マイクロセンサの現状と動向

特集解説

正 員 藍 光 郎 (センサ工学研究所)

1. はじめに

最近, いろいろな分野でマイクロセンサやマイクロマシンのマイクロという用語の定義づけの試みがなされている。特に, マイクロマシンの分野では出来上がった部品, 製品の寸法がミクロンメートルでなければマイクロという名前を冠せるべきではないという論がある。これに対し, 筆者は「完成寸法がミリメートルであろうとセンチメートルであろうとマイクロマシニング技術を用いて作られたセンサ, マシン (machine) がマイクロセンサ, マイクロマシンである」, また「マイクロマシニング技術とは, ホトリソグラフィを中心とした LSI 製造技術をベースに, センサ技術から生まれた異方性ケミカルエッチング, 犠牲層エッチング, アノードックボンディングなどの三次元加工技術を加えた技術」と定義すべきであると提案している⁽¹⁾。ちなみに, 完成寸法がいくら小さくても, 従来技術を用いて作られた物はミニあるいはミニチュアライズドと称すべきであろう。

本稿では, まず, マイクロマシニングについて述べた後, このマイクロマシニング技術で作られたマイクロセンサについて実用化を指向した国内の最近の開発例と海外における研究の進展の最新例を数例紹介する。

2. マイクロマシニング

マイクロマシニングの中心技術は IC, LSI プロセスで用いられているホトファブリケーションである。ホトファブリケーションは, 写真の技術と同じであり, パターンマスクを通して基板上に塗られたホトレジストに可視, 紫外波長の光や, X 線を当てパターンを転写する。転写されたパターンの窓から下地の材

料を選択的に溶解して除去するホトエッチングが行われた後, レジストを洗い流すことによってエッチング工程が完成する。また, パターンの窓の部分に基板と異なる材料をデポジットする工程がある。このエッチングとデポジションの工程を何回も繰返すことによってデバイスが出来上がる。いずれも IC プロセスにおいて重要な加工手段である。これらの方法は基本的には平面上の二次元加工法であり, マイクロマシニングは IC プロセスなどにない下記の加工法を加えることによって, 立体的に加工するところに特徴がある。基板材料としてはシリコンを用いることが圧倒的に多いので, シリコンの例で説明する。

2.1 異方性ケミカルエッチング

シリコン単結晶は化学的に結晶異方性があり, 異方性ケミカルエッチングといわれる。エッチング液としては, 無機系および有機系のアルカリ溶液があり, 結晶方位によってもエッチ速度が異なる。この性質をうまく利用することによって, 様々な形状の加工が可能となる。例えば, 結晶の $\{111\}$ 面のエッチング速度が遅いエッチング液を用いると, 図 1⁽²⁾ のように, マスクの形状に応じて V 字形や垂直に形成することができる。エッチング液の性質としては, エッチングレート of 結晶方位依存性が大きいこと, マスク材料や LSI プロセスとの適合性が優れていること, また, 毒

図 1 結晶異方性エッチング⁽²⁾

Present Status and Trends of Micro Sensors.

By Mitsuo Ai, Member (AI Sensor Engineering Laboratory)

キーワード: マイクロセンサ, センサ, マイクロマシニング

図2 犠牲層エッチング⁽²⁾

図3 アノードリックボンディング

性が少なく取り扱いが容易であることなどが要求され、最近、LSIプロセスで使用されているTMAH（水酸化テトラメチルアンモニウム）が良好なエッチング特性を示すことが報告された⁽³⁾。

2.2 犠牲層

エッチング液を適当に選ぶことによって、また、材質の違いあるいはドーピングする不純物の濃度によって、エッチング速度が異なる。そこから、複数の層を成膜したのち、ある中間の特定の層だけを選択的にエッチングし、上の層を残して空洞を形成する技術が生まれ、これを犠牲層エッチングと呼ぶ。選択的にエッチングされた層が犠牲にされ、後に残らないわけである。図2⁽²⁾はSiO₂層を犠牲層とし、中空に多結晶シリコン（ポリシリコン）部が浮いた構造になっており、歯車や静電マイクロモータなどの回転体として用いることができる。

2.3 アノードリックボンディング

超小型シリコン圧力センサの成功に大きく寄与した技術としてアノードリックボンディング（陽極接合）技術がある。本技術は米国のある電池メーカーの技術であったが、センサと結び付いて花が開いた。

接合原理は、図3に示すように300～400℃の高温中で約千ボルトの直流電圧を印加することにより、ガ

図4 フュージョンボンディング⁽⁴⁾

ラス中のナトリウムイオンが陰極側に移動し酸素イオンは導体側に引き付けられて、導体との界面近傍に空間電荷層を生じ、大きな吸引力で化学結合する。本法は主に、シリコンとガラスの接合に用いられるが、表面に酸化シリコンやポリシリコンをデポジットしたウェーハや、ガラスと熱膨張係数が近い金属とガラスの接合にも用いられる。

2.4 フュージョンボンディング

30年以上も前に日本で発明された技術であるが、従来のLSIプロセスではあまり利用されず、数年前にセンサ技術として改めて見直され、世界からも注目され始めた技術である。

フュージョンボンディングのプロセスを図4⁽⁴⁾に示す。片面が鏡面のシリコンウェーハを純水に浸漬して表面を親水性にする。鏡面同士を張り合せ、空気あるいは酸素-酸素雰囲気中で熱処理すると強固な接着となる。接着強度は熱処理温度に比例し、1,000℃以上ではシリコン自体の強度と同じになる。

原理は、親水性にすることにより表面にOH基が生成し、ウェーハ表面にSi-OH結合が多数でき、このウェーハ同士を荷重をかけて接触させると、OH基間で水素結合が生じ、弱い結合ができる。これに熱処理を加えると、両ウェーハのSi原子にSi-O-Si結合が生じ、更に、高温で熱処理すると結合中の酸素原子はシリコン中に拡散し、両面のSi原子同士が直接結合して、完全な接合が得られるといわれる。

3. マイクロセンサ

3.1 マイクロダイヤフラム圧力センサ⁽⁵⁾

圧力センサのダイヤフラム部は、一般に、裏面からケミカルエッチングで薄く加工される。この構造では

図5 マイクロダイアフラム圧力センサの加工プロセス⁽⁵⁾

加工がウェーハの両面でなされるため、プロセス工数が増えること、両面のパターンのアラインメントが難しいことなど、加工上の問題を幾つか抱えている。片面の加工のみで済めば、上記の問題はかなり解決できるし、量産化への道も開ける。

本例は、片面のみですべての加工が終了する構造で、図5に加工プロセスごとの断面構造を示す。

(a)シリコン基板上に厚さ50nmの Si_3N_4 膜、直径100 μm 、厚さ200nmのポリシリコンの円形犠牲層、厚さ100nmの Si_3N_4 膜が順次デポジットされる。

(b) Si_3N_4 膜上にボロンをドーピングした幅2 μm 、厚さ200nmのポリシリコンのピエゾ抵抗、更にアルカリエッチ液からの保護膜として厚さ300nmの Si_3N_4 膜がデポジットされる。

(c)中央部にエッチング用の穴があけられ、犠牲層のポリシリコンがエッチングされて空洞部、同時に Si_3N_4 の円形ダイアフラムが形成される。

(d)アルミ配線がパターンニングされ、最終的に真空中で厚さ1 μm の SiN 膜が保護膜としてデポジットされてプロセスが終了する。特性としては、感度10 $\mu\text{V/V/kPa}$ 、非直線性<0.9%が得られている。

3.2 3軸触覚センサ⁽⁶⁾

ロボット用触覚センサには、ロボットが種々の物体を把持し操作する際に、安定な把持力制御を行うための情報を得ることが期待されている。これらの情報としては、被把持物に加わる把持力、被把持物とハンド

図6 3軸1ミリ触覚センサの全体構造⁽⁶⁾

間のすべり、被把持物がハンドに及ぼすモーメントなどがある。この目的を実現するために3分力検出が可能、リード線の数が少ない、高速処理などが要求される。

本例は、シリコンを構造材料とし、ピエゾ抵抗効果により加えられた力を3方向の分力に分解して検出するもので、素子は中央に突起を有する16個の両端固定のはりがシリコンチップ上に集積されており、両端固定のはりの全長は750 μm 、はりの断面は幅250 μm 、厚さ200 μm の方形で、中央突起間のピッチは1mmである。

全体構造は図6に示すとおりであり、このチップが8個で1ユニットを構成している。加工手順は、まずシリコンウェーハに放電加工で長方形の穴を所定ピッチで開け、この穴を基準にしてダイヤモンド砥石で縦と横方向に長方形断面の溝を加工する。この溝の深さを交互に変えることによって、16個の両端固定のはりが x, y 方向に交互に並んだ3軸触覚センサが形成され、突起部で荷重を受ける。裏面は合計32個の長方形貫通穴が16個の両端固定のはりを形成している。それぞれのはりには4個ずつのストレインゲージが形成され、ICパターン部には、各はりを選択するためのシフトレジスタとアナログスイッチが集積化されている。

る。特性としては x 方向に力を加えたとき、 x 方向の出力 V_x の感度は約 107 mV/N であり、 z 方向はほとんどゼロであり、 y 方向に力を加えたときには x 方向の感度がないことが確認されている。

3.3 振動式圧力センサ⁽⁷⁾

振動子を真空室内に封じ込み、周囲の雰囲気の影響を受けない構造とするとともに、振動子、真空室、起振体であるダイアフラムをマイクロシニング技術を用いて、すべて単一の単結晶シリコンチップから作りあげた振動式圧力センサの例を紹介する。

図7に全体構造を示す。シリコン基板に異方性エッチングでダイアフラムを形成し、そのダイアフラム上にシェルを設け、真空室を造り、その中に四端固定の H 型をした振動子が造り込まれている。振動子は長さ $500 \mu\text{m}$ 、幅 $20 \mu\text{m}$ 、厚さ $5 \mu\text{m}$ の大きさであり、真空室は 100 MPa 以上の耐圧強度をもっている。

図8は加工プロセスである。(a)は(100)面のシリコン基板に高濃度ボロン層を選択エピタキシャル成長させる。この層は最後に振動子とシェルとして残される。(b)で酸化膜を除去した後、 p 層を選択的にエッチし、(c)で n 型シリコンを全面的にエピタキシャル成長させ、ボロン層と基板の隙間をシールする。(d)でシェル内部に残った水素ガスは、窒素ガス雰囲気

図7 振動式圧力センサの全体構造⁽⁷⁾

気アニールの際シリコン内に拡散し、シェル内は 1 mm Torr 以下の真空になる。(e)で基板の裏面からアルカリエッチでダイアフラム部を作り、(f)で別の基板と熱酸化接合して圧力センサが完成する。特性としては、非直線性 $\pm 0.003\%$ 、ヒステリシス 0.001% が得られているといわれる。

3.4 容量式加速度センサ⁽⁸⁾

加速度は機械量の中で最も基本的な量の一つであり、加速度を1重積分することによって速度が、二重積分することによって距離が得られる。従って、加速

図8 振動式圧力センサの加工プロセス⁽⁷⁾

図9 容量式加速度センサの原理と構造⁽⁸⁾

度センサは機械量センサの中で重要な位置を占める。最近、マイクロマシニング技術の進展に伴い、自動車ではアンチスキッド、車高制御、衝突防止など、加速度センサが使われる機会が多くなり、特に注目されるようになった。

本例は静電サーボのフィードバックを用いた容量式の加速度センサの研究例である。図9に原理構造を示す。カンチレバー先端の可動電極は図10のSEM写真に示すように重錘も兼ねており、加速度、すなわち重錘の変動量を両側の固定電極との間の静電容量の差 ΔC に変換する。 ΔC はパルス幅変調(PWM)されて固定電極にフィードバックされ、可動電極が常に中央に保持されるようにサーボ制御されている。従って、ローパスフィルタ(LPF)、増幅回路を通して出力されたパルス幅信号は加速度に比例することになる。容量式を採用することによって高感度になり1Gまでの計測が可能になり、PWMサーボ制御によって高精度になるとともに、傾斜などの外乱にも強くなっている。

構造は概略、次のとおりである。中央のシリコンチップは2枚のガラス板でサンドウィッチされ、アノード・ドックボンディングされている。チップ中央部には可動電極を兼ねた重錘とカンチレバーがマイクロマシニングで形成されている。チップの外形寸法は厚さ

220 μm 、幅3.2mm、長さ5mmで、カンチレバーは厚さ15 μm 、幅200 μm 、長さ800 μm である。チップ形状は上下左右対称なので、温度や直角方向の外乱に対して強い構造になっている。上下のガラス側には金属薄膜が蒸着されており、可動電極との間で差動容量として機能する。特性としてはレンジ1G、非直線性 $\pm 0.2\%$ 、感度1mgが得られている。

3.5 海外における研究例

(1) フィールド・エミッション・アレイを利用した圧力センサ⁽⁹⁾ マイクロマシニング技術は真空マイクロエレクトロニクスという新しい技術分野を生み出したが、この新しい技術を早速圧力センサに応用した例である。本例はFowler-Nordheimの式で表されるフィールド・エミッション電流とダイアフラムの動きの関係から圧力を検出するもので、エミッタチップの先端形状やチップのピッチ間隔、均一性などについて比較検討している。図11に断面構造を示す。

(2) STM/SFM用カンチレバーの開発⁽¹⁰⁾ 走査型トンネル顕微鏡(STM)は表面形状のみならず、

図10 容量式加速度センサのSEM写真⁽⁸⁾

図11 FEA式圧力センサの断面構造⁽⁹⁾

図12 SFM用カンチレバーのSEM写真⁽¹⁰⁾

図13 表面マイクロマシニングを用いた加速度センサ⁽¹¹⁾

原子間力 (AFM) など多くの目的に用途があるが、マイクロプローブをいかに作成するかが成功の鍵になっている。本例はマイクロマシニング技術を用いて走査型力顕微鏡 (SFM) プローブ用シリコン単結晶カンチレバーと探針を試作した例である。図 12 は IC の検査に用いている例で、カンチレバーは長さ 600~1,000 μm 、幅 30~80 μm 、板厚 5~20 μm で、チップ先端は高さ 20 μm 、径 1 nm 以下である。

(3) 表面マイクロマシニングを用いた加速度センサ⁽¹¹⁾ 1 方向からのみ加工できることは LSI 製造ラインをフルに利用できる利点があるが、本例は多重ポリシリコン層をうまく利用することによって 1 方向からの加工で製作した加速度センサの例である。図 13 に示すように、作動容量は 3 層からなっている。下部容量はポリシリコン層 1、2 で、上部容量はポリシリコン層 2、3 で作られ、層 2 が動いて容量を差動的に変化させる。感度はチップ面と直角方向にある。特性としては、10 Hz~10 kHz で、レンジ 1 G、非直線性 2.5%FS であった。

4. おわりに

以上、マイクロセンサの動向について、国内外で発表された数多くのマイクロマシニングを用いたマイクロセンサのうち、代表的な数例について紹介した。筆者は先にセンサ技術から生まれた新しい技術分野が育つことによって、ブーメラン効果が期待できると指摘した⁽¹²⁾。3.1 節の例は早くもその予言が実現した例であると考えられる。今後も、マイクロセンサ、マイクロアクチュエータ、マイクロマシンや真空マイクロエレクトロニクスなど、関連する技術が互いに連携を取りながら、かつ刺激しあいながら発展していくものと期待している。

最後に、本稿の執筆にあたり、貴重な資料を提供していただいた(株)豊田中央研究所 杉山 進氏、(株)富士電機総合研究所 芳賀敬二氏、横河電機(株) 原田 謹爾氏および(株)日立製作所 鈴木清光氏に厚く御礼申しあげる。

文 献

- (1) 藍 光郎:「センサ関連用語の定義に関する提案」第 11 回「センサの基礎と応用」シンポジウム講演概要集, p. 67 (平 4)
- (2) 江差正喜:「マイクロマシニング技術の現状」電学誌, 110, 7 (平 2)
- (3) 田畑 修・杉山 進, 他:「TMAH を用いたシリコン異方性エッチング」電気学会研究会資料, センサ技術研究会 ST-91-7, p. 7 (平 3)
- (4) 白水俊次・桂 正樹:「マイクロマシニングのための高精度接合技術の現状と課題」サイエンスフォーラム社'90 Si マイクロマシニング技術戦略シンポジウム, p. 4.1 (平 2)
- (5) S. Sugiyama, K. Simaoka, O. Tabata: "Surface Micromachined Micro-diaphragm Pressure Sensors, *Transducers '91, Digest of Technical Papers*, p. 188 (1991)
- (6) 小林光男・鷺沢 忍:「シリコンを構造材料とする 3 軸触覚センサ」信学会論文誌 C-II, J74-C-II, 5, 427 (平 3)
- (7) 原田謹爾・桑山秀樹:「振動式センサ」計測と制御, 28, 6, 31 (平 1)
- (8) S. Suzuki, R. Tsuchitani, K. Sato, et al.: "Semiconductor Capacitance-type Accelerometer with PWM Electrostatic Servo Technique", *SAE TECHNICAL PAPER SERIES* p. 51 (1991)
- (9) H. C. Lee & R. S. Huang: "A Novel Field Emission Array Pressure Sensor", *Transducers '91, Digest of Technical Papers*, p. 241 (1991)
- (10) J. Brugger, R. A. Buser & N. F. de Rooij: "Silicon cantilevers and tips for scanning force microscopy, *Sensors and Actuators A*, 34 p. 193 (1992)
- (11) Lj. Ristic, R. Gutteridge, B. Dunn, D. Mietus & P. Bennett: "Surface Micromachined Polysilicon Accelerometer, *Technical Digest of Solid-State Sensor and Actuator, Hilton Head Island, South Carolina*, p. 118 (1992)
- (12) 藍 光郎:「シリコン系センサの限界」, 平成 3 年電気学会全国大会予稿集, S. 5-1

藍 光 郎 (正員)

昭和 33 年早稲田大学第一理工学部応用物理学科卒業, 同年(株)日立製作所入社, 那珂工場計器設計部部長, 本社研究開発推進センタ副技師長, 計測器事業部副技師長, 同社センサ技術委員長。平成 2 年(株)超伝導センサ研究所代表取締役専務を経て, 平成 3 年センサ工学研究所代表及び(株)日製エンジニアリング取締役に就任, 現在に至る。工学博士, 技術士。日本機械学会, 計測自動制御学会等の会員。