マイクロメカニカルセンサ

正 員 五十嵐 伊勢美 (豊田中央研究所)

1. はじめに

人間の指先の触覚は多機能、フレキシブルであり、それらの受感部はごく表面層数 百 μm の位置に数多く、かつ立体的に構成されている。圧覚、すべり覚、温覚などで代表され、相互の関係から物体の形状、硬軟、動きなども知ることができる。このようなセンサ群およびシステムは知能センサシステムであり、センサ開発の究極の目標である。

現在、半導体の微細加工技術を駆使した多様なマイクロメカニカルセンサが、1987年6月東京で開かれた第4回センサ・アクチュエータ国際会議に数多く報告されている⁽¹⁾。素材はシリコンとその酸化物薄膜が主である。シリコンは地球上の約1/4を占める豊富な資源で尽きることなく、かつ無害である。高純度で完全結晶に近いものを人工的に多量に作れる素材はほかに例がない。しかしながら、電子材料としての諸特性はよく知られているが、その機械的性質や物理的性質については一般的でない。

表1にはシリコン結晶の主な物理的特性が示されている。同表から明かなように、メカニカルセンサのばね材(起わい材)としても優れていることがわかる。そのため、圧力センサのダイヤフラムとしても優れた特性を示している。起わい材の一部にセンサ部および電子回路部を作り出し、集積化できる特徴はシリコン素材独特のものである。更にIC製作工程と同じように、結晶のエッチング速度の異方性を利用して、

表1 シリコン結晶の物理的特性

密度	2.33 g/cm ³
縦弾性係数 (<111>方向のヤング率)	1.9×10 ¹² dyn/cm ²
体積弾性係数	7.7×10 ¹¹ dyn/cm ²
融点	1,412°C
比熱	0.18 (18~100°C) cal/g°C
熱膨張係数	2.33×10 ⁻⁶ /°C (Room temp.)
熱伝導	0.3 cal/(s·cm·°C) (20°C)

Integrated Silicon Micromechanical Sensors. By Isemi Igarashi,
Member (Toyota Central Laboratory).

精度の高い三次元構造を表面数百 μm のところに作ることができる特徴も有している。以下にこれらの動向、従来にない応用の可能性およびこれからの展開について述べる。

2. マイクロメカニカルセンサの現状

これからのセンサの高機能化を左右するものは、ホトリソグラフィとエッチング技術である。エッチングも目的に応じた種々の手法が開発されている。例えばプラズマ、活性化イオン、等方性、異方性などが比較的多く利用されている。シリコンに関する特徴を要約すると以下のようなものである。

(1) エッチング速度が結晶方向によって著しく異なる。また、不純物濃度、結晶状態、p形、n形によっても大きく異なる。

(2) エッチング液またはガス成分を適当に選ばば、前項の異方性エッチと結晶方向に依存しない等方性エッチとを組合せて利用できる。

(3) LSI、超 LSI 技術によって、それらの効果は十分確かめられており、汎用プロセス装置も開発されている。

(4) シリコン結晶面上に作られる機能膜は、下地の影響を受け良質であり、容易に制御することができ、加工もIC工程により高精度化できる。

これらの手法によって試作された数例のセンサの概要を以下に述べる。

2.1 マイクロダイヤフラム圧力センサ⁽²⁾

図1にマイクロダイヤフラム圧力センサの構造図を示す。同図のように、シリコン基板の中央にシリコン窒化膜 (Si_3N_4) の正方形のダイヤフラムが形成されている。圧力基準室は異方性エッチングによって、ダイヤフラムの直下にピラミッド状の空洞として形成されている。空洞のエッチングはダイヤフラム周辺に設けられている小さなエッチ孔を通して行われる。エッチ孔は空洞形成後、よく洗浄してプラズマ CVD 膜に

図1 マイクロダイヤフラム圧力センサの構造

図2 マイクロダイヤフラム圧力センサのプロセスシーケンス

よって封止される。ひずみゲージは窒化膜上に作られ、アルミニウム膜で配線されている。この圧力センサは真空状の圧力基準室を有しているので絶対圧の測定が可能であり、製造プロセスはすべて片面処理で実施できる。

図2はマイクロダイヤフラムのプロセスの手順が示されている。(100)面シリコンを基板とし、ダイヤフラムおよび圧力基準室となる空洞はアンダーカットエッチング法を適用した。以下にその手順の概略を述べる。図2の(a),(b)……の順に進める。

- (a) シリコン基板上に第1の Si_3N_4 膜を作り、方形の窓を中央に開ける。
- (b) 多結晶シリコンのエッチングチャンネルを方形の窓を覆うように形成する。
- (c) 第2の Si_3N_4 膜を全面に形成し、ダイヤフラムの所定の位置に多結晶シリコンひずみゲージを作り出す。更に、そのうえに第3の Si_3N_4 膜を形成し、ゲージを被覆する。ダイヤフラムの外

図3 各種薄膜のアンダーカットエッチング特性

図4 マイクロ圧力センサユニット (100×100 μm)

側周辺にエッチ孔を第2および第3の Si_3N_4 膜を貫通して、多結晶シリコンのエッチングチャンネルに到達するように開ける。

- (d) アンダーカットエッチングは異方性エッチング液を用いて行う。エッチングはエッチ孔を通して、ポリシリコンのエッチチャンネルを除去しながら進行し、シリコン基板に空洞を形成する。

- (e) エッチチャンネルが全部除去されるとシリコン基板の異方性エッチングは、(111)面で囲まれたピラミッド状の空洞を作ったところで自動的に停止する。その後、プラズマ CVD で Si_3N_4 膜を基板表面に作り、エッチ孔の封止を行いマイクロダイヤフラムができあがる。その後、アルミニウム蒸着で電極を形成し圧力センサが完成する。

図3に種々の薄膜をエッチチャンネルとして用いたときのアンダーカットエッチング特性を示す。多結晶シリコンを用いた場合、 SiO_2 の約 100 倍のエッチ速度となる。

前述の手順で試作した例を図4に示す。圧力センサ部の大きさは $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 、ダイヤフラムの厚さは約 $1.4 \mu\text{m}$ 、基準空洞圧は 0.3 Torr 以下であった⁽³⁾。このセンサユニットを集積した写真は図5に示されている。センサ個数は $32 \times 32 = 1,024$ 個、周辺集積回路を含めたチップの大きさは $10 \times 10 \text{ mm}^2$ である。表2には試作例の特性を示す。消費電力は約 50 mW 、二次元圧力分布センサとして有望である。

図 5 集積化面圧分布センサアレイ
(センサ $32 \times 32 = 1,024$ 個)

表 2 集積化マイクロ圧力センサの特性

センサ個数	1,024 (32×32) 個
アレイピッチ	250 μm
アレイ部サイズ	8 mm $\times$ 8 mm
センサ素子	100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$
制御回路部 デバイス形式	CMOS (3 μm ルール)
トランジスタ数	約 16,000
チップサイズ	10 mm $\times$ 10 mm
読み出し速度	16.7 ms 以下 (60 Hz 以上) 1 素子 16 μs 以下
出力方式	アナログ時分割
クロック周波数	4 MHz
電源電圧	DC 5 V

2.2 小形圧力・流速複合センサ⁽⁴⁾

流体の圧力と流速を同時計測することによって、流体の動的特性を精度良く計測することができる。更に、センサの小形化が達成できると流れを乱さず局所的な動きも把握することができる。特に医療分野においては、血圧と血流量から求められる心臓血管系のインピーダンスや入力パワーが情報としては極めて重要視されている。

図 6 には試作例の一つで、マイクロマシーニング技術を利用した複合センサが示されている。同図から明らかなように、熱絶縁構造を有する熱式流速センサと圧電抵抗効果を応用したシリコン圧力センサとの複合である。前者は流体中に置かれた発熱体の温度が流速の変化に応じて変わる原理を応用したものである。この発熱体の温度を一定に保つための供給電力を知れば、流体の速度および流量を知ることができる。発熱体の温度は、流体の温度変化を補償するために、流体温度より常に一定温度高く保つ必要がある⁽⁵⁾。後者は既に数多く報告されている半導体圧力センサの応用であり、表面絶縁膜を用途に応じて工夫したセンサであ

図 6 小形圧力・流速複合センサの断面模式図

る⁽⁶⁾。

作製プロセスは前述の集積化マイクロ圧力センサとほぼ同じである。特徴は多孔質シリコン膜であり、熱絶縁と機械的強度の双方の特性を必要とするからである。図 6 の断面模式図から明らかなように、加熱素子は多孔質酸化シリコン膜上に形成されている。加熱部分と周辺との熱絶縁性を良好にして S/N 比を上げるためである。センサチップ表面の温度分布はヒータ部分が最高で、周辺部分は流体温度に近くなる。この温度分布は流速に応じて変化する。流速検出部の感度は温度分布の流速依存性が小さいほど高く、チップ周辺部の素子の集積化には周辺部の温度と流体温度との差が小さいほど有利である。熱絶縁構造の各部のサイズはチップの温度分布に大きな影響を与えるため、それらの影響を設計段階で予測することが望ましい。図 6 の例は幅 4 mm、長さ 8 mm、厚さ 0.36 mm であり、医用計測用には大きすぎるため $1 \times 5 \times 0.15$ mm の小形化を図った⁽⁷⁾。この例では、p 形シリコン厚さ 360 μm 、抵抗率 $40 \Omega \cdot \text{cm}$ 、(100)面を使用した。形成した多孔質シリコンは厚さ 10 μm 、密度は 0.75 g/cm^3 であった。

2.3 その他のマイクロセンサ

数 mm 角のシリコン単結晶板の表面の数百 μm のところに三次元的に多数の片持ちはり振動板を作り出し、それらの共振周波数を検出して物体の振動を検出するセンサも報告されている⁽⁸⁾。これは (100) 面上にエピタキシャル成長により片持ちはりの振動板を作り、その上を絶縁酸化膜層で覆い、その上にひずみゲージの役目をする多結晶シリコン膜を作り、ゲージ部分のみを残して除去し、ゲージの上に酸化膜を作成する。最後にゲージ部の電極部と振動板の自由端に金を蒸着し、電極と受感質量部を作り出す。積層加工を終了したのち自由端のところから孔をあけ、アンダーカットエッチングにより深く加工し、シリコン単結晶の片持ちはりを成形して完了する。

同じような手法で、多くの熱電対をシリコン表面層に作り出し、微少な温度変化を検出して、真空度や赤外センサに応用している例もある⁽⁹⁾。

3. 終 り に

単一機能では生体の数倍～数万倍の検出感度を有する自然界の素材は少なくない。しかしながら、総合的に機能し、その目的を達成する機敏さと正確さにおいては生体に匹敵するものはない。はじめに述べたように、生体模倣から出発することが高機能化センサ開発への近道であると思う。その有力手段としてマイクロマシーニング技術を適用した集積化、多機能化センサの開発が必要である。

(昭和 63 年 1 月 12 日受付)

文 献

- (1) The 4th Inter. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators Proc., 第 4 回固体センサ国際会議 (昭 62-6)
- (2) 杉山, 他: 「シリコンマイクロセンサ」, 昭 62 電気学会全大, S. 7, 7-23
- (3) S. Sugiyama, et al.: "High-resolution Silicon Pressure Imager with CMOS Processing Circuits", The 4th Transducer '87 Proc., p. 444 (1987-6)
- (4) O. Tabata, et al.: "Monolithic Pressure-Flow Sensor", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-34, 2456 (1987)
- (5) 田畑, 他: 「熱絶縁構造を有する集積型流速センサ」, 第 5 回センサの基礎と応用予稿集, p. 89 (昭 60)
- (6) I. Igarashi: "Semiconductor Dynamic Sensors", *Sensors and Actuators*, 13, 53 (1988)
- (7) 田畑, 他: 「シリコンを用いた小型圧力・流速複合センサ」, 電気学会センサ技術研資, ST-87-2, p. 11 (昭 62)
- (8) W. Benecke, et al.: "A Frequency-selective Piezoresistive Si Vibration Sensor", Proc. 3th Inter. Conf. Solid State Sensors and Actuators, p. 105 (1985-6)
- (9) P.M. Sarro: "Integrated Si Thermopile Infrared Detectors", Tech. Univ. Delft, S. Middelhoeck. (1987)