development of Photonic Integrated Circuits for Silicon Photonics

研究代表者

水本 哲弥（MIZUMOTO TETSUYA）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00174045

研究成果の概要：

シリコン光集積回路を実現するための基礎として、シリコン導波路型光アイソレータと発光デバイスについて研究を実施した。特に、これらの光デバイスを形成するために必要な、磁気光学ガーネットや III-V 族化合物半導体をシリコン導波層上に接合するために、表面活性化接合法を開拓した。さらに、試作したシリコン導波路型光アイソレータにおいてアイソレーション 21 dB の良好な特性を実現し、発光デバイスを形成するための分布反射器をシリコン導波路上に形成した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2007年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：シリコンフォトニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・光学基礎 / 応用光学・量子光工学

キーワード：光集積回路、シリコンフォトニクス、シリコン細線導波路、導波路型光アイソレータ、磁気光学ガーネット、ダイレクトボンディング、表面活性化接合

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の強い閉じ込めが生じる。この効果を利用することによって、 μm オーダーの微小な曲率半径で屈曲部を形成しても、低損失な光伝搬特性をもつ光導波路を形成することができ、光回路の超小型化が可能となる。

研究を開始した当初は、電子回路と光回路

の集積化とともに、この光回路の微小化に着目して、シリコン光回路の研究開発が活発化する時期にあった。特に、Si 導波路上の半導体エバネッセントレーザの発振、10Gbps を超える高速光変調器、リング共振器やアレー導波路格子による光合分波器など、多くの光機能素子の研究開発が活発化し、成果が報告されていた。その中で、光波に対する非相反性を有する光アイソレータについては、いずれの研究機関も研究開発に未着手であり、本研究グループが 2004 年に提案したシリコン

干渉導波路型光アイソレータが、唯一の提案例であった。

また、いくつかの光機能素子を一体に集積化するという試みも報告されつつあったが、シリコン光回路上に光源と光機能素子を集積化した例は無かった。

2. 研究の目的

高性能な半導体レーザ光源を実現するためには、レーザへの反射戻り光の入射を防止し、安定なレーザ発振を実現する必要がある。また、光回路の高機能化を進めるためには、半導体光増幅器を適切に配置して回路中で発生する光損失を補償する必要があり、増幅器の発振など予期せぬ動作を防止するために、光アイソレータを配置する必要がある。シリコン光回路において、光波に対する非相反伝搬特性をもつ光アイソレータは報告例がなく、シリコン光回路を高機能化するために、研究開発が望まれている。

本研究は、光回路として重要な光源デバイスと、これに反射戻り光が入射することを防止する光アイソレータを一体集積化したシリコン光集積回路を形成するための技術的課題を解決し、将来の高機能シリコン光集積回路の発展に資することである。

3. 研究の方法

光能動素子に予期しない方向から光が入射することを防止する光アイソレータは、非相反な動作特性を実現するために磁気光学効果を利用する必要がある。シリコン光回路が用いられる波長帯は近赤外領域であり、波長 1310nm と 1550nm 帯の光ファイバ通信波長が主たる使用波長となる。この波長帯において、大きな磁気光学効果を持ち、光吸収損失の小さい材料として、磁気光学ガーネット（希土類鉄ガーネット）が知られている。しかし、物性の違いから、この材料をシリコン上に結晶成長させることは極めて困難である。シリコン光回路上で光アイソレータを形成するためには、この問題を解決する必要がある。

これに対して本研究では、異種結晶接合法として知られているダイレクトボンディング法を用いることとした。特に、強固な接合が実現可能な、表面活性化接合法でシリコンと磁気光学ガーネットの接合を検討し、良好な接合を実現するための表面活性化処理の方法などの接合条件の明確化を行った。

さらに、SOI ウェーハ上のシリコン導波層に光導波路を形成し、異種結晶接合技術を用いてシリコン導波層に磁気光学ガーネットを接合して光アイソレータを試作し、その動作特性を検証した。

一方、光機能回路を形成するために、光源の開発は重要な課題である。特に、シリコン

は間接遷移形半導体であり、それ自身を高効率な発光材料とすることが困難である。したがって、発光効率の高い材料として III-V 族化合物半導体を用い、これをシリコン導波路上に配置する構造を検討することとした。化合物半導体とシリコン導波路の間は、十分な光結合が生じるように層構造を形成する必要がある。シリコン上に結晶性のよい化合物半導体を成長することは困難であるため、ダイレクトボンディング法を用いて化合物半導体発光層をシリコン導波路上に接合することを試みた。また、レーザを実現するためには、光共振器を形成する必要がある。光共振器に必要な分布反射器を、導波路形成段階でシリコン層に形成する方法を検討した。

4. 研究成果

シリコン光集積回路を形成するために必要な光アイソレータと発光デバイスについて、次の研究成果が得られた。

4.1 デバイス設計

(1)シリコン導波路型光アイソレータ

SOI ウェーハ上のシリコン層を光導波路コアとし、この上に磁気光学ガーネットを接合する（図 1）。磁気光学ガーネットの膜面内で光の伝搬方向と直交する方向に外部直流磁界を印加すると、シリコン導波層を伝搬する光波電磁界分布が、磁気光学効果によって伝搬方向に応じてわずかに異なる方向に変位し、伝搬方向に依存する位相変化を示す（非相反移相効果）。干渉導波路中にこの効果を組み入れ、磁気光学効果による非相反な位相変化を $\pm 90^\circ$ に設定する。同時に、伝搬方向に依存しない 90° の位相変化を、一方の干渉導波路に挿入する。

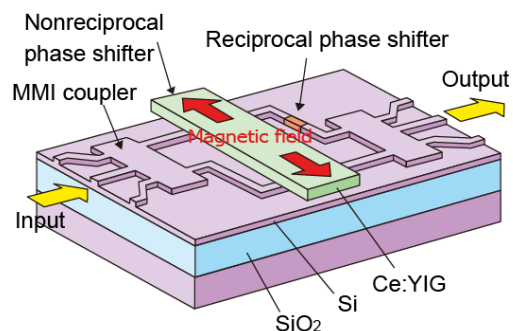


図 1 シリコン干渉導波路型光アイソレータ

このように設計すると、前進波に対しては磁気光学効果による位相変化と伝搬方向によらない位相変化が相殺し、同相干渉が起こり、入力端から入射する光波はすべて出力端から出射される。逆方向に伝搬する光波は、磁気光学効果による位相変化の符号が反転するため、伝搬方向に依存しない位相変化と相加し、逆相干渉となる。結果として、出力

端から逆方向に入射する光波は、入力端から出射せずに、放射端から出射される。すなわち、逆方向から伝搬する光波が入力端に接続された光デバイスに入射することを防ぐことができる。

この光アイソレータを形成するために重要な要素は、干渉計を形成する分岐結合器と非相反移相器である。分岐結合器としては、特性の波長依存性が小さく、製作誤差による特性劣化が比較的小さい多モード干渉(MMI)分岐結合器を用いた。また、非相反移相器は、磁気光学ガーネット Ce:YIG / Si / SiO₂ という層構造が決まると、Si 導波層の厚さによって発生する非相反移相効果は図 2 のように求まり、位相変化量 ±90° を得るために必要な伝搬長が決まる。本アイソレータは TM モードで動作する。TM モード光に対する伝搬損失を低減するために、シリコン導波層の厚さは 300 nm とした。その結果、波長 1550 nm で光アイソレータとして動作させるために、非相反移相器の伝搬長を 430 μm と設定した。

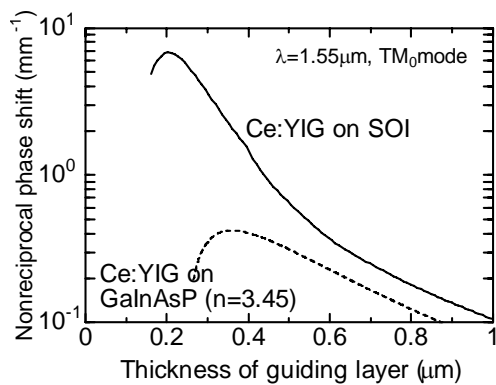


図 2 シリコン導波路における非相反移相効果の導波層厚依存性 (波長 1550 nm)

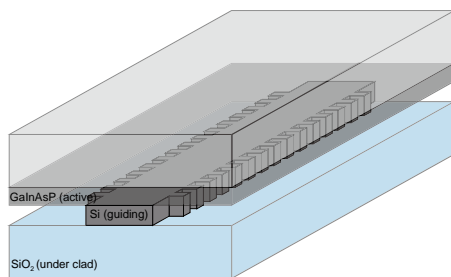


図 3 シリコン導波路上発光デバイスの構造

(2)発光デバイス

III-V 族化合物半導体 GaInAsP を発光層としてシリコン光導波路上に配置し、GaInAsP 活性層の発光をシリコン導波路に結合させて発光デバイスとして用いることを検討した。ここで、シリコン導波路側壁にグレーティングを形成し、垂直回折格子型分布反射器

によってレーザ共振器を構成することにした (図 3)。

また、活性層のゲインを有効に利用するためには、GaInAsP 層への光閉じ込めが重要である。GaInAsP 層への光閉じ込め係数を計算した結果、図 4 に示すように、発光デバイスを形成するために十分な GaInAsP 層への光閉じ込めが得られることがわかった。

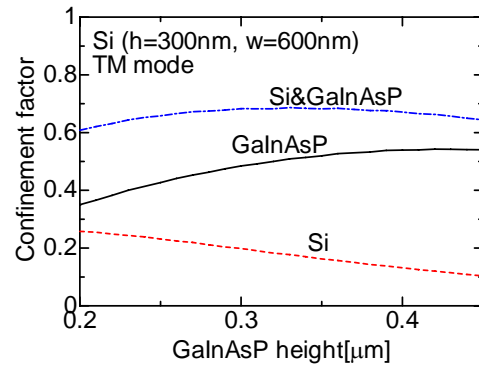


図 4 GaInAsP 層への光閉じ込め係数

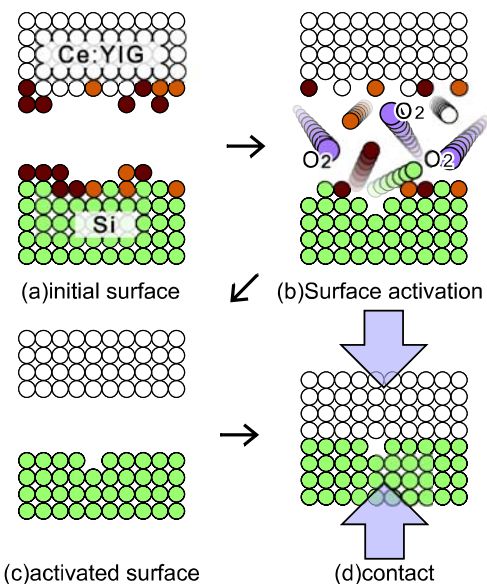


図 5 表面活性化接合の手順

4.2 異種結晶接合

光アイソレータを形成するためには、磁気光学ガーネットをシリコン導波路上に配置する必要がある。また、発光デバイスをシリコン導波路上に形成するためには、シリコン層の上に III-V 族化合物半導体を配置する必要がある。これらの異種結晶をシリコン導波層の上に適切に配置するために、表面活性化接合法を研究した。

表面活性化接合法による異種結晶接合の手順を図 5 に示す。プラズマ照射などの方法により、接合する結晶表面を活性化する。表面の洗浄性を保つため、活性化した表面同士

を真空中で接合し、必要に応じて加熱・加圧することで接合を完成させる。

良好な接合を実現するためには、適切な表面活性化処理を行う必要がある。本研究の成果として、磁気光学ガーネット (Ce:YIG) とシリコン、III-V 族化合物半導体とシリコンを接合するいずれの場合も、酸素プラズマを照射することが、表面活性化の手段として有効であることを見出した。この方法によって接合した試料を図 6 に示す。Ce:YIG とシリコンは、250°C に加熱しながら 5MPa の圧力を 1 時間印加することで接合させた。また、GaInAsP とシリコンを室温で接合することに成功した。

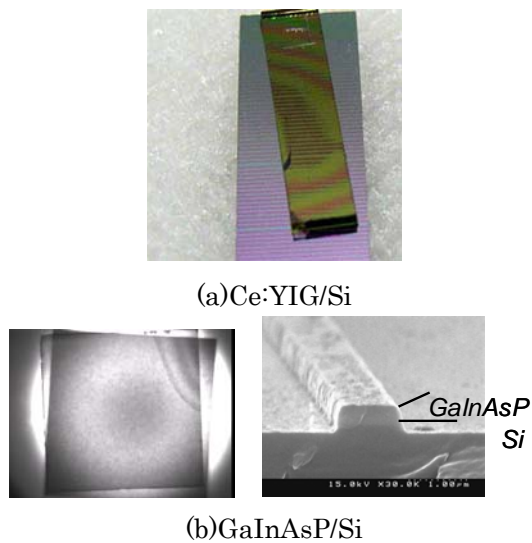


図 6 表面活性化接合法により接合した試料

4.3 デバイス特性

(1) シリコン導波路型光アイソレータ

SOI ウェーハ上の厚さ 300nm のシリコン層にリブ導波路によってマッハツェンダ干渉計を形成し、干渉導波路上に表面活性化接合法によって Ce:YIG を直接接合して、シリコン導波路型光アイソレータを製作した。シリコンリブ導波路の高さは 10 nm で、シングルモード条件から幅を 2 μm とした。リブ導波路の横方向光閉じ込めが弱いため、マッハツェンダ干渉計を形成する導波路曲がり部分は、曲率半径 500 μm と、シリコン導波路としては比較的緩やかな曲がり導波路で形成する必要があり、結果としてアイソレータ全体のデバイス長が約 4mm となった。

製作した光アイソレータに、偏波面保存ファイバを端面接続し、デバイスの透過損失を測定した。なお、光アイソレータとして動作させるために、小形の永久磁石によって 2 本の干渉導波路に互いに反平行に磁界を印加した。光入出力用に接続した光ファイバと光源および光検出器との接続を光スイッチによって切り替え、伝搬方向の反転による透過

特性の変化を測定した。測定結果を図 7 に示す。図から、伝搬方向を反転させることによって、透過損失の波長特性が著しく変化することがわかる。例えば、波長 1559nm における透過損失をみると、CCW 方向の透過損失は小さく、逆(CW)方向の透過損失は大きくなっている。すなわち、伝搬方向によって、透過/阻止特性が変化する。さらに、磁界の印加方向を反転すると、干渉効果も反転し、透過損失波長特性の伝搬方向依存性が反転した。このことから、透過損失の伝搬方向に対する依存性は、磁気光学効果に基づく非相反移相特性によって発生するものであると結論付けることができる。なお、製作したデバイスで得られた最大のアイソレーション比 (逆方向損失と順方向損失の比) は、21dB (波長 1559nm) であった。

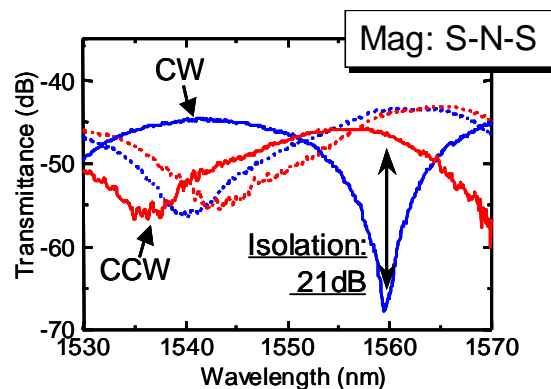


図 7 シリコン導波路型光アイソレータの透過損失波長依存性

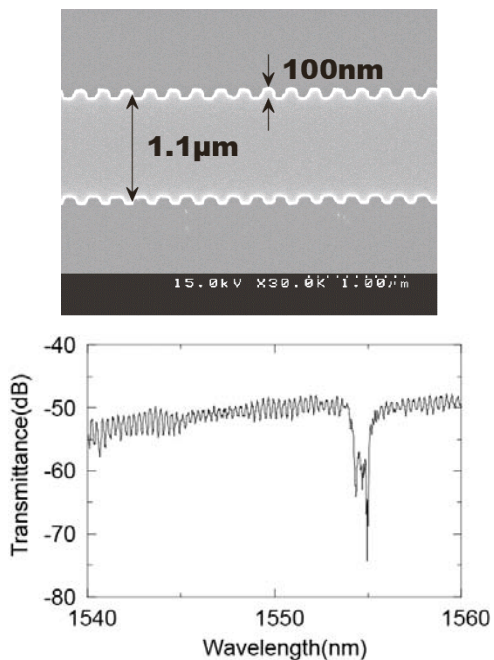


図 8 シリコン導波路垂直回折格子の分布反射特性

(2) 発光デバイス

発光デバイス製作の基礎とするために、シリコン導波路の側壁にグレーティングパターンを形成し、垂直回折格子型の分布反射器を製作した。グレーティングの製作は、電子ビーム露光によってシリコン導波路パターンを形成する際に、同時にグレーティングパターンも形成し、 CHF_3 反応性イオンエッチングによって導波路と同時に垂直回折格子を形成した。

製作したシリコン導波路垂直回折格子の透過率波長特性を図7に示す。中心波長1554.7 nmのストップバンドが観測され、分布反射器として機能していることがわかる。

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)

- ① Y. Shoji, T. Mizumoto, H. Yokoi, I-Wei Hsieh, and Richard M. Osgood, Jr., “Magneto-optical isolator with silicon waveguides fabricated by direct bonding,” *Applied Physics Letters*, vol. 92, 071117 (Feb., 2008). 査読有
 - ② Y. Shoji and T. Mizumoto, “Wideband operation of Mach-Zehnder interferometric magneto-optical isolator using phase adjustment,” *Optics Express*, vol. 15, pp. 13446-13450 (Oct., 2007). 査読有
 - ③ Y. Shoji, I-Wei Hsieh, Richard M. Osgood, Jr., and T. Mizumoto, “Polarization-independent magneto-optical waveguide isolator using TM-mode nonreciprocal phase shift,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, No. 10, pp. 3108-3113 (Oct., 2007). 査読有
 - ④ Y. Shoji and T. Mizumoto, “Ultra-wideband design of waveguide magneto-optical isolator operating in 1.31 μm and 1.55 μm band,” *Optics Express*, vol. 15, pp. 639-645 (Jan. 22, 2007). 査読有
 - ⑤ Y. Shoji and T. Mizumoto, “Wideband design of nonreciprocal phase shift optical isolators using phase adjustment in Mach-Zehnder interferometers,” *Applied Optics*, vol. 45, No. 27, pp. 7144-7150 (2006). 査読有
- [学会発表] (計27件)
- ① T. Mizumoto and Y. Shoji, “(Invited) Optical isolator with SOI waveguide,” 2009 Optical Fiber Communication Conference (OFC2009), San Diego, California, OWV3 (March 25, 2009).
 - ② 武井, 佐々木, 桐田, 吉田, 水本, “シリコン導波路型光サーキュレータの提案,” 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会, 東京, 電子情報通信学会技術報告書, vol.108, OPE2008-136, pp. 1-4 (Dec. 19, 2008)
 - ③ T. Mizumoto, “(Invited) Optical isolators for integrated photonics,” *Photonics 2008*, WC2-2, New Delhi, India (Dec. 17, 2008)
 - ④ T. Mizumoto, Y. Shoji, R. Takei, and K. Sakurai, “(Invited) Waveguide optical isolators for integrated optics,” *Asia Optical Fiber Communications & Optoelectronic Exposition & Conference (AOE 2008)*, Shanghai, China, SuQ1 (Nov. 2, 2008).
 - ⑤ T. Mizumoto, R. Takei, Y. Shoji, and K. Sakurai, “(Invited) Low temperature direct bonding and its application to photonic devices,” *The 214th Meeting of Electrochemical Society, Fourth International Symposium on Integrated Optoelectronics*, Honolulu, Hawaii, 2042 (Oct.15, 2008).
 - ⑥ T. Mizumoto and Y. Shoji, “(Invited) Optical isolator for silicon-on-insulator circuits,” *European Conference on Optical Communication (ECOC 2008)*, Brussels, Belgium, Tu.4.C.1 (Sept. 23, 2008).
 - ⑦ 武井, 庄司, 水本, “Si 導波路光サーキュレータの提案,” 2008年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, 川崎, C-3-10 (Sept. 16, 2008).
 - ⑧ 武井, 庄司, 水本, “非相反移相効果を用いた Si 細線導波路型光サーキュレータの提案,” 2008年秋季秋季第68回応用物理学学会講演会, 名古屋 3-ZN-3 (Sept. 3, 2008).
 - ⑨ 庄司, 横井, I-Wei Hsieh, Richard M. Osgood, Jr., 水本, “Si 導波路上への磁性ガーネット直接接合を用いた干渉型光アイソレータ,” 2008年秋季秋季第68回応用物理学学会講演会, 名古屋, 3a-ZN-2 (Sept. 3, 2008).
 - ⑩ 水本, 庄司, 武井, 横井, “(招待講演) シリコン導波路型光非相反デバイス,” 電子情報通信学会第9回シリコン・フォトニクス研究会, 仙台, SiPH2008- 11 (July 19, 2008).
 - ⑪ T. Mizumoto, Y. Shoji, and R. Takei, “(Invited) Waveguide optical isolators fabricated by direct

- bonding,” Indium Phosphide and Related Materials (IPRM’08), Versailles, France, WA3.1-Inv (May 28, 2008).
- ⑫ T. Mizumoto and Y. Shoji, “(Invited) Integrated waveguide optical isolators: principle and history,” the 2008 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2008), Symposium on Integrated Optical Isolators and Magneto-Optical Phenomena, San Jose, California, CThC1 (May 8, 2008).
- ⑬ 庄司, 横井, I-Wei Hsieh, Richard M. Osgood, Jr., 水本, “シリコン導波路を用いた非相反移相型光アイソレータ,” 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 船橋, 28p-ZG-12 (March 28, 2008).
- ⑭ 庄司, 横井, I-Wei Hsieh, Richard M. Osgood, Jr., 水本, “Si導波路を用いた干渉型光アイソレータの動作実証,” 2008年電子情報通信学会総合全国大会, 北九州, C-3-29 (March 18, 2008).
- ⑮ Y. Shoji, H. Yokoi, I-Wei Hsieh, Richard M. Osgood, Jr., and T. Mizumoto, “Magneto-optical isolator with SOI waveguides,” 2008 Optical Fiber Communication Conference (OFC2008), San Diego, California, OTuC8 (Feb. 26, 2008).
- ⑯ R. Takei, K. Abe, and T. Mizumoto, “Room-temperature direct bonding for integrated optical devices,” IEEE LEOS Annual Meeting, Lake Buena Vista, Florida, TuD4 (Oct. 23, 2007).
- ⑰ Y. Shoji and T. Mizumoto, “Design of an ultra-wideband magneto-optical isolator operating in 1.31 μ m and 1.55 μ m,” IEEE LEOS Annual Meeting, Lake Buena Vista, Florida, TuC4 (Oct. 23, 2007).
- ⑱ 庄司, 水本, “非相反移相型光アイソレータの超広帯域設計,” 2007年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, 鳥取, C-3-70, p.193 (Sept. 10, 2007).
- ⑲ 武井, 水本, “酸素プラズマによる表面処理を用いた InP-Si 常温ダイレクトボンディング,” 2007年秋季第68回応用物理学学会講演会, 札幌, 4p-P3-25 (Sept. 4, 2007).
- ⑳ 庄司, 水本, “1.31-1.55 μ m 帯で動作する超広帯域型光アイソレータの設計,” 2007年秋季第68回応用物理学学会講演会, 札幌, 4p-P3-23 (Sept. 4, 2007).
- (21) Y. Shoji and T. Mizumoto, “Wideband operation of magneto-optical isolator with phase adjusted Mach-Zehnder interferometer,” 2006 IEEE LEOS Annual Meeting, Montreal, Canada, ThV2 (Nov. 2, 2006).
- (22) T. Mizumoto, “(Invited) Wafer bonding of magneto-optic garnet and its application to integrated optical devices,” The 210th Meeting of Electrochemical Society, Third International Symposium on Integrated Optoelectronics, Cancun, Mexico, 1258 (Oct. 31, 2006).
- (23) T. Mizumoto, K. Sakurai, Y. Shoji, and H. Saito, “(Invited) Integration of optical isolators and semiconductor lasers by wafer bonding,” Asia Pacific Optical Communications (APOC2006), Gwangju, Korea, 6352-90 (Sept. 7, 2006).
- (24) 庄司, 水本, “非相反移相型光アイソレータの広帯域化の動作実証,” 2006年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, 金沢, C-3-85, p.207 (Sept. 22, 2006).
- (25) 武井, 水本, “SOI グレーティング光導波路の製作,” 2006年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, 金沢, CS-3-11, p.S-46 (Sept. 21, 2006).
- (26) 庄司, 水本, “位相調整によるマッハツェンダー干渉型光アイソレータの広帯域化,” 2006年秋季第67回応用物理学学会講演会, 滋賀, 29a-ZX-4, p.1067 (Aug. 29, 2006).
- (27) Y. Shoji and T. Mizumoto, “Novel design of nonreciprocal phase shift optical isolators for wideband operation,” the 11th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2006), Kaoshung, Taiwan, 5B4-5 (July 5, 2006).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水本 哲弥 (MIZUMOTO TETSUYA)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：00174045

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし