

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510119

研究課題名(和文)プロトンビーム直接描画により形成されるポリマー導波路型光スイッチの研究

研究課題名(英文)Fabrication of optical polymer waveguide switch using proton beam direct writing technique

研究代表者

花泉 修 (HANAIZUMU, Osamu)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：80183911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：量子ビーム技術を利用したプロトンビーム描画(Proton Beam Writing: PBW)は、次世代微細加工技術として期待されているが、プロトン照射によるポリマー材料の屈折率向上効果を応用した光導波路直接描画技術としても有望である。本研究では、このPBW技術を利用し、PMMAを構成材料とするマッハツェンダー導波路型熱光学スイッチの試作を行い、光スイッチング動作の確認に初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated a PMMA-based thermo-optic switch consisting of a Mach-Zehnder (MZ) type waveguide drawn by proton beam writing (PBW) and working at a wavelength of 1.55 μm . The MZ waveguide was drawn by symmetrically coupling two Y junctions with a core width of 8 μm and a branching angle of 2 deg. A Ti thin-film heater and Al electrodes were formed on the surface of the MZ waveguide using conventional photolithography and wet-etching processes. An optical switching power of 44 mW were obtained from the sample.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：ポリマー光導波路 光スイッチ プロトンビーム描画

1. 研究開始当初の背景

光スイッチは、光ファイバ通信ネットワークにおいて、波長多重通信 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) システムを構築する上で不可欠な光デバイスであり、用途に応じて様々な種類が研究・開発されている。その中でも、マッハツェンダー干渉計 (Mach-Zehnder Interferometer: MZI) 型熱光学スイッチは、その構造がシンプル且つ可動部が無いので、低価格・高信頼性の光スイッチとして期待が寄せられている。従来、材料としては、主に石英系ガラスが用いられており、スイッチング電力が 100mW 程度 (研究レベルでは 11mW : ほぼ石英系の理論限界) にまで下げられた MZI 型熱光学スイッチが開発されるまでに至っている [引用文献①]。更に、シリコンと石英のハイブリッド構造を採用することで 0.6mW という超低スイッチング電力も実現されており [引用文献①]、光スイッチの低消費電力化競争は終息を迎えつつある。

しかしながら、光ネットワークの更なる普及のために、光スイッチの一層の低コスト化が求められている。そのための一つの手段として、材料に安価なポリマーを用いた光スイッチも数多く研究がなされている。MZI 型熱光学スイッチは、よく知られているように、材料の熱光学効果 (熱による導波路材料の屈折率変化) を利用してスイッチングを行うが、一般的にポリマーは石英に比べ桁大きな熱光学係数を持つため、光スイッチ用材料として適している。ポリマー系光スイッチの例として、我々は、感光性ポリシラン (屈折率 1.55 程度) を用いたフォトリソング法により MZI 型光スイッチを作製し、Ti 薄膜ヒータ及び Al 電極構造の独自の工夫により、石英系の理論限界値に匹敵するスイッチング電力 11.4mW での動作を確認している [引用文献②]。更に、SU-8 (微細加工用フォトレジスト、屈折率 1.58 程度) を材料とした MZI 型光スイッチも作製されており、スイッチング電力 4mW が得られている [引用文献③]。しかし、この二例で使用されているポリマー材料の屈折率は石英系材料に比べ 0.1 程度高く、将来の光ファイバ通信ネットワークへの導入を考慮した場合、この屈折率の差がフレネル損失として問題になってしまう可能性が高い。更に、この二例を含め、一般にポリマー系光スイッチの作製はフォトリソグラフィを基本とする手法により行われ、高価なフォトリソマスクが用いられるケースが大半である。

そこで本研究では、マスクレスで導波路 (コア) の描画が可能なプロトンビーム描画 (Proton Beam Writing: PBW) を用いた [引用文献④]。PMMA にプロトン (H⁺) ビームを照射すると、照射された領域の屈折率が高くなることが分かっており [引用文献⑤]、照射されない領域との屈折率差により光が閉じ込められ光導波路として動作する。光導波路

に使用される代表的なポリマーは、PMMA、シリコン、ポリイミド、エポキシ、ベンゾシクロブテンなどがあるが、本研究では、光ファイバ (石英系) との屈折率整合性を優先的に考慮して PMMA を主に使用した。PMMA は、PBW による微細加工用レジスト材料としても使用されており、実験データの蓄積があることから、本研究の目的を早期に達成するために最適な材料である。

2. 研究の目的

前述の背景のもと、本研究では、光導波路の形成方法として PBW 技術を用い、PMMA の屈折率がプロトン照射によって向上する効果を利用して、マスクレスで PMMA 光導波路を直接描画する技術を確認するとともに、この技術を応用し、低消費電力な熱光学スイッチの実現を目指した。

3. 研究の方法

(1) MZI 型 PMMA 系光導波路の作製

我々の PMMA 系光導波路の作製プロセスは次の通りである。

まず、高周波スパッタリング法を用い、Si 基板 (~20mm 角) 上に厚さ 15 μ m 程度の SiO₂ 膜 (屈折率 1.440) を成膜し、下部クラッドとした。その膜上に、スピコートにより厚さ約 10 μ m の PMMA 膜 (屈折率 1.485) を形成した。その後、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所イオン照射研究施設 (TIARA) 内の 3MV シングルエンド加速器を用い、照射エネルギー 1.7MeV の条件の下、直径 1 μ m 程度にまで集束させた H⁺ ビームを試料に照射した。その際、ビームスキャン及び試料ステージ位置の制御を同時に行い、図 1 のように、Y 分岐導波路を二つ、対称に描画し結合させることによって、MZI 型光導波路をマスクレスで直接描画した。トータルのドーズ量は 100nC/mm² 程度とし、光導波路のコア幅は、波長 1.55 μ m においてシングルモード導波路として動作する 8 μ m に設定した [引用文献⑥]。分岐角は 2° とし、分岐後の直線までの移行部分は正弦波状の緩やかな曲がりで構成した。分岐後に並行する 2 本の導波路間の距離は 300 μ m 程度とした。描画後、更にもう一層の PMMA 膜を約 10 μ m の厚さで試料上にスピコートで成膜し、上部クラッドとした。

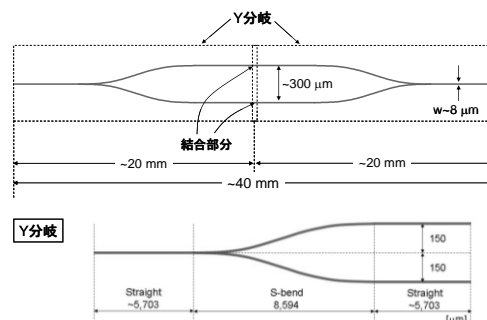


図 1. MZI 型光導波路のレイアウト図

(2) 熱光学スイッチの作製

(1) で得られた MZI 型光導波路に対して Ti 薄膜ヒーター及び Al 電極を形成、パターンニングし、熱光学スイッチを試作した。

図 2 は、Ti ヒーター及び Al 電極のレイアウト図である。このレイアウトは、独自の熱解析により、ヒーター及び電極からの熱を効率的に利用できるよう最適化されている[引用文献⑦]。これをもとに、予めフォトマスクを準備しておき、真空蒸着による金属薄膜形成、フォトリソグラフィ及びウェットエッチングプロセスにより、Ti ヒーター及び Al 電極を形成した。Ti 及び Al の膜厚は 300nm 程度とした。

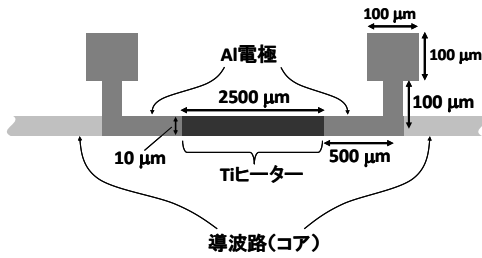


図 2. Ti ヒーター及び Al 電極のレイアウト図

4. 研究成果

(1) MZI 型 PMMA 系光導波路の作製結果

図 3 は、上部クラッドを形成する前の、試料表面の光学顕微鏡観察結果である。MZI 型光導波路の直接描画に成功した。更に、波長 1.55μm における出射光の近視野像を観察したところ、図 4 の結果が得られた。作製した MZI 型光導波路により、伝搬光の分波及び合波を問題なく行うことができた。

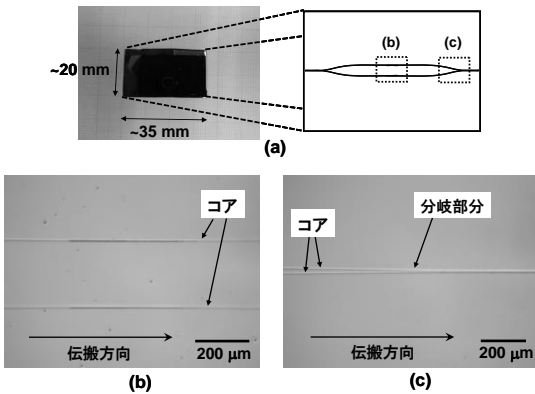


図 3. (a) MZI 型光導波路を描画した試料の外観写真と (b) 試料中央付近の二本の光導波路及び (c) Y 分岐部分の光学顕微鏡観察結果

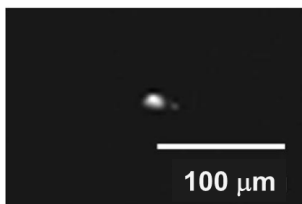


図 4. 出射光の近視野像の観察結果

(2) 熱光学スイッチの試作結果

図 5 に、(1) の光導波路上に形成した Ti ヒーター及び Al 電極の光学顕微鏡での観察像を示す。それぞれ、ほぼ狙い通りのレイアウトで形成することに成功した。この試料の Ti ヒーターへの印加電力と出力光強度の相対値との関係をプロットしたところ、基本的なスイッチング動作が確認でき、ON/OFF 比：約 9.0dB、スイッチング電力：約 44mW が得られた。スイッチング特性としてはまだ改善の余地があるものの、PBW による光導波路直接描画技術を応用した世界初の MZI 型熱光学スイッチの実現可能性が示された。

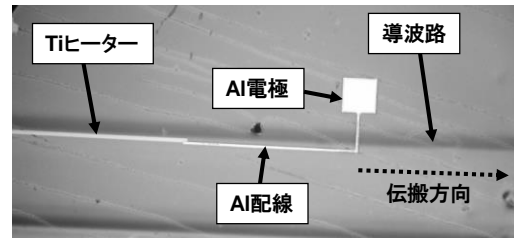


図 5. 形成した Ti ヒーター及び Al 電極の光学顕微鏡観察像

<引用文献>

- ① K. Watanabe et al., NTT Technical Review, vol. 8, 2010, 1-5.
- ② O. Hanaizumi, K. Miura, Y. Hiratani, Y. Machida, and M. Uehara, Mach-Zehnder type thermo-optic switch with antenna-coupled Y-junction fabricated by selective photobleaching of polysilane films, Key Engineering Materials, vol. 459, 2011, 153-156.
- ③ N. Xie et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 24, 2009, 1861-1863.
- ④ A.A. Bettiol et al., J. Cryst. Growth, vol. 288, 2006, 209-212.
- ⑤ I. Rajta et al., Nucl. Instr. and Meth. B, vol. 260, 2007, 400-404.
- ⑥ K. Miura, Y. Machida, M. Uehara, H. Kiryu, Y. Ozawa, T. Sasaki, O. Hanaizumi, T. Satoh, Y. Ishii, M. Kohka, K. Takano, T. Ohkubo, A. Yamazaki, W. Kada, A. Yokoyama, T. Kamiya, and H. Nishikawa, Fabrication of polymer optical waveguides for the 1.5-μm band using focused proton beam, Key Engineering Materials, vol. 497, 2012, 147-150.
- ⑦ 平谷 雄二, 花泉 修, 萩谷 吉樹, 感光性ポリシランを用いた低消費電力熱光学素子, 信学技報, OPE2004-220, 2005.

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 18 件)

- ① W. Kada, K. Miura, H. Kato, R. Saruya, A. Kubota, T. Satoh, M. Koka, Y. Ishii, T. Kamiya, H. Nishikawa, and O. Hanaizumi, Development of embedded Mach-Zehnder optical waveguide structures in polydimethylsiloxane thin films by proton beam writing, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol. 348, 2015, 218-222. 査読有
- ② K. Miura, H. Kiryu, Y. Ozawa, A. Kubota, Y. Hiratani, O. Hanaizumi, T. Satoh, Y. Ishii, M. Kohka, K. Takano, T. Ohkubo, A. Yamazaki, W. Kada, A. Yokoyama, and T. Kamiya, Demonstration of thermo-optic switch consisting of Mach-Zehnder polymer waveguide drawn using focused proton beam, Key Engineering Materials, vol. 596, 2014, 134-138. 査読有
- ③ K. Miura, T. Satoh, Y. Ishii, H. Kiryu, Y. Ozawa, M. Kohka, K. Takano, T. Ohkubo, A. Yamazaki, W. Kada, A. Yokoyama, T. Kamiya, and O. Hanaizumi, Fabrication of Mach-Zehnder polymer waveguides by a direct-drawing technique using a focused proton beam, Key Engineering Materials, vol. 534, 2013, 158-161. 査読有

[学会発表] (計 41 件)

- ① 川端 駿介, 猿谷 良太, 加藤 聖, 新木 潤, 三浦 健太, 加田 渉, 佐藤 隆博, 江夏 昌志, 石井 保行, 神谷 富裕, 西川 宏之, 花泉 修, 集束陽子ビーム加工による PDMS 薄膜内包型光スイッチング素子の開発, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 平塚, 2015 年 3 月 13 日.
- ② K. Kano, R. Saruya, S. Kawabata, J. Araki, K. Noguchi, W. Kada, K. Miura, H. Kato, T. Satoh, M. Koka, Y. Ishii, T. Kamiya, H. Nishikawa, and O. Hanaizumi, Fabrication of Mach-Zehnder optical waveguide structures in PDMS thin films using proton beam writing, 6th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, December 4, 2014.
- ③ W. Kada, K. Miura, R. Saruya, H. Kato, A. Kubota, T. Satoh, M. Koka, Y. Ishii, T. Kamiya, H. Nishikawa, and O. Hanaizumi, Development of Mach-Zehnder optical waveguide embedded in PDMS thin films by proton beam writing, 4th International Symposium on Element Innovation, Kiryu, Japan, October 24, 2014.
- ④ W. Kada, R. Saruya, H. Kato, A. Kubota, K. Miura, T. Satoh, M. Koka, Y. Ishii, T. Kamiya, H. Nishikawa, and O. Hanaizumi,

Development of embedded Mach-Zehnder optical waveguide structures in PDMS thin films by proton beam writing, 14th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, Padova, Italy, July 10, 2014.

- ⑤ 猿谷 良太, 加藤 聖, 久保田 篤志, 三浦 健太, 加田 渉, 佐藤 隆博, 江夏 昌志, 石井 保行, 神谷 富裕, 西川 宏之, 花泉 修, PBW 微細加工による PDMS を基材としたフレキシブル光導波路の開発, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原, 2014 年 3 月 19 日.
- ⑥ 三浦 健太, 佐藤 隆博, 石井 保行, 江夏 昌志, 横山 彰人, 神谷 富裕, 平谷 雄二, 桐生 弘武, 小澤 優介, 加田 渉, 花泉 修, プロトンビーム描画による導波路型光スイッチの試作, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 京都, 2014 年 1 月 24 日.
- ⑦ A. Kubota, R. Saruya, K. Noguchi, W. Kada, K. Miura, O. Hanaizumi, T. Satoh, Y. Ishii, M. Koka, T. Ohkubo, A. Yokoyama and T. Kamiya, Fabrication of Mach-Zehnder type optical waveguides in flexible acrylic sheets using proton beam writing, 5th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, December 19, 2013.
- ⑧ K. Miura, T. Satoh, Y. Ishii, M. Koka, K. Takano, T. Ohkubo, A. Yamazaki, W. Kada, A. Yokoyama, T. Kamiya, H. Kiryu, Y. Ozawa, A. Kubota, and O. Hanaizumi, Prototype of thermo-optic switch consisting of Mach-Zehnder polymer waveguide drawn by focused proton beam, 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and the International Quantum Electronics Conference, Munich, Germany, May 13, 2013.
- ⑨ Y. Ozawa, A. Kubota, K. Miura, O. Hanaizumi, K. Noguchi, T. Satoh, Y. Ishii, M. Kohka, K. Takano, T. Ohkubo, A. Yamazaki, W. Kada, A. Yokoyama and T. Kamiya, Mach-Zehnder type thermo-optic switch fabricated by proton beam writing, 4th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, December 7, 2012.
- ⑩ K. Miura, H. Kiryu, Y. Ozawa, A. Kubota, and O. Hanaizumi, Demonstration of a Mach-Zehnder type thermo-optic switch produced by utilizing proton beam irradiation, Pre ASIS-IV Symposium, 2nd International Symposium on Element Innovation, 8th International Symposium on Silicon Science, and 5th Symposium of Carbon Material Creative Association, Kiryu, Japan, October 19, 2012.
- ⑪ K. Miura, T. Satoh, Y. Ishii, M. Kohka, K.

Takano, T. Ohkubo, A. Yamazaki, W. Kada, A. Yokoyama, T. Kamiya, H. Kiryu, Y. Ozawa, and O. Hanaizumi, Fabrication of polymer optical waveguides for the 1.5- μ m band using proton beam writing, IUMRS-International Conference on Electronic Materials, Yokohama, Japan, September 26, 2012.

〔図書〕(計1件)

- ① 花泉 修, 三浦 健太, 加田 涉, 野口 克也 (分担執筆), 炭素とケイ素の元素科学 (1.18 量子ビーム技術を利用した光情報通信用光導波路型デバイスの研究開発), 群馬大学エレメントイノベーションプロジェクト, 2015, 225-238.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~hana/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

花泉 修 (HANAIZUMI, Osamu)
群馬大学・大学院理工学府・教授
研究者番号：80183911

(2) 研究分担者

三浦 健太 (MIURA, Kenta)
群馬大学・大学院理工学府・准教授
研究者番号：40396651