ホットエンボスによる光スイッチ用可動ミラー アレイ構造の作製

正員 池原 毅* 非会員 単 学伝**
非会員 大友 誠*** 正員 前田 龍太郎*

Fabrication of Movable Mirror-Array Structure Using Hot-Embossing for Optical Switch Applications

Tsuyoshi Ikehara*, Member, Xue Chuan Shan**, Non-member, Makoto Otomo***, Non-member,
Ryutaro Maeda*, Member

A new micro hot-embossing process which combines the high accuracy of silicon micromachining process and low cost production of forming process was reported. A movable cantilever-array structure with vertical mirrors were designed under the limitation of hot-embossing fabrication and material properties of polymer. The cantilever has non-uniform width optimized for electrostatic actuation and high-density array configuration. Two metal molds were transferred by electroplating from silicon structures which is micromachined by DRIE and anisotropic wet etching. The polymer optical switch array chip was produced by hot-embossing between the two molds and laser cutting. Finally, the operation of the assembled 8×8 optical switch system was demonstrated.

キーワード：ホットエンボス，光スイッチ，ミラー，ポリマー MEMS，金型，シリコン

Keywords: Hot-embossing, optical switch, mirror, polymer MEMS, mold, silicon

1. まえがき

シリコンデバイスの製造はフォトリソグラフィを基盤技術とし、ウエハを単位としたバッチ生産である。そのため、デバイスの価格はデバイス製造工程の複雑さだけではなく、チップ面積にも大きく依存する。MEMS デバイスは電気回路と違い、本質的にその大きさが重要である。電気回路のように、ムーアの法則に代表されるようなテクノロジーの進化に従って単純に小型化を進めることは難しい。チップサイズはどうしても小さくできにくく、コストも下がらないという問題がある。

一方で、通常の大きさの機械部品は、ポリマーの成形加工や金属のプレス加工などで金型を元に成形加工されるこ

とが多いが、これらの部品は同程度の大きさの MEMS シリコンチップに比べると 1 ～ 2 桁低いコストで生産が可能である。これらの成形加工を MEMS デバイス生産に利用することができれば、デバイスの飛躍的な低価格化と普及が期待できる。

我々はシリコンの 3 次元微細構造を原型にして金属の金型を作製し、ホットエンボスによりポリマーの 3 次元微細構造を生産する研究を行ってきた^{(1)～(3)}。応用として、MEMS 製品への期待が高い、光ファイバ通信用光スイッチを想定している。ポート数は 8×8 とし、2 次元型のデバイス構造を試作した。本論文では、このデバイスの設計から金型の試作、ポリマー構造の試作までを中心に報告し、ポリマー構造に特有の問題点なども指摘したい。

2. 設 計

ポリマー材料の中でホットエンボスによく使われる典型的な材料として、PC (polycarbonate) と PMMA (poly-methyl methacrylate) が挙げられる。まず、材料の機械的性質⁽⁴⁾ をシリコンと比較してみると、これらの材料のヤング率は 1 ～ 3 GPa であり、シリコンのヤング率⁽⁵⁾ 150 ～ 190 GPa と比べると約 2 桁低い。その一方で、材料の密度は 1.2 g/cm³ 程度と、シリコンの密度⁽⁶⁾ 2.3 g/cm³

* 産業技術総合研究所 機械システム研究部門

〒 305-8564 茨城県つくば市並木 1-2

Mechanical System Engineering, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1-2 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564

** Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech)

71 Nanyang Drive, Singapore 638075, Singapore

*** 池上金型工業株式会社

〒 346-0004 埼玉県久喜市南 5-5-30

Ikegami Mold Engineering Co., LTD.

5-5-30 Minami, Kuki, Saitama 346-0004

と極端に大きくは変わらない。

また、微細構造の寸法を比較してみると、ポリマーの加工方法としてホットエンボスを想定しているため、その構造体の最小寸法は $100\mu\text{m}$ 程度に限られる。構造体上の凹凸に関してはサブ μm の構造も転写が可能であるが、構造体そのものが $100\mu\text{m}$ よりも小さくなると、成型時のポリマーの流れが制限されて成形が困難になるためである。

以上の2つの違いを考慮し、光スイッチの可動ミラー構造を設計した。ミラーの可動構造については、垂直側面を持つミラーが長さ l 、厚さ t のカンチレバー先端に配置され、上下に可動するポップアップタイプとした⁽²⁾。シリコンデバイスでは同様の光スイッチ⁽⁷⁾が既に報告されていて、2次元光スイッチとしては典型的なものである。光ファイバから出射した光をボールレンズでコリメートした場合、その光束はファイバのタイプにもよるが直径 $50 \sim 150\mu\text{m}$ 程度になる。したがって、ミラーの可動距離はそれより大きくなければならない。設計では可動距離を $150\mu\text{m}$ とした。本研究ではポリマー構造体の試作を主眼に置いており、できるだけ構造を簡単にするために、アクチュエータとしては他種の材料を必要としない静電駆動を選択した。カンチレバーは間隔 d を隔てられて配置された電極によって、電位差 V で引きつけられ駆動される。

カンチレバーの単位面積あたりに働く静電力は

$$F_{\text{ES}} = \frac{\epsilon_0 V^2}{2d^2} \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで ϵ_0 は真空の誘電率である。この力により生じる、幅の様なカンチレバー先端の変位 y は、 $y \ll d$ という小変位の条件では

$$y = \frac{3F_{\text{ES}}l^4}{2Et^3} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで E はカンチレバー材料のヤング率である。実際のデバイス動作ではカンチレバーを pull-in させて、On/Off の2値制御で使用する。そのため実際には小変位の条件は保たれていないが、式(2)で $y > d/2$ 程度の変位があればカンチレバーは十分 pull-in すると近似的に考え、設計を行った。

まず、前述の寸法の制限によりカンチレバーの厚さは $t = 100\mu\text{m}$ とした。また、電極間隔は必要な可動距離に等しく、 $d = 150\mu\text{m}$ とした。式(1)および式(2)により、カンチレバーの長さ l が決まれば必要な駆動電圧 V が決定される。本研究ではカンチレバーの耐振安定性を重視し、 $V = 200\text{V}$ 、 $l = 8.9\text{mm}$ という比較的高電圧で動作させる条件とした。これより低電圧駆動のカンチレバーも設計が可能であるが、加速度の影響を受け動作が不安定になると考えられる。実際のデバイス試作にあたっては、長いカンチレバーを短いミラーの配置ピッチ (3mm) で配列させるため、図1のような非一様な幅を持つカンチレバーとしている。図では 2×2 のレイアウトを示しているが、このカンチレバー形状はそのまま 8×8 といったさらに大規模な

図1 設計した非一様カンチレバーの 2×2 アレイレイアウトのソリッドモデル。(a)は上型側(ミラー側)から見た図であり(b)は下型側(電極側)から見た図である。

Fig. 1. A solid model of 2×2 layout of non-uniform cantilever array. Figures (a) and (b) show the bird's-eye view from upper-mold side (mirror side) and lower-mold side (electrode side), respectively.

配列が可能である。カンチレバーの幅は根本で $200\mu\text{m}$ 、先端で約 1mm とし、幅の細い部分と広い部分の寸法比は有限要素法ソフトウェア ANSYS を使用して最適化された。これにより、先端の電極面積を増加させることができたため、カンチレバー長さも約 7mm に短縮することができた。上記のカンチレバー型に加え、渦巻型バネで支持されたスイッチ構造の設計も試みたが、同等の剛性を持つ支持構造ではミラーのピッチを 4mm 程度までしか短縮できず、直線的なカンチレバーの方が密にデバイスを配置することが可能であった。試作は 8×8 の配置を行ったフォトリソ作製し、プロセスを行った。ポリマー光スイッチチップの大きさは $25\text{mm} \times 31\text{mm}$ である。

以上のように、ポリマーで作製する可動構造はシリコンに比べるとどうしても、厚く、柔らかく、長いものにならないを得ない。前述のように密度はそれほど小さくはないため、重力や振動の影響を受けやすくなると予想される。本試作のカンチレバーでも、 $5g$ 程度の加速度が印加されると静電力とほぼ同等の慣性力が発生してしまう。一方で、デバイスのサイズの増加は、成形加工においては必ずしもコストの増大にはつながらない。このような、材料の特性による違いを十分に理解してデバイスを設計することが必要である。

図2 製作した光スイッチのシリコン上型のSEM写真。4つ見えている小さな矩形の突起がミラーとして使われる。

Fig. 2. SEM image of fabricated silicon original for upper mold. Four small square walls are used as mirrors.

3. 製作

3.1 シリコン原型の製作 デバイスの原型は2枚のシリコンウエハから、3次元微細加工により作製した。2枚の原型のうち、DRIEを用いて作製する「上型」はミラー形状を定義し、異方性エッチングを用いて作製する「下型」は静電アクチュエータのギャップを定義する。図1の(a)および(b)で見える構造が、それぞれ上型および下型の形状にほぼ対応している。製作したシリコン原型のうち上型の原型のSEM写真を図2に示す。下型はシリコン基板に異方性エッチングで長方形の溝を切っただけのものである。この2つの原型から反転させた金型を作り、上下からポリマー板を挟んでホットエンボスすることで、3次元のポリマー製光スイッチ部品が製作できる。

シリコン加工において問題になるのは、DRIE加工での側面のエッチングプロファイルである。図2のような、エッチング面積の大きなパターンの側面は、DRIEの性質により逆テーパ面になりやすい。ミラー面の逆テーパは反射光を偏向させ、スイッチの光軸合わせを難しくするという問題がある。また、ホットエンボスの過程においても、金型からの離型性を悪化させるという問題をもたらす。我々はDRIEのレシピを工夫することで、このようなパターンの条件のDRIEにおいても、 89.7° の垂直性を確保することができた⁽⁸⁾。この条件における表面粗さは、AFMによる計測により約30 nmであった⁽⁹⁾。下型のように垂直側面の不要な場合は、異方性エッチングを用いて正テーパを付けることで、より良い離型性が実現できる。

3.2 ニッケル金型の製作 金型は、前述のシリコン原型から電鍍を行うことで作製した。まず、シリコン原型に厚さ $0.1\mu\text{m}$ のNiシード層を蒸着し、次にNiを約3 mm電鍍した。精密な転写を行うため低い電流密度で電鍍を行い、約25日間を要した。その後、シリコン原型をKOH中

図3 製作した光スイッチのNi金型。左が上型、右が下型である。

Fig. 3. Images of fabricated nickel upper mold (left) and lower mold (right).

で溶解し、残ったNiからパターンの転写された $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ の部分を作り出し、金型とした。金型のミラー構造側面をAFMで観測したところ、シリコン原型の表面粗さとは大きな変化はなく、ナノメートルレベルで正確な転写が行われていた⁽¹⁰⁾。 8×8 の光スイッチを配置したNi金型の外観を図3に示す。

3.3 ポリマー構造の製作 ポリマー構造材料としてはPCを使用した。ガラス転移点温度は約 155°C である。実験の配置等については以前の報告⁽³⁾に詳しく示されている。

厚さ 0.4 mm のPC板を荷重を与えないように上下の型に挟み、両方の金型を 180° まで加熱した状態で徐々に荷重を増加させた。最大の荷重は 1 kgf/mm^2 以下である。最大荷重で数秒間荷重を保持した後、金型を強制空冷させて約 100°C で離型させた。この条件で、ミラー構造(幅 $100\mu\text{m}$ 、高さ約 $150\mu\text{m}$)の先端まで、正確に転写することが可能であった。ミラー構造の側面をAFMで観測したところ、金型同様、シリコン原型の表面粗さとは大きな変化はなく、ナノメートルレベルで正確な転写が行われていた⁽¹⁰⁾。一方で、ポリマーチップ全体の寸法は、ホットエンボス時の熱収縮のために原型の寸法よりも約 0.7% 収縮していた。これは、ホットエンボス温度が約 180°C であることと、金型のNiとポリマー材料では熱膨張係数が大きく違うことを反映している。

また、カンチレバーを構成する、厚さの最も薄い部分は厚さ約 $100\mu\text{m}$ とすることができた。この厚さは、主として原材料の厚さと、ホットエンボス温度におけるポリマー材料の流動性によって決まる。薄い部分を作製するためにはむやみに加圧するのではなく、元々薄い材料を使用することと、薄い部分の近くにポリマー材料が逃げる空間を用意しておく設計が必要であった。本研究の試作でも、図1のようにカンチレバー以外の部分の厚さを厚く取りポリマーを逃がす構造としたが、実際にはさらに機械加工を用いて金型にポリマーを逃がす構造⁽³⁾を追加することが必要であった。

カンチレバーの切り離しには、エキシマレーザー(KrF、波長 248 nm)によるレーザーカッティングを用いた。切断部

図4 レーザカッティングを行った後のポリマー光スイッチのミラー付近の光学顕微鏡写真。カンチレバー右端に斜めに配置されているのがミラー、下に2本並んでいる細い構造は隣接するカンチレバーである。

Fig. 4. Optical microscope image of polymer optical switch after the laser cutting of cantilever structure. The mirror is obliquely located at the right end of the cantilever. The two narrow structures are neighboring cantilevers.

の幅は $100\mu\text{m}$ である。金属プレス加工のように、ホットエンボスと同時にカンチレバーが切り離されるのが最も望ましいが、このような加工にはさらに複雑な金型が要求され、現時点では実現が難しい。加工部のポリマー光スイッチの光学顕微鏡像を図4に示す。切断箇所付近では溶融などの特に大きな変質や歪は見られなかった。また、切断後に残留応力等でカンチレバーが変形することはほとんどなく、ほぼ切断前と同一位置を保ち続けた。一方で、切断部周辺には黒く見える膜が薄く堆積し、表面を汚染した。これは蒸発したPC材料が変質後、再付着したものと考えられるが、デバイスの性能自体に悪影響はないと考えられる。

作製した光スイッチチップには、ミラーの反射率を向上させるためにPt(厚さ 200nm)がスパッタされた。この金属膜は、静電駆動のための電極としても用いられる。

3.4 デバイスの組立て 作製したポリマー光スイッチは、シリコン基板で作製した電極基板に接合された。接合には、熱硬化性エポキシ樹脂を使用し、位置合わせは電極基板の段差と、ポリマー構造の段差を合わせることで行われた。ポリマー光スイッチはPtコーティングにより電気的にはすべてのカンチレバーが同電位になっているため、電極基板側に 8×8 の独立した電極を形成し、その上をプラズマCVDによる SiO_2 膜で絶縁した。

電極を付けたポリマー光スイッチは、図5に示すように、最後にシリコンV溝基板上に直径 1.0mm のボールレンズを配置したシングルモード光ファイバアレイと組み合わせられ、光スイッチシステムを構成した。

組み立て上の問題としては、前述のポリマーの熱収縮による寸法の変化が挙げられる。今回の試作ではその影響が考慮されていなかったため、シリコンでできている電極基

図5 作製した 8×8 光スイッチアレイシステムの全体像。左側が電極基板と接合されたポリマーチップであり、入射側、出射側に各8本の光ファイバが接続される。右側は静電駆動のための電気的なコネクタである。

Fig. 5. Total system of the fabricated 8×8 optical switch array. Left side is the polymer chip assembled with electrode substrate and 16 optical fibers. Right side is the electrical connector to the actuators.

板やファイバアレイとの位置合わせに問題が生じてしまい、 8×8 の全てのスイッチを正常に動作させることは困難であった。チップの大きさが約 30mm 角と大きいことも、この影響を大きくする原因となった。今後、この熱膨張を考慮した設計が必要である。

4. 試作結果

現在、試作した光スイッチの評価と改良を続けており、詳細な報告は次報に譲りたいが、波長 $1.31\mu\text{m}$ の光のミラーによる挿入損失は 10dB 程度であり、カンチレバーの駆動電圧は約 300V であった。スイッチおよび電極基板はこの駆動電圧でも、絶縁破壊を起こすことなく正常に動作を行っている。

5. むすび

シリコンで3次元微細加工した原型を金型に転写し、ポリマーのホットエンボスを行うことで、シリコンプロセスの高い加工精度と成形加工の低い生産コストを両立させる製造プロセスを目指したポリマー光スイッチの試作を行った。

ホットエンボス加工の条件に適合した、静電駆動カンチレバー可動部を持つ光スイッチ構造を設計し、 8×8 に高密度配置した。シリコンの原型から電鍍でNiの金型を作製し、ポリマー構造のホットエンボスを行った。カンチレバー可動構造はレーザカッティングで形成した。作製したポリマー光スイッチのアセンブルを行い、実際に動作することを確認した。

ポリマーMEMSの導入による製造方法の変革は、シリコンプロセスが中心であったMEMSのコストダウン、普及に大きく寄与できると期待できる。最後に、本報告の一連の試作で理解を深めることができた、ホットエンボスで作製するポリマーMEMSの現状の課題点について下記に

簡単にまとめたい。

- 構造体の厚さに $100\mu\text{m}$ 程度という下限があることが、設計を難しくしている。可動構造を作ろうとすると、厚く、大きく、重い構造になりやすい。この特性を理解した設計が必要である。
- したがって、大きなストロークに向かない静電駆動との組み合わせは必ずしも有利ではなく、別のアクチュエータとの組み合わせが期待される。特にポリマーアクチュエータとの一体成形が可能になれば、可動部品としての価値は極めて高くなる。
- 下限に近い厚さを実現させるためには、ホットエンボス時のポリマーの逃げを考慮した金型の設計が必要である。
- シリコン原型を製作する際、DRIE を使う場合は離型性を確保するために、エッチングプロファイルの制御が重要になる。
- カンチレバーのような切り離された構造を作製するには、レーザカッティング等の加工を併用する必要がある。
- ホットエンボス時の熱収縮があるため、作製したポリマー構造の寸法は原型よりもわずかに収縮する。ホットエンボス条件を決めた上で、設計にフィードバックが必要である。

(平成 16 年 1 月 23 日受付, 平成 16 年 6 月 16 日再受付)

文 献

- (1) Y. Hashiura, T. Ikehara, A. Kitajima, H. Goto, and R. Maeda: "Optical switch array based on microforming process", Proc. of SPIE, Vol.4592, pp.414-421, Adelaide, Australia (2001)
- (2) X.C. Shan, R. Maeda, T. Ikehara, Z.F. Wang, and C.K. Wong: "A polymer-based optical switch fabricated using silicon process, electroplating and micro hot embossing", *Int. J. of Comput. Eng. Sci.*, Vol.4, pp.725-728 (2003)
- (3) X.C. Shan, R. Maeda, and Y. Murakoshi: "Development of a micro hot embossing process for fabricating micro optical devices", Proc. of SPIE, Vol.4936 pp.67-75, Melbourne, Australia (2002)
- (4) Mitsubishi Engineering Plastic Co.: "Material Data Sheets" (Japanese)
- (5) J.J. Wortman and R.A. Evans: "Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio in silicon and germanium", *J. Appl. Phys.*, Vol.36, pp.153-156 (1965)
- (6) W.R. Runyan: "Silicon Semiconductor Technology", McGraw-Hill (1965)
- (7) M. Okuno, R. Nagase, A. Himeno, and M. Kawachi: "Silica-based 8×8 optical matrix switch integrating new switching units with large fabrication tolerance", *J. Light wave tech.*, Vol.17, p.771 (1999)
- (8) X.C. Shan, R. Maeda, and T. Ikehara: "Fabrication of Micro Vertical Mirrors on Silicon Mold Master for Optical Switch Applications", proc. of HARMST, pp.177-178, Monterey, USA (2003)
- (9) T. Kobayashi, Y. Murakoshi, and R. Maeda: "Development of a novel self-sensitive atomic force microscope for nondestructive measurement of micro vertical surfaces", *Microsystem Technologies*, Vol.9, to be published (2004)
- (10) T. Kobayashi, X.C. Shan, Y. Murakoshi, and R. Maeda: "A novel self-sensitive SFM for nondestructive measurement of tiny vertical surfaces with restricted access", Proc. of DTIP 2003, pp.286-289, Cannes-Mandelieu, France (2003)

池 原 毅 (正員) 1965 年生。1993 年 3 月東北大学理学研究科物理学専攻修了。同年横河電機(株)マイクロマシン研究部。1999 年機械技術研究所(現,産業技術総合研究所)。博士(理学)。主としてマイクロセンサ、マイクロアクチュエータの設計および製造に関する研究に従事。

単 学 伝 (非会員) 1992 年東北大学機械電子工学科精密計測工学専攻修了。同年オリンパス光学工業(株)マイクロシステム研究所。1998 年シンガポール SIMTech 研究員。2001~2002 年産業技術総合研究所客員研究員。工学博士。主としてマイクロシステムの設計、製造、パッケージングに関する研究に従事。

大 友 誠 (非会員) 1979 年日本大学生産工学部卒業。1980 年池上金型工業(株)に入社,中曽根事業所設計室に配属。1982 年電鑄室に配属され現在に至る。射出成形用金型の設計,電鑄製品の製作・研究に関する業務に従事。

前 田 龍太郎 (正員) 1952 年生。東京大学大学院修士課程修了。マイクロファブリケーション,ハイアスペクト比加工,圧電材料の成膜技術などの研究に従事。現在,産総研機械システム研究部門集積機械研究グループ長。工学博士。