

タッチモード容量型圧力センサ

電子デバイス研究所 山本 敏*1・鈴木 孝直*1・中尾 知*2・西村 仁*3
機器電材事業部 佐藤 昌啓*4

Touch-mode Capacitive Pressure Sensor

S. Yamamoto, T. Suzuki, O. Nakao, H. Nishimura & M. Sato

タッチモードと称される新しい方式の静電容量型圧力センサは、様々な分野で応用される可能性を秘めている。高度な微細加工が必要なこのタイプのセンサには、先進のMicro Electro-Mechanical System (MEMS) 技術が適用されている。タッチモード構造の場合、センサに外部圧力が印加されると、そのダイアフラムは対向電極側の基板に接触して保護される。このことから、タッチモード方式のセンサは従来方式に比較して、その出力特性の直線性に優れ、定格測定範囲を大きく超える印加圧力にも耐えられ、さらには過酷な環境下の工業用途にも使用可能な頑健な構造を有している、という特徴がある。当社は工業的規模での生産が可能で、かつタッチモード構造を有する静電容量型圧力センサの開発に成功した。

A new type of capacitive pressure sensor, called “touch-mode”, has great potentialities for the application to various industries. State-of-the-art Micro Electro-Mechanical System (MEMS) technologies are used in such a sophisticated type. In touch-mode operation, the diaphragm of the sensor is touching the substrate structure. For that reason, the advantages of touch-mode are near linear output, large over range pressure and robust structure that makes it capable to withstand harsh industrial field environment, compared with “non-touch” conventional pressure sensors. We have successfully developed industrial capacitive pressure sensors with above-mentioned touch-mode.

1. ま え が き

シリコン半導体から製造される静電容量型圧力センサは、他方式のセンサ、例えば当社が市販しているピエゾ抵抗型圧力センサと比較して、微圧の定格測定範囲においても高い感度が得られる、測定時における消費電力が小さい、加えてその出力特性はほとんど温度に依存しないなど、多くの優れた特徴を有している。それ故、血圧計などで代表される医療機器、あるいは工業用計器などの市場ですでに多用されているが、様々な新しい分野でも常にその応用が検討されている。しかしながら、従来方式の静電容量型圧力センサが持つ弱点がその応用を阻んでいる。特に、高圧下での耐久性と高感度が要求される応用分野では、従来方式センサの場合、そのダイアフラムの破壊強度は印加圧力に耐えられるレベルにいたっておらず、しかも本用途に必要な感度も得られていない。

タッチモード静電容量型圧力センサ¹⁾は上述の弱点を克服するために登場した。本方式のセンサにおいては、印加圧力によって変形を余儀なくされるダイアフラムが、

誘電体薄膜を中間にかいしながら、直接、対向する電極側の基板と接触する。この接触によってダイアフラムの破壊は緩和され、高圧下におけるセンサの破壊強度は飛躍的に大きくなる。また、ダイアフラム自身が一方の電極となっているため、上述したように、これが対向電極上に形成された誘電体膜と直接触れると、本センサの静電容量の出力値は従来方式のそれよりも顕著に増大する。そのため、感度の大幅な向上が可能となる。加えて、この出力特性（印加圧力 - 出力静電容量の関係）における直線性が、従来方式のそれに比較して著しく改善される。

本構造のセンサは、量産可能なMEMS技術を採用しているとともに、シリコンプレーナプロセス、異方性エッチングや陽極接合²⁾など、大量生産の実績があるピエゾ抵抗型圧力センサの製造プロセスが適用されているため、工業的規模での製造が容易である。当社は、タイヤ圧検知などで代表される定格測定範囲が高圧な用途を目標として、このタッチモード静電容量型圧力センサを開発した。本論文では、本センサの構造および製造プロセス、さらにその基本特性について述べる。

2. 構造、動作原理および設計

2.1 構造および動作原理

今回、開発したタッチモード容量型圧力センサチップ

*1 マイクロデバイス開発部

*2 マイクロデバイス開発部グループ長

*3 シリコン技術開発部

*4 センサ技術部

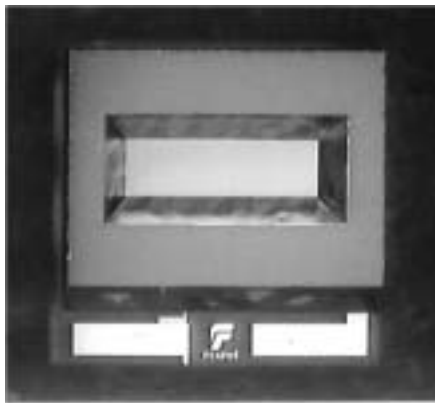


図1 タッチモード容量型圧力センサの外観
A photograph of the touch-mode capacitive pressure sensor

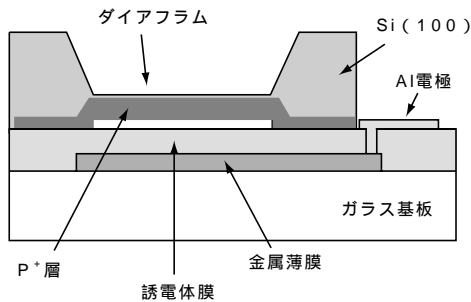


図2 センサの断面構造
Structure of cross section of the sensor

の外観を図1に示す。また、その断面構造の模式図を図2に示す。チップサイズは2.7mm x 2.7mm x 0.8mmである。シリコン(100)基板に、厚さ6μmのダイアフラムが形成してある。このダイアフラムはボロン(B;ホウ素)が高濃度にドーピングされたP+構造となっており、可動電極の役割を果たしている。一方、固定電極としてガラス基板上に金属薄膜が設けてあり、さらにその上に誘電体膜が形成されている。ダイアフラムと誘電体膜との間隔(ギャップ)は数μmである。

図3に示すように、センサに圧力が加わるとダイアフラムはその印加圧力に応じて変形し、ある圧力で誘電体膜と接触するようになる。このときの接触面を一つの電極とみなせば、誘電体膜が二つの電極に挟まれたキャパシタ構造となっている。したがって、ダイアフラムと誘電体膜の接触面積をS、誘電体膜の厚さをdとすると、キャパシタ部の静電容量Cは

$$C = \frac{S}{d} \dots\dots (1)$$

と表せる。ここで、 ϵ は誘電体膜の誘電率である。

(1)式において、dおよび ϵ は一定であり、静電容量Cは接触面積Sのみに比例する。ダイアフラムに圧力が加わると接触面積Sが変化し、この接触面積の変化を静電容量の変化として検出することで、外部圧力の測定が可能となる。

図4に、印加圧力に対する静電容量の変化を示す。ダイアフラムが誘電体膜に接触する前の領域では、圧力に対

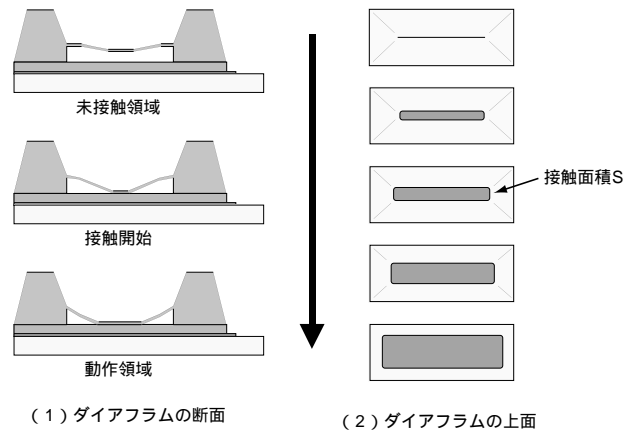


図3 タッチモード容量型圧力センサの動作原理
Principle of touch mode operation (1) cross-sectional view and (2) surface view of the diaphragm

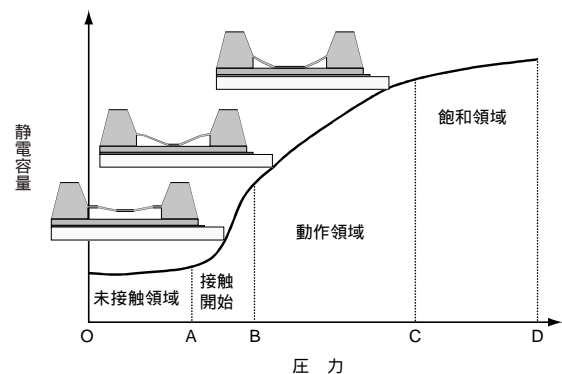


図4 タッチモード容量型圧力センサの代表的な圧力-容量特性
Typical pressure-capacitance characteristics of touch-mode capacitive pressure sensor

して静電容量はほとんど変化せず(図中OA間)、ダイアフラムが誘電体膜に接触すると静電容量は大きく上昇する(図中AB間)。ここでダイアフラムが誘電体膜に接触する点Aをタッチポイントと呼んでいる。その後、圧力に対して静電容量がほぼ直線的に増加する領域(図中BC間)が現れ、最後に静電容量の変化は飽和する(図中CD間)。

2.2 設計

タッチモード容量型圧力センサを開発するにあたり、700kPa前後の圧力範囲で高い直線性が得られること、700kPaにおける感度が0.015pF/kPa程度になること、および3.5MPa以上の圧力に耐えられることの3項目を目標に設計を行った。これらの目標を満足するためには、表1に示す項目についてそれぞれ最適化する必要がある。

出力特性の直線性は、ダイアフラムの形状と関係がある。ダイアフラムの形状が長方形の場合、辺の長さの縦横比が1:3程度になるように設計すると、出力特性の直線領域を大きくとることができる。この直線領域がセンサの動作圧力範囲になるように、ダイアフラムの厚さとギャップの幅を最適化する必要がある。ダイアフラムを薄くする、あるいはギャップを狭くすると、タッチポイントは低圧側にシフトするので、最適動作圧力範囲は低くなる。逆にダイアフラムを厚くする、あるいはギャ

表1 ダイアフラムとギャップの設計結果
Design of diaphragm and gap

検討項目	検討目的	設計値
ダイアフラム形状	直線性	0.5mm × 1.5mm
ダイアフラム厚	タッチポイント 感度 耐圧	6 μm
ギャップ	タッチポイント 感度 耐圧	3 μm

ブを広くすると、タッチポイントは高圧側にシフトし、最適動作圧力範囲も高くなる。しかしながら、ダイアフラムの厚さやギャップの大きさは、センサの感度や耐圧特性に大きく影響するため、これらを考慮に入れた設計が必要となる。それぞれの項目についてシミュレーションなどにより検討した結果、表1に示すような設計値を得た。

3. 製造方法

3.1 製造プロセス

図5に製造プロセスの概略を示す。まず、厚さ300 μm、結晶方位(100)のn型Si基板を酸化した後、LPCVD法でSiN膜を成膜する。次にKOH(水酸化カリウム)溶液を用いた異方性エッチングによりギャップを形成する。さらにギャップを設けた面からボロンを高濃度にドーピングしてP⁺層を形成する。このP⁺層の深さがダイアフラム

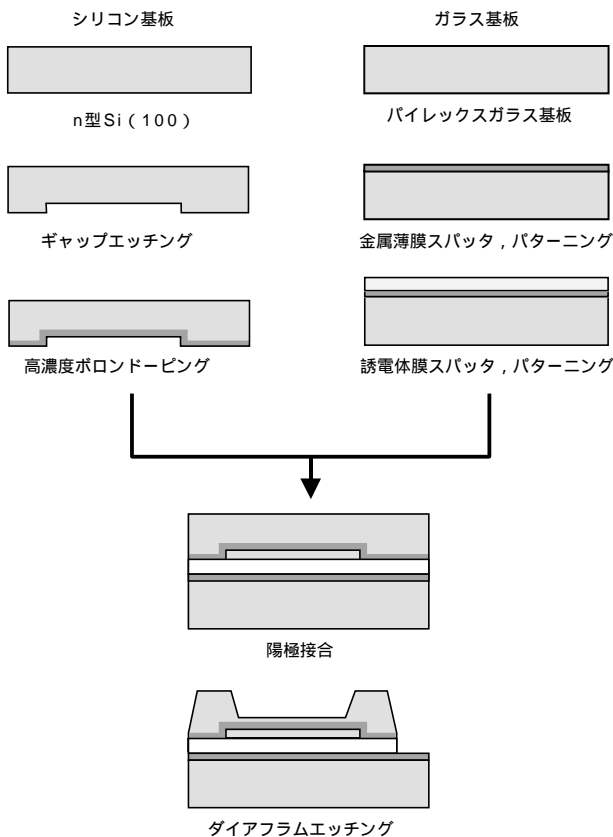


図5 センサの製造プロセス
Schematic process flow of the sensor

を形成した際の厚さとなる。一方、厚さ500 μmのピレックスガラス基板の上に、固定電極である金属膜をスパッタにより成膜し、その後パターニングを行う。この上に誘電体膜を、同じくスパッタにより形成する。

こうして得たシリコン基板とピレックスガラス基板とを、ギャップ面と誘電体膜が対向するようにして陽極接合を行う。接合後、濃度24wt%、温度80 °CのKOH溶液によりシリコン基板を異方性エッチングして、P⁺層のダイアフラムを形成する。最後に各センサチップにダイシング(切断)し、電気的特性、機械的特性を評価する。

3.2 エッチストップ技術

厚さが数 μmと非常に薄いダイアフラムを精度良く形成するため、新たに高濃度P⁺層をエッチストップ層とするエッチストップ技術を採用した。以下にその原理を述べる。

KOH溶液のシリコンに対するエッチングレートは、シリコンの結晶面方位以外にも、KOH溶液の濃度や温度に大きく依存する。また、シリコン中にドーピングされたボロンの濃度にも依存する³⁾。図6は、シリコン(100)面に対するKOH溶液のエッチングレートが、ボロン濃度に対してどのように変化するかを示している。ボロン濃度が10¹⁹ atm・cm⁻³以下では、エッチングレートはボロン濃度に依存せず一定である。ボロン濃度が10¹⁹ atm・cm⁻³を超えるとエッチングレートは急激に減少し、10²⁰ atm・cm⁻³では数十分の一となる。

このエッチングレートのボロン濃度依存性を利用し、ダイアフラムを形成している。すなわち、ダイアフラムとして残したい深さまで10¹⁹ atm・cm⁻³以上のボロンをドーピングすると、エッチングの際、この領域ではエッチングレートが減少するため、目標とするダイアフラム厚さでエッチングがほぼ停止する。したがって、上記ボロン濃度を制御することで、所望する厚さのシリコンダイアフラムを精度良く形成できる。

4. 基本特性

製造後のタッチモード容量型圧力センサについては、

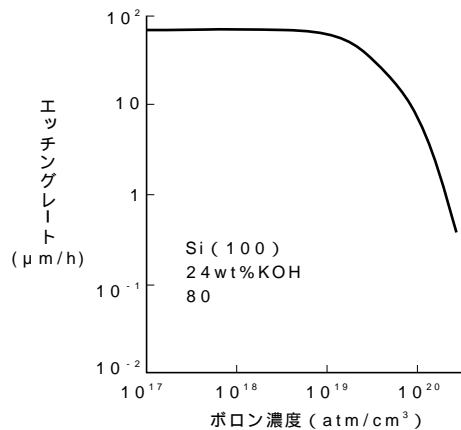


図6 (100)シリコンにおけるエッチングレートとボロン濃度の関係
Etch rate of (100) Si as a function of boron concentration

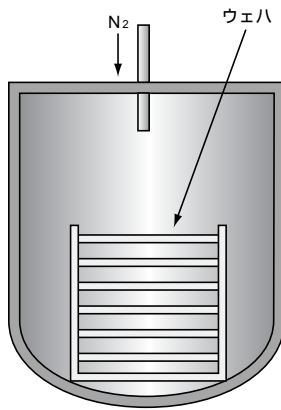


図7 加圧チャンバ
Schematic diagram of pressure chamber

十種類にもおよぶ機械的特性、電気的特性の評価がなされる。本センサは高圧測定用途を目標に開発しているので、なかでも耐圧特性と圧力 容量特性が重要となる。ここではこれら二つの特性の評価方法と実際の評価結果について述べる。

4.1 耐圧特性

タッチモード容量型圧力センサを高圧測定用途、例えばタイヤ圧の検知に用いる場合、測定する圧力範囲は通常250～700kPa程度である。しかしながら、その使用方法によっては、測定圧力範囲をはるかに超えるような高い圧力がセンサに加わる場合がある。そのため、センサには3.5MPa以上の高い破壊耐圧が要求される。

タッチモード容量型圧力センサの高圧下における破壊は、ほとんどの場合ダイアフラムに発生するクラックが原因である。ダイアフラムにクラックが発生すると出力、つまり圧力に対する静電容量の変化が得られなくなる。そこで、作製したセンサを一定時間高圧下に放置した後、センサの出力特性を測定することでダイアフラムの破壊強度を評価した。

図7は、センサに高圧を印加するために用いられるチャンバの断面図である。作製したセンサを窒素ガスにより5MPaまで加圧できる仕様になっている。本センサに対しては、はじめ4.2MPaで1時間、ついで3.5MPaで24時間圧力を印加した後、センサの出力特性を測定することで耐圧性を評価した。

ダイアフラムの破壊強度は、ダイアフラムの厚さやギャップの幅のほかにも、ダイアフラムの表面形態に大きく依存する⁴⁾。ダイアフラムの表面形態はエッチング条件と密接に関係しており⁵⁾、ダイアフラムの破壊強度を向上するには、エッチング条件を含めた最適化が必要となる。これらのことを詳細に検討した結果、われわれは破壊強度が3.5MPa以上のセンサを再現性良く製造することが可能となった。

4.2 圧力 容量特性

圧力に対する静電容量の変化、すなわち圧力 容量特性は、タッチモード容量型圧力センサにおける最も重要な特性である。この測定から得られる圧力 容量曲線を

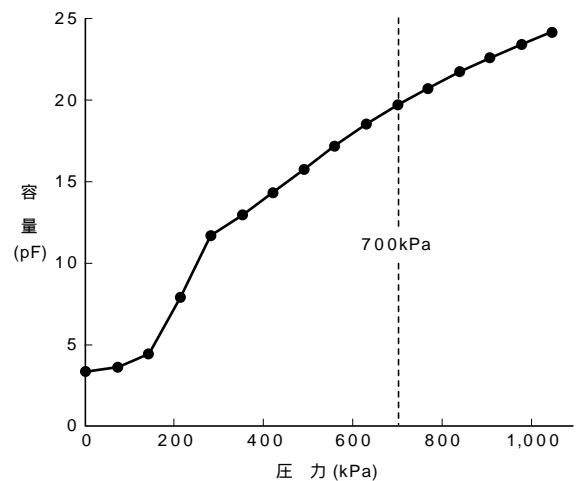


図8 本開発センサの圧力 容量特性
Pressure-capacitance characteristics of the sensor

を用いて、センサの感度や直線性が求められる。

図8に、本センサについて実測した典型的な圧力 容量特性を示す。タッチポイントの圧力は約150kPaであり、その後280kPaにかけて大きく静電容量が変化する。圧力が300kPaを超えると静電容量は圧力に対してほぼ直線的に増加する。この結果から本センサは、700kPa前後の圧力で感度が0.016pF/kPa、非直線性が1.3%FS(600～800kPa)となっており、設計値と良く一致していることが確認された。

5. む す び

タッチモード容量型圧力センサはその名が示すとおり、ダイアフラムが誘電体膜に“タッチ”して外部圧力を検知するセンサであり、高い耐圧性を有することが大きな魅力である。当社はこの魅力ある特徴を活かすため、高圧での検知が要求される用途向けにタッチモード容量型圧力センサを開発した。実際に製造したセンサは耐圧性に優れ、タイヤ圧の検知用など、測定圧力範囲が700kPaレベルの用途には十分使用できることを確認した。今後、上述した優れた特性をふまえて、本センサの用途を種々の分野へ発展させる予定である。

参 考 文 献

- 1) Wen H. Ko and Qiang Wang : Proc. of 10th Annual International Workshop on MEMS, Nagoya, Japan, pp.284-289, January 1997
- 2) H. Hebiguchi, S. Shouji and M. Esashi : Technical Digest of The 9th Sensor Symposium, pp.31-34, 1990
- 3) H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger and H. Baumgartel : J. Electrochem. Soc., Vol.137, p.3626, 1990
- 4) 山本, 佐藤, 西村, 中尾 : タッチモード容量型圧力センサの破壊強度に及ぼすダイアフラム表面形態の影響, 平成13年電気学会全国大会講演論文集, 3-1018, 2001
- 5) 岸, 岡田, 谷川原 : 真空, Vol.29, p.85, 1986