

SOI 基板によるマイクロレンズ光スキャナの製作

学生員 猿田 訓彦* 正員 藤田 博之*
正員 年吉 洋*

Fabrication of Micro Lens Optical Scanner on SOI Wafer

Kunihiko Saruta*, Student Member, Hiroyuki Fujita*, Member, Hiroshi Toshiyoshi*, Member

Two-dimensional (2D) optical scanner has various applications particularly for building 3D micro optical cross connects (OXC). Most MEMS OXC reported today use electrostatic tilting mirror. However, the mirror-type 2D scanners have an optical alignment issue associated with fiber core deviation. In this paper, we propose a bulk micromachined electrostatic 2D scanner using silicon micro lens as an alternative method for optical scan. The lenses (diameter $260\mu\text{m}$) and the driving actuators are integrated on the same layer of a silicon-on-insulator (SOI) wafer. This paper deals with the design, fabrication, and electromechanical characteristics of the bulk micromachined silicon scanner.

キーワード：2次元光スキャナ, SOI 基板, バルクマイクロマシニング, マイクロレンズ

Keywords: 2D optical scanner, SOI wafer, bulk micromachining, micro lens

1. はじめに

現在, マイクロ光スイッチに代表されるマイクロ光デバイスは, 急速な市場の拡大に合わせるように次々と新しい技術が発表されている。中でも, ファイバ光を X, Y 両方向にスキャンニングすることができる2次元光スキャナは, 自由空間を光伝搬に用いる3次元マイクロ光スイッチ (3D Optical Crossconnect, 3D OXC) の要素デバイスとして期待されており, 一部はすでに商品化されている⁽¹⁾。

3D OXC の多くの手法では, ミラーを傾斜させることによってビームスポットを変位させるミラー型の光スキャナを用いている。ミラー型光スキャナでは, 低い駆動電圧で大きい変位角と高い精度を実現するために, 様々なアクチュエータや構造が提案されてきた⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。しかしながら, この方式の光ファイバとのアラインメントに起因するいくつかの問題がある。

そこで本研究では, マイクロレンズを用いた透過型2次元光スキャナを, SOI 基板を用いてモノリシックに製作することを提案する。我々は, これに先立つ研究として, SDA (Scratch Drive Actuator) を用いた透過型2次元光スキャナを設計・製作している⁽⁵⁾。しかしながら, この方式では駆動に摺動面が存在するため, 位置決めの再現性に問題が

あった。また, SDA を用いていたために機械的消耗が早いという欠点も存在した。そこで SOI ウェハを用い, バルクマイクロマシニングによってマイクロレンズとアクチュエータを一枚の基板上に集積化するプロセスを考案し, 製作とアクチュエータの評価を行ったので報告する。

2. 2次元光スキャナ

2.1 反射型の2次元光スキャナ 反射型の2次元光スキャナを3次元光スイッチに応用する場合, その構成は図1のように表される。ファイバから出たビームはコリメートレンズを通り, アレイ状に配置されたマイクロミラーで反射する。このミラーの角度を変化させることによって, 反対側の適当なミラーに当てて, 出力側のファイバへ到達する。すなわち2組のマイクロミラーアレイ, コリメートレンズアレイを用いるが, この構造にはいくつかの問題が存在する: まず第一に, ミラーの部分で光路が2回折れ曲がっているため, デバイスの配置が難しい。これは, ミラーを用いている以上回避不可能である。また, このシステムではファイバのコア中心とコリメートレンズの中心の位置合わせを要する。しかし実際には図2のように, ファイバのコアは製作段階において最大 $1\mu\text{m}$ 程度のずれが生じている場合がある。その結果, コリメートレンズの透過後には図2のようにビーム方向が変化し, マイクロミラーの回転中心から外れるという問題が生じる。この問題は, 光学系の挿入損失の増大につながる恐れがある。また, ミラーをビーム径よりも大きめに設計する必要があり, これがミラーの

* 東京大学 生産技術研究所
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
Institute of Industrial Science, University of Tokyo
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

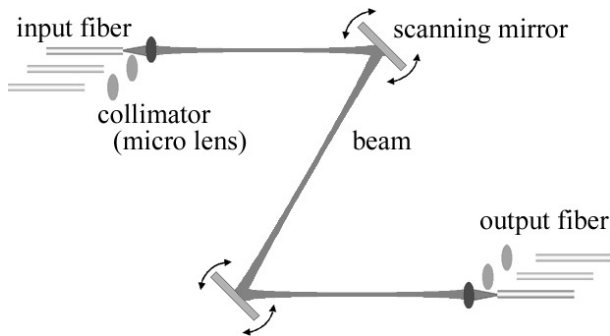


図1 反射型3次元光スイッチの概念図

Fig.1. Schematic draw of reflective 3D optical switch.

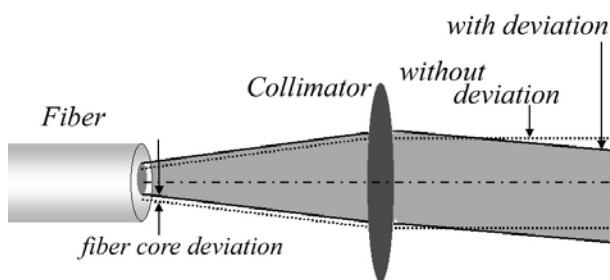


図2 ファイバのコア中心のずれによるビーム方向の変化

Fig.2. Beam angle steering caused by fiber core deviation.

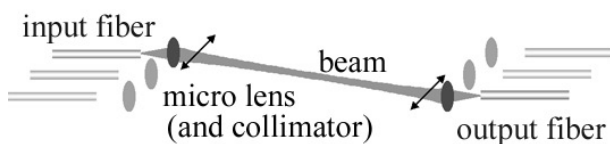


図3 レンズ型3次元光スイッチの概念図

Fig.3. Schematic draw of 3D optical switch using micro lens.

応答速度を遅くする要因となる。この問題は、光ファイバスイッチが大規模化するほど顕著になる。

2.2 マイクロレンズを用いた光スキャナ そこで本研究では、マイクロレンズ型の2次元光スキャナを用いることでこの問題を解決する手法を提案する。レンズ型3次元光スイッチの概念図を図3に示す。この図から分かる通り、レンズ型の2次元光スキャナはミラー型で生じた問題点を逆に利用した構造となっている。ファイバを出た光は、アクチュエータで保持されたマイクロレンズに入射される。マイクロレンズをレンズ面と平行に駆動させることにより、ビームはレンズ中心からずれた位置に入射する。このとき、図2と同じ原理 (f - θ レンズ) によってビームの

出射角度が変位する。従って、アクチュエータによりレンズ位置を調整することで、透過ビームの2次元的なスキャニングが可能となる。

レンズ型光スキャナでは、ファイバのコアがずれている場合でもオフセット調整が可能であるため、挿入損失が大幅に改善されることが期待できる。さらに、マイクロレンズがコリメータ兼スキャナとして機能するため、部品点数が減少し、また、コンポーネントが同一直線上に並ぶのでデバイスの配置が容易になる。

3. 提案する2次元光スキャナの構造

3.1 光学設計 レンズ型光スキャナでは、実際にどの程度レンズを駆動すれば良いのであろうか。まず、レンズの駆動距離とビームの変位との関係を導く。図4のように、レンズの焦点距離を f 、入出力側のレンズ間距離を l 、レンズの変位を x とすると、ビーム角 θ がある程度小さければ $\theta \approx x/f$ と近似できるので、出力側におけるビームの変位 p は、

$$p = \frac{x \cdot l}{f} \dots\dots\dots (1)$$

と表される。ビームの変位を決定するのは、レンズ間距離 l とレンズの変位 x である。よって p をレンズピッチに合わせるように x を制御すればよい。レンズの焦点距離 f を短くすればビーム変位を大きく取れるが、必要以上に短すぎるとレンズの球面収差が増大する。ここでは、後述するようにアクチュエータの発生変位等を考慮して、 $500 \mu\text{m}$ 程度の焦点距離をもつマイクロレンズを想定している。ファイバとレンズの間隔を f と等しくすると、ビームは平行光となる。ファイバから射出した光の広がり角はおよそ 0.1 rad ($\sim 5.7^\circ$) であり、レンズ操作によるビーム角の変位はそれ以下であるから、コリメーションには問題ないと判断した。

ビーム変位 p は、入出力間距離 l に比例して大きくなるが、 l が長くなるとビーム径が広がるために挿入損失が大きくなる。入力側のファイバを出たビームは、ガウシアンビームとしてふるまうため、収束点から z 離れた位置におけるビーム径 w は次式に従う：

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}, \dots\dots\dots (2)$$

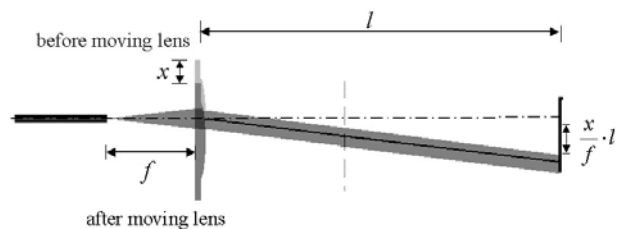


図4 レンズ変位によるビーム角の偏向

Fig.4. Beam steering from lens displacement.

ただし、 λ はビームの波長、 w_0 は収束時におけるビーム径である。

この式から分かるように、収束したビームは回折により徐々に広がっていく。よって、 l が大きくなるにつれてビーム径は大きくなり、それとともに損失は大きくなる。また、 $z = 0$ におけるビーム径が小さいほど、ビーム径は急速に広がってしまう。光学シミュレーターを用いた計算によると、例えば直径 $100 \mu\text{m}$ の収束光を 10 cm の結合長でファイバ端面に受光すると、その結合損失は約 23 dB と極めて大きくなる⁽⁶⁾。従ってレンズ間距離はあまり長く取ることができないため、 l を 10 cm 以下に仮定すると、レンズの変位 x は少なくとも $10 \mu\text{m}$ は必要になる

3.2 アクチュエータの設計 我々は、マイクロレンズをレンズ面と平行に駆動させる静電アクチュエータとして、図 5 のような機構を考案した。すなわち、アルファベットの H を模した形状のサスペンションを、周囲に配置した静電駆動電極によって変位させる。これにより、サスペンションの変位とともにレンズ位置を 2 次元的に変位させることができる。

本研究では、サスペンションの形状を十字型にするなどの検討も行ったが⁽⁷⁾、 X - Y の干渉が大きく、また変位が小さいといった問題が明らかになった。その点、提案する形状では、 X - Y のクロストークは 1% 未満であり、制御系を工夫することで抑制することが十分に可能である。また、拘束されているのが一方向のサスペンションのみであるため、十字型に比べて変位を大きく取ることができる。

さらに、可動電極として作用するサスペンションと、その周りに配置されている固定電極との間の静電ギャップについて改善を行った。大きな変位が必要なレンズ付近では、可動範囲を確保するためにギャップ長を広く取り、それ以外のところでは静電引力を大きく取れるようギャップ長を狭くした。このように、ギャップ長に傾斜をつけることにより、比較的低い電圧である程度大きい変位を期待することができる。

本研究では、まずレンズの最大変位を $10 \mu\text{m}$ と考えて設計を行った。そのため、静電アクチュエータのプルイン

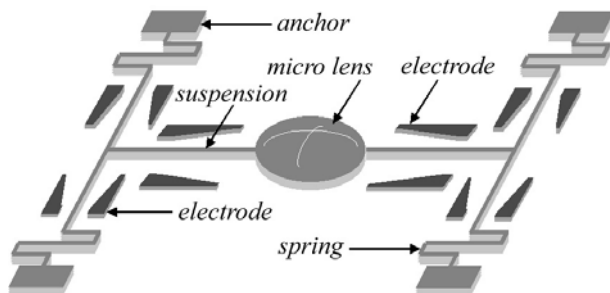


図 5 提案する静電アクチュエータ
Fig. 5. Proposed electrostatic actuator.

現象を考慮して、レンズに近い側のギャップ長を $30 \mu\text{m}$ とした。サスペンションは幅 $5 \mu\text{m}$ で、高さは SOI 基板の表側厚みと等しく、 $50 \mu\text{m}$ である。

4. マイクロレンズスキャナの製作

4.1 マイクロレンズの製作プロセス 提案する光スキャナでは、アクチュエータにマイクロレンズを作りこむ必要がある。その製作プロセスを図 6 に示す。まず、フォトリソグラフィーによってレジストを円形にパターニング、これを 150°C に加熱したホットプレート上に 30 秒間乗せ、レジストをリフロー（再融解）させる。これにより、表面張力で溶けたレジストが球面状になる。この際におけるレジストの形状は、レジストの直径および高さに依存する。直径に対して高さが低い場合は、球面状にならず逆に中心が凹んでしまう。

このままの状態でもレジストレンズとして用いることはできるが、レジストの屈折率は 1.7 と小さいため、焦点距離を短くするには厚いレンズを作らなくてはならない。しかし、厚いレンズは球面収差が大きくなってしまいうという問題点があり、また焦点距離を自由に決めることも困難である。

従って、プロセスの後段において、選択性の等方性 RIE (Reactive Ion Etching) によってレジストのレンズパターンをシリコンに転写し、シリコン製のレンズを形成することにした。シリコンの屈折率は 3.4 と高いため、薄いレンズでも焦点距離の短いレンズを作製することができる。フォトリソとシリコンのエッチング比は、 SF_6 と O_2 の流量比を変えることで調節可能である。 SF_6 の流量を増加させると Si のエッチング速度が速くなり、 O_2 を増やすとレジストのエッチング速度が速くなる。シリコンのエッチング速度が増すと、レンズ中心部分のレジストが完全にエッチングされるまでに周囲のシリコンが多くエッチングされるため、厚いレンズとなる。

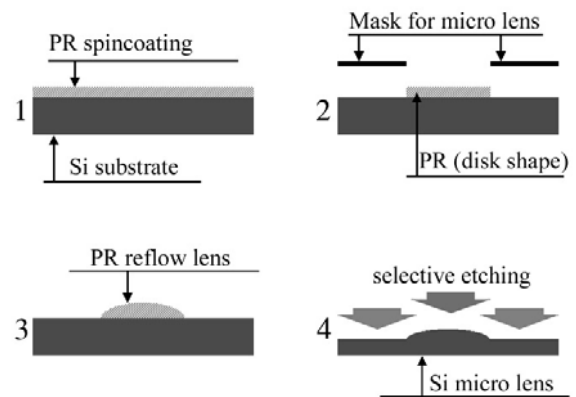
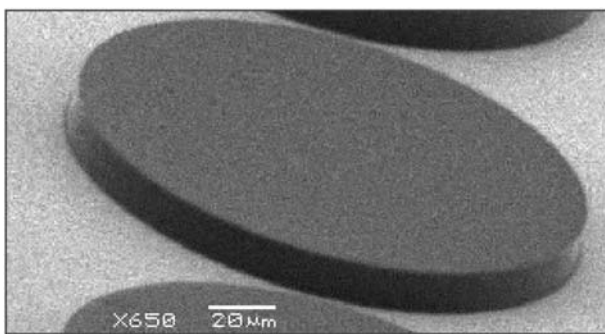


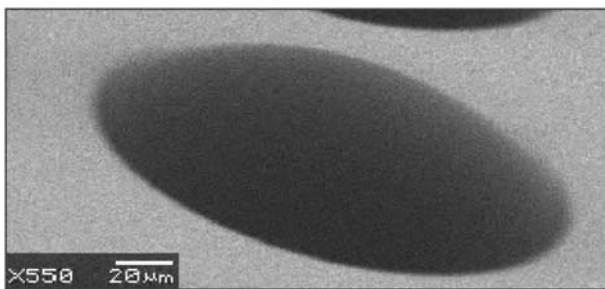
図 6 マイクロレンズの製作プロセス
Fig. 6. Fabrication process of silicon micro lens.

4.2 マイクロレンズの製作結果および考察 フォトリソは、粘性の高い厚膜加工用のレジストである THB-611P (JSR 株式会社製) を用い、3000 rpm で 30 秒間スピニングを行い、露光・現像を行った。レジストの直径はおよそ $260\ \mu\text{m}$ で作成した。リフロー前のレジスト厚はおよそ $5.5\ \mu\text{m}$ であった。

続いてホットプレートを用いてレジストのリフローを行った。レジストパターンが形成されている SOI 基板を、 $150\ ^\circ\text{C}$ のホットプレートで 30 秒間加熱してレジストをリフローしたところ、レジストの表面張力により形状が球面状に再構成され、レンズ頂点の高さはおよそ $9.4\ \mu\text{m}$ となった。リフロー前後のレジストの形状を図 7 に示す。リフロー前



before reflow



after reflow

図 7 リフロー前後におけるレジストの形状

Fig.7. Figure of photo resist before and after reflow.

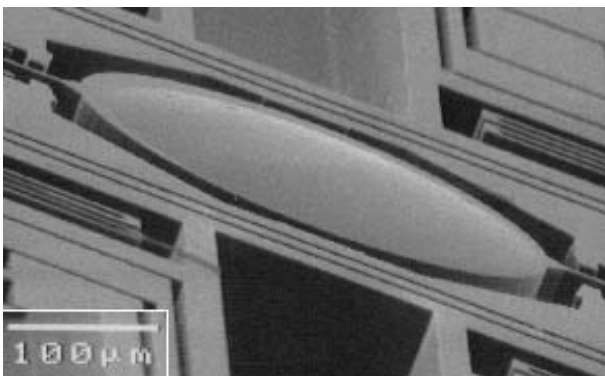


図 8 製作したシリコンレンズ

Fig.8. Fabricated silicon micro lens.

後でレジストレンズの直径に変化は見られなかった。これより、レンズの最終形状をあらかじめ予測することが可能になり、設計上都合が良い。

このレジストレンズパターンを RIE によってシリコン基板上に転写した。転写後のレンズ形状を図 8 に示す。RIE 条件は、 SF_6 の流量を 40 sccm、 O_2 を 60 sccm とした。なおエッチングのパワーを上げると、加速されたイオンによる物理的なエッチングが強くなり、レンズの表面が粗くなる。そこで、RIE のパワーを 50 W に抑え、エッチング時間を長めの 3 時間とした。その結果、シリコンマイクロレンズの高さはおよそ $4.5\ \mu\text{m}$ となった。

レンズの焦点距離は、次の計算式から導かれる：

$$f = \frac{r}{n-1} \dots\dots\dots (3)$$

ここで n はレンズ材料の屈折率であり、 r はレンズ表面を球面として含む球の半径である。 r とレンズの高さ h 、レンズ径 ϕ との関係は図 9 のようになるから、 $h = 4.5\ \mu\text{m}$ 、 $\phi = 260\ \mu\text{m}$ と次式

$$r^2 = (r-h)^2 + \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

より、このレンズの焦点距離は、約 $760\ \mu\text{m}$ と計算される。

本研究では、前節のプロセスを利用して 1 枚の SOI 基板上にアクチュエータとマイクロレンズを集積化することを考える。デバイス全体のプロセスを図 10 に示す。

表側の厚みが $50\ \mu\text{m}$ 、絶縁層が $2\ \mu\text{m}$ 、裏側が $525\ \mu\text{m}$ の SOI を用いて、表側にマイクロレンズを形成する。次に、真空蒸着装置でクロムと金の蒸着とパタニングを行う。これは、最終的な駆動実験の際にワイヤーボンディングを行うための層となる。このあと、レンズのパターンに重なるように異方性 DRIE (Deep Reactive Ion Etching) によって表側のアクチュエータを製作する。次に、レンズ部分の基板裏側から貫通孔を DRIE によって形成する。裏側のシリコン基板は $525\ \mu\text{m}$ と厚いため、DRIE のマスク材と

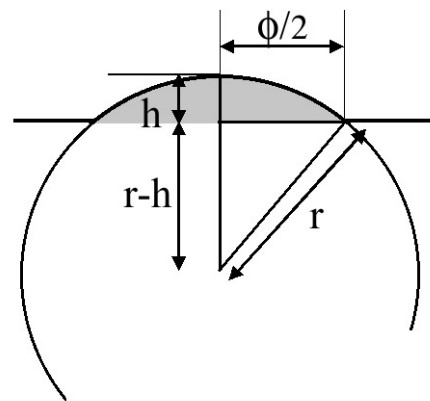


図 9 レンズ表面を含む球体の概念図

Fig.9. Schematic draw of the sphere containing lens surface.

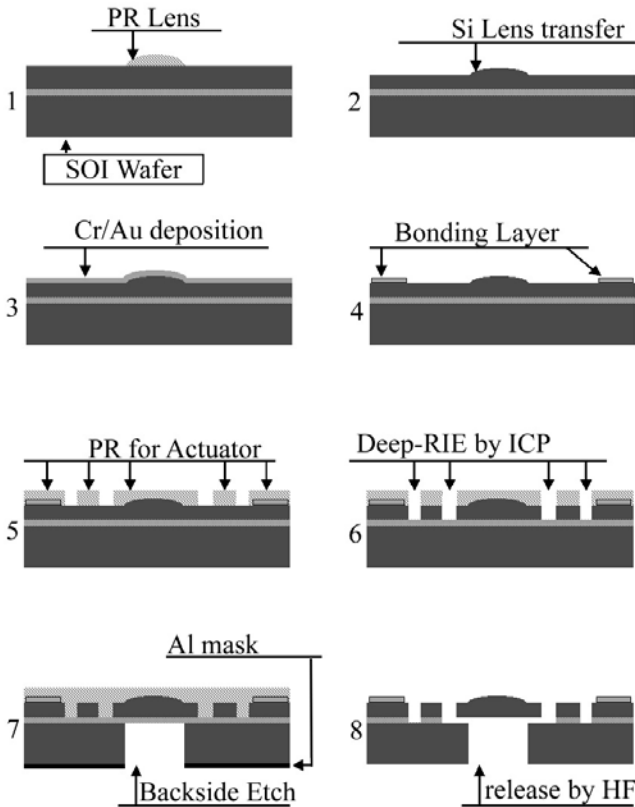


図 10 デバイス全体のプロセス

Fig. 10. Fabrication process of the device.

してアルミニウム (1500 \AA) を用いた。最後に、フッ酸を用いて絶縁層を除去し、レンズとアクチュエータをリリースする。

4.3 レンズスキャナの製作結果 基板表面には、すでに高さ $4.5 \mu\text{m}$ 、直径 $260 \mu\text{m}$ のマイクロレンズが多数存在している。そのため、当初、レジスト塗布厚の均一性と、露光時の基板とマスクの密着性が懸念された。しかし、レンズの表面が非常に滑らかに基板表面に連続しているために、レジストの塗布には問題は生じなかった。

実際に製作したアクチュエータを観察すると、幅 $5 \mu\text{m}$ で設計したサスペンションがおよそ幅 $3 \mu\text{m}$ まで細くなっていた。これは、マイクロレンズの厚みの分だけマスクと基板との間に隙間が生じ、完全なコンタクト露光条件でないためである。サスペンションの幅が細くなると、変位は大きくなる一方で構造が脆弱になり、製作時に壊れやすくなる。また、共振周波数が下がり、スイッチング速度が低下する。従って、サイドエッチングを考慮してサスペンション幅を設計する必要がある。以上のプロセスによって製作されたデバイスの写真を図 11、および、図 12 に示す。図 11 の中央に、 2×2 で配列した H 型のパターンがアクチュエータである。この写真より、1 つのスイッチへの配線が非常

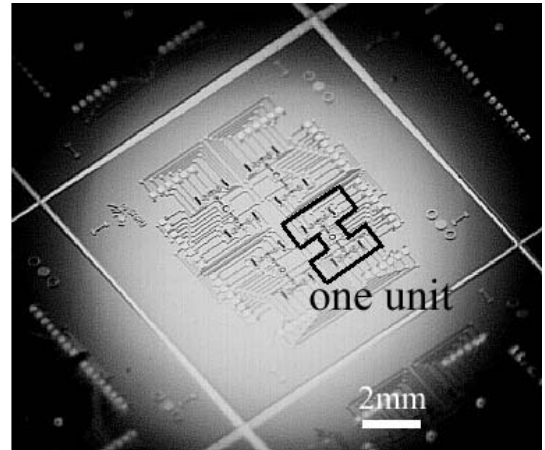


図 11 デバイスの全体写真

Fig. 11. Photograph of the whole device.

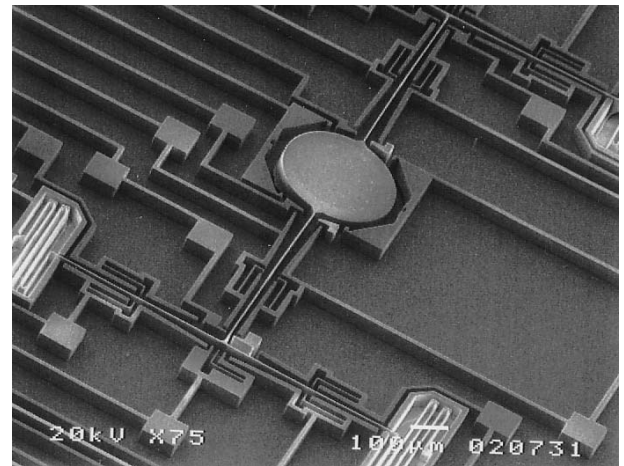


図 12 レンズを含めたデバイスの拡大写真

Fig. 12. Expanded photograph of the device containing micro lens.

に多くなっていることが分かる。将来的には、この SOI 層の上に配線用のガラス基板をボンディングして、配線をアクチュエータとは別の層に製作することを検討している。図 11 において、中心の正方形で区切られた部分はおよそ一辺が 11 mm である。

なお、レンズを含まない試作デバイスを用いてアクチュエータの解析を行ったところ、共振周波数はおよそ 7 kHz とかなり良い数値が得られた。また、印加電圧に対するレンズ位置の変位は図 13 のグラフに示すとおりである。

X 軸方向の変位については、 250 V で約 $8 \mu\text{m}$ であった。この結果から、焦点距離 $f = 500 \mu\text{m}$ 、入出力間距離 $l = 10 \text{ cm}$ の場合、 2 mm 程度のビームスポット変位が得られる。また、Y 軸方向の変位は X 軸方向に比べて小さいが、これはサスペンションと電極の形状を変えることによって改善が期待できる。サスペンション幅を狭くすることによっても変位を大きく取れるが、前述したとおり構造強度と共振周波数の低下が生じるため、これらの問題を考

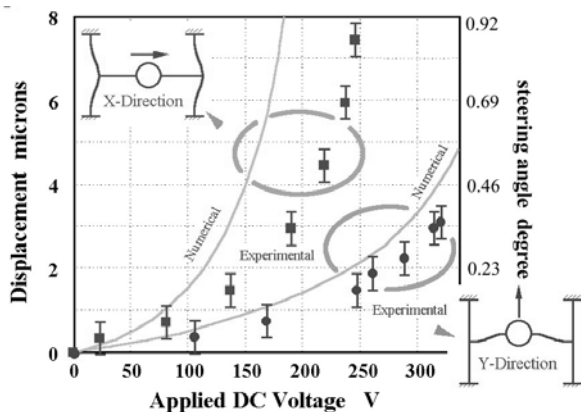


図 13 アクチュエータの電圧 - 変位特性

Fig. 13. Characteristic between voltage and displacement

慮しながら設計を行う必要がある。

5. おわりに

以上、本論文では SOI ウェハを用いた 2 次元のマイクロレンズ光スキャナの製作について述べた。冒頭で述べたとおり、3 次元光スイッチへの応用を考える場合には、ファイバコアのずれを修正できるマイクロレンズを用いた光スキャナが有効である。また、シリコン基板上にマイクロレンズを製作する手法、および、それを含めた全体のファブリケーションプロセスを提案し、実際にデバイスを作製してプロセスの実現性を確認した。今後は、光学実験などを行って結果を確認するとともに、その結果を元にしてデバイスの再設計を行い、あわせてマイクロレンズの無反射コーティングなどを検討することによって、光学特性の向上を図りたいと考えている。

(平成 14 年 8 月 6 日受付, 平成 14 年 11 月 12 日再受付)

文 献

- (1) V. Aksyuk: "Beam-Steering Micromirrors for Optical Telecommunications", Proc. IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS 2001, Sept. pp.25-28 (2001)
- (2) J. Doscher: "Using MEMS Technology in Optical Switching", <http://www.analog.com/library/techArticles/mems/techOp.html>
- (3) R. Sawada, E. Higurashi, A. Shimizu, and T. Maruno: "Single Crystalline Mirror Actuated Electrostatically by Terraced Electrodes With High-Aspect Ratio Torsion Spring", Proc. IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS 2001, Sept. pp.25-28 (2001)
- (4) D. Hah, S. Huang, H. Nguyen, H. Chang, H. Toshiyoshi, M.C. Wu: "A Low Voltage, Large Scan Angle MEMS Micromirror Array with Hidden Vertical Comb-Drive Actuators for WDM Routers", OFC, pp.92-93 (2002)
- (5) H. Toshiyoshi, Guo-Dung John Su, Jason LaCosse, and Ming C. Wu: "A Surface Micromachined Optical Scanner Array using Photoresist Lenses Fabricated by a Thermal Reflow Process", (to be published in IEEE JLT 2003, July).

- (6) K. Saruta, H. Fujita, H. Toshiyoshi: "Bulk Micromachined 2D Lens Scanners for Transparent Optical Fiber Switches", Proc. IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS 2002, Aug. pp.20-23 (2002)
- (7) 猿田訓彦・年吉 洋・藤田博之:「3次元透過型光スイッチの設計とシミュレーション」, 電気学会全大, Mar. pp.26-29 (2002)

猿田 訓彦 (学生員) 1978 年生。2001 年東京大学工学部電気工学科卒業。2003 年 3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程在学中。大学院ではマイクロマシンの設計および製作, 特に光マイクロマシンに関する研究に従事。2003 年 4 月より現在ソニー (株) に在籍。



藤田 博之 (正員) 東京大学生産技術研究所マイクロメカトロニクス国際研究センター教授。1980 年 3 月東京大学大学院電気工学専門課程修了 (工学博士)。同年 4 月より東京大学生産技術研究所講師, 81 年 5 月同助教授, 93 年 8 月同教授, 2000 年 4 月同付属マイクロメカトロニクス国際研究センター長となり, 現在に至る。この間 83 年から 85 年まで MIT 客員研究員。主としてマイクロマシン, マイクロアクチュエータ, 自律分散システムの研究に従事。97 年市村学術賞功績賞, 2000 年服部報公賞受賞, 2001 年フランス共和国政府教育・学術功労勲章シュバリエ受賞。



年吉 洋 (正員) 1968 年生。1992 年 2 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了, 同年 4 月より東京大学生産技術研究所講師。2002 年 4 月より助教授。1999 年から 2 年間, 米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員助教授。専門は MEMS の光学応用。

