解説

立体的なマイクロマシンを作る — 高アスペクト比マイクロ構造製作法 —

藤 田 博 之*

Making Three — Dimensional Micromachines — Fabrication Technologies for High-Aspect-Ratio Microstructure

Hiroyuki FUJITA*

Key Words : Micromachine, 3 Dimension Micromachining, Semi-conductor Micromachining

三次元的なマイクロ構造を作る研究として、三次元的な微細パターンの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

100g 程度の携帯電話や、ノートパソコンなど小型軽量の電子機器は私達の生活に広く使われ、情報革命の原動力になっている。仮に電子機器と同じベースで機械も小型になったら、目に見えないくらい小さな機械で、血管の中から病気を治したり、ミクロの対象を直接操作したり、全く新しい世界が開けるだろう。こんな夢を実現するため、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。これまでの10年の間に研究は進み、数 μm の部品を作ったり、数十 μm のモータを回したりすることは難しくなくなった。現在は、更に自由な加工や高性能のデバイスを追求する方向と、実用に供するシステムを作り上げる方向の二方向で、研究が行われている。インクジェットプリンタやマイクロミラーを使ったディスプレイなど、マイクロマシン技術を用いたヒット商品が生まれているが、今後も光通信ネットワークやデータ記録装置など増々応用分野が広がって行くと思われる。

さて、従来のマイクロマシンの典型的な例として、図1に、筆者の研究室で作った直径100 μm 、厚さ7 μm の静電マイクロモータ³⁾を示す。このように表面マイ

図1 直径100 μm のニッケル製静電マイクロモータ³⁾

クロマシニング法でできる構造は、その厚みが高々10 μm 以下である。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マイクロ構造を作る試みが行われている。本稿では、三次元マイクロ加工の現状について概説する。

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めっきで付け、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

*東京大学 生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

Inst. of Industrial Science, Univ. of Tokyo (7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106-8558)

図2 LIGA/HARMSプロセスの流れ

ン(厚さ数十～百 μm)を得たり、反応性イオンエッチングでシリコンや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(X線レジスト)層を、望みの厚さ(通常は0.1～1mm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、全体をめっき液に浸け、導電性の基板の上に電気めっきで、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

図3 LIGAプロセスの基本工程

(a) レジスト塗付, (b) 露光, (c) 現像, (d) 電鍍, (e) 金構造(金型), (f) 射出成形, (g) プラスチック構造

図4 マイクロコネクタ⁹⁾

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⁹⁾。コネクタの高さは $180\text{ }\mu\text{m}$ 、中心の間隔は $80\text{ }\mu\text{m}$ 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

最近で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、犠牲層だけをフッ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。シリコンの鋳型は再使用が可能であるし、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ンニングし、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、薄膜の下分離層を溶かし分離した後、おのおのの面を持ち上げて、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。面と面の間の折り曲がる部分には、ポリイミドの弾性ヒンジを使うか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、構造に通電し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。

図5 三次元マイクロ構造の自己構築法の説明

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 4.5mA 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および梁部の通電を除去しても、この姿は変わらない。

最終的に得られた構造ではプレート部の基板からの高さはおよそ $70\sim 80\text{ }\mu\text{m}$ であった。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 $50\text{ }\mu\text{m}$ 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。この技術を利用して作った立体構造の写真を図6に示す。二つのSDAで、4本足を立てその間にバネで吊った板を2組掛け渡したものである。

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動かすマイクロピンセットを基板を貫通す

図6 自己構築した三次元マイクロ構造

図7 ニッケルで作ったマイクロピンセット

る孔の端から突き出したものである。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、駆動力の発生部分是一对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、歯と歯がより重ならうとする方向に力が働く。

図7は筆者らの研究室において作った厚さ7μmのニッケル製の構造が、基板の端から長さ200μm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、乾燥した細菌を把持してみせた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。0.1×0.1×1mm³の曲屈した中空の角柱や、コイル径50μmのバネなどが作られている¹⁶⁾。中空の柱の中に電気めっきをして、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40μm、深さ10μm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もできる。

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、めっき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。

(1998-3-6 受理)

文 献

- 1) 藤田博之; マイクロマシンの世界 (工業調査会, 1992)
- 2) 江刺正喜, 五十嵐伊勢美, 杉山 進, 藤田博之; 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 and H. Fujita; IEICE Trans. on Electronics, Special Issue on Micro-machines and Micro Electro Mechanical Systems, E78-C2, p. 132 (1995)
- 4) K. E. Petersen; Proc. IEEE, **70**, p. 420 (1982)
- 5) L. S. Fan, Y. C. Tai, R. S. Muller; IEEE Trans. on Electron Devices, ED-35, p. 724 (1988)
- 6) M. Mehregany, K. J. Gabriel, W. S. Trimmer; IEEE Trans. on Electron Devices, ED-35, p. 719 (1988)
- 7) L. S. Fan, et al.; *Sensors & Actuators*, **20**, 41 (1989)
- 8) Y. C. Tai, et al.; *Sensors & Actuators*, **20**, 49 (1989)
- 9) J. Mohr, et al.; *Micro System Technologies 90* (Ed. H. Reichl), p. 529 (Berlin, Springer-Verlag, 1990)
- 10) K. Suzuki et al.; Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems '92, p. 190 (Travemunde (Germany), 1992)
- 11) K. S. J. Pister, M. W. Judy, S. R. Burgett and R. S. Fearing; *Sensors & Actuators (A)*, **33**, 249 (1992)
- 12) Y. Fukuta, T. Akiyama, H. Fujita; *Trans. IEE Japan*, **117-E**, (1), 20 (1997)

- 13) W. C. Tang, et al.; *Sensors & Actuators*, **A21-A23**, 328 (1990)
- 14) C. -J. Kim, A. P. Pisano, R. S. Muller; *IEEE/ASME J. Microelectromech. Syst.*, **1**, (1), 31 (1992)
- 15) H. Westberg, et al.; *Transducers '91*, pp.516-519 (1991)
- 16) K. Ikuta, K. Hirowatari; *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems '93*, p.42 (Fort Lauderdale, FL, 1992)
- 17) 中尾政之, 畑村洋太郎; 電気学会論文誌E分冊, **117**, (1), 45 (1997)
- 18) 柳沢佳一, 桑野博喜, 中野聡子; 電気学会論文誌E分冊, **117**, (1), 39 (1997)
- 19) 中村和人; 電気学会論文誌E分冊, **117**, (1), 15 (1997)
- 20) 山形 豊, 森田晋也, 他; 電気学会論文誌E分冊, **117**, (1), 33 (1997)
- 21) 余 祖元, 増沢隆久, 藤野正俊; 生産研究, **49**, 12, 609 (1997)