解説

次世代マイクロアクチュエータの加工法

Fabrication Methods of the Next Generation Micro Actuator

服 部 正* *姫路工業大学高度産業科学技術研究所

Tadashi Hattori* *Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, Himeji Institute of Technology

1. はじめに

マイクロセンサ、マイクロアクチュエータの微小な機能部品から構成され、複雑で高度な働きをするマイクロマシン、あるいはマイクロシステムと呼ばれているシステムは、これまでにない概念のシステムが実現できるということから、この技術が次の世界を征していくだろうと注目されており、アメリカをはじめ世界中の国々がその研究にしのぎを削っている。バイオ、医療、環境、情報通信など多岐にわたって応用が提案され、その構成要素であるマイクロセンサ、マイクロアクチュエータなどのデバイスもこれまで数々開発・提案されている。しかしながら、マイクロセンサが種々の産業分野に応用展開しているのに対し、マイクロアクチュエータはまだ広がりがないのが現状である。その一つの大きな原因は、その製造技術が確立されていないためといわれている。マイクロセンサの加工には平面的な加工技術である確立された半導体加工技術を用いることが可能である。一方、マイクロアクチュエータでは超微細三次元構造の加工技術が必要である。しかしながら、現在この超微細三次元構造加工技術は確立していない。

超微細三次元構造加工技術の基本となるのが高アスペクト比構造加工技術である。この高アスペクト比構造の加工技術には、半導体加工技術によるシリコンプロセス、放射光 (SR: Synchrotron Radiation) を用いた LIGA (リソグラフィー Lithographie, 電鍍 Galvanoformung, 成形 Abformung のドイツ語頭文字からの略語) プロセスがよく用いられている。また最近では SU-8 (商品名, Microlithography Chemical Corp 社製) と呼ばれる厚膜レジストが開発され、通常、半導体作成で用いられる紫外線 (UV: Ultra Violet) リソグラフィによって高アスペクト比構造加工が可能となってきた。このプロセスは SR による LIGA プロセスに対して LIGA ライクプロセスと呼ばれている。

今回、ここでは超微細三次元構造加工技術の基本となる

高アスペクト比構造加工技術を中心に、上述したシリコンプロセスにおける高アスペクト比加工、放射光による LIGA プロセス、SU-8 における LIGA ライクプロセスの現状とその将来展開について述べる。

2. シリコンプロセスにおける高アスペクト比加工

シリコンプロセスでは、ドライエッチングによる異方性エッチングが最近急速に進歩した。半導体の反応性イオンエッチング (RIE) を用い、シリコン基板に垂直なエッチング行われている。そのなかでも誘導結合装置による高密度プラズマ (ICP) エッチングでは、高速に異方性の高い加工ができる。この ICP によるプロセスを図 1 に示す。エッチングが所定の深さに達するまでの例えば SF_6 ガスを流すエッチング工程と、フロロカーボン系のポリマー膜を保護膜として堆積する例えば C_4F_8 ガスを流す保護膜堆積工程を交互に繰り返すことによって高アスペクト比加工を行う。このプロセスは側壁の壁面の保護とエッチングが独立しているため、エッチングと保護を同時に行うプロセスに比べ、より異方性の高い深溝加工が可能である。しかしこのプロセスを用いてもアスペクト比には限界がある。通常アスペクト比は 20~30 ぐらいである。さらにアスペクト比の高い加工法として提案されているプロセスについて述べる [1]。このプロセスは図 1 に示すエッチング工程と保護膜堆積工程を所定の深さに達するまで、交互に繰り返すことは同じ

図1 誘導結合型高密度プラズマ装置 (ICP) による異方性エッチングプロセス

原稿受付 2003年6月30日

キーワード: Micro Machining, Micro Actuator, Micro Systems, MEMS, LIGA Process

*〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-1-2

*Ako-gun, Hyogo

図2 二重保護膜法によるRIEプロセス

図3 二重保護膜によるD-RIEによるシリコンのエッチング例。アスペクト比：60，トレンチ深さ：62.6[μm]，トレンチ幅：1.05[μm]

である。そして所定の深さまで達した時点で、第2保護膜を形成するという手法である。この第2保護膜形成プロセスではポリマー膜よりも高いエッチング耐性を持つ保護膜を側壁面に形成する。この第2保護膜として酸素プラズマによるシリコン酸化膜(SiO_2)を用いている。この二重層保護膜プロセスを図2に示す。そのエッチング例を図3に示す。アスペクト比60まで加工でき、微細化かつ三次元的な素子の形成が可能になると考えられる。

3. 放射光によるLIGAプロセス

LIGAプロセスとは図4に示すようにSRを用いたX線ディープリソグラフィーによる微細パターン形成、電鍍による金型作製、および金型による精密成形を組み合わせた加工技術である。半導体回路パターンのX線等倍リソグラフィー(1.5~2.5[keV])より高いエネルギー領域(4.0[keV]以上)の軟X線の透過性と高い指向性を持つ放射光の特性を利用したX線ディープリソグラフィーによって、最小寸法サブ[μm](現在0.2[μm])、最大高さ1[mm]以上(現在3[mm])という高アスペクト比を有する構造体の作製が可能である。また他プロセスに類を見ないLIGAプロセスの大きな特徴として、構造体側壁の表面粗さが数十[nm]オーダーという鏡面状態であることが挙げられる[2]。この特徴を活かして、光ファイバーガイドや光スイッチ等の光学部品として応用されている。さらにLIGAプロセスを用いて

図4 LIGAプロセス

作製される構造体の材料には、金属、プラスチック、セラミクスなどが幅広く選択できるため、マイクロアクチュエータ[3]、高機能マイクロセンサ、マイクロ化学チップ、フォトニクスデバイスへの応用が大いに期待されている。

このLIGAプロセスは、1960年代後半のドイツのカールスルーエ原子核研究所(KfK)のEhrfeldらによるウラン濃縮用としてのセパレーションノズルの開発が発端である。現在では、アメリカ、フランス、イタリア、中国、韓国、台湾をはじめ、世界各国でLIGA研究が行われている。日本においても、立命館大学、姫路工業大学、住友電工(株)、住友重機械工業(株)などが中心となって、研究開発を行っている。

現在、世界の放射光LIGAの研究開発対象は以下の3項目に絞られるといっている[4]。

- ① 高エネルギー(1.5[GeV]以上)の蓄積リングによるX線を用い、より高アスペクト比の構造体を作製するための研究
- ② 任意の三次元マイクロ構造体を実現するための研究
- ③ リソグラフィー以降の電鍍、成形プロセスの高度化と実用プロセスの開発

LIGAプロセスは放射光という特殊な光源を利用するため、コスト面での課題が多く実用化の大きな壁となっている。また世界のLIGAプロセス研究が上記①に集中しており、実際のデバイス開発に必要なリソグラフィー以降の電鍍、成形プロセスの高度化と実用プロセスの開発が遅れていることも量産化に結び付かない原因である。これこそが実用化の大きな壁となっている。

次にLIGAプロセスでの高アスペクト比加工におけるX

図5 LIGA プロセスによるレジスト加工例

線ディープリソグラフィーについて述べる。

X線ディープリソグラフィーにおける露光工程は、レジスト材ポリメチルメタクリレート (PMMA) に光を照射する工程で、光源としてSRを用いる点が特徴である。PMMAに光(放射光)を照射すると高分子主鎖の切断が起こり、光が照射された部分の線状高分子が短くなる。X線が照射されるとX線エネルギーの吸収に伴って光電子やオージェ電子を発生して、PMMA中にラジカルを発生しプラス電荷を帯びる。ラジカル中の電子の移動により側鎖部分のメチル基(CH_3)またはエステル基(COOCH_3)が切断される。ここでX線マスクを使用することにより、光の透過部分と吸収部分とでパターンを形成することができる。このX線マスクのX線吸収材料として金(Au)が通常用いられる。SRは可視光線からX線領域にわたる広い波長領域を持つ光である。また従来の光源とは桁違いの輝度と、レーザー光に匹敵する鋭い指向性を持っている。この性質によって、数百 μm から数 mm といった厚さのレジスト材でも光が深くまで到達し、鋭くエッジの立った加工ができる。図5にレジスト加工例を示す。

立体的なマイクロ構造体を作製する方法はいくつか提案されているが、大まかに分けると以下の三つの方法がある。

- ① X線マスクを立体的に走査させながら露光を行い、走査スピードや露光時間の制御を行い、レジストパターン上に擬似的に蓄積露光量の三次元分布を形成する方法[5][6]。
- ② ビームを絞る、露光ステージを立体的に走査・回転させることで直接描画的に露光するX線造形方法。
- ③ 吸収体の厚みに二次元分布を持つX線マスクを用い、X線の吸収の違いを用いてレジストパターン上に蓄積露光量の三次元分布を形成する方法[7]。

①の方法は現在最も広く用いられている方法である。マイクロレンズアレーのように得られる立体形状が同一パターン形状のデバイスには向いた方法である。②は電子ビーム描画装置のようにビームで加工するという方法であるが、放射光のようにエネルギーの高い場合ビームを絞ることが

図6 X線吸収体厚さ制御法を用いたX線リソグラフィーによるレジスト加工例

困難であり、数 μm といった微細なパターン形成にはまだ到っていない。一方③の手法はスループットが高く、立体構造の任意性が高い等の特徴を有しているが、いかに吸収体厚みに二次元分布を持つX線マスクを作製するかが技術的ポイントである。この③の手法により作成した立体構造体の作製例を示す。図6は直径50 μm の傾斜面のついた円錐形のレジスト構造体[6]となっている。これはX線マスクの吸収体の材質にAuを使用し、厚みを0~5 μm の範囲で制御されている。吸収体の材質を形状に応じて変えれば、さらに高精度な加工が容易になる。

4. SU-8によるLIGAライクプロセス

放射光によるLIGAプロセスはレジストのリソグラフィー、リソグラフィーされたレジストに電鍍による金型を形成し、その後、樹脂などを成形するという一連のプロセスをさしているが、近年この成形工程を行わず、電鍍そのものでセンサ、アクチュエータを作成するプロセスを「LIGAライクプロセス」[8]と呼んでいる場合が多い。このプロセスは、通常半導体プロセスで用いられるUV光でアスペクト比の高いリソグラフィーが可能な厚膜レジストSU-8が開発されてから、急速にその研究開発が広まっている。国際会議などにもこのレジストを用いた応用例の発表が年々多くなっている。このレジストはIBM社で開発されたネガ型であり、5~6年前から市販されるようになった。国内においても商品名TG-P(東洋合成株式会社製)など数社で開発され市販されている。放射光によるリソグラフィーより加工精度は落ちるが、大掛かりな放射光施設が必要なく、手軽に高アスペクト比加工を行うことができる。SU-8による加工例を図7(a)に示す。高さ200 μm の構造体である。その加工性はよい。しかしながらマスクとレジストとの距離、あるいは現像条件などに対して、加工性は大きく変わる。図7(b)はその一例である。微細パターン、高アスペクト比構造体例である。通常、この写真に示されるように逆テーパ形状となる場合が多い。

図7 SU-8 構造体例 (日本マクダーミッド (株) 提供)

5. ま と め

超微細三次元構造加工技術の基本となる高アスペクト比構造加工技術を中心に、上述したシリコンプロセスにおける高アスペクト比加工、放射光によるLIGAプロセス、SU-8におけるLIGAライクプロセスの現状とその将来展開について述べた。いずれも今後のマイクロアクチュエータには必要不可欠の技術であり、さらなる技術向上が重要である。また今回あまり言及しなかったが、コストの点から実用化の鍵となるのは金型を用いた成形技術と思われる。今後この技術開発の進展に期待したい。

なお本研究の一部は、(財)新産業創造研究機構が経済産業から委託された地域新生コンソーシアムの助成と科研費基盤研究B(13450299)の援助を受けて行われた。

参 考 文 献

[1] J. Ohara, K. Kano, Y. Takeuchi and Y. Otsuka: 14th IEEE In-

ternational Conference on Micro Electro Mechanical Systems MEMS2001, pp.76-79, 2001.

- [2] H. Mekar, T. Yamada, S. En and T. Hattori: "Surface Roughness of Microstructures Fabricated by LIGA Process," Proc. of THE 19th SENSOR SYMPOSIUM 2002, pp.263-266, 2002.
- [3] J. Mohr, M. Kohl and W. Menz: "Micro optical switching by electrostatic linear actuators with large displacement," Proc. the 7th International Conference Solid-State Sensors and Actuators, pp.120-123, 1993.
- [4] 服部: "放射光のナノマイクロ加工技術への応用", 溶接学会誌, vol.71, no.3, pp.135-144, 2002.
- [5] O. Tabata, N. Matsuzaka, T. Yamaji, S. Uemura and K. Yamamoto: "3D FABRICATION BY MOVING MASK DEEP X-RAY LITHOGRAPHY (M²DXL) WITH MULTIPLE STAGES," MEMS2002, pp.180-183, 2002.
- [6] T. Hattori, H. Mekar and Y. Utsumi: "An approach to three-dimensional microstructure fabrication utilizing hard x-ray lithography of synchrotron radiation," REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, vol.73, no.3, pp.1376-1378, 2002.
- [7] H. Mekar, Y. Utsumi and T. Hattori: "A deep X-ray lithography in the "NewSUBARU", 2002 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, pp.108-109, 2002.
- [8] T. Kawabata and K. Maenaka: "The Micromachined Accelerometer Fabrication using Thick Resist," Technical Digest of THE 16th SENSOR SYMPOSIUM, pp.199-202, 1998.

服部 正 (Tadashi Hattori)

1968年名古屋工業大学計測工学科卒業。日本電装(株)入社。基礎研究所副所長、ディスプレイ事業部長、(財)マイクロマシンセンターを経て、2000年姫路工業大学高度産業科学技術研究所教授。現在マイクロ・ナノシステム研究に従事。工学博士。日本機械学会賞(論文)、可視化情報学会技術賞、注目発明賞等を受賞。

(日本ロボット学会正会員)