解 説

〈マイクロマシンの生産技術〉

マイクロマシンのための微細加工技術

Micromachining Technology for Micromachines

江 刺 正 喜* *東北大学工学部

Masayoshi Esashi* *Faculty of Engineering, Tohoku University

1. マイクロマシニング

小形でありながら高度な機能が凝縮されたマイクロマシン(マイクロシステム)がマイクロマシニングと呼ばれる微細加工技術によって製作できる。この加工技術は集積回路の製造技術として培われてきたフォトファブ리케이션を中心に、結晶異方性などの選択的エッチング技術、あるいは電圧を印加しガラスとシリコンを界面で接合する陽極接合技術などを組み合わせることで、ある程度立体的な微細構造体を実現するものである[1]。

特に単結晶シリコンは半導体集積回路ができると同時にピエゾ抵抗効果などのセンサに役立つ特性を持っている。また機械的性質にも優れているため、シリコンをアクチュエータなどの構造材としても用いることができる。このため制御回路や通信回路[2]などを内蔵し複数の要素からなる、高度なシステムが実現可能になる。

このマイクロマシニングについて以下ではロボットで重要となる加速度や角速度などのセンサを取り上げる。これにはセンサと回路及びアクチュエータが集積化され、しかも実用的な形でパッケージングされたセンサを実現する加工技術が重要になるので、始めにその製法について述べる。対向する2枚の電極の構造は、コンデンサを形成するためその静電容量から電極間隔を知る容量型変位センサとして用いることができるが、同時に静電引力を発生できるため静電アクチュエータともなる。このような原理による、静電サーボ型加速度センサと高感度な振動型センサ、及び分布型静電マイクロアクチュエータについて述べる。最後に垂直で深い加工や非平面的加工などの、新しい立体的微細加工技術を紹介する。

2. パッケージングされたセンサの製作法

図1はマイクロマシニングの基本となるフォトファブリ

ケーションと接合の技術である。(a)のようにマスクパターンを光で基板表面のレジストに転写しレジストに窓を開けた後、(b)や(c)のようにエッチングで除去したりあるいは電気めっきで金属を付着させたりする加工を行う。このほか(d)のように界面反応で接合して精密に組み立てることができる。このような方法で製作すると小さくしかも組み立てられた状態ででき上がるため、部品点数の多い複雑なマイクロシステムが実現可能になる。

センサの安定性の確保、小形化や低価格化などには特にパッケージング技術が重要になる。シリコンとガラスを陽極接合した内部にCMOSの容量検出回路を形成した容量型センサでは、センサ部以外の配線などにおける静電容量の影響を防ぐことができる。シリコン基板はセンサや回路の材料であると同時に容器(パッケージ)にもなっている[3]。

3章や4章で述べるセンサ類はこのようなパッケージング技術を基本としている。これには図2に示すような封止した内部からリード線を取り出すフィードスルー構造が重要になる。ガラスに電解放電加工で形成した穴にリード線をさし込んで電気的な接続を行っている。シリコンの回路からだけでなく、図のようにして上のガラスや下のガラスの電極からの配線取り出しもできる。上のガラスの電極からの取り出しではガラスの穴が厚さ10[μm]ほどのp⁺-Si板で蓋してあるが、これはガラスにp⁺層を形成したシリコンを接合してから、p⁺-Si以外を選択的にエッチングす

図1 フォトファブ리케이션と接合

原稿受付 1994年1月26日

キーワード: マイクロマシン, マイクロマシニング, センサ

*〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉

*Aza-Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, 980, JAPAN

る方法で作られている。一方下のガラスの電極から配線を取り出す場合はシリコンの島を用いているが、これには加工したシリコンウェハをガラスに接合してから部分的に描画してシリコンを除去する図3に示すようなレーザー支援エッチングを用いる[4]。NF₃ガス中でYAGレーザーやArレーザーを照射してエッチングする方法である。エッ

チング中は反応生成物の再付着を防ぐために150°C程に基板を加熱する。

3. 静電サーボ型加速度センサ

3.1 集積化静電サーボ型加速度センサ

上で述べたパッケージング技術を用い、回路や静電アクチュエータも内蔵した集積化静電サーボ型加速度センサが作られている[5]。図4はその構造で、重りが薄い梁で支えられており、加速度によってそれが変位すると重りと電極間のコンデンサの静電容量が変化する。この容量変化はセンサに集積化された発振回路で周波数変化として取り出される。出力周波数は基準周波数と位相比較され、PLL(フェーズロックループ)の原理で重りに電圧として帰還される。重りの電圧により電極との間で静電引力を生じ、これが加速度による力とつりあって、重りを常に中央に位置させるように働く。この方式はサーボ型と呼ばれ、帰還量によって感度や測定範囲を変えることができるなどの特長を持ち高性能な加速度センサを実現できる。また電圧を印加し静電引力によって疑似加速度を与えることで自己診断機能も持つ。

3.2 多軸静電サーボ型加速度センサ

ひとつのセンサでXYZ方向の加速度を同時に測定できる多軸静電サーボ型加速度センサも作られている[6]。図5にはその構造と動作原理を示してある。中央で支えら

図2 封止した内部からリード線を取り出すフィードスルー構造

図3 レーザ支援エッチング

図4 集積化静電サーボ型加速度センサ

図5 多軸静電サーボ型加速度センサ
構造(a)と動作原理(b)

図6 多軸静電サーボ型加速度センサ
回路(a)と特性例(b)

れたシリコンの重りがZ方向(上下)に変位したり、X方向あるいはY方向の加速度で傾いたりするのをガラス側電極との静電容量変化で検出する。図6(a)のような回路により、各方向成分の容量変化は異なる周波数信号で検出

され、それらを同期検波により分離して帰還し各電極に直流電圧を重ねる。このような静電サーボで加速度による力を補償することにより重りを同じ位置で水平に保つ。これにより他軸の加速度によって感度などが影響されることを防ぐことができる。図6(b)にはX方向の加速度下での特性を示す。

4. 振動型センサ

4.1 電磁駆動容量検出振動型角速度センサ

振動型角速度センサは、振動体に作用するコリオリ力によって駆動振動方向に垂直に発生する振動成分を検出する。図7は両端支持音叉構造のシリコン振動子を電磁駆動で大きく振動させ静電容量によって検出を行う、振動型角速度センサである[7]。シリコンは内部摩擦が少ないために振動子に適しており、振動子のQファクタを数十万にもできる。このためわずかな駆動エネルギーで駆動可能である。そこでシリコンに微小な交流電流を流し、外部に取り付けた永久磁石との間で電磁力を発生させ重りを水平に振動させる。コリオリ力で生じるねじり振動をガラス側電極との静電容量で検出する。

4.2 振動型赤外線センサ

静電引力により駆動し静電容量で検出することで、梁などを共振させることができる。各種のパラメータで共振周波数などの変化を生じるため、いろいろな振動型センサを実現でき、高感度であること周波数出力であることなどの特徴を持つ。

図8は熱型の赤外線センサ(放射温度計)をブリッジの振

動子で実現したものである[8]. 高濃度のボロンを拡散した p^+ シリコンの薄板の端部を酸化シリコンの板で支えたブリッジで、引っ張りの残留応力を持たせている。 p^+ シリコンが赤外線を吸収し温度が上がると、それによる熱膨張で応力が変化して共振周波数が変わる。このブリッジは熱絶縁が良くしかも自己発熱がないため高感度化が期待できる。振動を静電容量で検出する際に寄生容量が問題にな

らないように、同じブリッジ構造で不要な信号を相殺するためのコンデンサ、及び検出用の MOS トランジスタを集積化してある。またガラス基板からのパッケージングストレスを避けるため、ガラスに一点で接合されたシリコンの枠にブリッジを形成している。共振周波数は約 70[KHz]で、 $1[\mu W]$ の入射により約 50[Hz]共振周波数が変化した。

振動子の Q ファクタが大きいほどセンサの高い分解能が期待できる。小さな振動子の Q ファクタは真空にしないと大きくできないが、これは微小なほど空気の粘性がその運動に大きく影響するためである[9]。このほか赤外線センサの高感度化には内部の空気による熱伝導を少なくする必要もある。このためパッケージングされた内部に小さな気体分子を吸着するゲッター材を入れ高真空に封止することも行われている[10]。

5. 分布型静電マイクロアクチュエータ

大きな力と変位が得られる高性能なマイクロアクチュエータの開発が待たれており、これができれば狭い所などで作業ができる本格的なマイクロマシンへの道が拓けると期待されている。

図 9 は多層の波形電極に電圧を印加して静電引力によって変形する分布型静電マイクロアクチュエータの原理で、筋肉がたくさんの細胞からなっているように多数の駆動ユニットからできている[11][12]。電極間隔を狭くして大きな力を発生すると同時に、多数直列にすることで大きな変位を得ている。波型の電極では接触している部分が広がっていくので、特に間隔が狭い部分で大きな力を発生すると考えられる。マイクロ構造では表面力が大きいため、その摩擦や磨耗などが問題になるが、材料の変形を用いた弾性支持でこの問題を回避している。また多数の電極を用いるためごみなどに影響されにくい。このアクチュエータは基本的に収縮する方向で動くため、筋肉の場合に骨の両側で引っ張り合って動くように拮抗型で動くアクチュエータに

図 7 電磁駆動容量検出振動型角速度センサ構造(a)と回路(b)

図 8 振動型赤外線センサ

図 9 分布型静電マイクロアクチュエータの原理

図10 分布型静電マイクロアクチュエータの製作方法

適している。

電極間の静電容量で位置を検出し駆動電圧にフィードバックして動かすシステムでは、ループゲインの違いで見掛けの硬さを制御できる[11]。

微細化するほど大きな力を発生でき性能向上に繋がるので、この分布型静電マイクロアクチュエータをマイクロ化して製作した。上で述べた拮抗型アクチュエータがフォトリソと電解めっきによる銅で作られており、厚さ8[μm]の電極による駆動ユニット200個からなり大きさは約4[mm]角ほどである[12]。図10にその製作工程を示す。160[V]の印加電圧で約30[μm]の変位が得られた。

6.立体的微細加工

フォトファブリケーションは複雑な微細構造をマスクパターンの転写により一括形成できるが基本的に平面的な加工である。これと相補的な立体的な微細加工技術を開発することにより、より自由な構造が実現可能になる[13]。描

図11 低温高速 RIE による 75 μm 厚ポリイミドフィルムの貫通エッチング例

画はビーム加工でできる。転写や描画により表面加工やバルク加工を行うことができる。

装置内であるパターン形状の層を順次連続的に形成できる投影光 CVD(転写による表面加工)も開発された[14]。低温にした基板にマスクパターンを紫外線のエキシマレーザで投影する低温凝縮投影光 CVD によって、高速に酸化シリコンや高分子膜などを形成している。レジストレスプロセスであるため、レジストを塗布できない光ファイバ端面などの場所にも微細構造を形成することができた。

6.1 低温高速反応性イオンエッチング(転写によるバルク加工)

低真空雰囲気中で反応性のイオンを基板に照射すると、結晶方向には関係なく表面から垂直な方向の異方性エッチングができ、これは反応性イオンエッチング(RIE)と呼ばれる。特に深い立体的な加工をするために低温高速反応性イオンエッチング装置を開発した[15]。エッチングガスには SF₆ を使い、基板を -120°C 程の低温にすることで、200[μm] 程の厚さのシリコン基板が垂直に貫通エッチングされた。エッチング速度は約 3[μm] 毎分で、エッチング深さに対するサイドエッチングの割合は約 0.03 であった。

同じ低温高速 RIE 装置で O₂ ガスを用い基板を 0°C にすることで、ポリイミドも垂直にエッチングすることができた。図11は厚さ 75[μm] のポリイミドフィルムを貫通エッチングした例で、4章で述べた分布型静電マイクロアクチュエータへの応用を目指して高アスペクト比の微細加工を行っている。

6.2 レーザによる非平面微細加工(描画による表面加工)

非平面の場合などにはマスクパターンを転写することはできないので、集束したビームで高速に描画してパターンを形成する必要がある。

先端に接触センサを持つカテーテルを製作している。図12は直径 1.8[mm] のポリウレタンカテーテルの先端部を紫外線の KrF エキシマレーザにより加工した例である[16]。レーザ光を照射してポリマーを除去するアブレーション加工を行っている。また接触して変形する部分に力ゲージや配線、スイッチなどを作るため、ポリウレタン表面

図12 カテーテル先端部での非平面微細加工の例

に金属薄膜の微細パターンを形成した。エキシマレーザが照射された場所にだけCrを選択的に堆積するレーザ支援CVDを行った。ポリウレタン表面にNi膜を無電解めっきによって形成し、その上でCr(CO)₆ガスをレーザで分解しCr層を堆積した。このCrは未分解物を含むため、この層をエッチングのマスクとして用いて下地のNiをパターニングし、これを配線として用いている。

7. お わ り に

エッチング、接合、あるいはLIGAプロセスのような電鍍加工など基本的なマイクロマシニングの話は他書を参照されたい[1]。なお微細加工に関連しシリコンエッチングなどのプロセス中での厚さモニタ[17]、液中でエッチングした後に乾燥する際に液体の表面張力で生じる貼り付き[18]、内部応力の測定・制御[19]などの研究課題がある。

マイクロマシニングは半導体微細加工技術に各種の技術を融合した総合的な技術である。半導体製造設備を含む研究環境の整備、多品種少量の生産技術なども必要である[20]。

謝 辞

本解説で紹介した研究例は研究室諸氏の協力によるものであり、また一部文部省科学研究費(03102001)によった。

参 考 文 献

- [1] 江刺, 藤田, 五十嵐, 杉山, “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.
- [2] M. Esashi and Y. Matsumoto, “Common two lead wires sensing system,” Transducers '91, pp. 330-333, San Francisco, USA, June, 24, 1991.
- [3] 松本, 江刺, “絶対圧用集積化容量形圧力センサ”, 電子情報通信学会論文誌C-II, Vol. J 75-C-II, No. 8, pp. 451-461, 1992.
- [4] K. Minami, Y. Wakabayashi, M. Yoshida, K. Watanabe and M. Esashi, “YAG laser-assisted etching of silicon for fabricating sensors and actuators,” J. of Micromechanics and Microengineering, vol. 3, no. 2, pp. 81-86, 1993.
- [5] Y. Matsumoto and M. Esashi, “Integrated capacitive accelerometer with novel electrostatic force balancing,” Tech.Digest

11th Sensor Symp., pp. 47-50, Tokyo, June 4, 1992.

- [6] K. Jono, M. Hashimoto, M. Esashi, “Electrostatic servo system for multi-axis accelerometers,” Proc. of IEEE MEMS-94, Oiso, Jan. 27, 1994.
- [7] 橋本, C. Cabuz, 南, 江刺, “電磁駆動容量検出型シリコン振動ジャイロ”, 第12回センサの基礎と応用シンポジウム, 大阪, June 2, 1994.
- [8] C. Cabuz, S. Shoji, E. Cabuz, K. Minami and M. Esashi, “Highly sensitive resonant infrared sensor,” Transducers '93, pp. 694-697, Tokyo, June 7, 1993.
- [9] K. Yoshimi, K. Minami, Y. Wakabayashi and M. Esashi, “Packaging of resonant sensors,” Tech. Digest 11th Sensor Symp., pp. 35-38, Tokyo, June 4, 1992.
- [10] H. Henmi, K. Yoshimi, S. Shoji and M. Esashi, “Vacuum packaging for microsensors by glass-silicon anodic bonding,” Transducers '93, pp. 584-587, Tokyo, June 7, 1993.
- [11] M. Yamaguchi, S. Kawamura, K. Minami and M. Esashi, “Control of distributed electrostatic microstructures,” J. of Micromechanics and Microengineering, vol. 3, no. 2, pp. 90-95, 1993.
- [12] K. Minami, S. Kawamura and M. Esashi, “Distributed electrostatic micro actuator (DEMA),” Abstracts of late news papers, Transducers '93, pp. 2-3, Tokyo, June 7, 1993.
- [13] 江刺, 南, “マイクロマシンのための三次元微細加工技術”, 応用物理, vol. 63, no. 1, pp. 45-48, 1994.
- [14] K. Takashima, K. Minami, M. Esashi and J. Nishizawa, “Laser projection CVD using low temperature condensation method,” 1st Int. Conf. on Photo-Exited Processes and Applications, p. 70 Sendai, Oct. 13, 1993.
- [15] K. Murakami, Y. Wakabayashi, K. Minami and M. Esashi, “Cryogenic dry etching for high aspect ratio microstructures,” Proc. of IEEE MEMS-93, pp. 65-70, Fort Lauderdale, USA, Feb. 7, 1993.
- [16] S. Maeda, K. Minami and M. Esashi, “KrF excimer laser induced selective non-planer metalization,” Proc. of IEEE MEMS-94, Oiso, Jan. 27, 1994.
- [17] K. Minami, H. Tosaka and M. Esashi, “Optical in-situ monitoring of silicon diaphragm thickness during wet etching,” Proc. of IEEE MEMS-94, Oiso, Jan. 27, 1994.
- [18] G. Mulhern, D. Soane and R. Howe, “Super-critical carbon dioxide drying of microstructures,” Transducers '93, pp. 296-298, Tokyo, June 7, 1993.
- [19] C. Cabuz, K. Fukatsu, H. Hashimoto, S. Shoji, T. Kurabayashi, K. Minami and M. Esashi, “Fine frequency tuning in resonant sensors,” Proc. of IEEE MEMS-94, Oiso, Jan. 27, 1994.
- [20] 江刺, “マイクロマシン研究入門—これからマイクロマシンを手がける人のために—II. マイクロマシン研究設備の整え方,” 電気学会論文誌A, vol. 1, no. 12, pp. 962-967, 1992.

江刺正喜 (Masayoshi Esashi)

1971年東北大学工学部電子工学科卒業。
1976年同大学院博士課程修了。同年より東北大学工学部助手, 1981年助教授, 1990年より教授(東北大学工学部 機械電子工学科)となり現在に至る。半導体センサ, マイクロマシニングによる集積化システムの研究に従事。著書「半導体集積回路設計の基礎」培風館(1981年), 「電子情報回路I, II」昭晃堂(1989年), 「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年)。