ホットエンボスおよび研磨加工による可動構造を接合積層した大変位ポリマー MEMS の製作プロセス開発

天谷 諭*, ダオ ベト ズン**, 杉山 進***

Development of Fabrication Process for Large-Displacement Polymer MEMS with Stacked Movable Structures Based on Hot Embossing and Polishing

Satoshi AMAYA*, Viet Dzung DAO**, and Susumu SUGIYAMA***

*立命館大学大学院理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

**立命館大学総合理工学研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

***立命館大学立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

*Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University (1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577)

**Research Organization of Science and Engineering, Ritsumeikan University (1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577)

***Ritsumeikan-Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University (1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577)

概要 本論文では、ホットエンボスと研磨加工を用いたポリマー MEMS デバイス製作プロセスの開発について報告する。開発した製作プロセスは、まず2段構造の Si 型を製作し、デバイス構造をホットエンボスにより成形した。その後、成形した試料と基板となる PMMA 板とを表面活性化法により接合した。接合後の試料上面には、ホットエンボス後に残る残膜があり、これを研磨加工によって除去した。最後に、デバイス表面に Au をスパッタリングによってコーティングした。この製作プロセスを適用し、V 字ビームをもつ PMMA 製熱駆動マイクロアクチュエータを製作・評価し、デバイス材料を Si とした場合に比べ 10 倍大きく変位することを確認した。

Abstract

This paper reports on our study of a fabrication process for polymer MEMS devices utilizing hot-embossing and polishing steps. In this paper, a PMMA thermal microactuator was developed and characterized to demonstrate the process's capability and robustness. In the hot-embossing step, a two-step silicon mold fabricated using bulk micromachining technology was used to create PMMA microstructures. Then, the hot-embossed structures were bonded to the PMMA substrate using a surface activation bonding method, and the back layer of the hot-embossed PMMA structure that remained after hot embossing was removed by a polishing step to release the movable microstructures. A V-shaped PMMA thermal microactuator with a thickness of about 50 μm was fabricated and tested successfully. The displacement was about 10 times larger than that of a Si counterpart at the same temperature difference.

Key Words: Polymer MEMS, Hot Embossing, Polishing Process, Thermal Actuator

1. 緒 言

MEMS 市場は年々拡大しており、新規技術および用途開発が進められている。これまで、MEMS デバイス材料としては Si が主に用いられているが、近年、デバイス材料にポリマーを使用したポリマー MEMS に関する研究が盛んに行われている。ポリマーは低コスト化に適しており、Si では得られない機能（柔軟性、透過性、生体適合性など）をもたせたデバイスの開発が可能である¹⁾。その応用としては、光学デバイス²⁾、流体デバイス³⁾、バイオデバイス⁴⁾といったポリマー MEMS に関する研究が盛んに行われている。また、ポリマー材料として植物由来ポリマーを使用することで低環境負荷デバイスの製作も可能となる。

ポリマー MEMS に関する報告の多くは $\mu\text{-TAS}$ やレンズなどのポリマー構造体自体に可動部をもたない場合が多い。可動部をもつポリマー MEMS としては、静電櫛歯型マイク

ロアクチュエータ⁵⁾やミラーデバイス⁶⁾がある。いずれの報告においても、ドライエッチングやステッパーなどの半導体製造装置を使用しており、低コスト化には限界がある。また、フォトレジストを使用した場合、適用可能な材料が限定されてしまうため、多岐多様にわたるポリマーに対する選択性が著しく限定されてしまう。

本研究では、適用材料の選択性が高く、半導体製造装置を使用せず大量生産に適した、可動構造をもつポリマー MEMS デバイスの製作プロセスについて検討を行っている。その製作プロセスとして、成形技術と機械加工を用いたポリマー MEMS 製作プロセスについて研究を行っている⁷⁾。この研究においては、機械加工として切削加工を適用し、可動構造をもつポリマー MEMS デバイスの製作・駆動を確認している。

しかし、切削加工は難削材の加工や金型加工には適しているが、デバイスを製作するには生産効率が低い。また、

MEMSデバイスの生産はウェハレベルで行われており、将来的な高効率かつウェハレベルプロセスを視野に入れた製作プロセスが今後必要になると考えられる。

そこで、本稿では可動構造をもつポリマーMEMSに関して、デバイス材料の選択性が高く、高効率・低コストな製作プロセスの開発を目的として、ホットエンボスと研磨加工を用いた製作プロセスについて検討を行った。この製作プロセスは、ホットエンボス用金型の製作以外はMEMSデバイスの加工に使用される半導体製造装置を必要としないため、設備コストの大幅な抑制が可能であり、 SF_6 などのドライエッチング用ガスやフッ化水素などの環境負荷の高い物質を使用しないため、低環境負荷な製作プロセスといえる。また、研磨加工を用いることでウェハレベルプロセスにも対応可能である。

なお、本稿ではデバイス材料として、リサイクルに関する開発が進んでいる環境に優しい材料の1つであり、汎用的なポリマーであるPMMA (Poly(methyl methacrylate))を用いた。

2. 大変位ポリマーMEMSの構造

本稿では、大変位ポリマーMEMSとして、PMMAの熱膨張率($70.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)がSiの熱膨張率($4.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)の約17倍という材料特性に着目し、熱駆動型マイクロアクチュエータを製作・評価対象とした。製作した熱駆動マイクロアクチュエータの構造図をFig. 1に示す。本稿においては、図のようなV字型熱駆動マイクロアクチュエータとした⁸⁾。アクチュエータの形状は可動部厚さ $50\text{ }\mu\text{m}$ 、固定部厚さ $80\text{ }\mu\text{m}$ とし、可動部が片側4本のビームで支持されたV字型構造とした。ビーム長さ： L は $2,000\text{ }\mu\text{m}$ 、ビーム幅： w $25\text{ }\mu\text{m}$ 、初期ビーム角度： a 1° である。また、加熱駆動用抵抗としてビーム表面にAuをスパッタリングによってコーティングした。ビームに電流： I を流したとき、ジュール熱によって熱膨張して可動部が変位する。

ここで、ビームのみ熱膨張すると仮定した場合、この熱駆動マイクロアクチュエータの変位： d は以下の式で表される⁸⁾。

$$d = \sqrt{L^2 + 2kL^2\Delta T - (L\cos(a))^2} - L\sin(a) \quad (1)$$

d ：変位， L ：ビーム長さ， k ：熱膨張係数

a ：初期角度， ΔT ：温度差

PMMA 熱膨張係数： $70.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Si 熱膨張係数： $4.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

式(1)から求めた初期温度から温度変化させた場合の変位をFig. 2に示す。また、比較として構造体にSiを適用した場合の変位も示す。この結果より、同じ寸法のアクチュエータにおいて、構造体にPMMAを適用した場合の方が、Siを適用した場合に比べて同じ温度差で大きな変位を得ることが可能であることがわかる。

Fig. 1 Schematic of V-shape thermal microactuator

Fig. 2 Calculated displacements versus temperature difference

3. 製作プロセスおよび製作結果

3.1 製作プロセス概要

今回提案するポリマーMEMS製作プロセスをFig. 3に示す。

まず、2段構造のSi型を製作した。Si型の製作プロセスについては次節にて説明する。Si型製作後、デバイス構造をホットエンボスにより成形した。その後、成形サンプルと基板となるPMMA板とを表面活性化法によって接合した。接合後のサンプル上面には、ホットエンボス後に残る残膜があり、これを研磨加工によって除去した。研磨加工により多数のデバイスを同時に加工することが可能となる。最後に、デバイス表面にAuをスパッタリングによってコーティングした。残膜除去後に施したAuコーティング薄膜を加熱駆動用抵抗薄膜として使用した。なお、コーティング時の短絡を防止するため、デバイス側面にはアンダーカットを設けている(Fig. 3(e))。次節から各工程の詳細および実験結果を示す。

3.2 Si型製作プロセスおよび製作結果

Si型製作プロセスをFig. 4に示す⁹⁾。可動構造を製作するには、固定電極部と可動部に段差を設ける必要がある。そのため、図のような2段構造のSi型を製作した。

まず、 SiO_2 層を形成したSiウェハに対して、可動部分と

Fig. 3 Fabrication process of polymer MEMS with movable structure

Fig. 4 Fabrication process of two-step Si mold

固定部分をフォトリソグラフィにてパターンニングする。次にパターンニングしたSiO₂層上にフォトレジストをスピコートし、固定電極部分のパターンニングを行う。

その後、フォトレジストをマスクに1回目のDeep-RIEを行う。1回目のDeep-RIE終了後、フォトレジストを除去し、SiO₂層をマスクに2回目Deep-RIEを行う。これにより、固定電極部と可動部に段差のあるSi型を製作した。また、Deep-RIE加工条件を制御することで、抜き勾配および加工壁面の平滑化を行った¹⁰⁾。Deep-RIE後は、離型性を向上させるためフッ素コーティング剤を塗布した。製作した型の

Fig. 5 SEM image of the two-step Si mold

SEM画像をFig. 5に示す。なお、前節で説明した製作プロセスにおいて、残膜の除去工程がある。そのため、残膜除去する際の仕上げ代を10μmとり、Deep-RIE加工深さはデバイス部60μm、固定電極部90μmとした。

3.3 ホットエンボス実験結果

ホットエンボスは、材料試験機（島津製作所：AG-10 kNIS）を改造した。材料試験機は精密ボールねじ駆動制御であり、移動速度を0.001~1,000 mm/minまで制御可能である。また、プレス部治具は研究室にて内製した。真空チャンバを有し、加熱・冷却用の流路を設けた金属プレートを上下に配置した。加熱冷却は射出成型用温度制御装置を用いた。加工するPMMAには、クラレックスS（日東樹脂工業製）を使用した。

成形条件および手順は以下の通りである。

1. 樹脂および金型を180℃に加熱
2. 180℃に到達後、0.1 mm/minの速度で加圧していき、2,000 Nで15分間保持（金型サイズ：15 mm×15 mm）
3. 圧力を2,000 Nに保持したまま冷却開始
4. 樹脂のガラス転移温度105℃に到達後、加圧を終了
5. 80℃まで冷却した後、0.01 mm/minの速度で離型

成形結果をFig. 6に示す。
未充填、ウェルドラインなどの不良がないことを確認できた。また、レーザ顕微鏡（キーエンス：VK9700）で段差を測定した結果、固定電極部高さ90μm、可動部高さ60μmとほぼ完全にSi型形状が転写されていた。

3.4 表面活性化による接合結果

接合は、真空紫外線（波長：172 nm）を用いた表面活性化による常温接合を行った¹¹⁾。真空紫外線により、接合の妨げになる表面汚染物を洗浄し、表面原子および分子の結

Fig. 6 SEM image of the PMMA thermal microactuator pattern after hot embossing

合手を切断し活性化することで、結合手同士を直接結合させて強固な接合を形成する手法である。172 nmの真空紫外線のエネルギーは166.7 kcal/molである。PMMAに含まれている分子結合のエネルギーは、C-O結合が76.4 kcal/mol、C-C結合が84.3 kcal/mol、C-H結合が97.6 kcal/molであり、172 nmの真空紫外線はPMMAに含まれる分子結合エネルギーを切断可能であることがわかる。また、サンプル表面の洗浄効果も確認されている¹²⁾。本手法によると、従来の熔融接着や接着剤の使用で問題となる、デバイスの変形および微細パターンの埋没を回避し、低温での接合が可能である。

ホットエンボスサンプルと基板用PMMA板に真空紫外線を10分間照射し、その後サンプルを重ね合わせて70°Cに加熱した状態で、4.4 MPaで10分間加圧した。

接合後のサンプルをFig. 7に示す。変形がなく接合できていることが確認できた。

3.5 研磨加工による残膜除去結果

可動構造を得るため、Fig. 7のようにデバイス層上部にホットエンボス後に残る残膜を除去する必要がある。本研究では、残膜を研磨加工により除去した。

研磨加工は、研磨剤にBAIKALOX（粒度3.0 μm, 0.05 μm）を使用し、1.3 kgの荷重をかけながら実施した。粒度3.0 μmで粗加工を行った後、粒度0.05 μmにて仕上げ加工を行った。加工時間は全工程で40分程度であった。研磨加工後、デバイス表面に加熱駆動用抵抗薄膜としてスパッタリングによってAuを厚さ252 nmでコーティングした。

製作したデバイスをFig. 8, 9に示す。図より、残膜が完全に除去されていることを確認できた。また、数μm以下程度のデバイス縁からはみ出た余分部分であるバリが発生

Fig. 7 Laser scanning microscope image of the bonded sample (side view)

Fig. 8 Laser scanning microscope image of the polished sample (side view)

Fig. 9 SEM image of the PMMA thermal microactuator pattern after polishing

していたものの、デバイスの破損およびスクラッチ痕などなく良好な表面状態にて残膜を除去することができていることが確認できた。レーザ顕微鏡にて表面粗さを測定した結果30 nm (Ra)であった。

4. 駆動評価結果

駆動評価は電流を流した際の変位を顕微鏡で観察し、そのときの顕微鏡画像から変位を読み取った。なお、変位量評価のため、デバイスの一部に10 μmのラインアンドスペースの櫛歯構造を設けた(Fig. 10)。製作した熱駆動マイクロアクチュエータの駆動評価結果をFig. 11に示す。縦軸が変

Fig. 10 SEM image of the comb teeth structure for measuring displacement

Fig. 11 Measured displacements versus current and power consumption

位、横軸が流した電流値であり、各電流値における消費電力を各点に記載した。電流の増加にともない変位が大きくなっていき、50 mA で39 μm変位していた。そのときの消費電力は21.9 mWであった。また、電流を流した前後の温度差と変位との関係をFig. 12に示す。縦軸が変位、横軸が電流を流した前後の温度差である。温度差は、電流を流した際に計測した導電膜(Au)の抵抗値から、金属の温度依存性を表す式(2)より、式(3)を用いて算出した。この場合温度差が小さいので温度の一次式とした。また、導電膜の温度係数は実測値0.00382/°Cを用いた。

$$R_t = R_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{R_t - R_0}{\alpha R_0} \quad (3)$$

ΔT : 温度差, R_t : 測定した抵抗値

R_0 : 初期抵抗値(8.51 Ω)

α : 導電膜(Au)の温度係数=0.00382/°C

この結果より、解析値とのよい傾向の一致を確認するこ

Fig. 12 Measured displacements versus temperature difference

とができた。また、Siで製作した場合の解析値に比べ、10倍程度大きく変位しており、同じ温度変化で大変位を得ることができることを確認できた。

5. まとめ

本稿では、ホットエンボスと研磨加工を用いた製作プロセスにより、可動部構造をもつポリマーMEMSデバイスを製作することができた。また、この製作プロセスを適応して熱駆動型マイクロアクチュエータを製作・駆動評価し、Siで製作したデバイスに比べて同じ温度変化で大変位が可能なことを確認した。熱駆動マイクロアクチュエータは、マイクロバルブやマイクロポンプ、磁気ヘッドスライダなどへの応用が期待できる。

今回提案した製作プロセスには以下の利点がある。

- ・シンプルな製作工程で、低コストなデバイスが実現可能である
- ・大面積化することで、ウェハレベルプロセスにも対応可能である
- ・型の製作以外は半導体製造装置を必要とせず、設備投資の抑制が可能である
- ・成形可能な材料であればSiと異なる材料特性を活かしたデバイスの製作が期待できる

また、加工後の表面粗さが30 nm (Ra)であり光学デバイスへの適用も考えられる。

今後は、他のデバイスへの適用や大面積化を詳細に検討することで、さまざまな特徴をもたせた可動部をもつポリマーMEMSデバイスの普及が期待できる。

謝 辞

本研究の一部は、平成22年度地域産学官連携科学技術振興事業費補助金 イノベーションシステム整備事業 地域イノベーションクラスタープログラム(グローバル型)「京都環境ナノクラスター」の支援による。

(2011.2.18-受理)

文 献

- 1) 倉林活夫: “ポリマーMEMS”をSi上に形成 “柔軟・透

- 明”を生かしバイオ・光へ,” NIKKEIMICRODEVICES, May, 2005, pp. 71–76
- 2) A. Yeniay, R. Gao, K. Takayama, R. Gao, and A. Garito: “Ultra-Low-Loss Polymer Waveguides,” *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. **22**, pp. 154–158, 2004
 - 3) H. Shinohara, Y. Takahashi, T. Nishi, K. Uemura, C. Takahashi, J. Mizuno, and S. Shoji: “Surface Hydrophilic Polyurea Film for PMMA Blood Analysis Chip Realized by Vacuum Ultraviolet Light Irradiation,” *Tech. Digest Transducers '07*, pp. 291–294
 - 4) C.-L. Chen, S. Jinno, H. Möller, B. Rajalingam, S.-H. Chao, S. Selvarasah, A. Khademhosseini, and M. R. Dokmeci: “Multiplayer Parylene-C Stencils for Dynamically Controlling Cell Interactions,” *Proceedings of MEMS 2008*, pp. 276–279
 - 5) Y. Zhao and T. Cui: “Fabrication of High-Aspect-Ratio Polymer Based Electrostatic Comb Drives Using the Hot Embossing Technique,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. **13**, pp. 430–435, 2003
 - 6) J. Chung, Y. Huang, and W. Hsu: “Fabrication of Polymer-Based Vertical Comb Drive Using a Double-Side Multiple Partial Exposure Method,” *Proceedings of MEMS 2008*, pp. 475–478
 - 7) S. Amaya, D. V. Dao, and S. Sugiyama: “Development of Polymer Electrostatic Comb-drive Actuator Using Hot Embossing and Ultraprecision Cutting Technology,” *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, SPIE*, Vol. **8**, No. 4, Oct–Dec. 2009
 - 8) M. J. Sinclair: “A High Force Low Area MEMS Thermal Actuator,” *Proceedings of the 2000 Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, pp. 127–132
 - 9) M. Mita, Y. Mita, H. Toshiyoshi, and H. Fujita: “Multiple-Height Microstructures Fabricated by ICP-RIE and Embedded Masking Layers,” *T. IEE Japan*, Vol. **120-E**, No. 11, pp. 493–497, 2000
 - 10) P. H. Pham, D. V. Dao, S. Amaya, R. Kitada, and S. Sugiyama: “Fabrication and Characterization of Smooth Si Mold for Hot Embossing Process,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. **127**, No. 3, pp. 187–191, 2007
 - 11) T. Suzuki, F. Kitagawa, H. Shinohara, J. Mizuno, K. Otsuka, and S. Shoji: “Polymer Microchip for Electrophoresis-Mass Spectrometry Fabricated by Hot Embossing and Low Temperature Direct Bonding,” *Tech. Digest Transducers '07*, pp. 1617–1620
 - 12) 遠藤真一: “紫外線洗浄,” *ライトエッジ*, 2008年10月, pp. 12–16