

■10 群 (集積回路) - 8 編 (集積化センサとマイクロマシン)

2 章 圧力センサ

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 2-1 圧力の計測
- 2-2 受圧構造
- 2-3 変形検出の方法
- 2-4 パッケージング
- 2-5 圧力センサの設計
- 2-6 圧力センサの応用
- 2-7 最近の研究動向

■10 群-8 編-2 章

2-1 圧力の計測

(執筆者：池原 毅) [2013年9月 受領]

圧力 (Pressure) は気体及び液体の状態を表す最も基本的な物理量の一つであり、その計測は、自動車などの機械、化学・食品プラントといった工業用途から、身の回りの気象や血液などに至るまで、極めて広範な応用範囲を持つ。また、音声も低周波の圧力変動にほかならない。圧力は単位面積当たりの力で表され、力/面積の単位を持つ。SI 単位系では Pa (N/m²) が使われるが、慣用的には大気圧を単位とした「気圧」なども使われるほか、血圧などには水銀柱ミリメートル (mmHg) なども依然として使われ続けている。

圧力を計測するための古典的な「圧力計 (Pressure Gauge)」としては、圧力を屈曲管の変形に変換して計測するブルドン管 (Bourdon Tube) 式、圧力を容器の変形に変換して計測するアネロイド (Aneroid) 式の 2 種が代表的で、これらの計器は現代でも多くの場所で用いられている。

圧力センサ (Pressure Sensor) の原理もこれらの計器と同様、圧力による構造体の変形を、発生した変位あるいは応力を通じて検出する。現在利用されている圧力センサは、そのほとんどがシリコンの微細加工で作られた半導体圧力センサ (Semiconductor Pressure Sensor ; シリコン圧力センサともよくいわれる) であるが、その理由は、シリコンは微細加工によりダイアフラム構造が作りやすかったことと、シリコン材料自体が良好な歪ゲージであり、これらを組み合わせることで極めて優れた特性の一体型のセンサが大量生産できるからである。

最初にこの種の半導体圧力センサが開発されたのは 1964 年で、当時は材料としてはゲルマニウムが用いられていた¹⁾。IC の発明が 1960 年前後であったことを考えると、当時の先端技術をいち早くセンサ分野に応用したことに驚かされる。今でこそ MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) という用語が広く用いられているが、当時もちろんこのような言葉もないばかりか、そのような概念すら存在していなかった。しかし、センサの構成を考慮すると、半導体圧力センサは MEMS の要素を備えており、「最初の MEMS」であると考えてよいのではなからうか。

■10 群-8 編-2 章

2-2 受圧構造

(執筆者：池原 毅) [2013年9月 受領]

半導体圧力センサでは、圧力を機械的変形に変換する構造として、**図 2・1** に示すようなダイアフラム (Diaphragm) 構造が一般に用いられる。ダイアフラムはセンサチップの一部を薄く加工して作られるのが一般的で、そこに加えられた圧力によって、ダイアフラムがたわむ。ダイアフラム構造の種類と作製方法としては、大まかに以下のように分類することができる。各手法の名称は一般的なものではなく、本稿で説明を統一的行うために使用したものである。

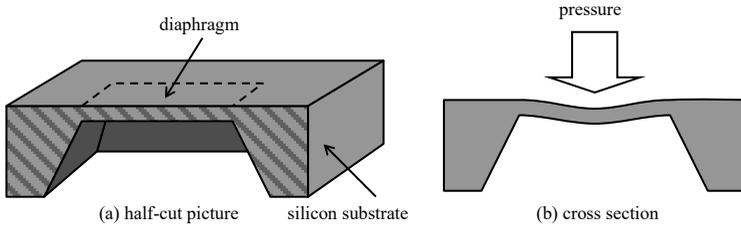


図 2・1 圧力センサのダイアフラム構造と受圧の様子

2-2-1 エッチング法によるダイアフラム作製

結晶異方性エッチング (Crystal Anisotropic Etching) は、単結晶材料を薬品と反応させた際に、特定の結晶方位にエッチングが進みやすい・進みにくいことを利用したエッチング方法である。シリコン単結晶はアルカリ溶液に対して顕著な異方性エッチングを示し、 $\langle 100 \rangle$ 及び $\langle 110 \rangle$ 方向へのエッチング速度が $\langle 111 \rangle$ 方向に比べて極めて大きい特性を持つ。そのため、IC 製造に最もよく用いられる (100) ウエハに $\langle 110 \rangle$ 方向の辺を持つ矩形でマスクしてエッチングを行うと、(111) 面がエッチストップのように働いたため、約 55° の傾斜角を持つ (111) 面で囲まれた 4 角形のくぼみが生じ、(100) 面の底面で均一な厚さのダイアフラムが形成される²⁾。この様子を**図 2・2** に示す。ダイアフラムの大きさは一辺 $100 \mu\text{m}$ から数 mm 程度であるが、マスクのサイズで精密に製作できる。ダイアフラム厚さは数 μm から数 $10 \mu\text{m}$ であり、通

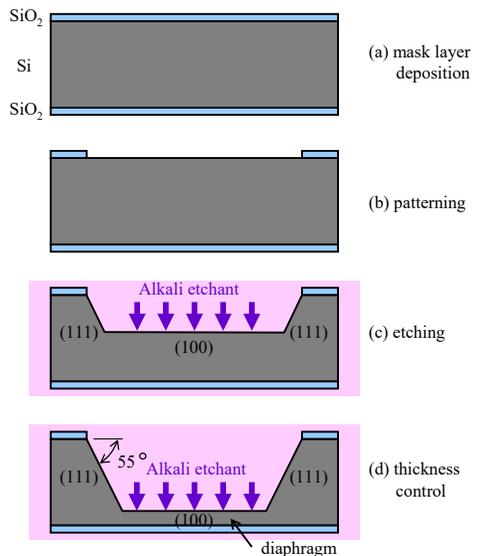


図 2・2 エッチング法 (結晶異方性エッチング) によるダイアフラム構造の作製プロセス

常 500 μm 程度の厚さを持つシリコンウエハから時間管理で調整するため、薄くなると誤差が生じやすい。単結晶材料が機械材料として用いられることは少ないが、シリコンの場合、IC 用途に高品位のものが大量生産されていることでこのような技術が可能となっている。

アルカリ溶液としては、一般に加工面粗さが良好な KOH (水酸化カリウム) が用いられているが、金属汚染を嫌う半導体工場では有機アルカリの TMAH (水酸化テトラメチルアンモニウム) も用いられる。エッチング速度を上げるため、溶液の温度は 70~100 $^{\circ}\text{C}$ 程度で使われ、また、エッチング面の粗さを制御するために様々な添加物も使用されている。ほとんどのフォトレジスト材料はこのような高温のアルカリに対して耐性がないため、エッチング時のマスク膜としてシリコン酸化膜 (Silicon Oxide Film) あるいはシリコン窒化膜 (Silicon Nitride Film) が使用される。KOH を使用する場合、シリコン酸化膜は十分な耐性がないため、数 100 μm の厚さのウエハを掘り進める場合には、シリコン窒化膜が使われるのが一般的である。大がかりなエッチング装置が不要であり、バッチ処理も可能で製造コストが低いため、現在、市販されている多くの圧力センサが、この方法でダイアフラムを作製していると推測される。

しかし、エッチング側壁の角度が結晶構造で決められる約 55 度となってしまう、側壁の傾きの分だけチップサイズが大きくなってコストを圧迫するという欠点も挙げられる。側壁角度がほぼ 90 度となる深掘りドライエッチング (DRIE : Deep Reactive Ion Etching) を使えばこの問題はなくなるが、DRIE では平坦なエッチング底面を得ることは困難であり現実的ではない。(110)面シリコンウエハを用いた圧力センサ³⁾では、一部の(111)面が垂直方向となり、この点では有利と推測される。

アルカリ溶液による異方性エッチングでは、溶液の濃度や温度がわずかでも変化するとエッチングレートの変化につながるため、薄いダイアフラムを形成する際には厚さ制御が難しい課題となる。シリコンに B などの不純物を高濃度にドーピングすると、アルカリ溶液にエッチングされにくくなる特性を利用し、ダイアフラム部分に事前に不純物を拡散し、その後エッチングを行い、薄いダイアフラムを作製する技法も報告されている^{4),5)}。

Si/SiO₂/Si の 3 層からなる SOI (Silicon on insulator) ウエハを使い、簡便にダイアフラム構造を作製することもできる。SOI ウエハの裏面から結晶異方性エッチングあるいは深掘りドライエッチングによりハンドル層を除去して、更に SiO₂層も取り除けば、活性層シリコンをダイアフラムとして使用することができる。裏面からのエッチング時に SiO₂層がエッチストップ層として働くため、終点制御を行いやすいという利点がある。この方法は研究室レベルで簡単にダイアフラム構造を試作するにはよいが、コストの高い SOI ウエハを使用しなければならないため、量産品には使用されていないと思われる。

2-2-2 接合法によるダイアフラム作製

図 2・3 に示すように、2 枚の基板を用意し、片側にはダイアフラムに相当する部分にエッチングで凹みを作製する。凹みを挟んで 2 枚の基板の接合 (Wafer Bonding) を行った後、上下いずれかの側から研削・研磨により基板を薄く加工し、残った部分をダイアフラムとすることができる。ダイアフラムを形成する側の基板は通常、機械的特性を良好にするためシリコン単結晶ウエハを用いるが、もう一枚の基板はシリコンと接合が容易なガラス基板が用いられる場合が多い。この方法ではダイアフラムの片側に閉じたキャピティを作りやすいため、絶対圧センサを構成しやすい。また、ダイアフラムに対向電極を配置した静電容量検出型への応用が容易

である。ダイアフラム自体はエッチング法で作製し、その後接合法により対向電極を配置するという方法も、静電容量検出型の圧力センサでよく用いられている。

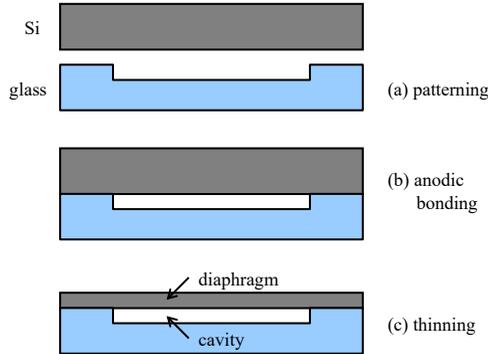


図 2・3 接合法によるダイアフラム構造の作製プロセス

近年では、ポリマー膜のダイアフラムなども、バイオ・医療用途に用いられるようになってきている。ポリマー膜は単体の薄膜から転写・接合する場合もあれば、液体材料をスピコート法などで基板に成膜することもあり、エッチング法、接合法、犠牲層法の中間的な製法となりやすい。

2-2-3 犠牲層法によるダイアフラム作製

裏面加工や接合を利用しない「表面マイクロマシニング (Surface Micromachining)」でダイアフラムを製作することも行われている。図 2・4 に示すように、シリコンウエハ上に犠牲層 (Sacrificial Layer) となる膜を堆積、ダイアフラム部のみを残してパターニングを行い、その後ダイアフラム材料となる膜を堆積させる。犠牲層の部分が内部に埋め込まれてしまうため、ダイアフラム材料の膜にはエッチングホール (Etching Hole) を形成し、エッチングホールから内部の犠牲層を除去し、浮上したダイアフラム構造を作製する。このままではダイアフラムに穴が残っているため、最後にエッチングホール部分を封止 (Sealing) すれば閉じたキャビティを持つダイアフラムが完成する。封止は LPCVD (Low-pressure Chemical Vapor Deposition) などの減圧成膜プロセスにより行われることが多い。犠牲層法を用いた場合は通常、絶対圧センサとなる。

犠牲層法を用いる場合には、ダイアフラム構造を残して犠牲層のみをエッチングする、犠牲層エッチングプロセスが含まれるので、エッチング選択性を持つ材料の組合せが重要になる。犠牲層・ダイアフラム材料・封止材料の組合せとしては多数の報告例があり、[犠牲層/ダイアフラム材料/封止材料]として示すと、[シリコン酸化膜/単結晶シリコン/ポリシリコン]の組み合わせ⁶⁾、[ポリシリコン/シリコン窒化膜/ポリシリコン]の組み合わせ⁴⁾、[ポリマー/金属薄膜/ポリイミド]の組み合わせ⁷⁾、などがある。シリコン以外の材料によるダイアフラムでは機械的特性はベストではないが、精度の必要でない目的やバイオ系の応用で使用されている。

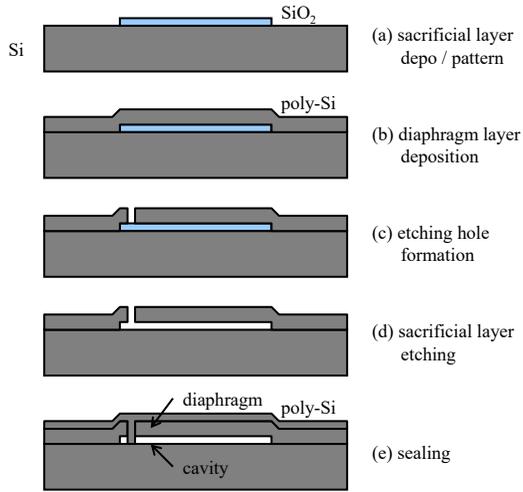


図 2・4 犠牲層法によるダイアフラム構造の作製プロセス

表面マイクロマシニングでは、ダイアフラムの極小化、アレイ化が可能になり、低コスト化や、集積化して指紋センサに応用するなどが期待されている。また、低温プロセスを使うことで、CMOS IC との集積化なども期待される。

■10 群-8 編-2 章

2-3 変形検出の方法

(執筆者：池原 毅) [2013年9月 受領]

2-3-1 ピエゾ抵抗式

シリコン、ゲルマニウムなどの半導体は、ピエゾ抵抗効果 (Piezoresistive Effect) を持ち、金属の 10~100 倍の歪感度 (ゲージ率) を示す。応力と電気抵抗を結びつけるピエゾ抵抗係数は結晶方位に関する異方性を持つとともに、不純物の種類や濃度により大きく変化する。このような特性は 1960 年前後に系統的な研究が行われ^{8)~10)}、ピエゾ抵抗式センサ開発の基礎となった。1960 年代に入ると、フォトリソグラフィや不純物拡散の技術が発達し、p-n 接合による空乏層の利用で、シリコン基板上に微細な配線を形成し、局所的なピエゾ抵抗ゲージ (Piezoresistive Gauge) を配置することが可能となった¹¹⁾。

ピエゾ抵抗式圧力センサ (Piezoresistive Pressure Sensor) は、シリコン単結晶で作られたダイアフラム上に、不純物拡散などで直接ピエゾ抵抗を形成し、圧力印加によるダイアフラムの変形を、ダイアフラム上の歪み (応力) として測定する。

シリコンの場合、**図 3・1** のように、n 型基板上に p 型不純物拡散でピエゾ抵抗を形成し、p 型ピエゾ抵抗の大きな成分 π_{44} を利用する構成が一般的である³⁾。(100)シリコンウエハの面内では、電流を $\langle 110 \rangle$ 方向に流した場合に最大の応力感度を持つゲージが形成できる。 $\langle 110 \rangle$ 方向は、結晶異方性エッチングで作られた四角形ダイアフラムの辺の方向と同一である。

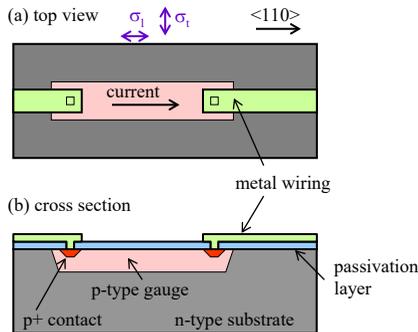


図 3・1 ピエゾ抵抗素子の上面図(a)と断面図(b)

ピエゾ抵抗ゲージの初期抵抗を R_0 、応力印加時の抵抗変化を ΔR とすると、ほぼ

$$\Delta R/R_0 \approx \pi_1 \sigma_1 + \pi_t + \sigma_t \quad (3 \cdot 1)$$

と書くことができる。ここで、 σ_1 及び σ_t はそれぞれ電流の方向に平行及び垂直な方向の応力成分である。また、電流を $\langle 110 \rangle$ 方向にとったとき、 π_1 及び π_t については、 $\pi_1 \approx \pi_t \approx \pi_{44}/2$ という関係が知られている⁹⁾。この関係を使って、正方形のダイアフラムの 4 辺に 4 個のピエゾ抵抗ゲージを**図 3・2(a)**のように配置し、応力と電流の関係の異なる 2 通りの素子 (図では赤と緑に

色分け)を用意し, π_1 と π_t の符号が反対であることを利用し, 図3・2(b)のような Wheatstoneブリッジを形成することで感度を稼いでいる. また, ブリッジにより, 電源電圧変動や抵抗値の温度変化もキャンセルさせている. 半導体抵抗体の温度係数は理想的にはブリッジによりキャンセルできるが, 現実にはパターンの位置合わせ精度などの問題で完全にはキャンセルできない. 通常は, 別途温度センサを配置して, 温度補償を行うことが行われている. ピエゾ抵抗素子は電流を特定の一方方向に流すものが一般的で, 長さをとりたい場合は屈曲したミアンダ型(Meander)形状もよく使われる. (100)面シリコンウエハではほかにも, 単一の4端子型ピエゾ抵抗ゲージが用いられる場合もある¹⁾.

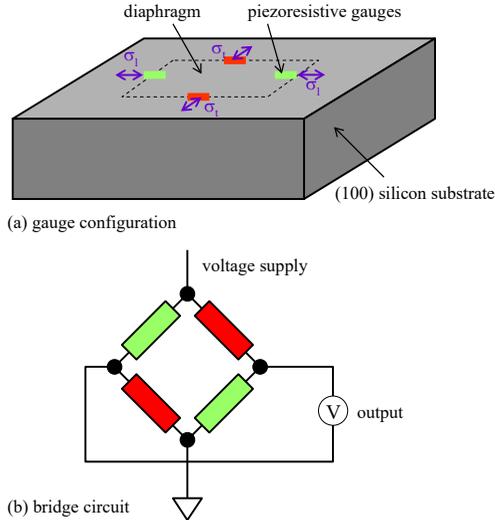


図3・2 ピエゾ抵抗素子のダイアフラム上の配置(a)とブリッジ回路の例(b)

また, (110)面を持つシリコンウエハを使用する場合には, $\langle 110 \rangle$ 方向, $\langle 111 \rangle$ 方向でピエゾ抵抗係数が大きくなり, いくつかの構成例が存在する³⁾.

ゲージの製造プロセスは比較的簡単な不純物ドーピングであり, ゲージの不純物濃度は低い方がピエゾ抵抗係数が大きくなるが¹⁰⁾, 現実のセンサでは, インタフェース回路との整合性, プロセス設計, p-n 接合設計, 配線金属とのコンタクト設計などがより重要であり, 特に最適な不純物濃度が決まっているわけではない. また, ゲージの表面は IC と同様, パッシベーション膜(薄いシリコン酸化膜)で保護され, ゲージの両端にはコンタクトホール(Contact Hole)を経由して金属膜の配線でオーミック接続(Ohmic Contact)される.

ピエゾ抵抗式では比較的簡単な IC プロセスで製造でき, チップ内に電気回路を組み込む場合には同一のプロセスが利用できる. そのため, 低コストの製品には, 主にこの検出方式が用いられている.

2-3-2 静電容量検出方式

静電容量型圧力センサ(Capacitive Pressure Sensor)は, 圧力印加によるダイアフラムの変形

を、ダイアフラム上に形成した電極の変位として検出する。ダイアフラムには対向電極が小さなギャップを隔てて設置され、2 電極間の静電容量が、電極間距離によって変化することを検出して、圧力を測定する。面積 S 、電極間距離 d の平行平板電極で近似した場合、静電容量 C は

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (3 \cdot 2)$$

となり、 d の初期値が小さいほど変位検出感度が高くなる。ここで ϵ_0 は真空の誘電率である。図 3・3 に接合法で作製したダイアフラムでの例を示す。

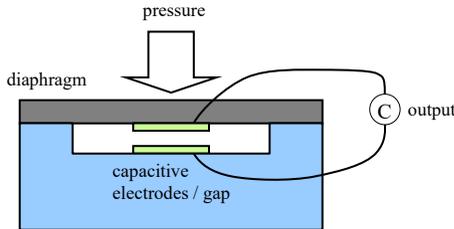


図 3・3 静電容量検出の例

小さなシリコン圧力センサでは、対向電極の配置や位置調整を個別に行うことは極めて困難であるため、通常はウエハプロセスにより対向電極を形成する。ダイアフラム製造法としては先に挙げた接合法と犠牲層法で対向電極が形成しやすいことから、これらの製造法との組合せの例が多い。ほかにも、グリッド状の対向電極をダイアフラム上に別途作り込む例も報告されている⁹⁾。

2-3-3 振動式

振動式歪センサは、両端を固定した弦（振動子：Resonator）の固有振動数が、両端に与えられた歪みによって変化することを利用した歪センサである。弦楽器の弦のテンションを変えてチューニングを行うと同様の現象である。振動式圧力センサ（Resonant Pressure Sensor）では、圧力印加によるダイアフラムの変形を、図 3・4 のようにダイアフラム上に形成した小さな弦の振動数変化として検出する。

振動子を形成すること自体は比較的容易であるが、振動子を駆動し振動を検出するためにはアクチュエータ・センサの組込みが必要であり、現在実用化されている例では、外部磁場と振動子を流れる電流との電磁相互作用を利用した、やや複雑な構成となっている¹²⁾。また、共振周波数は 10 kHz オーダ

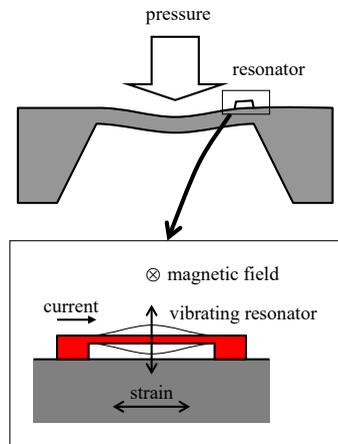


図 3・4 振動式センサの例

一となるが、高周波の振動は大気の粘性によって減衰しやすいため、振動子を減圧状態に封止することも必要となり、製造プロセスも難しい。

ほかの方式よりも外的要因による影響を受けにくく、高い安定性を持つ圧力センサとなるが、製造コストが高く、小型化も困難なため、専ら工業用のハイエンド製品に利用されている¹³⁾。

2-3-4 光学式

ダイアフラムの変位を、干渉計などを使って測定する光学式 (Optical Detection) の構成もしばしば報告されている。この方式ではダイアフラムに特に付加的加工を行う必要がなく、ダイアフラム部の構造を簡素化できるメリットがある。また、光ファイバと組み合わせやすく、カテーテル先端に利用しやすいというメリットもある。しかし、光源や干渉計まで含めると単純な構成とは言えなく、システムとしては大きく複雑になってしまう。

■10 群-8 編-2 章

2-4 パッケージング

(執筆者：池原 毅) [2013年9月 受領]

2-4-1 受圧方式

圧力センサの受圧方式としては、絶対圧センサ、ゲージ圧センサ、差圧センサの3種類がある。ダイアフラム片側の圧力を p_1 、もう片側の圧力を p_2 とすると、ダイアフラムは圧力差 $p_1 - p_2$ を感じて変形することになる。

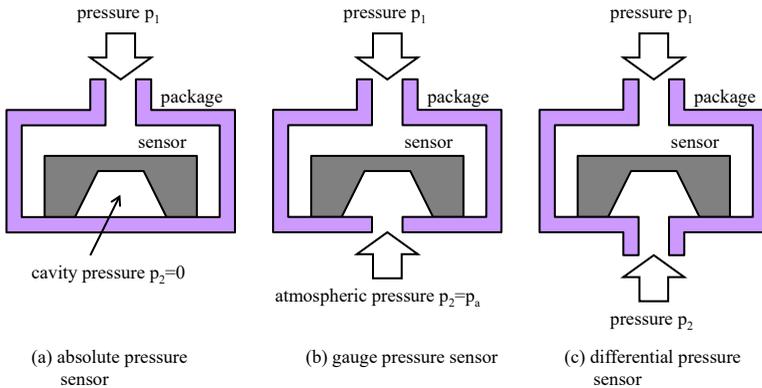


図 4・1 圧力センサの3種類の受圧方式。(a)絶対圧センサ、(b)ゲージ圧センサ、(c)差圧センサ

絶対圧センサ (Absolute Pressure Sensor) は図 4・1(a)に示すように、 p_2 を 0 として p_1 を入力するもので、1 ポートの圧力センサとなる。 p_2 を 0 にするために、ダイアフラム下側のキャビティを真空中に封止する必要がある。エッチング法によるセンサの場合は、センサチップの下に別のガラス基板などを真空中で接合して、真空室を形成する。接合法によるセンサの場合は、真空中で2枚の基板を接合することで真空室を形成する。犠牲層法によるセンサの場合は、真空中で封止プロセスを行うことで真空室を形成する。

差圧センサ (Differential Pressure Sensor) は図 4・1(c)に示すように、 p_1 、 p_2 の両方を別の2ポートとするもので、 $p_1 - p_2$ に対する信号を出力する。エッチング法によるセンサの場合は、ダイアフラム上下に圧力を導くようなパッケージを使用する。接合法によるセンサの場合は、ダイアフラムでない方の基板にあらかじめ貫通孔を開けておくことで下部のポートを形成する必要がある。犠牲層法によるセンサは裏面加工を行わないため、通常は差圧センサに用いられることはない。

ゲージ圧センサ (Gauge Pressure Sensor) は、基本構造は差圧センサと同じであるが、図 4・1(b)に示すように、 p_2 を接続ポートではなく大気開放にすることで常に p_2 が大気圧になるようにしたものである。 $(p_1 - \text{大気圧})$ に対する信号を出力する。一般的な圧力計 (Pressure Gauge) の表示と同じになるため、ゲージ圧という呼び方をされる。ゲージ圧は大気圧下で生活している我々には便利な概念であるが、基本的には差圧の一種である。ゲージ圧では大気圧の状態が

圧力ゼロとなり、大気圧以下の減圧状態は「負圧」(Negative Pressure) と呼ばれる。

2-4-2 外乱の緩和

圧力センサのチップは上記受圧方式に合わせて、1 ポートあるいは 2 ポートのパッケージ (Package) にマウントされる。パッケージは安価なプラスチックから、セラミックス、金属まで様々である。圧力センサチップを直接パッケージに接合すると、パッケージから熱変形などが生じて大きな外乱を与えると同時に、ダイボンディングに使われる接着剤などが残留歪みを発生させ、ヒステリシスやドリフトの原因となってしまう。

圧力センサではこのような外乱を緩和するため、図 4・2 のようにガラス製の緩衝構造を介してパッケージと接合されるのが一般的である。ガラスが用いられる理由は、陽極接合 (Anodic Bonding) により接着剤などを使用せずシリコンと容易に強固な接合が可能であり、ヒステリシスやドリフトをほとんど発生しないためである。ガラスの材料としては、陽極接合が可能で、なおかつシリコンと線膨張係数が近い、硼珪酸ガラス Corning Pyrex 7740 や、アルミノ珪酸塩ガラス Hoya SD2 が用いられる。パッケージなどからの外乱は、ガラス部分で吸収され、圧力センサチップにできるだけ影響が及ばないように設計される。しかし、圧力センサチップに直接大面積で結合する必要があるため、このガラス部材のわずかな線膨張係数の違いは、どうしてもセンサに付加的な温度係数を発生させてしまう。そのため、圧力センサでは温度補償 (Temperature Compensation) は不可欠となる。ガラス基板の接合はウエハ単位で行われ (Wafer Level Packaging と呼ばれる)、その後、チップに分割する製造工程が一般的である。ガラス基板への受圧用の貫通孔の加工は、高い加工精度を必要としないため、ブラスト加工、超音波加工などの技術が使われている。

圧力センサ製造ではこのように、ガラス基板の接合がほとんどの場合必要である。接合法によるダイアフラム製造はこの点、ダイアフラム製造工程がパッケージング工程の一部も兼ねることになる。

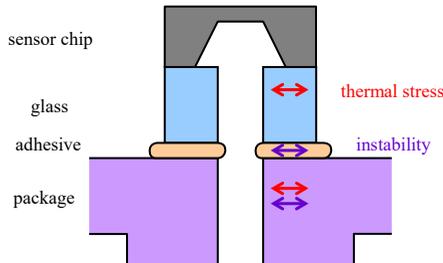


図 4・2 圧力センサのパッケージングとセンサに加わる外乱

多くの圧力センサはシリコンセンサチップ/ガラス/パッケージという構造で十分な精度を実現しているが、極めて高い安定度が要求される場合には、パッケージをガラスと線膨張係数の近い金属 (Kovar 合金など) で作り、陽極接合することで、ヒステリシスやドリフトの原因となりやすい接着剤の使用を完全に排除することができる¹⁴⁾。

圧力センサはセンシングの心臓部であるダイアフラムがチップ内の大部分を占めるうえ、セ

ンサに圧力を導くためにはセンサチップをパッケージへ強固に固定する必要があることから、ダイアフラムに様々な外乱が影響を与えてしまう構造となりやすい。したがって、ほかのセンサから比べても、この外乱緩和が重要となり、パッケージングのための設計と製造コストが、センサチップ単体よりも難しい問題となる場合が一般的である。

2-4-3 受圧部の保護

圧力センサのダイアフラムは外部気体または液体からの圧力を受ける必要があるが、直接被測定物質がセンサに触れると、腐食や断線のおそれがある。そのため、センサチップは通常は被測定媒体から保護されている。

非腐食性気体用のローコスト圧力センサは多くの場合、**図 4・3** に示すように、パッケージ内で柔らかいシリコーンゲルで保護されている。

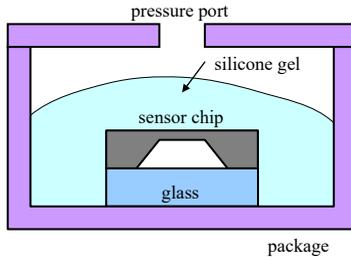


図 4・3 圧力センサのゲルによる保護の例

液体や腐食性気体などに接する圧力センサは、**図 4・4** に示すように、受圧用に別のダイアフラム（ダイアフラムシール）を設けて、安全性を確保している。ダイアフラムシールはステンレス、 Hastelloy などの耐食性の高い材料で作られ、封入されたシリコーンオイルなどの圧力伝達媒体を通じて圧力をセンサチップに伝えるようになっている。ダイアフラムシールは比較的大きいため、一般的な機械加工で製造されている。

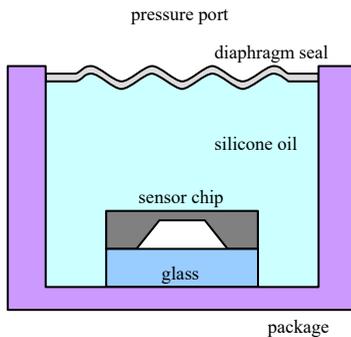


図 4・4 圧力センサのダイアフラムシールによる保護の例

■10 群-8 編-2 章

2-5 圧力センサの設計

(執筆者：池原 毅) [2013年9月 受領]

2-5-1 基礎設計

圧力センサの基礎構造設計はダイアフラムの設計となる。結晶異方性エッチングで作製されるダイアフラムは四角形となるので、ここでは正方形のダイアフラムについて説明するが、長方形、円形などの場合も概ね同様である。

図 5・1 のような、一辺の長さ a 、厚さ t の、周辺を固定した正方形ダイアフラムの片面に均様な圧力 p を印加したとき、その中心の変位 d は

$$d = 0.015 \frac{1}{E} \frac{a^4}{t^3} p \quad (5 \cdot 1)$$

となる。また、このときのダイアフラム端に発生する最大応力 σ は、

$$\sigma = 0.31 \frac{a^2}{t^2} p \quad (5 \cdot 2)$$

となる。ここで、 E はダイアフラム材料のヤング率である¹⁵⁾。この 2 つの式が圧力センサ設計の最も基礎となる式である。

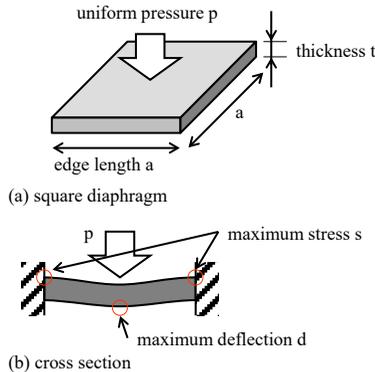


図 5・1 圧力センサの 4 角形ダイアフラムの計算モデル

変位の値は、ギャップを持つセンサ構造では重要となり、変位量をギャップの大きさに合わせて設計する必要がある。また、静電容量検出式の場合は、変位の値が感度を支配する。応力の値はセンサの耐圧設計に関わってくる。シリコン単結晶は脆性材料であり、その破壊特性は表面の加工状態によって大きく異なってくる。慎重に製作されたシリコン薄膜試験片などでは 1~数 GPa の破壊応力が得られているが¹⁶⁾、実用的な最大応力は概ね 100 MPa から 1 GPa 程度で、しかもばらつきがあるため統計的な取り扱いが必要である¹⁷⁾。定格となる圧力域で破壊応力に対して十分余裕がある応力設計をしなければならない。また、ピエゾ抵抗検出式の場合は発生応力を検出するため、検出に十分な応力がとれているかも重要になる。

設計が進んでくると、更に詳しい解析が必要となり、有限要素法を使ったシミュレーションが用いられている。静電容量検出式の場合は、ダイアフラムの変形形状に応じて検出電極の面積や形状を最適化する必要がある。ピエゾ抵抗検出式の場合は、ゲージの大きさが有限であることを考慮し、応力分布の中で最適な形状・配置を設計する必要がある。また、リソグラフィ誤差による位置ずれで、どの程度特性に影響が出るかといったばらつき設計も必要になってくる。

ダイアフラム材料として最もよく使われているシリコン単結晶は、ダイアフラムが作製しやすいこと、歪ゲージの性質を持っていること以外にも、機械的特性に優れているという重要な利点を持っている。シリコン単結晶は脆性延性遷移温度が 700 °C 程度で、室温ではほぼ完全な脆性材料である。そのため、応力を印加しても塑性変形が起こることはなく、破壊まで線形な応力-歪み関係を示す。結果として、線形性に優れたセンサが実現できる。更に、長期間高い応力をかけた後に金属で見られるような、塑性変形に起因するドリフトやヒステリシスも極めて小さくすることができる。安価で小さいだけでなく、高性能かつ高信頼性なのである。

設計においては、シリコン単結晶は結晶材料であり、正確な構造設計を行うためには、材料定数として表 5・1 のような弾性テンソル成分^{18),19)}を用いた計算を行うべきである^{20)~22)}。等方性定数を用いて計算を行うと、表 5・2 のように弾性率の結晶方位による違いが無視されることになり、時に大きな計算誤差を発生させる場合がある。正方形や円形のダイアフラムの変形計算でやむを得ず等方的弾性定数を用いる場合は、ヤング率は面内平均値をとれば概ね問題ないが、アスペクト比が 1 でなくなってくると単純ではない。また、ポアソン比は <110> 方向で値が小さくなるという特異性を持っているが、ピエゾ抵抗素子も <110> 方向で使われることが多いため、影響を受ける場合もあり注意が必要である。

表 5・1 シリコン単結晶の弾性定数 (温度 25°C)

弾性定数	値 [GPa]
c_{11}	167.40
c_{12}	65.23
c_{44}	79.57

表 5・2 シリコン単結晶の代表的な結晶方位のヤング率

結晶方位	ヤング率 [GPa]	ポアソン比 ((100)面内)
<100>	130.8	0.280
<110>	169.7	0.066
<111>	188.4	—

ダイアフラムは一樣な厚さである場合がほとんどだが、微圧センサのように薄いダイアフラムを使用する場合には、構造非線形性を弱めるため、ダイアフラム中央に厚いボスを設けたり、ピエゾ抵抗設置部を厚くしたりといった工夫も行われている²³⁾。このように構造が複雑になると、有限要素法の利用が必須となってくる。

接合法、犠牲層法によるダイアフラムで、ギャップを持つ構造の場合、過大圧印加時にはダ

ダイヤフラムが対辺に接触し、変形が抑えられる効果がある。これを利用してダイヤフラムを破壊から防ぎ、信頼性を高める手法も利用されているが^{14),24)}、この設計は線形有限要素法では計算できず、非線形計算を行う必要がある。

2-5-2 外乱緩和の設計

ダイヤフラムに対する外乱緩和の設計は、論文などではほとんど報告されていないが、現実の圧力センサ開発では極めて重要である。温度変化による外乱は特に大きく、接合されたガラスの線膨張係数差による影響を中心に、正しく見積もる必要がある。また、パッケージや接着剤によってもたらされる外乱についても、ガラス部分で十分に緩和されるようにパッケージ設計されなければならない。差圧センサの場合には、差圧 $p_1 - p_2$ のみならず、静圧 p_1 (あるいは p_2) に対しても感度が発生してしまうので、その設計も行う必要がある¹⁴⁾。

■10 群-8 編-2 章

2-6 圧力センサの応用

(執筆著：池原 毅) [2013年9月 受領]

2-6-1 気圧測定

気圧の測定には絶対圧センサが用いられる。気圧測定は主に気象観測において重要な項目であったが、現在は気圧による高度測定の重要性が増している。

気圧による高度測定は、従来から航空機ナビゲーションや登山などで利用されてきたが、近年、携帯機器やカーナビゲーションにおける位置計測の補助として注目を浴びている。携帯機器の測位に使用されている GPS は高度方向に誤差が大きく、また、室内では信号が受信しにくくなる。気圧の変化は、高度差 1 m 当たり約 0.1 hPa となり、安価な圧力センサでも検出可能である。そのため、ビルや地下における階数の推定や、高速道路と一般道の判定などに、圧力センサを GPS の補助として利用しようという動きが見られる。

気圧から高度を求める方法としては通常、標準大気²⁵⁾が仮定されるが、標準大気では海面気圧と温度が固定されており、現実の利用においては気圧変動や温度変化などの補正が必要である。高気圧や低気圧の交替に伴う気圧変化は 10 hPa 以上になり、そのまま高度差に換算してしまうと 100 m 以上に相当する。そのため、絶対的な高度を測定することは通常は難しく、移動に伴う気圧変化を抽出する必要がある。

2-6-2 気体・液体を取り扱うプラント

気体、液体を取り扱うプラントでは、化学プラント、発電所、製鉄所、製紙工場から、水処理場、食品工場に至るまで、圧力センサが制御のためのセンシングの中心的な役割を果たしている。計測対象は、容器や配管の圧力だけではなく、差圧測定を通じた液位計や差圧式流量計も広く用いられている。このため、プラントでは差圧センサも多く用いられている。

2-6-3 自動車・機械

自動車など様々な機械においても、圧力センサは多数用いられている。自動車では従来からエンジンの油圧、吸気圧といった基本的なモニタリングは行われていたが、近年省燃費・排出ガス削減のため精密な燃焼制御が求められており、圧力センサをはじめとする各種センサの重要性が増している。また、米国では 2007 年から、タイヤの空気圧を検出する TPMS (Tire Pressure Monitoring System) が義務化されている。TPMS は圧力を直接検知するタイプだけではなく、圧力センサをエアバルブなどに搭載したタイプも普及しつつある。

また、自動車に限らず、油圧、空気圧、真空を利用する機械は民生用、工業用で広く用いられており、これらでも圧力センサが重要な役割を果たしている。

2-6-4 血圧

血圧計としては従来からアネロイド式が用いられてきたが、近年では半導体圧力センサを使った電子血圧計が一般的になっている。圧力センサを使用することで、家庭でも自動的に簡単に血圧が測定できるようになり、生活の質を高めることに役立っている。

また、学会報告では近年、各種センサのバイオ・医療応用が増えてきており、血圧以外にも眼圧や膀胱圧などの様々な体内圧を測定するためのセンサが開発されている。特に体内埋め込み型のセンサでは使用する材料も生体適合性が要求されるとともに、センサシステムとして電源や信号取出し方法などが大きな課題となり、従来のセンサとは全く異なったアプローチが必要とされている。

2-6-5 マイクロフォン

音波は空気の粗密波であり、高速に応答する圧力センサはマイクとしての資質を備えている。構造体の共振周波数は寸法に反比例するというスケールリング則を持つため、シリコンで作製した小型ダイアフラムは共振周波数が高くなり、可聴周波数帯に共振を持たない、周波数特性に優れたマイクロフォン (Microphone) が実現可能になる。マイクロフォンと圧力センサは基本構造はほぼ同一だが、音波による圧力変動は 10^2 Pa 以下となるため、通常の圧力センサの測定レンジに比べると極めて微圧用のセンサにする必要がある。したがって、ダイアフラムを薄くあるいは大きくする必要があるが、コストを考慮すると大きなダイアフラムは使いにくい。薄いダイアフラムに、柔らかくするための同心円状の凹凸 (コルゲーション)などを設けて、高感度なダイアフラムを作製するのが主流である。また、柔らかいポリマー材料の利用なども報告されている。

ダイアフラムの変形検出も圧力センサと同様な手法が使用可能であるが、ピエゾ抵抗式ではダイアフラム表面の応力を検出するため、薄いダイアフラムでは感度的に不利という問題がある。また、不純物拡散で作るピエゾ抵抗は、一定の深さを必要とすることも、薄いダイアフラムと相性の悪い一因である。そのため、現在、図 6・1 に示すような、従来のコンデンサマイクロフォンと類似した構造を持つ、静電容量検出式のマイクロフォンが主流となっている。ダイアフラムに近い位置に設けられた対向電極は、コンデンサマイクロフォンに倣って「バックプレート (Backplate)」と呼ばれている。バックプレートには多数の貫通孔が開けられ、エアダンピングを軽減するように工夫されている場合が多い。バックプレートはダイアフラムの背面ではなく、前面に配置されている例もある²⁶⁾。

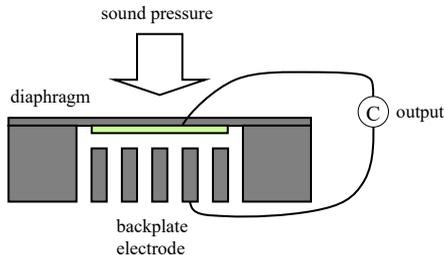


図 6・1 MEMS マイクロフォンの構造の例

また、圧力センサと違い DC 動作が不要であることから、AC 動作で発電する圧電膜 (Piezoelectric Film) やエレクトレット (Electret) を使う例も多数報告されている。これらはそれぞれ、従来のクリスタルマイクロフォンや、エレクトレットコンデンサマイクロフォンと同

様の原理に基づくものである。

「マイクロマイクロフォン」は語呂が悪いためか、「シリコンマイク (Silicon Microphone)」
「MEMS マイクロフォン」などと呼ばれている。センサ素子と信号処理 IC が 1 パッケージになっ
たものが多くのメーカーから供給されるようになっており、現在、その小型低背である利点
から、携帯電話の受話器のマイクロフォンを急速に置き換えつつある。更に、音質の高性能な
ことを活かし、放送録音用途などにも利用が広がりつつある²⁷⁾。

■10 群-8 編-2 章

2-7 最近の研究動向

(執筆者：池原 毅) [2013年9月 受領]

圧力センサの最新の成果が発表される国際会議 Transducers で、最近 2 回の圧力センサに關する発表を表 7・1 にリストアップした^{28),29)}。既に様々な圧力センサが実用化されている現在で

表 7・1 国際学会 Transducers (2011 年, 2013 年) で発表された圧力センサの分類

Paper No.	First Author		Diaphragm fabrication		Sensing method
	Name	Country	Method	Material	
Transducers '11					
M4A.003	J. Wang	China	Sacrificial	Si	Piezoresistive
M3P.025	Y. Zhang	USA	Etching	poly-Si	Capacitive
M3P.026	X. C. Hao	Japan	Bonding	Si	Capacitive
T3P.002	C. Z. Wei	China	Sacrificial	SiN	Piezoresistive
T3P.005	H. -D. Ngo	Germany	Etching	Si	Piezoresistive
T2A.005	R. Surapaneni	USA	Sacrificial	Parylene	Capacitive
Th2B.003	M. Baumann	Germany	Bonding	Si / glass	Piezoresistive
T3P.019	P. Gonzalez	Belgium	Sacrificial	poly-SiGe	Piezoresistive
T2A.002	C. -F. Chiang	USA	Sacrificial	Si	Capacitive
T4A.003	Q. Li	China	Etching	Si	Resonant
W3P.012	H. Takahashi	Japan	Etching	Si	Piezoresistive
W3P.013	S. Jin	USA	Sacrificial	SiC	Capacitive
T2A.003	N. Minh-Dung	Japan	Etching	Si	Piezoresistive
T3P.058	M. D. Zhou	USA	Etching	Parylene	Optical
M3P.084	A. Prümm	Germany	Bonding	Si	?
M3P.099	J. Wang	China	Sacrificial	Si	Piezoresistive
W4B.003	V. Laukhin	Spain	Bonding	Polycarbonate	Piezoresistive
Th2B.001	R. S. Okojie	USA	Sacrificial ?	SiC	Piezoresistive
W4C.006	P. Singh	Singapore	Etching	Si	Piezoresistive
W3P.156	C. -X. Liu	USA	Bonding	PDMS	Piezoresistive
Transducers '13					
M3P.104	T. Sharma	USA	Bonding	Polyimide	Piezoelectric
M3P.145	A. M. Hurst	USA	Bonding	Graphene	Piezoresistive
W2C.001	W. -C. Yeh	Taiwan	Bonding	Si	Piezoresistive
W2C.002	J. C. Wang	China	Sacrificial	Si	Piezoresistive
W2C.003	Y. Deimerly	France	Etching ?	?	Piezoresistive
W2C.005	G. Mirshekari	Canada	Etching	Si	Piezoelectric
W2C.006	Z. Z. Wu	USA	Etching	Polyimide	Piezoresistive
W3P.015	V. Laukhin	Spain	Etching ?	Polycarbonate	Piezoresistive
W3P.021	Y. -C. Lin	Taiwan	Sacrificial	Aluminium	Resonant ?
W3P.089	S. H. Song	USA	Bonding	Ecoflex	Capacitive
W3P.130	G. Keulemans	Belgium	Sacrificial	SiO2	Optical
W3P.146	K. Shioya	Japan	Bonding ?	Polyimide / PDMS	Piezoresistive
Th2A.004	J. H. Lee	Korea	Bonding	PDMS	Piezoresistive
Th2D.004	M. Ghannad-Rezaie	USA	Etching	SiN	Optical

あっても、新たな圧力センサに関する研究が盛んに、かつ世界的に偏りなく行われており、圧力計測の重要性が理解できる。表には、ダイアフラムの製法及び材質、変形検出の方法をまとめてみた。本稿の分類に従ったが、ポリマー系の製造に関してはなかなかこの分類に当てはめるのが難しい場合もあった。

ダイアフラム製造方法は、3 分類の方式がいずれも利用されており、目的に応じて様々な方法を使い分ける必要があることが分かる。ダイアフラム材料は、実用化されているセンサは圧倒的にシリコンが主流で、Transducers '11 でもシリコン系が多かったが、Transducers '13 では非シリコン、特にポリマー系のものが増えてきており、また、用途もバイオ・医療を指向したものが多くなっている。変形検出方法は、ピエゾ抵抗型と静電容量型が主流であるが、ピエゾ抵抗型はシリコンセンサに多い。ピエゾ抵抗はシリコンだけでなく、カーボン材料をはじめとした新材料を応用したものも見られるようになってきた。

マイクロフォンは既に実用化が進んでいるためか、発表件数は少ない状況であった。

■参考文献

- 1) “ピエゾ抵抗式半導体圧力センサ,” でんきの礎, 電気学会, <http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/30-foundation/index.php>, 2013.
- 2) 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山 進: “マイクロマシーニングとマイクロメカトロンクス,” 培風館, p.11-22, 1992.
- 3) 田中重信, 山口哲夫, 小山内裕, 新免 徹: “半導体圧力センサー総論一,” 藤倉電線技報, 第 66 号, pp.1-8, 1983.
- 4) M. Esashi, S. Sugiyama, K. Ikeda, Y. Wang, and H. Miyashita: “Vacuum-Sealed Silicon Micromachined Pressure Sensors,” Proc. IEEE, vol.86, no.8, pp.1627-1639, 1998.
- 5) C.H. Mastrangelo, X. Zhang, and W.C. Tang: “Surface-Micromachined Capacitive Differential Pressure Sensor with Lithographically Defined Silicon Diaphragm,” J. Microelectromech. Systems, vol.5, no.2, pp.98-105, 1996.
- 6) Y. Suzuki, T. Kudo, K. Ikeda: “Accurate, Cost Effective Absolute Pressure Sensor,” Proc. Transducers '97, pp.1493-1496, 1997.
- 7) N. Sato, S. Shigematsu, H. Morimura, K. Machida, M. Yano, K. Kudou, and T. Kamei: “Highly Sensitive CMOS MEMS Fingerprint Sensor,” Proc. 21th Sensor Symposium, pp.99-102, 2004.
- 8) W.P. Mason: “Use of Piezoresistive Materials in the Measurement of Displacement, Force, and Torque,” J. Acoust. Soc. Am., vol.29, no.10, pp.1096-1101, 1957.
- 9) O.N. Tufte, P.W. Chapman, and D. Long: “Silicon Diffused-Element Piezoresistive Diaphragms,” J. Appl. Phys., vol.33, no.11, pp.3322-3327, 1962.
- 10) O.N. Tufte and E.L. Stelzer: “Piezoresistive Properties of Silicon Diffused Layers,” J. Appl. Phys., vol.34, no.2, pp.313-318, 1963.
- 11) 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山 進: “マイクロマシーニングとマイクロメカトロンクス,” 培風館, p.98-118, 1992.
- 12) K. Ikeda, H. Kuwayama, T. Kobayashi, T. Watanabe, T. Nishikawa, T. Yoshida, and K. Harada: “Three-dimensional Micromachining of Silicon Pressure Sensor Integrating Resonant Strain Gauge on Diaphragm,” Sensors and Actuators A, vol.A21-A23, pp.1007-1010, 1990.
- 13) K. Harada, K. Ikeda, H. Kuwayama, and H. Murayama: “Various applications of resonant pressure sensor chip based on 3-D micromachining,” Sensors and Actuators, vol.73, pp.261-266, 1999.
- 14) T. Watanabe, S. Fukuhara, H. Tsukamoto, T. Kudo, and K. Ikeda: “Differential Pressure Sensor with Micromachined Overrange Protectors,” Proc. Transducers '95, pp.578-581, 1995.
- 15) 日本機械学会編: “機械工学便覧 A4 材料力学,” 第 5 章 平板の曲げ, pp.52-64, 2003.
- 16) 土屋智由: “MEMS 材料の信頼性評価,” 電気学会論文誌 E, vol.125, no.7, pp.289-293, 2005.
- 17) 岡田 明: “セラミックスの破壊学,” 第 5 章 脆性破壊の統計論, 内田老鶴鋪, pp.35-43, 1998.
- 18) J.J. Wortman and R.A. Evans: “Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio in Silicon and

- Germanium,” J. Appl. Phys., vol.36, no.1, pp.153-156, 1965.
- 19) H.J. McSkimin, W.L. Bond, E. Buehler, and G.K. Teil : “Measurement of the Elastic Constants of Silicon Single Crystals and Their Thermal Coefficients,” Phys. Rev., vol.83, pp.1080, 1951.
 - 20) T. Ikehara, C. Kato, Y. Suzuki, S. Fukuhara, and T. Watanabe : “Simulation of Anisotropy Effects on a Crystal-Silicon Diaphragm Used for Pressure Sensors,” Proc. 13th Sensor Symposium, pp.149-152, 1995.
 - 21) T. Ikehara and T. Tsuchiya : “Effects of anisotropic elasticity on stress concentration in micro mechanical structures fabricated on (001) single-crystal silicon films,” J. Appl. Phys., vol.105, pp.093524/1-10, 2009.
 - 22) M.A. Hopcroft, W.D. Nix, and T.W. Kenny : “What is the Young’s Modulus of Silicon,” J. Microelectromech. Systems, vol.19, no.2, pp.229-238, 2010.
 - 23) S. Hein, V. Schlichting, and E. Obermeier : “Piezoresistive Silicon Sensor for Very Low Pressures Based on the Concept of Stress Concentration,” Proc. Transducers ’93, pp.628-631, 1993.
 - 24) L. Christel, K. Petersen, P. Barth, F. Pourahmadi, J. Mallon, Jr. and J. Bryzek : “Single-crystal Silicon Pressure Sensors with 500x Overpressure Protection,” Sensors and Actuators A, vol.A21-A23, pp.84-88, 1990.
 - 25) 日本工業規格 JIS W 0201-1990, 1990 ; ISO 2533-1975, 1975.
 - 26) P.R. Scheeper, A.G.H. van der Donk, W. Olthius, P. Bergverd : “A review of silicon microphones,” Sensor and Actuators A, vol.A44, pp.1-11, 1994.
 - 27) “Feature: Program Applications of Silicon Microphones,” Broadcast Technology, NHK, no.46, Autumn, pp.17-19, 2011.
 - 28) Proc. Transducers ’11, 2011.
 - 29) Proc. Transducers ’13, 2013.