

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22246009

研究課題名（和文）異種結晶接合によるシリコン導波路型光機能デバイスの創成と機能集積光回路の形成

研究課題名（英文）Silicon waveguide photonic functional devices based on direct bonding of heterogeneous crystals and their applications to photonic integrated circuits

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（和文）：シリコン光集積回路を実現するための基礎として、シリコン導波路に発光デバイス用の化合物半導体及び非相反デバイス用磁気光学結晶を直接接合する方法を研究し、接合条件を明らかにした。この方法を用いて、シリコン導波路で光アイソレータ及び光サーキュレータを製作し、それぞれ最大のアイソレーション 30 dB 及び 15 dB の良好な特性を実現した。また、シリコン導波路型機能素子として 97% の TE-TM モード変換率をもつモード変換器、シリコン導波路と光電変換用面実装フォトダイオード間をランダム偏波に対して 86% の結合効率で光結合するアポタイズグレーティング結合器を得ることができた。さらに、これらの機能素子を集積化したシリコン光集積回路を形成するためのデバイス製作プロセスを検討した。

研究成果の概要（英文）：As a fundamental technique for realizing functional photonic integrated circuits based on silicon waveguides, a surface-activated direct bonding technique has been investigated for integrating III-V compound semiconductors and magneto-optical crystals used for light sources and nonreciprocal devices, respectively. Based on this technique, silicon waveguide optical isolators and circulators are fabricated with an isolation of 30 dB and 15 dB, respectively. Also, a TE-TM mode converter is realized with a maximum conversion efficiency of 97 %. An apodized grating coupler can provides a coupling efficiency of 86 % for a randomly polarized light wave between a silicon waveguide and a surface mounted photo-diode. A fabrication process of photonic circuits integrating these functional devices is also investigated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	27,200,000	8,160,000	35,360,000
2011年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2012年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
年度			0
年度			0
総計	37,200,000	11,160,000	48,360,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：光制御、光集積回路、シリコンフォトニクス、異種結晶接合

1. 研究開始当初の背景

SOI (Silicon On Insulator) 基板上的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 (SiO_2) 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、 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、シリコン光回路の研究開発が活発化に行われていた。特に、シリコン導波路上に半導体レーザが形成され、40 Gbps を超える高速光変調器やリング共振器を利用した受動回路素子など、多くの光機能素子の研究開発が活発に行われていた。一方、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、本研究グループが 2008 年に初めてシリコン導波路型光アイソレータの動作を報告し、いくつかの研究機関もこれに追随して研究を開始した段階であった。

さらに、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非相反素子を集積化した光集積回路は無かった。

2. 研究の目的

光回路を集積化すると、回路素子などの接続部が多く発生し、この部分で発生する反射光が光回路の動作に大きく影響する。これは光回路にとって不要な光であり、その伝搬を阻止するデバイス、すなわち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、光波に対する実用的に十分な非相反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一層の研究開発が望まれている。また、シリコン導波路の大きな異方性のため、シリコン光機能回路の特性を偏波無依存化することも大きな課題となっている。これを実現するために重要な偏波回転素子の開発が必要である。さらに、シリコン光回路中で、必要な箇所では光信号を電気信号に変換する必要がある。そのために、シリコン導波路上に配置したフォトダイオードにシリコン導波路を伝搬する光波を高い効率で結合させる必要がある。

本研究の目的は、光回路として重要な非相反素子、偏波変換素子、面実装フォトダイオードとシリコン導波路の高効率光結合素子の個別機能素子を検討するとともに、これ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。特に、シリコンだけでは発現することができない非相反機能や発光機能は、これに適した異種材料をシリコン光回路上に集

積化する必要がある。これを実現するために、異種結晶直接接合法を開拓することも、本研究の目的である。

3. 研究の方法

光アイソレータ及び光サーキュレータにおける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 1310 nm 及び 1550 nm 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。本研究では、シリコン光回路で様々な機能を集積化するために、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及び光サーキュレータを製作し、その動作特性を実証することとした。

一方、シリコン導波路は異方性が強く、機能素子の動作を偏波無依存化することは困難であり、偏波ダイバーシティによって光回路の偏波無依存化を図る必要がある。このために必要な偏波変換素子、すなわち TE-TM モード変換器を検討することとした。

さらに、光回路中の任意の位置で光波をシリコン導波路から取り出し、光電変換によって電気信号を生成することも重要である。このために、シリコン導波路と面実装型フォトダイオードの高効率な光結合方法についても検討することとした。

最後に、これらの機能素子を一体集積して、SOI ウェーハ上にシリコン光集積回路を形成する製作プロセスを検討することとした。

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、光サーキュレータ、TE-TM モード変換器などの機能デバイス、シリコン導波路と面実装型フォトダイオードとの高効率な光結合、これら機能デバイスを集積した光集積回路を形成する製作プロセスについて研究し、次の成果が得られた。

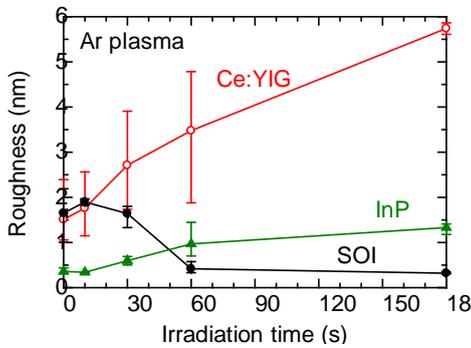
(1) 異種結晶接合

光非相反デバイスを形成するために、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、III-V族化合物半導体をシリコン上に配置する必要がある。これら異種結晶をシリコン層の上に適切に配置するため、表面活性化接合法の接合条件を検討した。

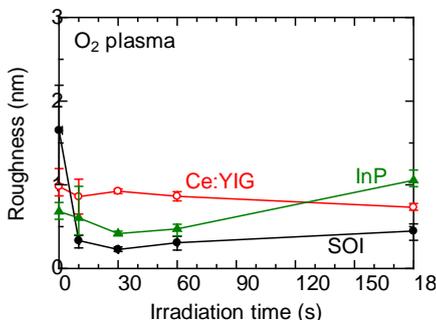
表面活性化接合法では、プラズマ照射などの方法により接合する結晶表面を活性化した後、活性化した表面同士を真空中で接合し、必要に応じて加熱・加圧して異種結晶を接合する。

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り、特に活性化処理後の表面平坦性は重要である。SOIウェーハ上のSi、発光材料の代表的として化合物半導体InP、磁気光学結晶(YCe)₃Fe₅O₁₂

(Ce:YIG) に対して、Ar及びO₂プラズマを用いて表面活性化処理を行った後の表面粗さをAFMで測定した結果を図1に示す。Arプラズマでは、InP及びCe:YIGともに処理時間とともに表面粗さが増大するが、O₂プラズマを用いた場合には、10~30秒程度の処理で表面粗さが減少するという結果が得られた。また、N₂プラズマでもO₂プラズマと同様の結果が得られた。この結果に従って、以降のデバイス製作では、O₂あるいはN₂プラズマによる表面処理を行って接合することにした。



(a) Ar プラズマ



(b) O₂ プラズマ

図1 表面活性化プラズマ処理時間に対するウェーハ表面粗さの変化

(2) 個別デバイスの動作実証

①シリコン細線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2)。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、磁気光学効果によって導波路を伝搬する光波が伝搬方向に依存する位相変化を受ける(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±90°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。これによって、順方向伝搬に対して同相干渉、逆方向伝搬に対して逆相干渉となる。結果として、順方向光波に対して低伝搬損失、逆方向光波に対して大きな伝搬損失を与える光アイソレータ動作が実現できる。

厚さ220 nmのシリコン層を有するSOIウェーハで幅450 nmのシリコン細線導波路を用いてマツハツェンダ干渉計(MZI)を形成し、表面活性化接合法を用いて干渉導波路上にCe:YIGを直接接合して、シリコン細線導波路型光アイソレータを製作した。シリコン細線導波路の強い光閉じ込め効果によって、曲率半径10 μmの曲がり導波路でMZIを形成しており、500×600 μm²程度の大きさで光アイソレータを実現することができた。

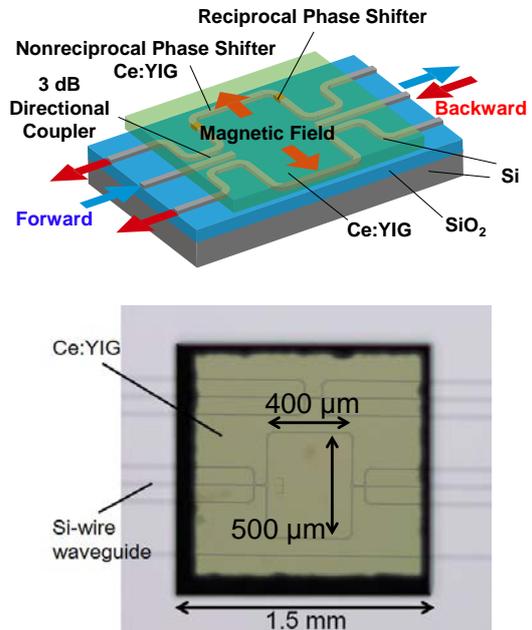


図2 シリコン干渉導波路型光アイソレータ

製作した光アイソレータの透過率波長特性の測定結果を図3に示す。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直流磁界を印加している。図3において、伝搬方向を反転させることによって透過率

の波長特性が著しく変化することがわかる。例えば、波長 1548 nm における透過率をみると、順方向の透過率が-30 dB、逆方向の透過率は-60 dB と低く、順方向と逆方向の透過率比、すなわちアイソレーションとして 30 dB が得られている。

順方向伝搬光に対する挿入損失 30 dB のうち、16~17 dB は入出力光ファイバとシリコン導波路間の結合損失であり、スポットサイズ変換器を用いることで十分低減可能である。また、4.1 dB がガーネットによる吸収損失、7.4 dB が光アイソレータのガーネットクラッド領域とアクセス導波路の空気クラッド領域との境界における散乱損失である。

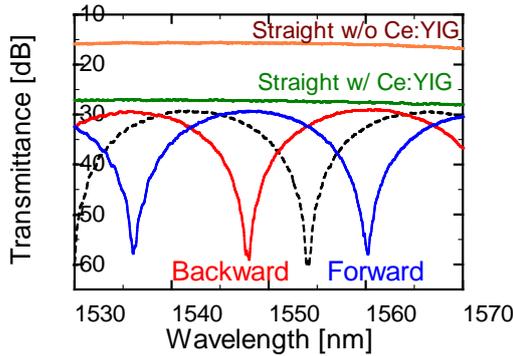


図 3 シリコン導波路型光アイソレータの透過率波長依存性

②シリコン細線導波路型光サーキュレータ

干渉導波路型光アイソレータ (図 2) の分岐結合器を 2×2 ポート構成の 3 dB 方向性結合器に置き換えることによって、完全循環型 4 端子光サーキュレータが実現できる (図 4)。

光アイソレータと同様の導波路断面構造で製作したシリコン細線導波路型光サーキュレータの波長 1531 nm における入出力ポート間伝達特性を表 1 に示す。表より、ポート 1→ポート 2→ポート 3→ポート 4→ポート 1→という伝達経路で透過率が高く、これと反対方向の経路では透過率が低い 4 端子完全循環型光サーキュレータの動作が実現できていることがわかる。

表 1 光サーキュレータの入出力ポート間伝達特性測定結果 (波長 1531 nm)

入力	透過率 [dB]			
	Port-1	Port-2	Port-3	Port-4
Port 1	-	-28.4	-	-34.5
Port 2	-43.7	-	-28.0	-
Port 3	-	-37.3	-	-29.0
Port 4	-27.8	-	-42.1	-

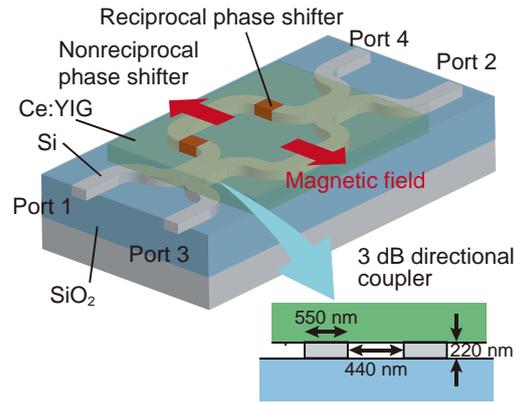
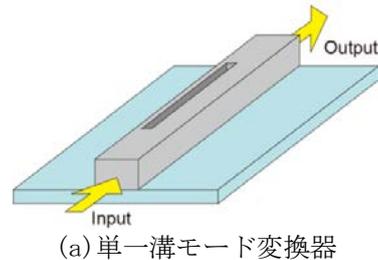


図 4 シリコン導波路型光サーキュレータ

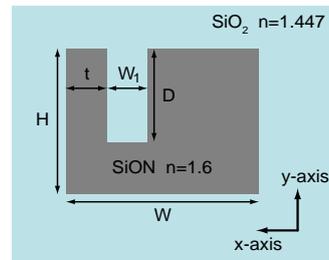
③TE-TM モード変換器

シリコン導波路は異方性が高く、デバイスの動作特性は入力光の偏波状態に依存する。そのため、偏波ダイバーシティによって偏波無依存化が図られる。この場合、シリコン光回路の入力部で偏波を分離した後に、TE-TM モード変換を行う必要がある。

シリコン導波路用の TE-TM モード変換器として、図 5 に示す単一溝型モード変換器を提案し、これを製作してその動作特性を検証した。矩形導波路に断面内で非対称な位置に適当な幅と深さで溝を形成し、導波路主軸を 45 度回転することにより、TE-TM モード変換を行う。1 回のドライエッチングプロセスによって、矩形導波路と溝を同時に形成することが可能であり、導波路パターンと溝のマスクパターンの精密な位置合わせが不要という特徴をもつ。SiON (屈折率 1.60) に溝を形成してモード変換器を構成し、先端を逆テーパ状としたシリコン細線導波路をこれに接続することで、製作許容誤差を確保している。



(a) 単一溝モード変換器



(b) 断面構造

図 5 単一溝型 TE-TM モード変換器の構造

製作した TE-TM モード変換器の変換器長に対するモード変換率の依存性を測定した結果を図 6 に示す。変換器長 $600\ \mu\text{m}$ において 97% の TE-TM モード変換率が実現できた。さらに、モード変換率の波長依存性を測定した結果、 $1260\sim 1360\ \text{nm}$ の波長範囲において 94% 以上の TE-TM モード変換率が得られ、比較的小さな波長依存性が実現できることを明らかにした。

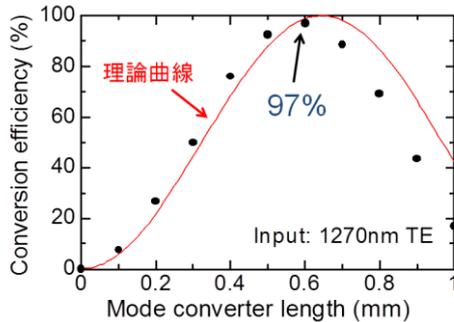
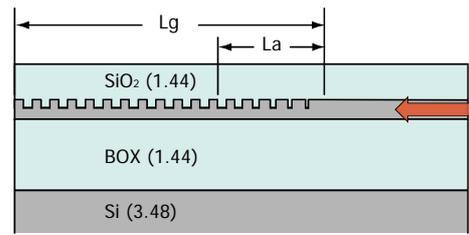


図 6 単一溝型 TE-TM モード変換特性の変換器長依存性測定結果 (波長 $1270\ \text{nm}$)

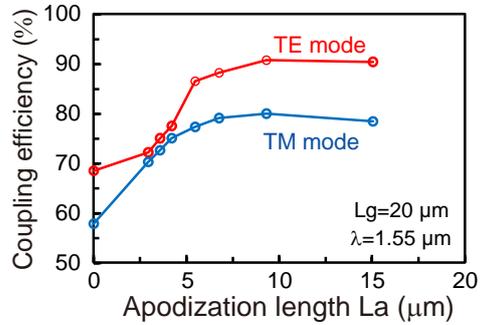
④表面実装型フォトダイオードへの高効率光結合

シリコン光集積回路において、シリコン導波路を伝搬する光信号を電気信号に変換する必要が生ずる。シリコン導波路の端面に光電変換用のフォトダイオード (PD) を配置する方法も考えられるが、光回路中の任意の位置で光電変換する目的には適さない。

シリコン導波路の表面に周期的な溝 (グレーティング) を形成することで光波を導波路外に放射させ、導波路表面に配置した PD に結合させることで光電変換する方法を検討した。導波路を伝搬する光波の偏波によらず、高い結合効率を実現するために、グレーティングの周期と溝の深さを設計した。さらに、接続用のシリコン導波路とグレーティングの境界において不要な放射や反射が発生しないように、グレーティング溝のデューティ比を伝搬方向に徐々に変化させるアポタイズグレーティング (図 7) を検討した。アクセスポイントとグレーティングの接続部で、長さ L_a の範囲で、デューティ比を 0 から 0.5 に線形的に変化させた (アポタイズ領域)。アポタイズ領域の長さ L_a を変化させて、受光径 $30\ \mu\text{m}$ の PD に対する TE、TM モード光の結合効率をシミュレーションした結果を図 7(b) に示す。波長 $1550\ \text{nm}$ の TE、TM モード光に対して、それぞれ 90%、82% の結合効率が実現可能であることを明らかにした。



(a)アポタイズグレーティング構造



(b)PD 結合効率のシミュレーション結果

図 7 アポタイズグレーティングによるシリコン導波路一面実装型 PD 間の高効率光結合

(3)集積プロセス

SOI ウェハ上のシリコン導波路を用いて複数の光機能素子を形成し、これによって光集積回路を構成するために必要な集積回路製作プロセスを検討した。想定する回路構成は、(i)化合物半導体活性層をシリコン導波路上に直接接合して形成する発光素子、(ii)磁気光学結晶をシリコン導波路上に直接接合して形成する光アイソレータ、(iii)偏波変換用単一溝型 TE-TM モード変換器、(iv)発光強度モニタ等に用いる光電変換用実装 PD からなる光源モジュール用光回路である。製作プロセスの概要は次の通りである。

- ①各機能素子を形成するとともに各素子を接続する光配線用のシリコン導波路を形成する (パターン露光及び SF_6 反応性イオンエッチング)
 - ② SiO_2 マスク形成後に単一溝型 TE-TM モード変換器用のコア材料 SiON を堆積する (CVD)
 - ③ SiON パターニング及びエッチングによって単一溝型 TE-TM モード変換器を形成する (シリコン導波路に対する位置合わせ精度 $0.3\ \mu\text{m}$)
 - ④化合物半導体活性層をシリコン導波路上に表面活性化接合により集積化する
 - ⑤化合物半導体活性層をエッチングし、発光素子の構造を形成する
 - ⑥発光素子及び PD マウント用の電極をリフトオフプロセスで形成する
 - ⑦光アイソレータ用磁気光学結晶を表面活性化接合により集積化する
- これらの製作プロセスに従って回路の製

作を行い、プロセス上の整合性を確認した。

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 Y. Shoji, M. Itoh, Y. Shirato, and T. Mizumoto, “MZI optical isolator with Si-wire waveguides by surface-activated direct bonding,” *Optics Express*, 査読有, vol. 20, pp. 18440–18448 (2012).
- ② K. Nakayama, Y. Shoji, and T. Mizumoto, “Single trench SiON waveguide TE-TM mode converter,” *IEEE Photonics Technology Letters*, 査読有, vol. 24, no. 15, pp. 1310–1312 (2012).
- ③ T. Mizumoto, Y. Shoji, and R. Takei, “(Invited) Direct wafer bonding and its application to waveguide optical isolators,” *Materials*, 査読有, vol. 5, pp. 985–1004 (2012).
- ④ T. Mizumoto, R. Takei, and Y. Shoji, “(Invited) Waveguide optical isolators for integrated optics,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 査読有, vol. 48, no. 2, pp. 252–260 (2012).
- ⑤ T. Mizumoto and R. Takei, “(Invited Paper) Application of Wafer Direct Bonding Technique to Optical Non-reciprocal Devices,” *IEEE Photonics Journal*, 査読有, vol. 3, no. 3, pp. 588–596 (2011).
- ⑥ R. Takei, K. Yoshida, and T. Mizumoto, “Effect of wafer pre-cleaning and plasma irradiation to wafer surfaces for plasma-assisted surface activated bonding,” *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, vol. 49, no. 8, 086204 (2010).
- ⑦ R. Takei and T. Mizumoto, “Design and simulation of silicon waveguide optical circulator employing nonreciprocal phase shift,” *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, vol. 49, no. 5, 052203 (2010).

[学会発表] (計 45 件)

- ① Y. Shirato, Y. Shoji, and T. Mizumoto, “High isolation in silicon waveguide optical isolator employing non-reciprocal phase shift,” 2013 Optical Fiber Communication Conference (OFC 2013), Anaheim (USA), OTu2C.5 (March 19, 2013).
- ② K. Mitsuya, Y. Shoji, and T. Mizumoto,

“The first demonstration of silicon waveguide optical circulator,” 2013 Optical Fiber Communication Conference (OFC 2013), Anaheim (USA), JTh2A.25 (March 21, 2013).

- ③ K. Miura, Y. Shoji, and T. Mizumoto, “Silicon waveguide wavelength-selective switch for on-chip WDM communications,” *IEEE Photonics Conference 2012 (IPC 2012)*, Burlingame (USA), WZ3 (Sept. 26, 2012).
- ④ T. Mizumoto, Y. Shoji, and K. Sakurai, “(Invited) On-chip optical isolators and silicon photonics,” *The 17th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2012)*, Busan (Korea), 6E3-3 (July 6, 2012).
- ⑤ K. Nakayama, Y. Shoji, and T. Mizumoto, “Single trench SiON waveguide TE-TM mode converter,” *The 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2012)*, San Jose (USA), CM4M.6 (May 7, 2012).
- ⑥ A. Fujimoto, K. Uchiho, Y. Shoji, and T. Mizumoto, “Improvement in coupling efficiency between a silicon waveguide and a surface mounted photo detector using an apodized grating coupler,” *The 17th Microoptics Conference (MOC’11)*, 仙台コンベンションセンター(宮城), H-9 (Nov. 1, 2011).
- ⑦ R. Takei, K. Uchiho, and T. Mizumoto, “Efficiency Improvement of SOI Waveguide Grating for Coupling to Surface Mounted Photodetector,” *The 8th International Conference on Group IV Photonics*, London (UK), P2.20 (Sept. 15, 2011).
- ⑧ T. Mizumoto, “(Tutorial) Materials and designs for nonreciprocal optical devices,” 2010 MRS Fall meeting, Boston (USA), Tutorial-J (Nov. 29, 2010).

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