

WLP 超小型絶対圧センサ

電子デバイス研究所 村重伸一¹・山本敏¹・塩尻健史²・三谷尚吾²
鈴木孝直³・橋本幹夫⁴

WLP Ultra-Small Absolute Pressure Sensor

S. Murashige, S. Yamamoto, T. Shiojiri, S. Mitani, T. Suzuki, and M. Hashimoto

近年、携帯電話などの情報電子機器において小型化・軽量化が急速に進んだ結果、ICやMEMSセンサなどの電子デバイスの更なる小型化が要求されるようになった。特に、携帯機器での気圧計測を目的とする圧力センサの応用が注目されている。このような市場の要求を満たすために、ウエハレベルパッケージ(WLP)技術を用いた超小型絶対圧センサを開発した。このセンサチップは、シリコン基板の内部に真空のキャビティ構造を形成することにより超小型化を実現した。本稿では、開発したWLP超小型絶対圧センサの特長や特性について報告する。

Recently, with miniaturization and weight reduction in information electronic equipments such as cellular phones, there is a demand for further miniaturization of electronic devices such as ICs and MEMS sensors. Attention is especially paid to the application of small pressure sensors to portable equipments used to measure the atmospheric pressure. We have developed an ultra-small absolute pressure sensor applying the wafer level package (WLP) technology to satisfy market needs. The sensor chip has a unique sealed reference cavity formed inside the Si chip, which is one of the reasons for its very small size. In this report, the characteristics of the WLP ultra-small absolute pressure sensor are described.

1. ま え が き

電子機器の小型化や軽量化が飛躍的に進むと同時に、搭載される各種の電子デバイスには小型化に対する要求が非常に強くなっている。また、電子機器は小型化が進むだけではなく、あらたな機能の追加や用途がさまざま考案されるようになってきており、MEMS技術を応用したセンサなどの需要が高まりつつある¹⁾²⁾³⁾。特に、圧力センサにおいては、従来の圧力制御や圧力計測という工業計測用途だけでなく、絶対圧測定による気圧情報を積極的に利用する観点から携帯電話や小型パソコンなどへの新しい応用が検討されている。

ピエゾ抵抗を利用した半導体圧力センサは、半導体ウエハプレーナプロセス、およびシリコン微細加工技術を用いて製造されている。ここでは、シリコンウエハの表面に半導体ピエゾ抵抗を形成後に、その裏面からシリコンを部分的にエッチングすることにより、数 μm から数十 μm の厚さのシリコンダイアフラム構造が形成されてい

る。従来の絶対圧センサでは、圧力測定の基準となる真空基準室をダイアフラム直下のエッチング領域に形成するため、チップ裏面にガラス等をリークタイトに貼り合わせる必要があった。しかし、シリコン裏面からエッチングを行いダイアフラム形成した後にガラス台座を貼り合わせる方法は、チップサイズを増大させることになり、センサの小型化には限界があった。ここで紹介する圧力センサチップは、ウエハ裏面からのエッチングを行うことなく、表面からの加工のみで、異種材料との貼り合わせを行わずに、真空基準室を形成したものであり、きわめて小さなチップを得ることができる。

このようなチップに、近年、半導体デバイスの小型パッケージ技術として需要が拡大しているウエハレベルパッケージ(WLP)技術⁴⁾を適用することによって、「WLP超小型絶対圧センサ」を開発することに成功した。この絶対圧センサは、大口径の圧力センサウエハをWLP加工することで作ることができるため、生産性に優れ、低コスト化が可能である。本報告では、開発したWLP超小型絶対圧センサの特長や基本特性を紹介し、実使用を想定した温度補償の検討、環境試験の評価結果と考察を述べる。

1 シリコン技術開発部(工学博士)

2 シリコン技術開発部

3 マイクロデバイス開発部グループ長

4 シリコン技術開発部グループ長

2. WLP超小型絶対圧センサの特長

2.1 WLP超小型絶対圧センサ

図1(a)は、今回開発したWLP超小型絶対圧センサと当社でこれまで最も小型であり、気圧水深計測機能付の腕時計などに採用されている従来の絶対圧センサを比較したものである。圧力センサのパッケージサイズで比較すると、従来品が外形（直径）5.8 mm ×（高さ）2.5 mmであるのに対して、WLP超小型絶対圧センサは外形（縦）0.8 mm ×（横）0.8 mm ×（高さ）0.5 mmである。このように、センサの大きさが飛躍的に小型化した結果、従来実現しなかった小スペースへの実装が実現され、小型機器への搭載が可能となると考えられる。また、図1(b)に、WLP超小型絶対圧センサを拡大した写真を示す。この絶対圧センサは、WLP技術によって直径150 μmのはんだバンプを4箇所形成している。

2.2 WLP超小型絶対圧センサの構造

WLP超小型絶対圧センサと従来の小型絶対圧センサの構造を図2および図3にそれぞれ示す。絶対圧センサは主に気圧測定などの用途に使用される圧力センサであり、圧力検知のためセンサチップには圧力測定用の真空基準室が必要となる。図3(b)のように、従来の絶対圧

センサにおける真空基準室は、ダイアフラムと呼ばれる薄肉部が形成加工されたセンサチップの裏面に陽極接合法によってガラス台座を貼り付けて作られる。ダイアフラムは、半導体圧力センサのピエゾ抵抗を形成するシリコン基板表面で被測定圧力に対する機械的な応力変化をピエゾ抵抗に伝える働きを有しており、一般には計測する圧力の範囲によって、厚さ十～数十μmに制御される。ダイアフラムの加工には強アルカリ溶液を用いてシリコン基板の裏面から異方性エッチングを行う。しかし、異方性エッチングによるエッチング面はシリコンの結晶面方位に依存して形成されるため、シリコン基板の厚さ方向に対して完全に垂直なエッチング形状は得られず傾斜角度を持ったダイアフラム構造になってしまう。この結果、従来の圧力センサでは、所望のダイアフラム面積に対して異方性エッチングにより形成されるシリコン側壁の傾斜角度を考慮したチップサイズの設計が必要となり、小型化するためには大きな問題となっていた。これに対して、WLP超小型絶対圧センサは、従来の異方性エッチング技術を使わずにシリコン基板内部にキャビティと呼ばれる真空基準室を形成し、小型化設計に対してきわめて

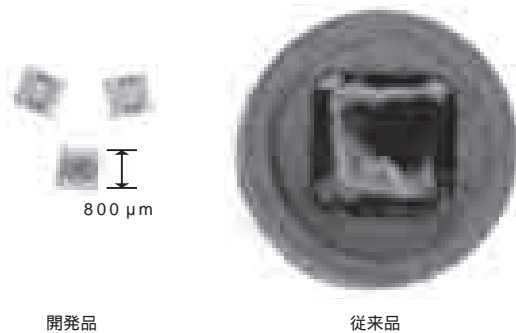


図1(a) WLP超小型絶対圧センサと従来の圧力センサのサイズの比較

Fig. 1(a) Comparison between the developed packaged pressure sensor with the existing smallest sensor.



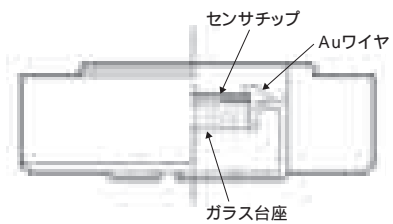
図1(b) WLP超小型絶対圧センサの拡大写真

Fig. 1(b) Magnified view of the developed pressure sensor.

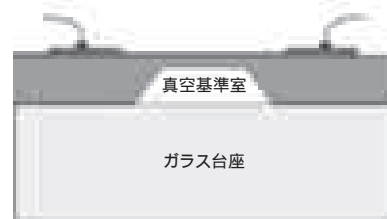


図2 パッケージング後のWLP超小型絶対圧センサの断面構造

Fig. 2. Cross sectional view of developed WLP ultra-small absolute pressure sensor.



(a) パッケージング後の断面構造



(b) センサチップ断面拡大図

図3 従来の絶対圧センサの断面構造

Fig. 3. Cross sectional view of existing small absolute pressure sensor.

有利なダイアフラム構造を実現した。このキャビティの間隔は非常に狭いため、外部からの大きな圧力によるダイアフラムの変形が生じたとしても、その変形量が機械的に制限され容易には破損しない設計となっている。また、WLP超小型絶対圧センサではガラス台座が不要であり、そのため、高さの大幅なサイズダウンと、さらには加工工数、材料の削減によるコストダウン効果も同時に得られる。

WLP超小型絶対圧センサがこのような飛躍的な小型化に至った理由は、従来のセンサチップと大きく異なる構造を有することだけではなく、超小型のセンサチップサイズを最大限に生かすことができるウエハレベルパッケージ(WLP)技術による点も大きい。センサチップ上の電極パッドとパッケージの金属端子をワイヤボンディングで電気接続する従来の構造では、組み立て精度を考慮してパッケージサイズを設計せざるを得ないため、小型化には限界がある。しかし、WLP超小型絶対圧センサの場合は、それらの必要がなく、センサチップ上の電極パッド上に直接、樹脂/Cu再配線とはんだバンプが形成されているため、金属端子を有するパッケージへの組み入れが不要であり、チップサイズパッケージが実現される。このはんだバンプをかいして実装基板と直接接合し電氣的に接続されるため、実装面積の縮小に大きく貢献する。なお、はんだバンプの材料には鉛フリーはんだ(Sn-3.0 Ag-0.5 Cu)を使用している。

2.3 製造プロセス

図4に示すように、WLP超小型絶対圧センサの加工プロセスは大きく分けると、

単結晶シリコン基板に圧力センサの検出部となるピエゾ抵抗を不純物拡散により形成し、圧力に応じて機械的に応力を検知する極薄ダイアフラムを加工するセンサウエハ加工プロセス

ウエハをウエハ形状のままパッケージングするウエハレベルパッケージ(WLP)工程

性能検査

センサとして個片化

となる。特に従来のパッケージ品の組み立てで必要とされる大規模な組み立て装置、特性検査装置が不要となり、また、すべての工程がウエハの状態で行われることから、量産性に優れていることを特長としている。

2.4 センサ特性検査装置

WLP超小型絶対圧センサはパッケージングまでのプロセスをウエハレベルで行うことを特長としており、ウエハに印加する圧力、温度を制御しながら特性評価を行う専用の検査プローバシステムを開発し、センサを個片化する前にウエハ状態でセンサの特性をすべて評価することを可能とした。また、これによって、従来のパッケージ品に比較すると短時間・低コストで検査工程を実施することができるなど、製造プロセス上のメリットも考えられる。図5は、開発した専用プローバの外観である。圧力制御可能な圧力チャンバ内にウエハプロービング部

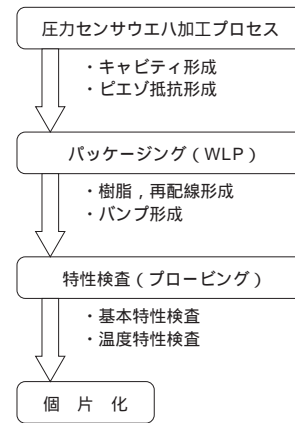


図4 WLP超小型絶対圧センサの製造プロセス
Fig. 4. Process flow of the developed sensor.



図5 専用プローバ

Fig. 5. Developed prober system for pressure sensor wafer.

を収納した構造としている。WLP加工を終えたウエハは、ウエハ状態のまま圧力チャンバ内にセットされ、規定の圧力、温度を制御することによって、オフセット電圧やスパン電圧、抵抗値の測定に加え、温度特性などの諸特性をすべて測定し検査することができる。

WLP超小型絶対圧センサはWLP技術の特長を生かすことで、理想的なチップサイズの実現、実装までのプロセスの低コスト化など、従来の圧力センサにはなかった多くの優位性を持つといえる。

3. WLP超小型絶対圧センサの特性

3.1 基本特性

WLP超小型絶対圧センサの特性評価は、図6に示すようにガラスエポキシ樹脂基板(FR-4)に実装した状態で行った。はんだ印刷、マウント、リフロー工程を通して実装した後、はんだバンプが基板側のランドに問題なく接合されていることを確認した。表1に、3.3V駆動時のWLP超小型絶対圧センサの基本特性を示す。ここで、表

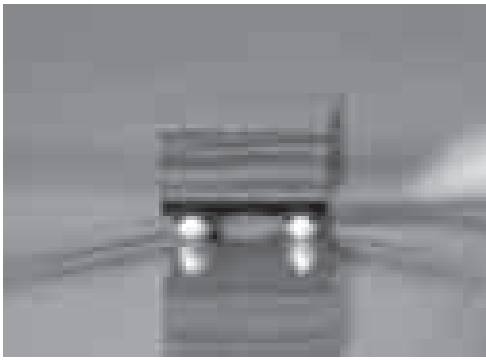


図6 FR-4基板実装後の圧力センサ
Fig. 6. Developed sensor mounted on PCB.

表1 圧力センサの基本特性
Table 1. Characteristics of the developed sensors.

特性項目	特性値
オフセット電圧	62 mV
感度	0.15 mV / kPa / V
ブリッジ抵抗	4.1 k
出力非直線性	- 0.03 %FS

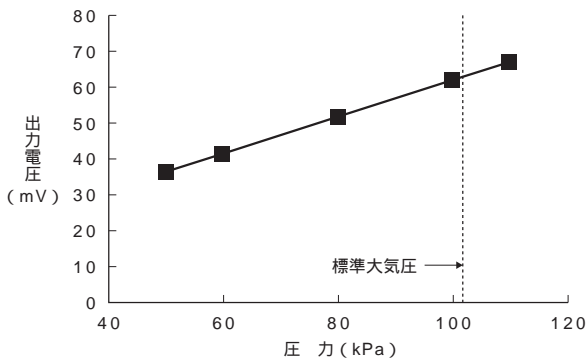
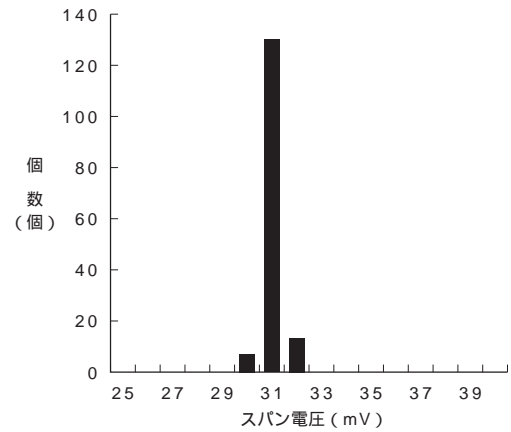


図7 出力特性 (3.3 V 駆動, 25 °C)
Fig. 7. Typical output characteristics of the developed sensor.

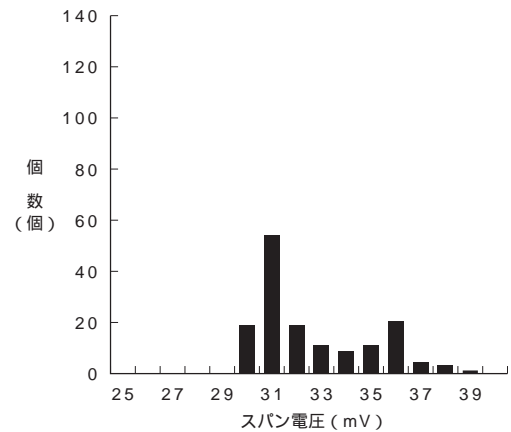
中のオフセット電圧は、圧力 100 kPa での出力電圧を示している。これらの基本特性は 37 個の圧力センサより求めた平均値であるが、従来の小型絶対圧センサの特性と同等レベルのセンサ性能であることを確認した。また、図 7 にセンサの出力特性を示す。測定圧力範囲は 50 kPa から 110 kPa としたが、110 kPa 以上の高圧側においても使用可能である。

図 8 は、WLP 超小型絶対圧センサおよび従来の絶対圧センサにおけるスパン電圧のばらつきを示したものである。測定個数は 150 個である。これらのグラフからわかるように、WLP 超小型絶対圧センサのスパン電圧のばらつきは、従来品のばらつきに比較して非常に小さい。ここで、スパン電圧 SV は次式によって表される⁵⁾。

$$SV = K \cdot R / t^2 \dots\dots\dots (1)$$



(a) 開発品



(b) 従来品

図8 スパン電圧のばらつきの比較 (N = 150 個)
Fig. 8. Comparison of span voltage.

(1) 式において、 K は比例定数、 R はセンサのゲージ抵抗、 t は圧力センサのダイアフラム厚である。この式より、圧力センサのスパン電圧はゲージ抵抗やダイアフラムの厚さによって変化し、特に自乗の項であるダイアフラム厚の影響を大きく受ける。従来の異方性エッチング法によるダイアフラム形成では、材料としているシリコンウエハ自体の厚さばらつき、およびエッチング液の管理、エッチング時間による制御など管理の難しさの理由により、エッチング後のダイアフラムの厚さを均一に加工することが難しく、そのため、従来の絶対圧センサでは、ダイアフラム厚のばらつきに起因するスパン電圧のばらつきが大きい。一方、WLP 超小型絶対圧センサの開発で採用した表面下の加工による真空基準室 (キャビティ) 形成方法は、きわめて精度の高いダイアフラム厚の制御が可能であり、スパン電圧のばらつきを小さくすることができる特長がある。

3.2 温度補償

一般に、ピエゾ抵抗には温度依存性が存在するため、ピエゾ抵抗効果を利用した半導体圧力センサの感度は温度によって変化することが知られている。スパン電圧温度特性はセンサを構成するピエゾ抵抗の温度係数に依存するものであり、ピエゾ抵抗の不純物濃度を最適化する

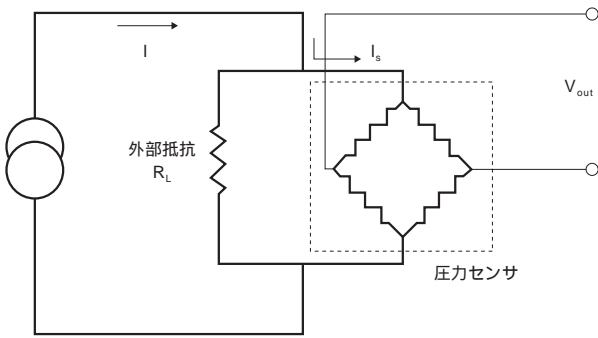


図 9 外部抵抗によるスパン電圧温度特性補償回路例
Fig. 9. Circuit for compensation of temperature characteristics which the pressure sensor exhibits.

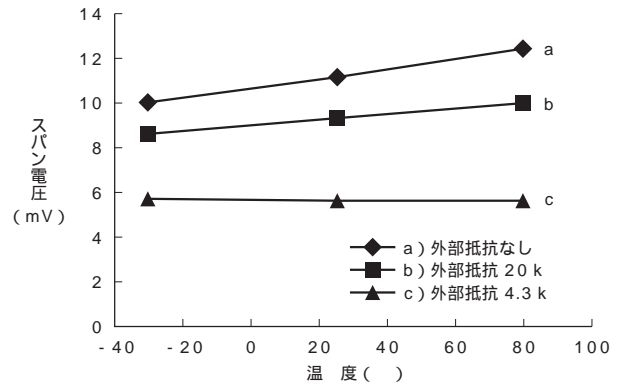


図 10 温度補償前と補償後のスパン電圧
Fig. 10. Temperature dependences of span voltage.
a) Non compensated, b) Compensated by 20 k ,
c) Compensated by 4.3 k

ことにより小さくすることができる。さらに厳しい要求仕様に対応するためには、温度特性補償用のICを用いて個別に特性補償するのが一般的に用いられる手法であるが、実装部品点数が増え、スペースが必要となること、また、コスト高になるといったデメリットもある。そこで当社ではスパン電圧温度特性が外部接続回路の接続によっても変動する⁶⁾ことに着目し、温度特性の小さい抵抗を外部に接続することで温度特性を改善することを検討した。図9に圧力センサに外部抵抗を接続して温度補償を行う場合の等価回路図を示す。圧力センサの検出回路はダイヤフラム部に形成された4つのピエゾ抵抗をホイートストンブリッジ回路に接続した形となっており、圧力センサのブリッジ回路と並列に外部抵抗を接続することで温度補償を行うことができる。これは、ピエゾ抵抗に比べて温度係数の小さい金属皮膜抵抗などの外部抵抗を並列に接続することにより、その合成抵抗の温度係数をピエゾ抵抗単体の温度係数よりも小さくすることができるためである。ここで、ピエゾ抵抗によって構成される圧力センサのブリッジ抵抗 R_s と外部抵抗 R_L を並列接続した場合の合成抵抗値 R は次のようになる。

$$R = R_s R_L / (R_s + R_L) \quad \dots\dots\dots (2)$$

外部抵抗の温度係数が非常に小さく R_L が温度に依存しないと仮定すると、温度変化に対する合成抵抗の変化率 R/T は(2)式から以下ようになる。

$$R/T = (R/R_s) \cdot (R_s/T) = \{R_L / (R_s + R_L)\} \cdot (R_s/T) \quad \dots\dots (3)$$

$R_s > 0, R_L > 0$ より $1 > R_L / (R_s + R_L) > 0$ となるため(3)式より、合成抵抗の変化率はセンサのブリッジ抵抗の変化率 R_s/T よりも小さくなるのがわかる。

接続する外部抵抗値は、使用温度範囲における圧力センサのスパン電圧およびブリッジ抵抗の値を用いて計算することができる。ブリッジ抵抗 R_s は温度変化を考慮すると、以下のように表すことができる。

$$R_s = R_{s0} (1 + \alpha \cdot T) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで R_{s0} は25における圧力センサのブリッジ抵抗で、 T は25との温度差である。 α はブリッジ抵抗の温度係数である。また、外部抵抗 R_L を圧力センサに並列接続すると、この並列回路全体に流れる電流 I に対してセンサ側に流れる電流 I_s は次のようになる。

$$I_s = I \cdot (R_L / (R_s + R_L)) \quad \dots\dots\dots (5)$$

外部抵抗を接続することによって得られる圧力センサのスパン電圧 SV_x は I_s に比例して変化し、温度補償を行わない場合の圧力センサのスパン電圧 SV に対しては以下の関係となる。

$$SV_x = (I_s / I) \cdot SV = (R_L / (R_s + R_L)) \cdot SV \quad \dots\dots\dots (6)$$

(4),(6)式において、各温度における圧力センサのスパン電圧 SV およびブリッジ抵抗 R_s を求めることにより、各温度における補償後のスパン電圧 SV_x が得られる。このとき、 SV_x が温度変化に無関係に一定となるような外部抵抗 R_L の値を決めることができる。

図10は、この手法によりスパン電圧温度特性の温度補償を施したWLP超小型絶対圧センサの温度特性を示す。この温度補償の確認は、0.3 mAの定電流駆動により、-30 ~ 80の温度範囲で行った。外部抵抗は20 k と4.3 k を用いた。4.3 k は前述の計算方法により得られた値で、スパン電圧が温度に無関係に一定となることが予想される抵抗値である。温度補償を施さない場合のスパン電圧温度特性は20 %FS程度の変動が確認できる。また、20 k の外部抵抗で温度補償を行った場合のスパン電圧温度特性は14 %FSの変動となり、補償前に比較すると温度変化に対するスパン電圧の変動が小さくなっているが、温度補償としては不十分であることがわかる。これ

表2 信頼性試験結果
Table 2. Results of reliability examinations.

試験項目	試験条件	外観不良	電気コンタクト
高温保持試験	150 , 1000 時間		
低温保持試験	- 40 , 1000 時間		
高温動作試験	125 , 1.5 mA 通電, 5 kPa, 1000 時間		
温度サイクル試験	- 40 ~ 125 , 1000 サイクル		
プレッシャークーラー試験	121 / 100 %RH, 205 kPa, 96 時間		
高温高湿バイアス試験	85 / 85 %RH, 1.5 mA 通電, 1000 時間		
吸湿リフロー試験	吸湿: 85 / 85 %RH, 168 時間 リフロー: 260 (MAX) × 3 回		
繰り返し加圧試験	5 ~ 10 kPa, 1,000,000 サイクル		
振動試験	100 ~ 2000 Hz, 20 G, 挿引 4 分, XYZ 方向		

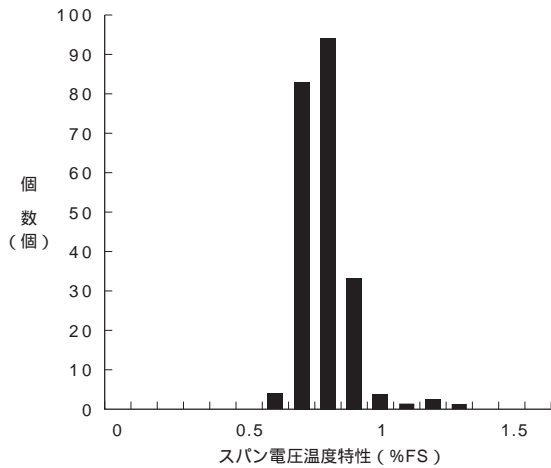


図11 温度補償後のスパン電圧温度特性の分布 (N = 220 個)
Fig. 11. Temperature characteristic of sensitivity after temperature compensating.

に対して、4.3 k の外部抵抗を用いた場合のスパン電圧温度特性は 1 % FS 以内の変動量となり、大幅な改善効果が得られたことから上記手法の有効性が確認できた。

図11は、実験的にウエハ面内の各所から均等に抜き取った圧力センサを一律の外部抵抗 4.3 k で温度補償した場合のスパン電圧温度特性のばらつきを示す。WLP超小型絶対圧センサでは、もともとスパン電圧温度特性のばらつきが非常に小さいことから、個々のセンサに対して個別の抵抗値を選択する必要がなく、限られた固定抵抗を用意するだけで大幅に温度特性を改善することができる。この結果では、スパン電圧温度特性を評価したサンプルの約 98 % のセンサの温度特性が 1 % 未満に補償され、1 種類の抵抗値によりウエハ単位で温度補償が可能であることが実証できた。

4. 信頼性評価

WLP超小型絶対圧センサを基板へ実装する場合、一般にフリップチップ実装で使用されているようなアンダーフィルの充填ができない。これはアンダーフィルがセンサのダイアフラムを固着し、圧力センサとして機能しな

くなるためである。そのため、基板実装後もピエゾ抵抗が形成されたセンサチップ表面が剥き出しの状態になっていることや、また、基板との熱膨張係数の違いによる熱膨張収縮の影響を受け、はんだ接合部の応力疲労による破断等の故障が懸念されたが、表2に示すように今回実施したいずれの試験項目においても外観不良や電気コンタクトの不良は発生しなかった。

5. むすび

微細なキャピティ構造とピエゾ抵抗を有する半導体圧力センサを用い、WLP技術によりパッケージングすることができた。このセンサは、従来のセンサと比較して格段に小型化され、また、同等レベルの性能を有している。これらの特長を生かして、急速に進む電子機器の小型化にも対応できるものと考えており、今後、種々の携帯機器などへの製品展開が期待される。

参考文献

- 1) 増田：エレクトロ実装学会誌 Vol.9, No.4, pp.251-256, 2006
- 2) S. Nakano, T. Toriyama and S. Sugiyama: Technical Digest of the 18th Sensor Symposium, pp.289-292, 2001
- 3) 西元, 山下, 大島：電子情報通信学会誌B, Vol.J90-B, No.1, pp.17-24, 2007
- 4) 升本ほか：フジクラ技報 99 号, pp.77-80, 2000
- 5) 五島ほか：藤倉電線技報 66 号, pp.9-24, 1983
- 6) 高橋ほか：フジクラ技報 96 号, pp.54-60, 1999