ピエゾ抵抗型半導体式加速度センサにおける 感度と強度の形状依存性

正 員 小幡 勤*

Shape Dependence of Sensitivity and Strength on a Piezoresistive Semiconductor Accelerometer

Tsutomu Obata*, Member

This paper reports the fabrication of a multi-axis accelerometer with piezoresistive detection using the bulk micromachining technique. The evaluation is attempted in the manner of using a computer simulation (FEM) and fabricating the sensors.

Two-axis detection sensors were fabricated for this experiment. These sensors were estimated for two views of a ribbed structure diaphragm and a mass shape. The samples consisting of a ribbed structure diaphragm gave higher output signal than that of the sensor with diaphragm only. This result shows that the ribbed structure affords the effective stress distribution to the piezoresistive elements on the rib. On the other hand, the mass shape had influence on the sensing performance and structural strength of the samples. The samples with square shape mass didn't indicate better properties than that of polygon shape. The stress isn't effectively generated on the sensor elements, because the stress concentrates at the edge of mass. The stress at the edge of mass causes destruction to sensors in fabrication process and has a harmful effect on fabrication yield.

These results are in agreement with the calculation of computer simulation (FEM) and show that the optimization of the diaphragm structure and the mass shape is important for achieving a high sensitivity and process yield for product development.

キーワード：半導体，加速度センサ，エッチング，シミュレーション

Keywords : semiconductor, accelerometer, etching, simulation

1. まえがき

加速度センサ^{(1)~(5)}は主に自動車用として用いられ，エアバック等に内蔵化されるものは $\pm 10\text{G}$ ~ $\pm 100\text{G}$ 程度の高い加速度の検知を対象としている。また，近年のアミューズメント機器（携帯ゲーム機器，アーケードゲーム機器）や，モバイルエンターテインメント機器まで発展してきた携帯電話までその用途は拡大してきている。このような機器は重力加速度のような低加速度領域（ $\pm 1\text{G}$ ）を検出対象とし，しかも携帯機器搭載の場合，小型化，低消費電力化が強く求められる。しかしながら，小型化とセンサ感度はトレードオフの関係にあり⁽⁶⁾⁽⁷⁾，小型化に際してはセンサ構造

の最適化が必要となってくる。バルク型の場合，小型化と感度を両立しようとする，過大加速度入力時のセンサの信頼性が問題になってくる。この点で現在市販されているセンサは，オーバークストッパー⁽⁸⁾などを設けることで必要とされる耐衝撃強度の確保を行っている。しかし作製プロセス中での破壊や，ストッパーが機能する加速度以下の入力に対しての強度を得るという観点からも，素子部自身の強度を高めることも重要である。

本論文では，2軸検出ピエゾ抵抗型半導体式加速度センサを試作し，その形状の違いによって生じる出力や強度への影響を調査，報告する。試作したセンサはシリコン基板上にプレーナー技術によってピエゾ抵抗回路を作成，外觀は，破壊強度の観点から最も感度が得られやすいビーム単構造⁽⁹⁾とはせず，エッチングによりキャビティを作成している。実験では，このダイヤフラム構造と圧力センサ等で用いられるリブ付ダイヤフラム構造⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾との比較を行った。また，重錘形状が特性や信頼性へ与える影響も調査した。

* 日本学術振興会 科学技術特別研究員
Japan Society for the Promotion of Science Domestic Research Fellow
富山県工業技術センター 企画管理部
〒933-0981 富山県高岡市二上町 150 番地
Toyama Industrial Technology Center
150 Futagami-machi Takaoka-city, Toyama 933-0981

なお、低 G に対応するためにシリコン重錘部にはガラス付加重錘⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹²⁾を取り付け、慣性重量を増やしている。

2. 作製プロセスと検出原理

すべての作製プロセスは、富山県工業技術センター・マイクロマシン研究設備を用いて行った。使用したシリコン基板は、N-(100)，抵抗率 4～8Ωcm，厚み 200μm のものと、N-(100)，抵抗率：2.4～3.6Ωcm，活性層/BOX 層/ベース層＝10μm/0.5μm/450μm の SOI 基板の 2 種類を使用した。なお、これらの基板は調査目的に応じて選択、使用している。

ダイサーによって 1 inch サイズにカットされた基板は熱酸化，BBr₃ ソースによるボロン拡散，アルミ蒸着等のプロセスを経てピエゾ抵抗型検出回路が形成される。熱拡散によって形成されたピエゾ抵抗は、スヘリカルドリル法によって、約 3μm の拡散深さであることを確認した。裏面はアルカリ溶液(TMAH，25%，90℃)あるいは、Si-DeepRIE 装置を用いたエッチングによってキャビティ構造を作製，中心部のみガラス付加重量の取り付け部を兼ねるシリコン重錘が残されている。エッチング後，陽極接合法によって 10mg 程度のガラス付加重錘を取り付け，ダイサーにてチップに分割している。接合されるガラスは，接合面側をあらかじめ浅くマス目状にダイサーでプレカットしておき，接合後裏面からもう一度カットすることで重錘と支持体を分離している⁽⁵⁾。なお，リブ付ダイヤフラム構造の試料は，抵抗回路作製前に基板の回路側から数 (<5) μm だけ，TMAH によるエッチングを行っている。試作されたセンサチップの構造を図 1 に示す。センサチップの大きさは約 3mm 角，厚さは 1.2mm である。ピエゾ抵抗は，約 5kΩ の抵抗値を持ち，図 1 のように直交する 2 つの同軸線上にある応力集中点 8 カ所に 1 素子ずつ配置される。<110> 方向に配向した 4 つの素子によって構成される 2 つのブリッジ回路によって，X,Y 軸の各出力を得る。分割されたチップはセラミックパッケージにシリコン樹脂を薄く塗布することで接合し，パッケージとの接着に起因する応力を少なくしている。なお，シリコン樹脂のような柔らかい接着剤での固定方法は，本実験でおこなうような静加速度による評価結果への影響は少ないと考えている。また，チップとパッケージ電極の接続は，20μm のアルミ線をウエッジボンダーにて空中配線している。(図 2)。

例として，完成したセンサに X 軸方向に加速度を加える

図 1 センサの概観と検出用等価回路

Fig. 1. Cross-sectional view and circuit diagram of a 2-axis piezoresistive accelerometer.

図 2 試作評価したセンサ

Fig. 2. Photograph of a packaged accelerometer.

表 1 加速度入力と各ピエゾ抵抗値の増減

Table 1. Relationship between the acceleration and change of the piezoresistors.

項 目		X 軸				Y 軸			
		R1x	R2x	R3x	R4x	R1x	R2x	R3x	R4x
X 軸加速度入力	応 力	E	C	E	C	0	0	0	0
	抵抗値	+	-	+	-	0	0	0	0
Y 軸加速度入力	応 力	0	0	0	0	E	C	E	C
	抵抗値	0	0	0	0	+	-	+	-

*C: 圧縮応力 E: 引っ張り応力

と慣性力により重錘が変位し、ダイアフラム面上に配置されたピエゾ抵抗素子 $R1x \sim R4x$ に応力が加わる。このとき、圧縮応力が加わると抵抗値は減少し、引っ張り応力が生じると抵抗値は増加する。ピエゾ抵抗素子に生じる応力と抵抗値の変化の関係を表 1 に示す。これらの素子で、図 1 に示されるようなホイートストンブリッジ回路を形成すると、抵抗値の変化に比例した電圧出力が得られる。本実験では、ブリッジ印加電圧として DC5V を与え、出力電圧の評価を行っている。

3. 評価用加速度センサの作製

評価はダイアフラムの形状とシリコン重錘形状の 2 点に絞って行った。ダイアフラム形状の比較は、ダイアフラム上のピエゾ抵抗素子がある部分をリブ形状に厚くしたもの

図 3 ダイアフラム形状

Fig. 3. Cross-sectional view of diaphragm shape.

図 4 シリコン重錘形状

Fig. 4. Shape of silicon mass.

と通常の平板状のものを比較している。また、シリコン重錘形状の比較は、シリコン重錘を四角形状にした場合と多角形状にした場合を比較する。

〈3・1〉 **ダイアフラム形状依存性** 比較する形状を図 3 に示す。図 3(a)は、ピエゾ抵抗を配置している同軸線上に 100μm 幅、ダイアフラムの厚みプラス 5μm のリブを付加形成している。図 3(b)は、通常のダイアフラム上にピエゾ抵抗を配置している。評価を行うセンサは、10μm 厚のダイアフラムのものとそれに 15μm 厚のリブが組み合わされたものの 2 種類を試作した。通常のシリコン基板を使用し、キャビティの加工はアルカリエッチングによって行った。ダイアフラムの膜厚は、SEM によって確認している。

〈3・2〉 **シリコン重錘形状依存性** 試作したシリコン重錘の形状を図 4 に示す。(a)は四角形状、(b)が多角形状になっている。これら 2 つの正確な形状は通常のアルカリエッチングで実現することは困難であるので、本研究ではシリコンを垂直に加工可能な DeepRIE 装置を用いてエッチングを行っている。これによりマスク設計通りのパターンでエッチングが行われるため、形状の違いによる比較が容易に可能になる。また、ダイアフラムの正確な膜厚と、エッチングストッパー効果を得るために 10μm の活性層厚を持つ SOI 基板を使用した。

(a) Ribbed structure diaphragm

(b) Diaphragm

図 5 シミュレーション結果 (ダイアフラム形状)

Fig. 5. Stress distribution by FEM simulation (Diaphragm).

以上のサンプル試作とともに有限要素法(FEM)による簡易的なシミュレーションを行い、実際のサンプル評価と併せて考察を行う。なお、センサの評価は、重力加速度を利用することで、静的な出力特性を簡易的に測定している。測定はX-Y平面上でセンサを360°回転させることで行い、その出力特性を評価している。評価に使用される電源電圧はDC5Vの定電圧である。

4. シミュレーションと試作評価

〈4・1〉 ダイアフラム形状依存性 コンピュータによるシミュレーションは、ダイアフラム領域内でセンサの1軸方向に、1Gの加速度が加わることを想定して計算を行った。ここで、シミュレーションはピエゾ抵抗素子に流れる電流方向の応力成分について行われており、色の濃い部分に応力が発生している。応力分布図5(a)のようなリブを組み合わせた構造では、リブの軸線上に応力が分布しており、シリコン重錘の角への応力集中はダイアフラム構造よりも

軽減されている。一方、図5(b)のダイアフラム構造の場合、応力はシリコン重錘の角に集中してしまうため、ピエゾ抵抗素子が配置された部分にはあまり分布していない。しかし、外枠近傍に付近においては、(a)の方が若干分布は抑えられているものの、あまり大きな差がみられなかった。このことよりこれらの構造の有意性は、重錘側の抵抗素子に大きく影響するものと考えられる。図6は、シリコン重錘近傍のピエゾ抵抗素子に加わる応力値を、リブ厚15 μm で固定してダイアフラムの膜厚を変化させて計算した結果である。このように通常のダイアフラム構造に比べ、リブを付加した方が効果的にピエゾ抵抗素子に応力が分布している。このことはセンサ感度に大きく影響するものと予想され、同じ膜厚のダイアフラムであればリブ構造を付加した方が出力は大きいと期待される。また、シリコン重錘角への過度の応力集中は破壊強度の劣化につながる為、センサ感度の点も併せてリブ付ダイアフラム構造が、ダイアフラム構造に比べ優れていることが予想される。ここで、ダイアフラム構造において膜厚が5 μm 以下になったとき、逆転現象がみられる。リブ付ダイアフラム構造では10 μm から5 μm まではほぼ直線的に応力が増加していくが、ダイアフラム構造のみのものは、8 μm 以下で急激な増加がみられる。しかし、この領域ではバルーン効果⁽¹³⁾の影響や、ダイアフ

図6 ピエゾ抵抗素子への応力 (シミュレーション)

Fig. 6. Relationship between diaphragm thickness and stress on piezoresistor.

図7 試作したセンサ特性 (回転動作出力)

Fig. 7. Output voltage of sensors.

(a) Square

(b) Polygon

図8 シミュレーション結果 (シリコン重錘形状)

Fig. 8. Stress distribution by FEM simulation (Silicon Mass).

図9 ピエゾ抵抗素子への応力（シミュレーション）

Fig. 9. Relationship between diaphragm thickness and stress on piezoresistor.

図10 試作したセンサ特性（回転動作出力）

Fig. 10. Output voltage of sensors.

ラム厚さ方向の中心点も抵抗拡散深さになり、出力直線性への影響が考えられる。また、リブ付きダイアフラム構造においてもダイアフラムの厚さが、リブ部の厚みより極めて薄くなってくると重錘の支持はリブ部が主体となってくる。この時、そのリブとダイアフラムの境界においては応力の逆転現象が起こるため、応力集中による破壊が起こりやすくなると考えられる。以上から、ダイアフラムが薄い領域では出力向上効果は若干あるものの、実用に適さないと思われる。図7に示すようにリブ付ダイアフラム構造で作製したセンサは、ダイアフラム構造のセンサよりも出力が大きい。ここで、試作したセンサのシミュレーションにおける1G入力時のダイアフラム構造：リブ付ダイアフラム構造の応力変化量比は、1:1.87、実際のサンプルのブリッジ出力比も1:1.88とほぼ一致しており結果の妥当性がみられた。なお、1Gの負荷を重錘近傍のピエゾ抵抗素子に与えた際の応力変化量 $\Delta\sigma$ は

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_t \quad \dots\dots\dots (1)$$

として求めた。 σ_1 はダイアフラム上のピエゾ抵抗素子に流れる電流方向の応力成分、 σ_t は横方向の応力成分である⁽¹⁴⁾。

以上のことから同じ膜厚であれば、一般的なダイアフラム構造よりもそれとリブ構造を組み合わせた方が、高いセンサ感度が得られることがわかった。

〈4・2〉 シリコン重錘形状依存性 シミュレーションは図4の設計で、1Gの加速度を加える設定で行った。図8(a)に示すように、四角形状のものはその角に応力が集中している。また、図8(b)の多角形状のものはピエゾ抵抗素子が配置されている短辺部分に応力が集中している。両構造共に、外枠近傍では差はみられない。図9はそれぞれの形状における素子部応力の膜厚依存性を示したものである。両者共に図6のダイアフラム構造のものと同様に5um付近で非線形的な応力の増加が見られる。2者を比較すると、応力は多角形状の方がピエゾ抵抗素子上に効果的に分布していることがわかる。ダイアフラム構造の場合、シリコン重錘の形状は多角形状にすることによってリブ付ダイアフラム構造と同様の効果が得られることが予想される。

試作ではSOI基板の活性層厚10umのダイアフラム構造に各々の形状でシリコン重錘を作製している。重力加速度によって評価した結果が図10である。多角形状を持つセンサよりも四角形状のセンサの感度は明らかに小さい。また、シミュレーションの結果と式(1)で求めた応力変化量比、四角形：多角形は、1:1.65だったのに対し、試作したサンプルの出力比も1:1.61とほぼ同じ値が得られた。信頼性においても四角形状のセンサは、ハンドリングやプロセス中での破壊強度がかなり劣っていた。これは四角形状のセンサは、劈開方向に正確に配向した重錘をもち、しかもその角に極端な応力分布を持つことから破壊しやすい構造になっていたためと思われる。

以上の結果よりシリコン重錘は多角形状のほうが四角形状に対して高い感度と強度が得られることがわかった。

5. 考 察

実験結果からダイアフラムやシリコン重錘の形状が、センサの感度や破壊強度と深く関係があることがわかった。

リブを付加したものは、ダイアフラムを薄くするに従って、その特性はビームのみで構成されるビーム型センサに近くなっていく。フレキシブルになっていくダイアフラムに対して、リブ構造体はそれよりも変形が起こらないため、重錘の支持はほとんどリブ構造体によって行われる。そのため、リブ上に変形によって生じる応力が集中し、ダイアフラム上にはあまり分布していないものと思われる。

また、重錘形状においても、その形状による応力分布への影響が見られた。応力は主に角部に集中するが、それを形成する面の角度が小さいとよりその度合いは大きくなる。極端な角部への集中は破壊にまで及ぶことも考えられる。表2に重錘作製工程から、最終工程までの良品率を示す。不良品は、すべて重錘エッジ部分から破壊で、角部を起点として劈開方向に伝搬するモードが大半を占めた。多

表2 重錘形状と良品率
Table 2. Process yield for silicon mass shape.

重錘形状	良品	不良品*	良品率
四角形	1	8	11%
多角形	7	2	78%

*重錘近傍で破壊したサンプル

表3 再試作したセンサの特性
Table 3. Sensor chip specification.

項目	単位	特性
外形寸法	mm	3.0×3.0×0.7
感度	X	mV/G
	Y	mV/G
他軸感度(±1G)	%FS	<5
電源電圧	V(DC)	5

角形状のものの破壊も見られたが、ダイアフラムに対し垂直なエッチングプロファイルであることが原因と思われる。また、多角形状のものは面で構成される角部の角度も大きく、また素子部近くに角部が配置されていた為、四角形状に比べ効率的な素子への応力集中と破壊強度を得られたものと思われる。しかし、今回の実験では角部の位置が素子に近かったことが好影響を与えたとも考えられ、角部が素子から離れた配置になったときは、強度は変わらないもののセンサ出力にはあまり貢献しないものと考えられる。

本実験から、リブを組み合わせたダイアフラム構造や重錘の形状に関する応力分布の検討は、センサの性能、製造歩留まり、信頼性に対して有効であることがわかった。リブ付きダイアフラム構造においては、その効果的なリブへの応力集中により、ダイアフラム構造に比べ1.8倍の出力向上がみられた。また、重錘形状も多角形状にすることで四角形状に比べ1.6倍の出力の向上と7倍の破壊歩留まりが得られた。本論文結果に基づき、リブ構造をもった小型のセンサ（リブ厚：約13μm ダイアフラム厚：約8μm、ガラス重錘約6mg）を再試作した結果を表3に示す。

6. むすび

ピエゾ抵抗式半導体型加速度センサにおける感度と強度の形状依存性について調査した。コンピューターシミュレーションによる検討は、センサの設計に対して有効な手段であることがわかった。また、センサ構造を最適化することで、高感度で信頼性を有するセンサの開発が可能であることを示した。

謝辞

本研究の為に、研究設備を開放していただいた富山県、富山県工業技術センター、職員の皆様に深く感謝いたします。

本研究は、平成14年度日本学術振興会 科学技術特別研究員事業によって行われた。

(平成14年9月13日受付, 平成15年3月7日再受付)

文 献

- (1) K.Suzuki and H.Tanigawa: "History of Silicon Accelerometer", *T. IEE Japan*, Vol.116-E, No.7, pp.252-255 (1996-7) (in Japanese)
鈴木健一郎・谷川 紘:「シリコン加速度センサの開発の流れ」, 電学論E, **116**, 7, pp.259-255 (1996-7)
- (2) L.M.Roylance and J.B.Angell: "A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer", *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-26, No.12, pp.1911-1917, Dec. (1979)
- (3) H.V.Allen, S.C.Terry, and D.W.De Brain: "Accelerometer Systems with Built-in Testing", *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp.381-386 (1990)
- (4) K.Okada: "Tri-Axial Piezoresistive Accelerometer", *Tech.Digest of The 11th Sensor symposium*, pp.245-248 (1992)
- (5) M.Hashimoto, M.Inaba, T.Suzuki, and T. Takizawa: "2-Axis and 3-Axis Silicon Piezoresistive Accelerometers", *Tech. Digest of The 15th Sensor Symposium*, pp.55-58 (1997)
- (6) H.Fujita: "MEMS Development in a Past Decade and its Future Prospects", *T.IEE Japan*, Vol.117-E, No.8, pp.401-406 (1997-8)
- (7) T. Tschan, N.de Rooij, and A. Bezing: "Analytical and FEM Modeling of Piezoresistive Silicon Accelerometers: Predictions and Limitations Compared to Experiments", *Sensors and Materials*, 3, 4, MYU, Tokyo, Japan, pp.189-203 (1992)
- (8) J.T.Suminto: "A Wide Frequency Range, Rugged Silicon Micro Accelerometer with Overrange Stops", *IEEE*, pp.180-185 (1996)
- (9) 橋本浩幸ら: "SOI マイクロマシニングによるピエゾ抵抗型3軸加速度センサの開発", 第18回「センサ・マイクロマシンと応用システム」, p.59 (2001)
- (10) Y.Takagi, M.Hashimoto, and H.Nishimura: "High Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensor", *Tech. Digest of The 12th Sensor Symposium*, pp.139-142 (1994)
- (11) A.Yasukawa, M.Shimazoe, and Y.Matsuoka: "Simulation of Circular Silicon Pressure Sensors", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-36, pp.1295-1302 (1989)
- (12) O.Torayashiki, A.Takahashi, and R.Tokue: "Capacitive Type 3-Axis Accelerometer", *Tech. Digest of The 14th Sensor symposium*, pp.19-22 (1996)
- (13) S.Timoshenko: "Theory of Plates and Shells", McGraw-Hill, p.59, (1940)
- (14) S.Tanaka, T.Yamaguchi, H.Osanai, and T.Shinmem: "Silicon Diaphragm Piezoresistive Pressure Sensors", *Fujikura Densen Gihō*, Vol.66, pp.1-8 (1983)
田中重信・山口哲夫・小山内裕・新免 徹:「半導体圧力センサ ―総論―」, 藤倉電線技報, 第66号, pp.1-8 (1983)

小 幡 勤

(正員) 平成3年3月富山大学工学研究科修士課程修了。同年、北陸電気工業(株)に入社。主に抵抗器、センサ、SiGe-MBE成長法の開発に従事。平成13年科学技術振興事業団科学技術特別研究員, 平成14年日本学術振興会科学技術特別研究員, 現在に至る。工博。