

世界最高水準の精度と信頼性を有する ピエゾ抵抗式圧力センサの開発

Development of Piezoresistive Pressure Sensors with the World's Highest Level of Accuracy and Reliability

株式会社 山武

徳田 智久

Tomohisa Tokuda

キーワード

ピエゾ, 圧力, ICP-RIE, R付ダイアフラム, 高耐圧, ノッチフリー, 拡散抵抗配線

当社の基幹製品である差圧・圧力発信器の心臓部に搭載されるSiピエゾ抵抗式圧力センサを改良することで、従来品に対して大幅な高耐圧化を達成する理想的なダイアフラム構造とそれを可能にする独自プロセスを開発し、センサの信頼性を大幅に向上させているので報告する。さらに従来のメタル配線の代わりに半導体拡散抵抗を配線とすることで、さらなる精度向上を実現している併せて報告する。

Improvements have been incorporated into the silicon piezoresistive pressure sensors installed in the central unit of differential pressure and pressure transmitters, which are key products of our company. This has enabled the development of ideal diaphragm structures featuring significantly higher pressure resistance and the unique processes making this possible and the realizing of greatly improved sensor reliability. This paper covers these topics and how installing semiconductor diffused resistors instead of conventional metal wires enables even higher accuracy.

1. はじめに

差圧・圧力発信器は圧力、流量、液位などの計測に使われる汎用性の高い工業計器であり、世界中で広く採用されている。近年、これらを取り巻く環境は市場のグローバル化や世界規模での生産拠点の変化にともない厳しさを増し、これまで以上に高いコスト競争力と差別化技術による製品力強化が必要不可欠な状況となってきた。そこで、当社で製造・販売している高精度・高機能な差圧・圧力発信器AT9000 Advanced Transmitter Model GTX (以下GTX)等に検出素子として内蔵されるSiピエゾ抵抗式圧力センサの改良を行い、大幅な信頼性、及び精度向上を達成しているのでここに紹介する。



図1 AT9000 Advanced Transmitter Model GTX

2. センサ概要

2.1 ピエゾ抵抗式の測定原理

センシング方式として利用しているピエゾ抵抗効果とは、応力による半導体のバンドギャップの変化で説明され、抵抗率が変化する現象である。⁽¹⁾ピエゾ抵抗係数は、応力に対する抵抗率の変化を示す係数であり、物質によって固有の値を持つ。Siの場合では、このピエゾ抵抗係数は、伝導型、温度、不純物濃度によって変化し、さらに異方性を持つ。

当社では、検出素子として、p型Siの拡散抵抗で結晶面(100)を採用している。図2にp型Siの(100)面におけるピエゾ抵抗係数の異方性を示す。この面においては結晶方向が<110>方向の時に最もピエゾ抵抗係数が大きくなり、圧力検出に最適方向となる。逆に結晶方向が<100>の時に、最もピエゾ抵抗係数が小さく圧力感度最小となり、温度センサなどの最適方向となる。

測定原理としては、図3に示すとおり、圧力印加時にセンサチップに形成されたダイアフラムの撓みにより発生する応力を、センサ表面に形成したピエゾ拡散抵抗の抵抗値変化としてブリッジ回路で検出する方式を採っている。発生応力、抵抗値変化率、及びブリッジ出力電圧の関係を式(1)に示す。この式が示すように、ダイアフラムの径方向に発生する σ_l と接線方向に発生する σ_t との差である $\sigma_l - \sigma_t$ に比例する抵抗値変化率 $\Delta R/R$ に伴う電圧が出力される。

$$V_{out} = 1/2 (\sigma_l - \sigma_t) \pi_{44} \cdot V_0 = \Delta R/R \cdot V_0 \quad \text{式(1)}$$

(π_{44} : <110>のピエゾ抵抗係数)

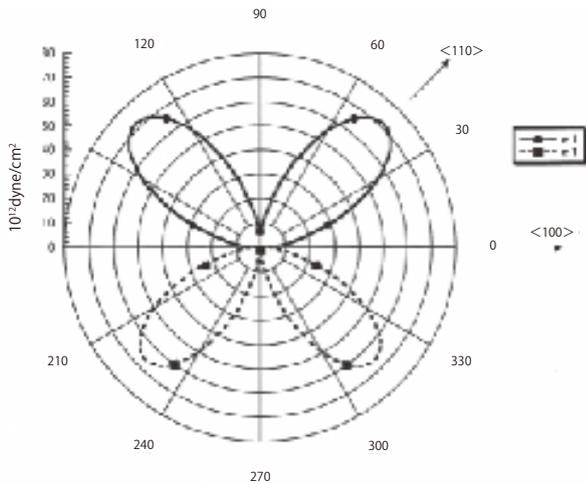


図2 p型Si (100)面のピエゾ抵抗係数

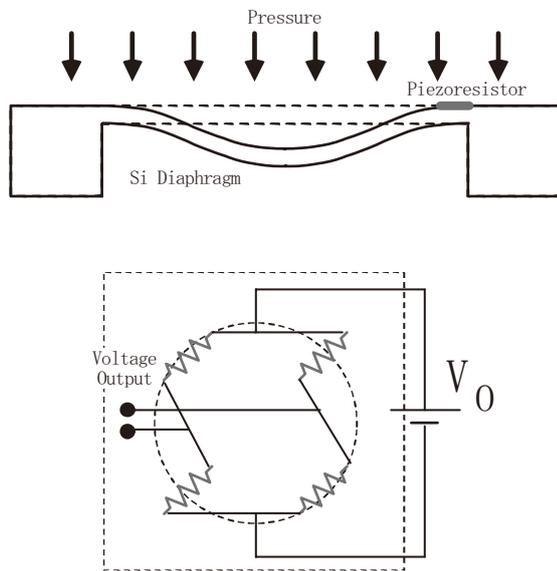


図3 測定原理

2.2 センサ従来構造と特徴

当社にて、これまでに高精度・高信頼性を追究することにより得られてきた独自の差別化技術について以下に記載する。

2.2.1 センサチップ構造

当社ではSOI (Si On Insulator) ウエハを用いてセンサチップを作製している。これはSiに比べて極端にエッチングレートの低い埋め込み酸化膜(buried oxide:BOX)層でエッチングストップさせることで、ウエハ面内でダイアフラム厚さの均一性を保つためである。しかし、この構造では強度の弱いSiO₂やSi-SiO₂界面で応力集中が起こるため、耐圧の低い構造になってしまう。そこで、耐圧向上のためにさらに追加で掘り込むことにより図4に示すような強度の弱いBOX層付近への応力集中を避ける構造としている。また、センサ表面には検出素子が形成されており、アルミ配線によりブリッジ接続されている。

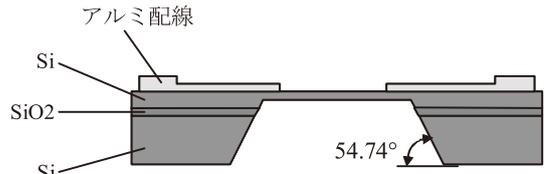


図4 センサチップ従来構造

2.2.2 LZS構造

支持台であるガラス台座との僅かな熱膨張係数差やヤング率の違いにより接合界面に生じる歪による誤差を排除する構造をとっている。これをLZS (Low Zero Shift) 構造(図5)と呼び、温度特性及び、静圧特性のSN比が従来比で10倍以上に向上している。当社センサは、チップ材料としてSiを採用し、台座はガラス材を採用している。異種材料を接合している限り、誤差成分である温度や圧縮力により発生する応力を完全になくすことは不可能である。但し、ここで式(1)に再度注目すると、このノイズ成分の低減には、温度や圧縮力により発生する径方向の応力と接線方向の応力が等しく、その差が0であれば良いことが分かる。このことに注目し、センサチップと台座との接合部の形状を最適化することで、 σ_l と σ_t の値を等しくし、温度や圧縮力により発生する応力によるノイズ成分を極力抑えることのできる構造となっている。

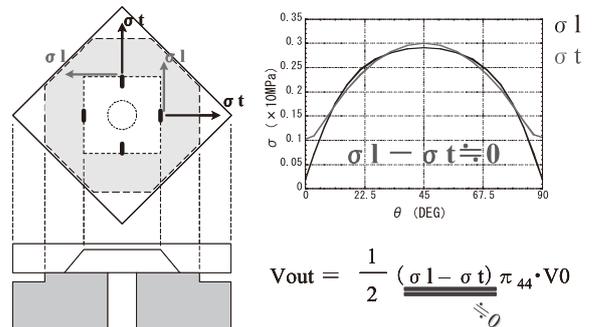


図5 LZS構造

2.2.3 Si / Glass / Si 三層PKG

センサチップ・台座を压力容器であるステンレス鋼にパッケージしているが、ステンレス鋼との熱膨張係数ミスマッチにより熱応力が発生する。この応力のチップへの伝達を十分に減衰させる目的として、図6に示すように、Siチューブを導入している。これにより、PKGから受ける誤差要因の排除を可能にしている。

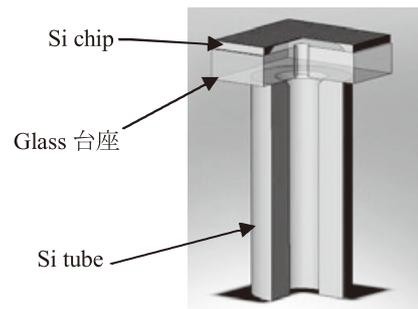


図6 三層構造

2.2.4 ゼロ点安定化技術

計測値の信頼性を論じる際、しばしばゼロ点のドリフトが問題になる。当社ではこの問題を解決するため、センサゲージ形成の際のイオン注入プロファイルを独自に最適化し、ドリフト発生の原因であるイオン性不純物に対する耐性向上に成功している。図7に示すように、本来特性を保証していない限界動作領域(125℃)においても17ヶ月以上で0.01%F.S. 以下と工業用差圧・圧力発信器における世界最高水準の安定性、信頼性を実現している(図7)。

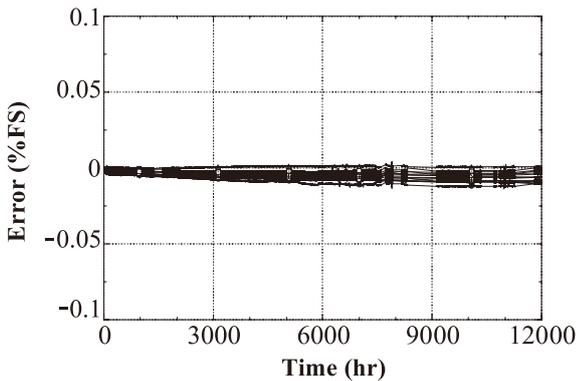


図7 125℃におけるゼロ点のドリフトデータ

3. さらなる高信頼性化・高精度化

前述のとおり、我々の開発したピエゾ抵抗式圧力センサは、長年の開発から得た様々な技術を集約した高精度、高信頼性のセンサである。しかし、従来の構造では、最も低い微圧レンジの実現が困難であった。これは、差圧センサのLP (Low Pressure) 側の耐圧が使用圧力の70倍という厳しいスペックの中、スパンと耐圧のトレードオフを達成することが同構造では極めて困難だったためである。一方でスペック内であっても、厳しい使用環境でウォーターハンマーやアコースティックショックなどにも耐える信頼性の高いセンサが求められている。このような要求に応えるため、我々はセンサの耐圧を極限にまで高めた。具体策として、設計上のアプローチ (R付) とプロセス上のアプローチ (ノッチレス) の両方により解決している。さらに低圧レンジになるほどヒステリシスの問題も大きくなっていく。これについても、設計上のアプローチ (配線メタルレス化) により課題解決している。

3.1 従来構造の課題点

従来構造のセンサは、アルカリのエッチング液による異方性エッチングでダイアフラムを形成していたため、面方位の関係からエッチング終端部に54.74°の角ができ(図4)、この角が応力集中箇所となるため耐圧が低かった。そこで、高耐圧化を実現する手段として、この角にRをつけ、応力を分散させる構造が有効と考えた。この考えのもと、理想的なダイアフラム構造の実現に成功しているの以下に記載する。

また、従来センサは配線材料にアルミを使用しているため、温度サイクルが加わった際に主にこの異種材料界面に

発生するすべりのためゼロ点シフト (以下サーマルヒステリシス) が発生する。また低圧レンジになるほど、この影響が大きく、最も低圧の微圧レンジでは深刻な問題となる。これに対しても配線に半導体拡散抵抗を導入することでヒステリシスを低減することで解決しているの以下に記載する。

3.1.1 新ダイアフラム構造の実現

R付ダイアフラムの構造を実現するために、従来のエッチング手法であるウェットエッチングではなく、ICP-RIEによるドライエッチングを導入した。また、チップサイズは極力小さい方が好ましく、そのためには開口部面積を極力小さくする必要がある。R付ダイアフラム作製プロセスの概要を下記に記載する。

- (1)1次掘り:SOIのBOX層までのエッチング。Bosch Process と呼ばれるエッチングとエッチング側壁保護を繰り返しながら行うエッチング手法を用い、垂直、もしくは逆テーパ形状となるようなトレンチ構造を形成する。これにより、ダイアフラム寸法からの開口部の広がりゼロ以下にしている。
- (2)BOX層の除去:BHF (Buffered HF) によるウェットエッチング。
- (3)2次掘り:等方性エッチング (Non-Bosch Process) による深掘り。等方性エッチングで行うことにより、エッチング時間に伴う寸法のR形状が形成される(図8)。



図8 R付ダイアフラム

但しこの構造では、図9に見られるように、SOIウエハで実施していることによる、ドライエッチングの際にノッチと呼ばれるくぼみが酸化膜界面で発生する。これは従来構造と同じ応力集中箇所となりうるという懸念点があるため、以下で検証した。

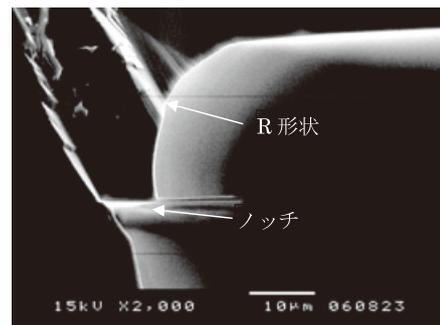


図9 ノッチ構造

ノッチは低圧以下のレンジでは問題ないが、より使用圧の高い中圧レンジでは、LP耐圧が0.9倍と逆に低下してしまうことが耐圧試験結果より分かった。図10にチップ破壊後の断面図を示すが、チップ破壊はノッチ部を起点としていくことが分かる。また、図11にはノッチ形状ダイアフラムとノッチフリーの理想的な形状のダイアフラムのLP印加時の発生応力分布を比較したシミュレーション結果を示している。ノッチ形状ダイアフラムでは、ノッチ部分が新たな応力集中部となり酸化膜の破壊応力を超える応力が発生していることが分かる。それに対しノッチフリー形状ではBOX層領域に酸化膜の破壊応力を超える応力発生は見られない。以上の結果より、LP耐圧低下の原因は、ノッチ形状であり、ノッチが新たな応力集中部となるため、Rによる応力分散効果が生かしきれないためであると結論付けた。またこれに対応するため、ノッチ形状の発生を解消し、尚かつさらなる高耐圧化実現のため、プロセスの最適化により図12の様な形状を達成している。

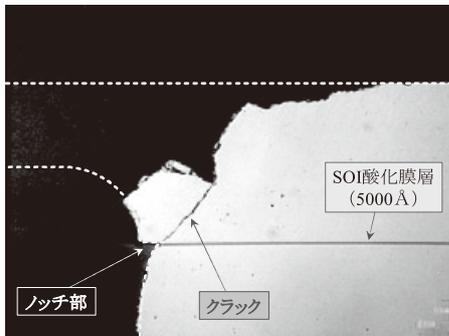


図10 チップ破壊断面観察結果

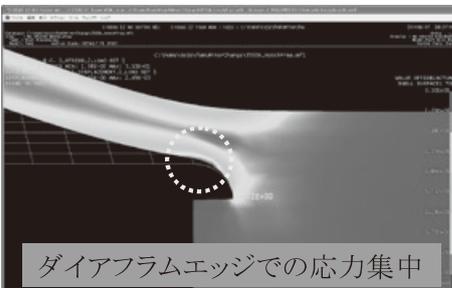


図11 ノッチ有(上)とノッチ無(下)のLP印加時の応力分布シミュレーション結果比較

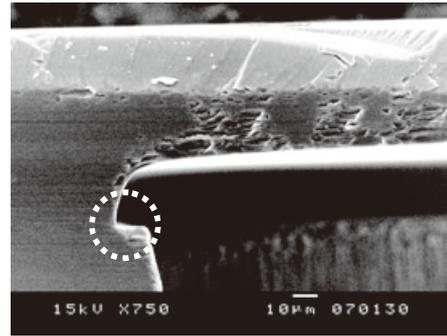


図12 ノッチフリーR付ダイアフラム断面図

3.1.2 評価結果

新ダイアフラム構造の耐圧について、各レンジ毎に従来品と比較した結果を表1に示す。全レンジとも従来構造の耐圧を基準としての耐圧向上率で表記している。微圧レンジでは従来構造の6倍以上、低圧レンジでは3.3倍以上、中圧レンジでは2.8倍以上と各レンジ大幅な高耐圧化を達成している。

以上により、従来構造に対して大幅な高耐圧化を実現する理想的なダイアフラム構造であるR付ノッチフリーダイアフラムの作製に成功している。この新ダイアフラム構造の導入により、微圧レンジ実現において課題であったスパンと耐圧のトレードオフを達成している。さらに他レンジにも導入することで、実使用環境で予想されるより強いウォーターハンマーやアコースティックショックなどの過酷な使用環境への耐性が向上され、より信頼性の高いセンサとなっている。

測定レンジ	LP耐圧評価結果 (従来構造比)
微圧	6倍
低圧	3.3倍
中圧	2.8倍

表1 耐圧結果(従来比較)

3.1.3 配線メタルレス化

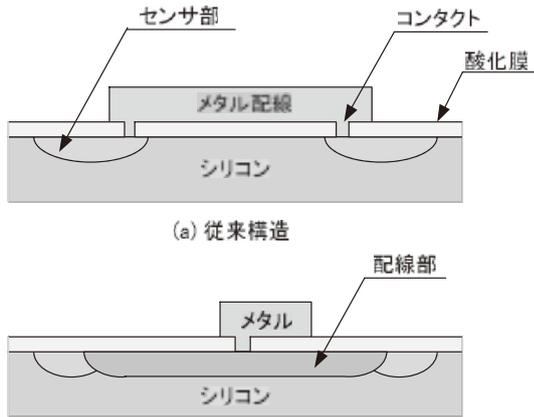
既存センサでは、チップ上に配置した個々のセンサでブリッジ回路を形成するための配線材料としてアルミを用いたメタル配線を採用していた。センサ抵抗はシリコン表面への埋め込み抵抗として形成し、シリコン表面は保護膜としての酸化膜が形成されている。メタル配線はこの酸化膜にコンタクト用の穴をあけ、チップ全面に引き回す構造を採っていた。しかしながら、この方式ではサーマルヒステリシスが大きくなることがあり、この原因が以下の2点であることが分かっている。

- ① メタルと酸化膜界面にストレスが発生する。
- ② メタルで埋め込まれたコンタクト穴が酸化膜とシリコンの界面に熱ストレスを発生させるが、このコンタクト穴が多くなる。

また、低圧レンジになるほど、チップの圧力検出感度が高くなるため、この熱ストレスの影響が顕著に出ることとなる。このため従来構造の低圧レンジではサーマルヒステリシスが大きくなり、最も低圧の微圧レンジ実現に対して、深刻

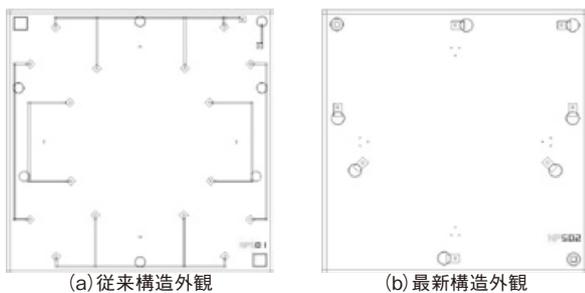
な問題となっていた。そこで、配線としてセンサ素子同様の半導体の拡散抵抗を導入し、可能な限り異種材料を排除することで、サーマルヒステリシスの低減を図った。つまり、図13に示す様に、拡散抵抗を抵抗値、電流パス方向、ブリッジバランス等を考慮して配線として引き回すことで、メタルは外部接続用のボンディングパッド用途のもののみとすることが可能となり、下記の効果が得られる。

- ① メタルが最小限となる。
- ② コンタクト穴数が半減でき、かつ、センサ部より遠ざけられる。



(a) 従来構造
(b) 最新構造
図13 チップ配線形成方法

図14に図13の内容を考慮して設計したチップレイアウトを記載する。図で確認されるパターンは主にメタル部であるがメタルが大幅に削減できることが(a)(b)図の比較により確認できる。また、差圧、静圧センサ接続用のコンタクト穴を従来構造に比べて半分以下に減らすことができている。



(a) 従来構造外観
(b) 最新構造外観
図14 チップレイアウト

3.1.4 評価結果

上記2種類のチップでのサーマルヒステリシスの実測定結果を図15示す。グラフは従来品の最大値を1とした相对比较結果である。ヒステリシス対策が功を奏し半減できていることが確認できる。

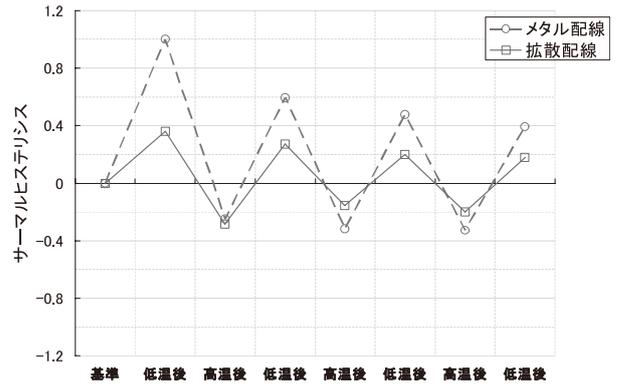


図15 ヒステリシス測定結果

前述の高耐圧化ダイアフラムと合わせることで、微圧レンジの実現が可能となり、圧力センサの全ラインナップを揃えると共に、従来構造に対し、さらなる高精度化を実現している。

4. おわりに

新たに理想的なダイアフラム構造とそれを可能にする独自プロセスを導入することで、センサの信頼性を向上させることに成功し、さらに同時に拡散抵抗配線を導入することで、精度向上にも成功している。

今後も世界を代表するピエゾ抵抗式圧力センサの老舗として、さらなる高精度化、高信頼性化、高機能化に向けてあくなき追究を続け、技術に、かつ製品に、より一層の磨きを掛けていく所存である。

参考文献

- (1) 米田雅之:ピエゾ抵抗式圧力センサの最適設計, Savemation Review, Vol.18, No2, pp.2-11(2000)
- (2) C. S. Smith:Phys. Rev. Vol.94, No.1, p42-49(1954)
- (3) K. Matsuda, K. Suzuki, Y. Kanda:The 7th International Conference on Solid State Sensors and Actuators, p221-223(1993)

著者所属

徳田 智久 マイクロデバイス生産開発部
研究開発グループ

