

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360139

研究課題名(和文)超低消費電力ポリマー3次元光インターコネクションスイッチングデバイスの開発

研究課題名(英文)Development of ultra-low power consumption polymer three-dimensional optical interconnection switching devices

研究代表者

宇高 勝之(Utaka, Katsuyuki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：20277817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：低消費電力ポリマー3次元光スイッチング回路の実現及び機能デバイスへの展開を目指して、まず複数種類ポリマーの多層化に伴うクラックの発生、導波路形状の変形の問題についてプロセス条件の最適化により解決した。それを元に、4x4構成3次元光スイッチなどを実現した。比較的低い消費電力でほぼ偏光無依存、また1530~1610nmの広波長域動作を達成し、ポリマー導波路の低消費電力3次元光スイッチング回路への展開の可能性を実証した。同時に、ポリマー導波路の機能光デバイス展開として、半導体集積ポリマーリング共振器フィルタや導波路型クレッチマン表面プラズモンセンサーを実現し、その有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：In order to realize low-power consumption polymer three-dimensional (3D) switching circuits and develop related polymer functional devices, first we solved the issues of cracking due to multi-layer stacking of different kinds of polymers and deformation of waveguide shapes by optimizing the fabrication process. On the basis of these results, 4x4 configuration 3D optical switches were realized. Operation with rather low-power consumption, almost polarization independence and wide-wavelength range of 1530 to 1610nm was experimentally realized, showing the possibility to effectiveness of polymer waveguides to low-power consumption 3D optical switching circuits. At the same time, as the extension of polymer waveguide technologies to functional optical devices, an optical ring-resonator filter integrated with semiconductor optical devices and a waveguide-type Kretschmann surface plasmon resonant sensor were realized and clarified the wide effectiveness of polymer waveguide devices.

研究分野：フォトンクスに関し、特に光通信、光信号処理、光センサーなどの光デバイス、光機能材料の研究

キーワード：ポリマー光導波路デバイス 光インターコネクション 3次元光回路 光スイッチ リング共振器 表面プラズモン共鳴光センサー

1. 研究開始当初の背景

急増する通信需要のもとインターネットによる転送において、超高速化に伴い電気ルータでの消費電力が爆発的に増大している。また、クラウドコンピューティングの普及により大容量データのデータセンターでの蓄積やサーバ間・センター間などの高効率転送が求められており、サーバ内のデータ処理における消費電力の著しい増加も社会問題化している。これら従来の電気的な処理・配線による消費電力問題や高速処理への障害を克服するために、高速な接続が可能な種々のレベルの光インターコネクション技術の導入が進められている。データセンター間やサーバラック間、そしてボード間の光インターコネクションは従来の光ファイバ通信ネットワークをベースとしたシステムが検討されているが、究極的には信号処理が行われる複数の LSI プロセッサを接続するマルチコア及びメニコア化のためのチップ間やチップ内への光インターコネクションの導入が期待されている。

光インターコネクションにおいては、シリコンフォトリソグラフィにより光導波路や光受動デバイス、さらに光変調器や光スイッチなどの制御デバイスも実現されている。他方、発光源としては III-V 族半導体レーザをウエハボンディングやフリップチップボンディングなどによりヘテロ集積し、シリコン導波路により素子間接続を行う方法の検討が鋭意進められている。しかしながら、これら一連のシリコンフォトリソグラフィと呼ばれる技術だけではチップ内での機能統合に限定され、材料が異なる種々の機能を有するデバイスを統合する上で不可欠な異種チップ間の接続には何らかの方法を講じる必要があり、またチップ内でも多層化によるマルチコア・メニコア化のための柔軟な光配線の実現が望まれている。

このような観点から、柔軟性に優れたポリマーは、LSI チップ上に直接的及び間接的な光配線を簡易に導入することが可能であり、また熱光学効果を用いることにより光スイッチなどの光機能デバイス化も実現可能であることから、チップ内・チップ間への柔軟かつ低コストな光インターコネクションとして極めて有望である。これまでポリマーデバイスとしては、伝送路としてのプラスチックファイバや種々のプレーナ導波路光デバイスの研究が進められてきているが、このような光スイッチを導入した 3

次元光インターコネクションスイッチはほとんど見当たらなかった。

その様な背景の中で、申請者はエポキシ系光学ポリマーの SU-8 をコアに、ポリイミド系の PMGI をクラッドに用いたチャンネル埋込導波路により、光ファイバ通信との整合性を勘案し 1550nm 帯において、約 2 dB/cm の低損失かつ偏光無依存導波路をベースに、熱光学効果を用いたマッハツェンダ型光スイッチの検討を行ってきた。さらに一括ナノインプリントにより周期約 500nm の 1 次回折格子付き導波路型波長フィルタの実現、さらに 3 次元光インターコネクションのための積層光導波路の作製について検討を進めてきている。

2. 研究の目的

本研究では、電気配線に頼らず高速かつ低消費電力でボード間やマルチチップ・メニコア間での異種光デバイスの接続や信号処理を支援する光インターコネクションの実現のために、低コストで柔軟性に優れたポリマーを用いた低消費電力 3 次元光インターコネクションスイッチング機能回路を開発することを目的とした。そして加えてポリマー導波路を種々の機能デバイスへ展開することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、3 年間にわたりポリマー多層光デバイスのポテンシャルを確立すべく、作製条件の確立や 3 次元光インターコネクションスイッチを含め種々の機能デバイスへの展開を模索した。まずこれまでに開発してきた 2x2 ポリマー光スイッチエレメントについて、一層の低消費電力動作を目指した。また、層間インターコネクション用として、3 層の積層導波路構造の実現を目指した。そして、多ポートスイッチマトリクス化と積層構造の光スイッチング動作実現に傾注した。具体的には、最低でも 4x4 ポート程度の多ポート化について検討し、低消費電力で達成を目指した。

4. 研究成果

本研究課題は、これまで研究室で検討を進めてきた低消費電力ポリマー 2x2 光スイッチのより低消費電力動作化、多ポート化、そして 3 次元化によるボード間などの光インターコネクション光スイッチを目指したものである。

本研究を遂行するに当たり、ポリマーとして、エポキシ系の SU-8 をコアに、ポリイミド系の PMGI をクラッドに用い、偏光無依存動作を目標に、矩形のチャンネル埋込導波路をベースとした。このように熱膨張係数の異なる 2 種類のポリマーをコア及びクラッドに

用いること、さらに熱光学効果を用いた屈折率変調用の電極金属をポリマー上に堆積することにより、本質的な問題が発生していた。すなわち、作製プロセス過程におけるクラックの発生であり、この解決無しには目標とする素子の実現はあり得ないことから、その根本解決にまず取り組んだ。具体的には、SU-8の導波路パターンニング後 PMGI ポリマーを堆積し、それらの固化のためのバッキング時は現像時にクラックが発生したことから、これらのプロセスの最適化を検討したが、その原因解明、条件把握に思いの外時間を要することとなった。しかしながら検討の結果、最高バッキング温度はほぼガラス転移温度の180 とし、遅い変化率の昇温及び降温時において数回の温度一定状態を取り入れるなどの細かい条件を取り入れることにより、最高5層までの多層導波路構造を実現することができた。この改良したバッキング条件による熱膨張係数の異なる異種ポリマーの多層化は簡単な理論計算によっても検討され、温度一定状態の導入により歪みによる応力が緩和され、全体の許容応力に到達するまでの多層化が可能であることを明らかにした。

次に電極金属堆積によるクラック発生問題も、歪みが発生している状態で電極のパターンニングのための金属のエッチングにおいてクラックが発生する、所謂ソルベントクラックであることから、上記の改良バッキング法により応力を緩和することによりクラックの発生が抑えられることも同時に明らかにし、概ね問題解決を図ることができた。

これらの作製条件の最適化により、2次元光スイッチ並びに多層構造3次元光スイッチの作製に取り組んだ。その際、単一モード動作のため、幅及び厚さ2.5 μm の矩形導波路として、偏光無依存化を図ることとした。

その結果、まず要素素子となる図1に示す2次元2x2ポリマー光スイッチにおいてはマツハツェンダ干渉系構造を用いて、約3.5mWの極めて低消費電力の光スイッチ動作を実現した[1]。この際、理論予測通りの偏光無依存かつ約80nmの広波長域動作、さらに約150 μs 以下の動特性も同時に示した。またこの素子において、導波路両側にトレンチを形成することなどにより、約0.3mWという一層の低消費電力動作が可能であることを解析的に示した。

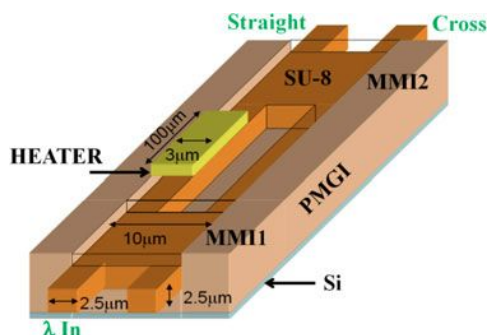


図1 2x2 マツハツェンダ型光スイッチ

3次元導波路化については、前述のようにレジスト層としては5層の積層に成功し、すなわち導波路としては図2に示すように3層積層を達成した。

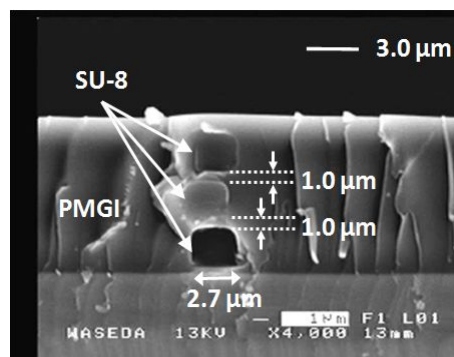


図2 3層積層導波路構造

そして中間層にマツハツェンダ型光スイッチを配置し、その上下導波路を方向性結合器で接続した2x2の3次元光スイッチ構造を作製し、上下約7 μm に渡る3次元光インターコネクションスイッチング動作を実現した[5],[6]。さらに2層導波路構造でマツハツェンダ型光スイッチ4個、多モード干渉型光結合器1個、方向性結合器2個を配置した4x4の3次元光スイッチにより、動作電力は約18mWと高いものの-10dB以下のクロストークの光スイッチ動作を実現した。(査読有り国際会議投稿済み)

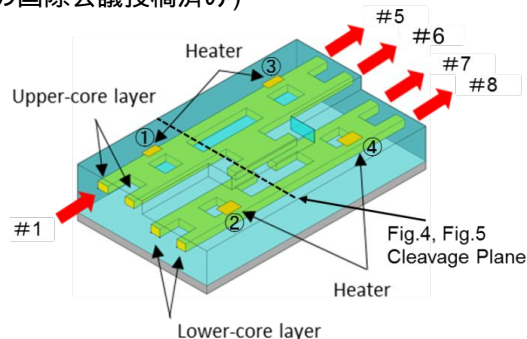


図3 4x4 3次元光スイッチ

またポリマー導波路の他の光通信用デバイス応用として、リング共振器を実現し、約10dBのコントラストを得た[3]。これにより、ポリマー光デバイスが他の半導体などの光デバイスとの柔軟な集積化が可能であることを示した。

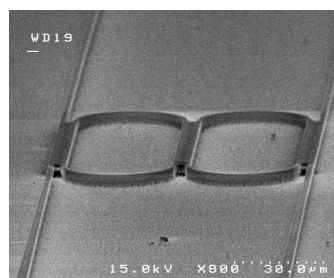


図4 ポリマー2重リング共振器

ポリマー導波路のさらなる応用として、低コストで高機能な光センサーへの応用を提案した。すなわち、高感度光センサーである表面プラズモン共鳴を用いた導波路型クレッチマン構造を提案、及びポリマー導波路で実現し、光ネットワーク上での利用が可能な1550nm帯での動作を実現した [2], [4]。

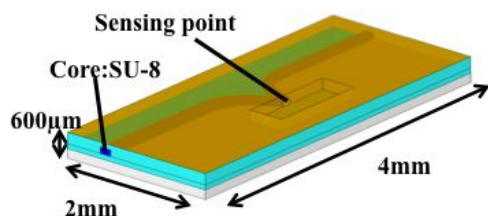


図5 表面プラズモン導波路型クレッチマン光センサー

これらの一連の成果により、光インターコネクションの一層の高機能のため、ポリマー導波路が3次元光スイッチの実現に極めて有効であること、そして低コストな表面プラズモン光センサなどとしても適用可能であることを示し、ポリマー導波路デバイスの広い有用性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- [1] N. Xie, T. Hashimoto, and K. Utaka, "Design and Performance of Low-Power, High-Speed, Polarization-Independent and Wideband Polymer Buried-Channel Waveguide Thermo-Optic Switches", *J. Lightwave Technol.*, vol.32, No.17, pp.3067-3073, 2014. (査読有り)
- [2] Y. Kuroda, N. Hidaka, Y. Matsushima, and K. Utaka, "Improved Characteristics of Polymer Waveguide-Type Kretschmann-Structure Surface Plasmon Resonance Sensor at 1500nm Wavelength Range", *Proc. 18th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2014)*, WE9E-2, July 2014. (査読有り)
- [3] Y. Takei, A. Matsumoto, A. Matsushita, K. Akahane, Y. Matsushima, and K. Utaka, "Wavelength Selective Filter Using High-mesa Structure Directly Connected Type Polymer Micro-Ring Resonators on InP Substrate", *Proc. of 18th Microoptics Conference (MOC13)*, Tokyo, H-10, Oct.27-30, 2013.
- [4] N. Hidaka, Y. Kuroda, Y. Matsushima, and K. Utaka, "Polymer Waveguide-type Kretschmann-structure Surface Plasmon Sensor at 1550nm Wavelength Range", *Proc. of 18th Microoptics Conference (MOC13)*, Tokyo, H-55, Oct.27-30, 2013. (査読有り)
- [5] H. Kobayashi, H. Hoshina, G. Yuzawa, Y. Matsushima, and K. Utaka, "Fundamental switching operation of polymer three-dimensional optical interconnection switch", *Proc. of 17th OptoElectronics and Communications Conference/Photonics in Switching Conference (OECC/PS2013)*, Kyoto, WT2-4, July 2013. (査読有り)
- [6] T. Hoshina, T. Tatsuzaki, G. Yuzawa, H. Kobayashi, Y. Matsushima, and K. Utaka, "Proposal of Polymer Three-Dimensional Optical Switch and Demonstration of Fundamental Transmission Characteristics of Passive Optical Interconnection Circuit", *Proc. 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2012)*, Amsterdam, No.P2.12, Sep. 2012. (査読有り)
- 〔学会発表〕(計16件)
- [7] 小林久也、木村優一、若松果奈、松島裕二、石川浩、宇高勝之、"3次元光接続用ポリマー3層3×3光スイッチの作製"、第62回応用物理学会学術講演会(春季)、東海大、13a-P7-5、2015.
- [8] 木村優一、小林久也、若松果奈、宇高勝之、松島裕一、石川浩、"3次元光インターコネクション用ポリマー2層構造4×4光スイッチの作製"、第62回応用物理学会学術講演会(春季)、東海大、13a-P7-4、2015.
- [9] 若松果奈、小林久也、木村優一、宇高勝之、松島裕一、石川浩、"2次元4×4ポリマー光スイッチの特性"、第62回応用物理学会学術講演会(春季)、東海大、13a-P7-3、2015.
- [10] 日高直哉、黒田康彰、松島裕二、石川浩、宇高勝之、"導波路クレッチマン型SPRセンサの高感度化・広測定範囲化の検討"、第62回応用物理学会学術講演会(春季)、東海大、13p-p3-2、2015.
- [11] 若松果奈、小林久也、木村優一、松島裕二、石川浩、宇高勝之、"ポリマー大規模光スイッチのための作製条件に関する検討"、第75回応用物理学会学術講演会(秋季)、東海大、19p-PA1-7、2014.
- [12] 木村優一、小林久也、若松果奈、宇高勝之、松島裕一、石川浩、"3次元光ポリマーデバイスの多層積層化作製技術の検討"、第75回応用物理学会学術講演会(秋季)、北海道大、19p-PA1-8、2014.
- [13] 小林久也、木村優一、若松果奈、松島裕二、石川浩、宇高勝之、"ポリマー3次元光インターコネクションスイッチング回路の特性改善"、第75回応用物理学会学術講演会(秋季)、北海道大、19p-PA1-9、2014.
- [14] 黒田康彰、日高直哉、松島裕一、宇高勝之、"波長1500nm帯ポリマー導波路型クレッチマン配置表面プラズモン共鳴センサの特性改善"、電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会(OPE)、東京、OPE2014-P3-03、4月、2014.

[15] 黒田康彰、日高直哉、松島裕一、宇高勝之、“波長1550nm帯ポリマー導波路型クレッチマン配置表面プラズモン共鳴センサの特性改善”、第61回応用物理学関係連合講演会(春季)、青学大、17a-E6-7、2014.

[16] 小林久也、若松果奈、松島裕一、宇高勝之、“ポリマー三次元光インターコネクションスイッチング回路の多ポート化の検討”、第61回応用物理学関係連合講演会(春季)、青学大、17p-PA2-25、2014.

[17] 小林久也、若松果奈、松島裕一、宇高勝之、“ポリマー3次元光インターコネクションスイッチング回路の多ポート化の検討”、電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会(OPE)、東京、OPE2013、11月、2013.

[18] 保科 貴之、湯澤元輝、小林久也、若松果奈、松島裕一、宇高勝之、“ポリマー3次元光回路の作製とスイッチング基本動作の実現”、第60回応用物理学関係連合講演会(春季)、神奈川工大、27p-PA2-3、2013.

[19] 湯澤元輝、保科貴之、小林久也、若松果奈、松島裕一、宇高勝之、“改良した溝構造入りポリマー熱光学スイッチの低消費電力化”、第60回応用物理学関係連合講演会(春季)、神奈川工大、27p-PA2-2、2013.

[20] 小林久也、保科貴之、湯澤元輝、若松果奈、松島裕一、宇高勝之、“ポリマー3次元光インターコネクションスイッチング回路の検討”、電子情報通信学会 総合大会、C-3-57、2013.

[21] 湯澤元輝、保科貴之、小林久也、若松果奈、松島裕一、宇高勝之、“溝構造の導入によるポリマー熱光学スイッチの低消費電力化”、第73回応用物理学学会学術講演会(秋季)、愛媛大/松山大、12p-C5-13、2012.

[22] 小林 真、島津啓史、宇高勝之、“ポリマー導波路型 Kretschmann 構造による小型・高感度・1500nm帯動作SPRセンサの提案と基本特性”、電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会(OPE)/レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE)、東京、OPE2012-9/LQE2012-13、6月、2012.

6. 研究組織

(1)研究代表者

宇高 勝之 (UTAKA, Katsuyuki)
早稲田大学理工学術院・教授
研究者番号：20277817

(2)研究分担者

松島 裕一 (MATSUSHIMA, Yuichi)
早稲田大学・研究戦略センター・教授
研究者番号：80619536

松本 敦 (MATSUMOTO Atsushi)