マイクロストラクチャの作成技術

佐 藤 一 雄 [(株)日立製作所 中央研究所]

1. はじめに

電子回路の集積化を目的として発達した半導体の微細加工技術を機械的な構造体の加工に応用・展開することにより、極めて微細なセンサ・アクチュエータなどのメカニカルデバイスが作られるようになってきた。本稿では、マイクロメカニクスと呼ばれる本分野を加工技術の面から解説し、その適用例を述べる。

一般に半導体集積回路 (LSI) の構造は平面的であるのに対して、マイクロメカニクスには三次元的な構造が要求される。これを形成するための加工として孔加工を例にとれば、孔径の微細さと共に高いアスペクト比 (深さと孔径の比) の加工技術が必要である。図1はマイクロメカニクスに必要な加工領域を孔加工を例にとって、在来機械の加工および LSI の加工領域と比較したものである。機械の加工技術は微細化が難しく、一方 LSI の加工技術は微細性に富むが深い加工が難しい。マイクロメカニクスを実現するには、LSI の微細パターン形成技術を基礎にして、深さ方向に加工を展開する技術が必要になる。以下の

各章では、このような観点からこれまでに開発されたマイクロメカニクスのための加工技術を紹介する。

2. シリコンウェハ上のマイクロストラクチャ加工技術

単結晶 Si は圧力センサのダイヤフラムとして使われていることからわかるように、機械的な強度が比較的大きく、しかも弾性変形におけるエネルギー散逸が極めて少ない。従って、鉄鋼などの金属材料に代り Si を構造材として用いることができる。

LSI のための Si 微細加工技術を応用してウェハ上に孔や溝を形成し、微小な機械構造を作る研究が1970年代後半以後、現在まで各所で盛んに行われている。単結晶 Si が使われる主な理由は次の三点である。

- (1) リソグラフィ・エッチングなどの半導体プロセス技術が利用できること。
- (2) 単結晶 Si の弾性的性質 (直線性、再現性、弾性限界) が良いこと。
- (3) ウェハ上に機械的な部材と電子回路とを共存させたシステムの実現が可能なこと。

本章では、以下に半導体プロセス技術を応用したマイクロストラクチャの加工について述べる。半導体プロセス技術は大別して、(a)リソグラフィによるパターン形成、(b)エッチングによる材料除去、(c)不純物ドーパ・薄膜形成などの材料付加、からなっている。マイクロストラクチャを形成するには、エッチングの選択性が様々な形で利用される。主な方法としては、結晶方位によるエッチングの選択性の利用 (異方性エッチング) およびエッチレートが母材と著しく異なる薄膜の利用がある。これらを実施するため、上記の(a)~(c)項のプロセス技術が駆使される。

化学的に異方性エッチングを行うためのエッチャントとしては、KOH 水溶液、エチレンジアミン水溶液

図1 マイクロメカニクスに必要な加工領域と在来の加工技術の比較

Fabrication Technology of Microstructure. By Kazuo Sato, Non-member (Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.).

図 2 Si ウェハの深溝加工

図 3 Si ウェハ上の片持ちはり振動子

などが知られている。これらを用いてエッチングすると、ダイヤモンド結晶構造をもつ Si の (111) のエッチレートは、他の結晶面のそれに比べて極めて小さい値を示す。例えば、(110) と (111) の両方位間のエッチレートの比は 40℃ の 40% KOH 水溶液において約 180 : 1 に及ぶ⁽¹⁾。一方、Si の酸化膜 (SiO₂)、窒化膜 (Si₃N₄)、また多量の不純物をドーブした Si のエッチレートも Si に比べて非常に小さい。このような性質を利用すると様々な立体形状を作ることができる。

図 2 は (110) ウェハに深溝加工を施したものの断面写真である。この加工ではウェハ表面に SiO₂ 膜を形成してマスクとし、これにストライプ状の開口を設けてエッチングする。溝の側面が (111) に一致するのでサイドエッチの進行が極めて遅く、同図のような深溝加工が可能になる。このような構造を LSI 冷却用のフィンとして応用することが提案されている。

図 3 は (100) ウェハを貫くまでエッチングして得た片持ちはり形振動子である。細いはりが先端部の大面積の質量を支える構造をしている。はりの側面を形成する斜面は (111) に一致しているので、はり部のサイドエッチは非常に少なく、幅の狭いはり部が精度良く加工できる。この種の構造では、ウェハ面の法線方向に加速度が加わるとはりがたわむことから、はりの変形を検出して加速度を特定するセンサが開発されている⁽²⁾。

また、(100) ウェハの一面から異方性エッチングを施すと図 4 に示すようにダイヤモンドが形成できる。Si のダイヤモンドを受圧面とした圧力センサは既に

図 4 ダイヤフラムの形成

 図 5 SiO₂ 片持ちはりの加工プロセス

工業計器・自動車用に広く使われている。

片持ちはり、ダイヤフラムなどの加工では、エッチングの深さを管理することが重要である。エッチング時間の管理のほか、ウェハ面から一定の深さにあらかじめエッチストップ層を設けることが行われる。例えば、図 4 のダイヤフラムに相当する厚さの層に多量のボロンをドーブする方法、また p 形ウェハにダイヤフラムの厚さだけ n 層を積んだ後、n 層に正の電位を加えながら p 側からエッチングする方法などがある⁽³⁾。

化学的な異方性エッチングによれば、等方性エッチングでは成し得ないような形状の加工、またドライエッチングでは不可能な数百 μm に及ぶような深い加工を行うことができる。上述した適用例のほかにも、センサ、計算機実装、光学素子などの幅広い分野で単結晶 Si の微細構造体への適用が研究されている⁽⁴⁾。

一方、ウェハの表面に形成した SiO₂、Si₃N₄ などの薄膜を構造体、振動体として使うことができる。図 5 に SiO₂ の片持ちはりを形成する過程を示す。面方位が (100) の Si ウェハ表面に形成した酸化膜からはりの輪かくに相当する部分を除去後、露出した Si 面を KOH 水溶液でエッチングすると図のように加工が進行し、(111) 面あるいは不純物ドーブ層でエッチングが停止する。

このようにして形成した薄膜の片持ちはりの共振を

図 6 微小な機械要素の加工工程断面図

利用して、超音波センサ、振動センサなどが作られている。更に、 SiO_2 の片持ちはりのたわみ変形を利用したレバー式マイクロスイッチも試作されている⁽⁵⁾。

上述した Si のエッチング加工とは別に、CVD などの薄膜形成加工と選択性エッチングの組合せにより立体的な構造を作ることができる。例えば図 6 に示す工程により、単結晶 Si の上に PSG (リン珪酸ガラス) および多結晶 Si の薄膜を順次成長させた後、PSG 層を溶解除去することによって多結晶 Si の薄膜を基板から浮かせた構造を作ることができる。最近、このような技術を使って Si ウェハ上に多結晶 Si からなる微小な歯車、クランク機構を形成し、実際に軸やジョイントまわりに運動させた例が報告されている⁽⁶⁾。

このような技術を使うと基板からわずかに浮いたマイクロブリッジを作ることできる。多結晶 Si で形成したマイクロブリッジを上下方向に共振させ、振動特性の変化から雰囲気ガスの濃度を検出するセンサが開発されている⁽⁷⁾。

3. 金属・樹脂のマイクロストラクチャ加工技術

微細な三次元形状をリソグラフィで形成できれば、これを雌型として金属に形状を転写することにより、微細な金属部材を得ることができる。

シンクロトロンからは、ビームの広がりが少なく、しかも強い X 線が得られるので、これを光源として用い、厚いレジスト樹脂膜にマスクパターンを深く感光させ現像すれば、高アスペクト比の微細三次元形状を得ることができる。図 7 はこうして得た形状を雌型とし、電鋳によって Ni に形状を転写して製作したハニカム構造である。ハニカムの一辺は $80\mu\text{m}$ 、壁厚は $4\mu\text{m}$ 、構造の厚さは $350\mu\text{m}$ ある。同じ方法でウラン濃縮用のガスノズル列が試作されている⁽⁸⁾。図 8 はその加工工程である。完成した金属部材から更に樹脂に形

図 7 シンクロトロン放射光リソグラフィで形成した Ni ハニカム構造 (西独カーlsruエ原子核研究センタの御好意による)

図 8 シンクロトロン放射光リソグラフィを用いた微細金属部材の加工工程

状を転写し、レプリカを増やすこともできる。この手法で加工できる形状のアスペクト比は数百に及ぶ。

上記のような特殊な露光技術のほか、通常のリソグラフィによっても、雌型に金属を電鋳する手法を使えば微細な板状の部材が得られる。例えば、レーザ核融合に用いられるビームターゲットの半球殻を作るため、直径 $350\mu\text{m}$ 、厚さ $4\mu\text{m}$ の Au の半球殻を製造した例がある⁽⁹⁾。その加工プロセスは、まず Si ウェハ面に点状の開口をもつマスクング層 (Si_3N_4) を設け、次に等方性エッチングを施して Si ウェハに直径 $350\mu\text{m}$ の半球状の凹みを形成する。この凹みに Au を蒸着後、これをひきはがすことによって半球状の殻を得る。

4. 積層・接合による組立て技術

これまでに述べたような加工方法で形成されたマイクロストラクチャをセンサ・アクチュエータなどの機

能をもつ構造に実装するには、ウェハ状の部材どうしを積層し接合する技術が必要である。接着剤を用いる方法のほか、以下に述べる拡散を用いたウェハ間の接合が一般に行われる。

単結晶 Si ウェハどうしを酸素雰囲気中で約 1,000°C に加熱することにより、直接接合することができる。接合界面の酸素原子は母材中に拡散し、両ウェハの結晶方位が一致していれば、結晶の連続性の良い界面が得られる。p 形と n 形のウェハを接合して、高耐圧のトランジスタを作る例があるが⁽¹⁰⁾、構造体の加工にも使える。

単結晶 Si とガラスを接合するには、静電接合 (Anodic Bonding)⁽¹¹⁾ が使われる。Si と熱膨張率の近いパイレックスガラスを用い、300~500°C の雰囲気中で両ウェハの背面から直流電圧 (Si を正、ガラスを負として 500~1,000 V) を印加すると、ガラス中の酸素イオンが Si 側に拡散して接合が行われる。比較的低温で接合できるので、Si ウェハ側にある回路や Al 配線を損なうことがない。従って、圧力センサの組立てなどに広く使われている。

5. 終りに

リソグラフィ・エッチングなどの技術は、主に LSI の微細加工の要請から、様々な新技術を生み出してきた。これらの技術を微小な機構部品の加工に応用・展開することにより、これまで実現が困難とされていた領域の微小機械の世界が開かれつつある。

このような手法は電子回路と微小機械を一基板上に集積する可能性をもち、またバッチ処理による量産性をもっていることから、将来、自動車、家電品などの分野への波及効果も期待される。

(昭和 63 年 1 月 9 日受付)

文 献

- (1) 佐藤, 他: 「Si を用いたマイクロメカニクスの研究 (第 1 報)」, 昭 61 精密工学会秋季講演論文集, p. 751
- (2) L. M. Roylance, et al.: "A Batch-fabricated Silicon Accelerometer", *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-25**, 1911 (1979)
- (3) P. M. Sarro, et al.: "Silicon Cantilever Beams Fabricated by Electrochemically Controlled Etching for Sensor Applications", *J. Electrochem. Soc.*, **133**, 1724 (1986)
- (4) 佐藤: 「単結晶 Si の異方性エッチング技術」, 精密工学会誌, **53**, 849 (昭 62)
- (5) K. E. Petersen: "Dynamic Micromechanics on Silicon: Techniques and Devices", *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-25**, 1241 (1978)
- (6) Long-Sheng, Fan, et al.: "Pin joints, Gears, Springs, Cranks, and Other Novel Micromechanical Structures", *TRANSDUCERS '87*, p. 849 (1987)
- (7) R. T. Howe, et al.: "Resonant-Microbridge Vapor Sensor", *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-33**, 499 (1986)
- (8) Becker, et al.: "Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming and plastic moulding (LIGA process)", *Microelectronic Engineering*, **4**, 35 (1986)
- (9) K. D. Wise, et al.: "Solid-state processes to produce hemispherical components for inertial fusion targets", *J. Vac. Sci. Technol.*, **18**, 1179 (1981)
- (10) 新保: 「シリコンウェハの直接接合技術」, 昭 62 電気学会全大, S7-7
- (11) G. Wallis, et al.: "Field Assisted Glass-Metal Sealing", *J. App. Phys.*, **40**, 3946 (1969)