

高アスペクト比マイクロ構造の製作法

Fabrication Technologies for High-Aspect-Ratio Microstructures

藤 田 博 之*

Hiroyuki FUJITA

半導体製造技術を援用してミクロの機械を作るマイクロマシニング技術が発達しており、マイクロマシンの実用化が期待されている。応用分野によっては、厚くて頑丈な構造や三次元的に複雑な構造が要求される場合があるため、様々のプロセスを開発し、三次元的なマイクロ構造を作る研究が盛んに行われている。三次元的な微細パターンを型取りでマイクロ構造を作る方法、シリコンの薄膜を基板から折り上げて立体化する方法、ビーム加工やマイクロ機械加工による方法などを紹介する。

1. はじめに

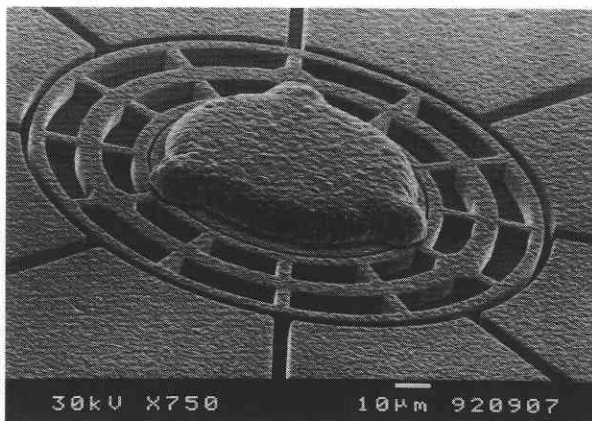
近年、半導体製造技術を援用して、 μm オーダの立体構造を実現したり、走査トンネル顕微鏡などの進歩により原子1個1個を操作して微細なパターンを描いたりできるようになってきた。つまり、肉眼には見えないような複雑な機械を作ることが、技術的に可能な段階に入りつつあり、いわゆるマイクロマシンの研究が活発に行われている^{1, 2)}。半導体マイクロマシニングは、1970年代から研究され⁴⁾、1987年の表面マイクロマシニング法の開発^{5, 6)}や、それを用いた静電マイクロモータ^{7, 8)}の成功によって今日のマイクロマシンの研究ブームを呼び起こした。図1に、筆者の研究室で作った直径100 μm の静電マイクロモータ³⁾を示す。

表面マイクロマシニング法でできる構造は、その厚みが高々4 μm 程度である。立体構造といっても平べったく、基板表面に広がるだけなので、応用によってはもっと三次元的な構造を用いたいという要求があった。このため、種々の工夫で三次元的なマイクロ構造を作る試みが行われている。本稿では、様々な三次元マイクロ構造の製作法について概説する。

2. LIGA および HARMS プロセス

高アスペクト比(構造の高さを幅で割った値)のマイクロ構造の作り方として、シリコンの結晶異方性エッチングやX線リソグラフィーによるLIGAプロセスが知ら

*東京大学生産技術研究所 第3部

図1 直径100 μm のニッケル製静電マイクロモータ³⁾

れている。後者では、深いレジストパターンの谷間に、ニッケル、銅、金などの金属層を電気メッキで付け、厚いマイクロ構造を得る⁹⁾。また、X線リソグラフィーの代わりに、紫外線のリソグラフィーで厚いレジストパターン(数十~百 μm)を得たり、反応性イオンエッチングでポリイミドなどを垂直に掘って鋳型とする場合もある。このような高アスペクト比マイクロ構造をHARMS (high-aspect-ratio micro structure) と総称している。LIGA/HARMSプロセスの流れを図2に示す。

2.1 LIGA プロセス

図3にLIGAプロセスの基本的な製造の工程を示す。まず、アクリル樹脂(PMMA)などのX線用感光材(フォ

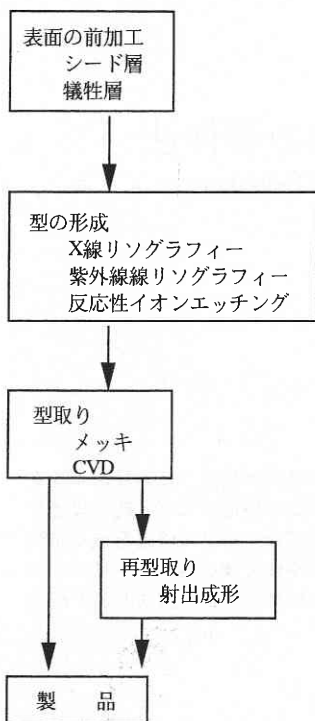


図 2 LIGA/HARMS プロセスの流れ

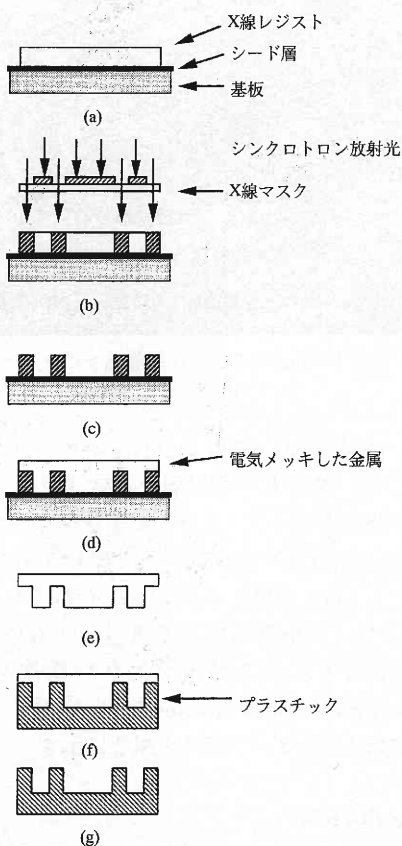


図 3 LIGA プロセスの基本工程

トレジスト) 層を, 望みの厚さ (通常は 0.1 ~ 1 mm 程度, 特別な例では数 cm) に基板上に形成する. 金などの重金属の吸収材をパターンとするマスクを用い, シンクロトロン放射の X 線 (SOR 光) でレジストを露光する. SOR 光は直進性・解像度・透過性に優れているため, 厚いレジストに対し μm 以下の精度で露光が可能である. この後, 現像してレジストの構造ができる.

次に, 全体をメッキ液に浸け, 導電性の基板の上に電気メッキで, ニッケル, 銅, 金などをレジスト構造の谷間に厚く堆積する (電鍍). さらに, この金属を型として射出成形でプラスチックに型取りする. このようにして, 1 回の SOR 露光でできた原型から何個ものプラスチック製品が作れる.

また, この射出成形で作ったプラスチック型をもとに, さらに電鍍で金属の構造を得たり, セラミックス粉末をプラスチック型に入れて焼結してセラミックスの構造を作ったりできる. セラミックスとして PZT (チタン酸ジルコン酸鉛) や, ZrO_2 (ジルコニア) を使用した例がある.

図 4 はニッケル製のマイクロコネクタを作った例である. コネクタの高さは $180 \mu\text{m}$, 中心の間隔は $80 \mu\text{m}$ である. スペースは従来のコネクタの数分の一になる. また, 本プロセスで光コネクタを作り, 光ファイバを接続することも可能である. 同様にして作った回析格子と組み合わせると, マイクロ分光器になる.

2.2 ポリシリコン HARMS

最近 は 異 方 性 の プラズマエッチングの進歩がめざましい. 例えば, ICP (誘導結合プラズマ) による反応性イオンエッチング (RIE) を用いて, レジストや金属のマスク

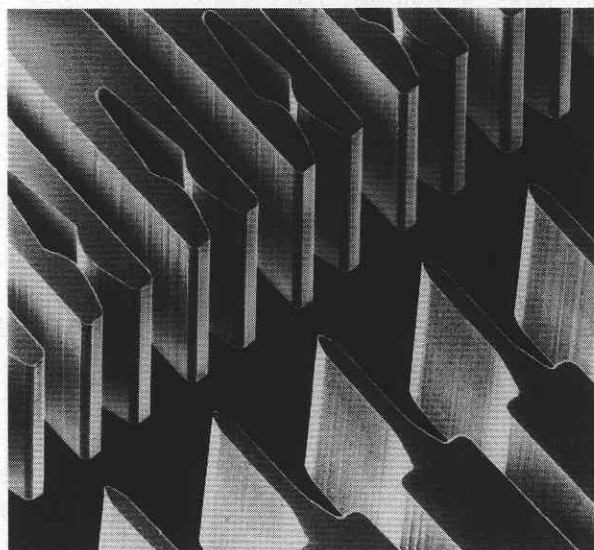


図 4 マイクロコネクタ⁹⁾

に合わせてシリコンを垂直にしかも深くエッチングできる。結晶軸に制約されない自由な形ができる点と、通常のシリコンのプロセスラインと適合性が良い（単に新しい反応性イオンエッチング装置を導入するだけである）点が利点であり、注目を集めている。

さらに、高アスペクト比のエッチングで作った三次元構造を鋳型として、複製を作れば製造コストを下げられる。シリコン鋳型であれば、その上に犠牲層の酸化膜と構造層の多結晶シリコン膜を堆積し、犠牲層だけをふっ酸で除去することで、多結晶シリコンの複製を得ることができる。シリコンの鋳型は、高アスペクト比エッチングの他、ダイシング、放電加工などで作ってもよい。

3. シリコン薄膜を用いた立体構造の製作法

エッチングやリソグラフィで直接的に高アスペクト比の構造を作るのではなく、シリコン基板表面に堆積したシリコンの薄膜をパターニングし、それを組み合わせて立体構造を作る考え方がある。小学校での工作の授業を思い出して頂きたい。ボール紙に展開図を書き、それを切り抜いた後、折り曲げて立体構造を作ったことがあるだろう。これと同様に、シリコン薄膜上に展開図をフォトリソグラフィとエッチングで作り、薄膜の下の犠牲層を溶かし基板から分離した後、おのこの面を持ち上げて、立体的な構造に組み上げればマイクロの立体構造ができる。面と面との折り曲がる部分には、ポリイミドの弾性ヒンジを使う¹⁰⁾、多結晶シリコンで作ったマイクロ蝶番を使う¹¹⁾。

折り曲げ部に特別な構造や材料を使わなくても、加熱した多結晶シリコンが塑性変形をする現象を利用して、三次元化のマイクロ構造を得ることもできる。さらに我々は、当初の平面的な構造を基板から持ち上げるためのマイクロアクチュエータを付加し、アクチュエータの力により構造を三次元的に弾性変形した後、構造を通電加熱して永久変形させることに成功した¹²⁾。このプロセスは外部からのマイクロプローブによる操作（人の手による操作）を必要としない、マイクロ世界での三次元構造の完全な自己構築である。

三次元マイクロ構造の自己構築の手順を図5に示す。この手順を図中の番号に従って説明する。

- (1) ICプロセスによって作製した試料。
- (2) アクチュエータの力により梁部が押されて座屈変形し、梁の中央部が持ち上がる。この結果、プレート部が基板上から垂直方向に持ち上がる。
- (3) 梁部に電流を流す。このとき、通電による発熱で多結晶シリコンが塑性変形を生じ、梁部の変形は固定される。通電加熱に要した電流値は4.5 mAである。

(4) 恒久的な三次元マイクロ構造が実現される。アクチュエータの駆動電圧及び梁部の通電を除去しても、この姿は変わらない。

また、最終的に得られた構造の写真を図6に示す。この構造のプレート部の高さはおよそ70～80 μmである。

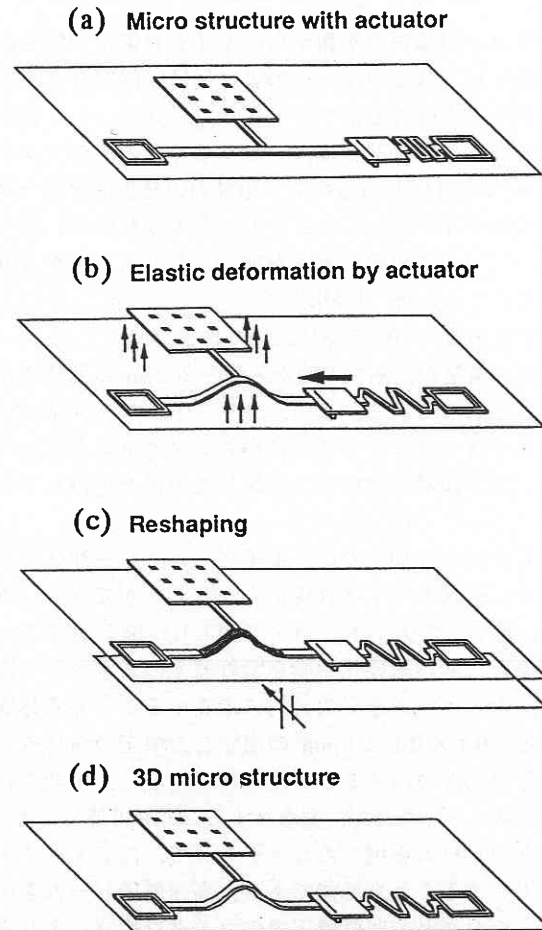


図5 三次元マイクロ構造の自己構築法の説明

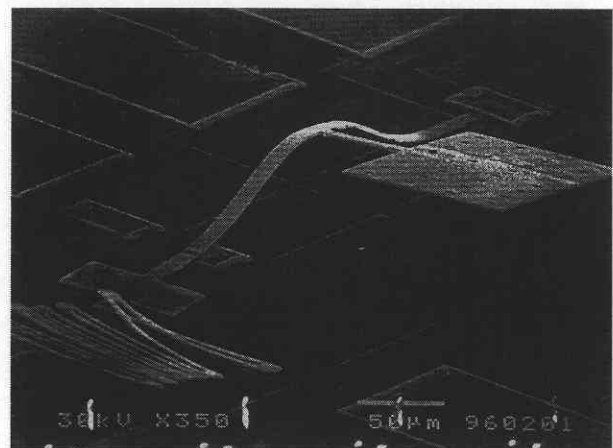


図6 自己構築した三次元マイクロ構造

プレート部と基板表面の電極との間に約100V(実効値)の正弦波電圧を加え、4.16kHzで50 μm 程度の共振振動を生ずることができた。この振動の大きさは、通常の表面マイクロマシニングで作った構造の動きに比べ10倍程度大きいものである。

4. オーバーハング構造とビーム加工

シリコンの基板の端面から、マイクロ構造が突き出した構造も作られている。そのよい例は、静電リニアアクチュエータで弾性変形するマイクロピンセットを動かすものである。駆動部分は、いわゆるくしの歯形アクチュエータ¹³⁾と呼ばれるもので、駆動力の発生部分は一対のくしの歯を互い違いにかみ合わせたような構造になっている。二つの歯の間に電圧を加えると、歯と歯がより重なる方向に力が働く。

図7は筆者らの研究室において作った厚さ7 μm のニッケル製の構造が、基板の端から長さ200 μm ほど突き出しているところである。また、カリフォルニア大学バークレー校ではシリコンでさらに小さいマイクログリッパを作り、電子顕微鏡の中で、乾燥した細菌を保持してみた¹⁴⁾。

さらに特殊な加工では、電子ビームやレーザービームを使って、線状のマイクロ構造を作ることができる。ガス中で、加工した例¹⁵⁾や、液中で加工した例¹⁶⁾がある。後者の場合、紫外線硬化樹脂を紫外線光のスポットで固化し、そのスポットを三次元的に走査することで立体構造を作る。0.1 \times 0.1 \times 1 mm^3 の曲屈した中空の角柱や、コイル径50 μm のバネなどが作られている¹⁶⁾。中空の柱の中に電気メッキをして、型取りすることも可能である。

様々のビームを用いたエッチングで、高アスペクト比の加工をすることも可能である。高速原子ビームを用いたエッチングと、顕微鏡下でのマイクロ組立により立体構造を組み上げる試みがある¹⁷⁾。また窒素イオンビーム

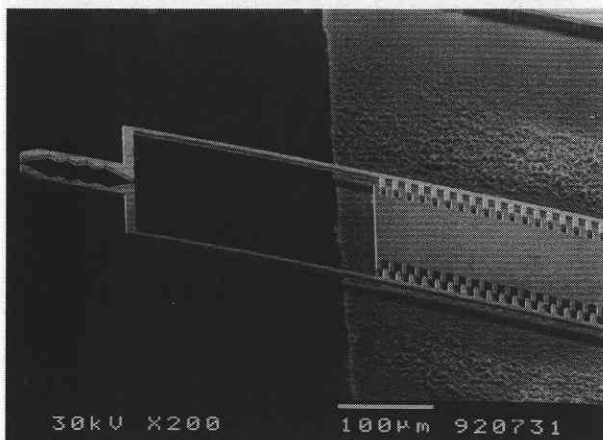


図7 ニッケルで作ったマイクロピンセット³⁾

でポリイミドを反応性イオンエッチングし、高アスペクト比のパターンを加工した報告がある¹⁸⁾。この他エキシマレーザーのアブレーションでセラミックス材料に微細穴加工が可能である¹⁹⁾。

5. 機械的加工

従来の機械加工を極限的に微細化して立体的なマイクロ構造を作る方法もある。この場合は、複雑に入り組んだ形状を作ることも可能になる。例えば、精密な切削加工を用いて円筒の表面に微細な螺旋状の溝を加工できる。直径が10mmの円筒の上に、ピッチ40 μm 、深さ10 μm の溝を形成した例がある²⁰⁾。また、超音波加工や放電加工を用いても、金属、シリコン、シリコンカーバイドなどに、数 μm 程度の直径の微細穴を開けることが可能である²¹⁾。こうして作った型をもとに、射出成形で複製を作ることでもある。

6. おわりに

以上説明したように、金属、プラスチック、ポリシリコンなどで高アスペクト比のマイクロ構造を得るプロセスが確立しつつある。しかし、メッキを用いて複製を作る工程では、内部応力の制御、パターンの粗密や基板の位置によらない厚さの均一性、材料の多様性、表面や側面の平滑度などをさらに向上させることが課題となっている。このような課題の解決などを含め、更に研究を進める必要がある。

(1997年9月10日受理)

参考文献

- 1) 藤田：マイクロマシンの世界，工業調査会(1992)。
- 2) 江刺・五十嵐・杉山・藤田：マイクロマシニングとマイクロメカトロニクス，培風館(1992)。
- 3) T. Hirano, T. Furuhashi, H. Fujita: Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, FL, Feb. (1993), pp. 278-283.
- 4) K. E. Petersen: Proc. IEEE, 70 (1982), pp. 420-457.
- 5) L. S. Fan, Y. C. Tai, R. S. Muller: IEEE Trans. on Electron Devices, ED-35 (1988), pp. 724-730.
- 6) M. Mehregany, K. J. Gabriel, W. S. Trimmer: IEEE Trans. on Electron Devices, ED-35 (1988), pp. 719.
- 7) L. S. Fan, et al.: Sensors & Actuators, 20 (1989), pp. 41-48.
- 8) Y. C. Tai, et al.: Sensors & Actuators, 20 (1989), pp. 49-56.
- 9) J. Mohr, et al.: "Movable microstructures manufactured by the LIGA process as basic elements for microsystems", in Micro System Technologies 90 Proc. of 1st International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components, Ed. H. Reichl, Berlin, Springer-Verlag Sept. 10-13 (1990), pp. 529-537.
- 10) K. Suzuki et al., "Creation of Insect-Based Microrobot with An External Skeleton and Elastic Joints", Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems '92, Travemunde (Germany),

- Feb.4-7 (1992), pp.190-195.
- 11) K.S.J.Pister, "Hinged Polysilicon Structures with Integrated CMOS TFTs", IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, June 22-25 (1992), pp.136-139.
 - 12) Y. Fukuta, T. Akiyama, H. Fujita, "The Reshaping Technology for Three Dimensional Polysilicon microstructures" Trans. IEE Japan, Vol. 117-E, No. 1, pp. 20-26 (1997).
 - 13) W. C. Tang, et al.: Sensors & Actuators, A21-A23 (1990), pp. 328-331.
 - 14) C.-J. Kim, A. P. Pisano, R. S. Muller, "Silicon-Processed Overhanging Microgripper", IEEE/ASME J. Microelectromech. Syst. Vol.1, No.1 (1992), pp.31-36.
 - 15) H. Westberg, et al.: "Truly Three-Dimensional Structures Microfabricated by Laser Chemical Processing", Transducers '91, pp. 516-519.
 - 16) K. Ikuta, K. Hirowatari, "Real Three Dimensional Micro Fabrication using Stereo Lithography and Metal Molding", Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems '93, Fort Lauderdale, FL, Feb. (1992), pp. 42-47.
 - 17) 中尾, 畑村: テーブルトップのマイクロマシン工場「ナノ・マニファクチャリング・ワールド」の構築, 電気学会論文誌 E 分冊, Vol.117, No.1, pp.45-54 (1997).
 - 18) 柳沢, 桑野, 中野: 窒素イオンビームを用いたポリイミド膜の高アスペクト比微細加工, 電気学会論文誌 E 分冊, Vol.117, No.1, pp. 39-44 (1997).
 - 19) 中村: エキシマレーザによるセラミックス材料の超微細穴加工, 電気学会論文誌 E 分冊, Vol.117, No.1, pp. 15-19 (1997).
 - 20) 山形, 森田, 他: 精密切削加工による微細構造形成の試み—微細スパイラル電極の形成—, 電気学会論文誌 E 分冊, Vol.117, No.1, pp. 33-38 (1997).
 - 21) 余, 増沢: 放電加工による超微キャビティの形成, 生産研究, Vol 49, No. 9, pp. 19-24 (1997).