MEMS技術を駆使して過大圧保護機構を集積化した 超高耐圧差圧センサの開発

A differential pressure sensor with ultra-overpressure resistance and an integrated overload protection system utilizing MEMS technology

> 徳田 智久 Tomohisa Tokuda

グレースケールフォトリソグラフィ,ウエハレベル表面活性化接合,Bosch/Non-BoschコンビネーションプロセスといったMEMS技術を駆使することで、センサチップレベルで使用差圧の約630倍の高耐圧化を実現する画期的な構造を有する差圧センサを開発した。さらにこのセンサは1チップで差圧と静圧を高精度に検出可能であり、差圧レンジを超える過大圧印加時にも差圧・圧力の計測が可能である。

Utilizing MEMS technology, including grayscale photolithography, wafer-level surface activated bonding (SAB), and a combination Bosch and non-Bosch processing technique, we have developed a differential pressure sensor with a revolutionary structure capable of resisting differential pressures approximately 630 times higher than those used at the sensor chip level. Additionally, this single sensor chip can make high-precision measurements of both differential pressure (DP) and static pressure (SP), and can measure differential pressure and pressure even when pressure exceeding the DP range is applied.

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。このような差圧・圧力発信器においては、印加され る静圧が測定する差圧の数百倍もあるような非常に過酷な 環境下で使用されることがあるため,相応の耐圧が要求さ れる。一方で, 搭載される差圧センサは差圧感度と耐圧がト レードオフの関係にあり、使用差圧に対して耐圧としては高 いものでも数倍から数十倍程度である。そのため差圧・圧力 発信器にはセンサを保護するための過大圧保護機構が搭 載されるが、それによる性能の低下、製品サイズ・重量のアッ プ,コスト高等のデメリットがある。そこでアズビルが保有す るMEMS技術を駆使することで、センサチップレベルで使 用差圧の約630倍の高耐圧化を実現する画期的な構造を有 する差圧センサを実現した(図1)。さらにこのセンサは1チッ プで差圧に加えて2方向の静圧をそれぞれ独立して検出可 能である点についても特筆すべき点である(1)。



Φ7.5×5.52mm in size and 0.3g in weight.
図1 超高耐圧センサの外観写真

2. センサ概要

2.1 ピエゾ抵抗式圧力センサの測定原理

まずセンシング方式としてはピエゾ抵抗式を採用している。 測定原理としては、図2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、およびブリッジ出力電圧の関係を式(1)に示す。 $Vout=1/2 (\sigma l \cdot \sigma t) \pi 44 \cdot V0 = \Delta R/R \cdot V0 \qquad \vec{x}(1)$

($\pi 44$:<110>のピエゾ抵抗係数) この式が示すように、ダイアフラムの径方向に発生する応力 σl と接線方向に発生する応力 σt との差である σl - σt に比例 する抵抗値変化率 $\Delta R/R$ に伴う電圧Voutが出力される⁽²⁾⁽³⁾。



2.2 過大圧保護機構の構造とコンセプト

センサ過大圧保護の1stコンセプトを図3に示す。センサ素 子はピエゾ抵抗素子が形成されたセンサダイアフラムを2つ の非球面ストッパーでサンドイッチし、さらにその上下にガラ ス台座を接続した構造となっている。使用条件範囲内ではダ イアフラムが非球面ストッパーに接触することはないが、過 大圧が印加された場合はセンサダイアフラムが非球面ストッ パーに着底することでセンサダイアフラムの変形が抑制さ れ、過剰な応力の発生が抑制されることでダイアフラム破壊 が防止される。

そのため、非球面ストッパーは使用圧力以上のある圧 力(着底圧)が印加された際のセンサダイアフラムの変位に 沿った形状をしており、ダイアフラム着底時に異常変形を起 こさないようになっている。さらに図4に示すように、非球面 表面には、ハニカムパターンが形成されており、ダイアフラム 着底時のスティッキングを防止するようになっている。しかし ながら、このような構造では、ダイアフラム変形時に、非球面 ストッパーとセンサダイアフラムの接合端に応力が1点集中 してしまうことが分かっている。さらには上下の非球面でズ レが生じると発生する応力が著しく増加してしまう。そこで 我々は図5に示すように50um幅の未接合部分を選択的に形 成することで過大な応力一点集中を防いでいる。これにより 少なくとも50%程度に発生応力を低減することに成功して いる。





図4 非球面上のハニカムパターン



図5 選択接合による応力分散(FEM解析結果)

しかし、その後さらに圧力が上昇すると、ストッパーごとセンサチップ全体が変形してしまう。その場合、非球面とダイアフラムの支持部に過大な引張応力が1点集中してしまい、 センサ破壊に至ってしまう(図6)。



そこでこれを防ぐための2ndコンセプトが必要となったため,我々は図7に示す構造を実現している。このセンサ素子

は, センサダイアフラム, 2つの非球面ストッパー, 2つのシリ コンベース, 2つのガラス台座で構成されている。



1stコンセプトに加えて、非球面の裏側に接続されるベース層に非球面よりも広い受圧面を形成することを目的として、非球面との間に0.2um程度の微少な隙間を形成し、そのエリア内に貼り付き防止と圧力伝達オイルの流動性確保のための柱構造を配置している。さらに受圧面の端にはストッパー層とベース層で形成される特長的なR構造を形成している。この構造により、1つの差圧センサと2つの独立した静圧センサを有するマルチバリアブルセンサとなっている。

図8に2ndコンセプトによる過大圧保護を示す。このセン サ素子に下側から過大圧が印加されるとベース層に形成さ れた受圧エリアの方が非球面エリアよりも広いため、上向き の力が下部ストッパー層に発生する。上部ストッパー層は柱 に接触して変形が抑制されるので、1stコンセプトモデルで 過大な引張応力が発生し、破壊の起点となっていた箇所に は引張ではなく圧縮応力が発生する。その代わりに過大な 引張応力は受圧エリア外周に形成されたR構造部に発生す るが、分散・緩和される。



図8 2ndコンセプトによる過大圧保

図9にR構造による応力分散効果のFEM解析結果を示 す。ここに示す特長的な構造は、FEMによる応力分散と小 型化における最適化の結果である。以上が2ndコンセプトで ある⁽⁴⁾。



図9 過大圧印加時のR構造における応力分散(FEM解析結果)

3. 作製方法

ストッパー層作製プロセス模式図を図10に示す。まず, (a) 厚さ 250umの(100) 面シリコン基板からなるストッパー 層上に非球面形状をグレースケールフォトリソグラフィと Reactive Ion Etching (RIE)による等方性エッチング(Non-Boschプロセス)を利用して形成する。次に,(b) 同じ表面に, 異方性エッチング(Boschプロセス)を利用して静圧(SP) 用 ダイアフラムを形成するための深さ20umのリング状トレンチ 構造を形成する。(c)に示す同じ表面に,ウエハ接合時に反 対側のセンサ電極の干渉を避けるためにBoschプロセスを 利用して,深さ100umのリング状のトレンチ構造を形成する。 裏面(d)は,深さ約130um,幅約345um,曲率約360umのリ ング状トレンチ構造をNon-Boschプロセスで形成する。

図11に示すように,このエッチングプロセスは2 つのス テップで実行される。第1ステップはSF6ガスのみを利用し たエッチングを行うが,第2ステップはSF6ガスとC4F8ガス を利用したエッチングを行う。これにより,エッチング形状の 深さは浅いまま曲率を大きくすることが可能である。

最後に,(e) Boschプロセスを利用して, 差圧 (DP)および 静圧 (SP) センサダイアフラムへの圧力導入開口としての貫 通孔を形成する。



図11 2ステップエッチングプロセス

ベース層の製造プロセスの概略図を図12に示す。まず, (a) 厚さ1500umの(100) Si基板からなるベース層上に深さ 0.2um以下の受圧部をRIEにより形成。その後,(b) 同じ領 域に深さ20umの柱状構造を,Boschプロセスを用いて等間 隔に形成する。次に,(c) BoschプロセスとNon-Boschプロセ スを組み合わせた技術を用いて受圧部外周のR構造を形成 する。このエッチングプロセスは,図13に示す2つのステップ で実行される。

最初のステップをBoschプロセス、2番目のステップをNon-Boschプロセスの順で連続して実行する。これにより、エッチ ングされた部分がスリットから円形の穴に変化し、深さが約 300um,開口部の寸法が約315um,曲率が約385umのユニー クな構造が実現する。最後に、(d)Boschプロセスを利用して、 受圧部への圧力導入口となる貫通孔を形成する。



図13 2ステップエッチングプロセス

積層接合プロセスの概略図を図14に示す。2枚のストッ パーウエハ、2枚のベースウエハ、およびピエゾ抵抗を備 えSOIウエハで作製されたセンサウエハは、ウエハレベル SAB を利用して接合される。まず、(a) 上ベース層と上ストッ パー層を接合する。次に、(b) 第1の接合ウエハとセンサウエ ハを接合する。その後、(c) BoschプロセスによりSOIウエハ の基板層を完全に除去し、BOE (Buffered Oxide Etch)プ ロセスを利用してSOIウエハのBOX (Buried Oxide)層も 完全に除去する。第4に、(d) 下部ベース層と下部ストパー 層とを接合する。最後に、(e) 下部接合ウエハと上部接合 ウエハを接合する。



図14 積層接合プロセス

作製したセンサチップの断面イメージを図15に,上面からのIR顕微鏡観察結果を図16に示す。この構造により,過大 差圧が直接チップにかかった場合でも差圧 (DP)センサを 保護することができ,どちらの方向からの静圧 (SP)もそれ ぞれ独立して測定することが可能である。



図15 顕微鏡による断面観察結果



4. 実験結果

低差圧レンジと高差圧レンジでのセンサ出力特性を、そ れぞれ図17と図18に示す。1チップで高圧側/低圧側の両方 向から差圧と2方向の独立した静圧の測定値を得ることが できた。この構造により、標準使用圧力範囲の600倍以上の 圧力に対して十分な耐圧性能(従来センサの10倍以上)を有 していること実証した。

また差圧ダイアフラムそのものが保護される一方で,セン サチップには圧力が印加されるため、2方向の独立した静圧 センサの出力により圧力計測が可能であることも実証した。

さらに,繰り返し耐圧評価においては,42MPa,50,000回 の耐圧性能を実証した。





図18 高差圧レンジにおけるセンサ特性

5. おわりに

アズビル独自のMEMS技術を駆使することで他に類を見 ない画期的な構造で超高耐圧性能を有する過大圧保護機 能付差圧センサを実現することに成功した。

一方で今回の構造は非常に複雑,かつプロセス難易度が 高いためセンサの量産が困難である。そこでこの技術をさら に応用し、よりシンプル、かつ量産に適した構造で同じ機能 を有する新しいセンサを実現することで新製品を創出し、顧 客に対して新たに耐久性向上による安心、安全、小型軽量 化による快適といった価値提供を行う所存である。

<参考文献>

 (1)間々田浩一:差圧・圧力発信器の高性能,高機能化技 術, azbil Technical Review, December, 2008, pp. 24-29.

- (2)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, 2000, pp.2-11, 山武
- (3) 徳田智久: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, azbil Technical Review, December, 2009, pp.28-33.
- (4) Tomohisa Tokuda, A NOVEL PRESSURE SENSOR WITH BUILT-IN OVERPRESSURE PROTECTION UTILIZING THREE-DIMENTIONAL ETCHING AND WAFER-LEVEL STACKING TECHNOLOGY, The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2016, pp.222-225.

<著者所属>

徳田 智久 アズビル株式会社 技術開発本部マイクロデバイス部