半導体圧力センサにおける非線形特性の温度依存性[†]西原元久*・嶋田 智*・田辺正則*
山田一二*・松岡祥隆**Temperature Dependence of Non-Linear Characteristics
in Semiconductor Pressure SensorsMotohisa NISHIHARA*, Satoshi SHIMADA*, Masanori TANABE*,
Kazuji YAMADA* and Yoshitaka MATSUOKA**

This paper discusses the temperature dependence of the nonlinearity in silicon diaphragm piezoresistive pressure sensors. Minimization of the temperature dependence is very important in designing high-precision pressure sensors which can be used over the wide temperature range. The amount of temperature dependence can be evaluated quantitatively by using the non-linear characteristics formula of the piezoresistive effect in p-type silicon diffused layers. From the characteristic analysis of silicon diaphragms in {110} and {100} planes by this method, the following results are derived. (1) The amount of the temperature dependence of the non-linear error increases in proportion to the increase in strain added on the silicon diaphragm. (2) Optimum gauge pattern which minimizes the non-linear error and its temperature dependence is found to exist on the {110} plane.

Using these results, high-precision semiconductor pressure sensors are developed. The specifications are as follows: (1) The non-linear error is less than $\pm 0.1\%$. (2) The output voltage is larger than 65mV/V . (3) The operating temperature range is between -40°C and 120°C .

Key Words: semiconductor pressure sensor, silicon diaphragm, piezoresistive effect, gauge pattern, nonlinearity

1. ま え が き

シリコン (以下 Si と略記) のピエゾ抵抗効果^{1)~3)}を利用した Si ダイアフラム形半導体圧力センサは、工業計器⁴⁾、自動車エンジン制御⁵⁾を始めとして応用分野が拡大かつ多様化し、圧力計測の分野において重要な位置を占めつつある。これに伴って計測精度も 0.5% 級から 0.2% 級へ、さらに近年 0.1% 級の高精度化が要求されるようになった⁶⁾。また、一方でセンサの高出力化や使用温度範囲の拡大が要求されている。

しかしながら半導体圧力センサの場合、センサの高精度化と高出力化は相反する問題を含む。すなわち、センサの高出力化に伴ってその非直線誤差が増加し^{7), 8)}、さらに非直線誤差が温度によって変化する現象^{9), 10)}が生じるためである。非直線誤差の温度依存性は、ダイアフラムに加えられるひずみ量が大きくなるに従って顕著になるが、これはピエゾ抵抗効果を利用したセンサ特有の現象である。この現象は、広い温度範囲にわたって高精度かつ高出力な圧力センサを開発する上で障害となっている。

しかし従来、非直線誤差の温度変化が生じる原因やその大きさについて明確にされていない。さらにまた高精度で高出力な半導体圧力センサを開発するための理論的裏付けに明確でなかった。

本論文は、上記問題点を解析によって明らかにし、半導体圧力センサの高精度化への要求に対する解決策の一つを与えることを目的とする。そのため、先に筆者らが報告した ϕ 形拡散ゲージ抵抗におけるピエゾ抵抗効果の非線形特性とその温度依存性を現象論的に厳密に表現したピエゾ抵抗特性式^{8), 11)}と、Si ダイアフラムの非線形特性の解析手法¹²⁾を用いて、半導体圧力センサの非直線誤差とその温度依存性を定量的に解析

[†] The 2nd Sensor Symposium で発表 (昭 57・5)

* (株)日立製作所日立研究所 日立市久慈町 4026

** (株)日立製作所那珂工場 勝田市市毛 882

* Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Hitachi

* Naka Works, Hitachi, Ltd., Katsuta
(Received December 1, 1984)

(Revised March 13, 1985)

する手法を述べる。そして $\{110\}$ 面, $\{100\}$ 面 Si ダイアフラムに対してこの解析を適用し, 特性の比較を行い, Si ダイアフラムの最適ゲージパターンについて考察した。この結果, 非直線誤差とその温度依存性を極めて小さくし得る最適ゲージパターンが $\{110\}$ 面 Si ダイアフラム上に存在することを明らかにできた。この結果をもとに試作したセンサは, $120^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲にて非直線誤差 $\pm 0.1\%$ 以内であり, ブリッジ出力として 65 mV/V 以上の高出力が得られている。

2. Si ダイアフラムの概要とゲージパタンの一般的考察

圧力を検出するエレメントを Si ダイアフラムという。その構造は Fig. 1 に示すように, Si 単結晶の中央部を薄く加工して圧力によりたわみを生じるダイアフラムを形成し, 表面に 4 個のゲージ抵抗体 R_{R1} , R_{R2} , R_{T1} , R_{T2} を拡散形成したものである。圧力が印加されるとダイアフラム表面に応力が発生し, ピエゾ抵抗効果によって抵抗値が変化する。ゲージ抵抗体 R_{R1} , R_{R2} はダイアフラム半径方向に沿って配置し, R_{T1} , R_{T2} は接線方向に沿って配置しており, 前者を半径ゲージ抵抗 (Radial Gauge Resistors), 後者を接線ゲージ抵抗 (Tangential Gauge Resistors) と呼ぶ。Si 基板は n 形, ゲージ抵抗は p 形で, 夫々の抵抗体は $p-n$ 接合により電気的に分離されている。

ゲージ抵抗体に, 電流方向と平行に応力 σ_l , 電流と直交方向に応力 σ_t が同時に加えられたとき, その抵抗値は応力が微小な範囲において近似的につぎのように変化する¹³⁾。

Fig. 1 Schematic diagram and cross section of a silicon diaphragm piezoresistive pressure sensor

$$\Delta R/R \approx \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (1)$$

ここに ΔR は抵抗変化量, R は応力零時の抵抗値, π_l は縦ピエゾ抵抗係数, π_t は横ピエゾ抵抗係数であり, $\pi_l > 0$, $\pi_t < 0$ である。このゲージ抵抗を Fig. 2 のようにブリッジに構成し, 圧力を電圧信号 V_0 として検出する。

Fig. 3 は本論文で解析の対象とする $\{110\}$ 及び $\{100\}$ 面 Si ダイアフラムのゲージパターンであり, 図中にそれぞれの結晶面におけるピエゾ抵抗係数 π_l , π_t の結晶軸異方性を示す¹⁴⁾。

同図(a)は $\{110\}$ 面ゲージパターンで, π_l が最大となる $\langle 111 \rangle$ 軸に半径ゲージ抵抗 R_R を配置し, π_t が最大となる $\langle 110 \rangle$ 軸から 45° 方向に接線ゲージ抵抗 R_T を配置している。このゲージパターンは筆者らが先に報告したものである^{12), 6)}。 p 形 Si では $\langle 111 \rangle$ 軸の π_l は他の結晶軸に比べて最大の値をとるため, これ

Fig. 2 Bridge circuit diagram

Fig. 3 Gauge resistor patterns on the silicon diaphragms and piezoresistance coefficients in p-Si. plane
(a) $\{110\}$ plane, (b) $\{100\}$ plane

を半径ゲージ抵抗 R_R に有効に利用して高感度を得ること、また接線ゲージ R_T では、後述のような π_t に帰因する大きな非直線誤差を積極的に利用して、 R_R , R_T の個々の非直線誤差がブリッジ出力として互いに打ち消し合い、直線性の優れた特性を得るようにすることが狙いである。

同図(b)は {100} 面 Si を利用したゲージパターンであり、このパターンは従来から圧力センサに非常に多く利用されている⁵⁾。特に {100} 面では <110> 軸に沿ってアルカリ性溶液による化学的エッチングが正確に出来るため、Si ダイアフラムの製造が容易であるという利点があるためである。{100} 面では π_t , π_t 共に <110> 軸で最大となるため、ゲージ配置は一義的に図示ようになる。

なお {110} 面では π_t , π_t の結晶軸異方性が複雑なため、同図(a)以外のゲージパターンも種々考えられるが、いずれもこの例の変形と考えられるので、他のパターンはここでは省略する。

3. p形拡散ゲージ抵抗におけるピエゾ抵抗特性

拡散ゲージ抵抗体が応力 σ_t , σ_t を同時に受けたとき、微小応力の範囲でゲージ抵抗値は近似的に(1)式のように変化すると述べた。しかし実際の特性は応力に対して大きな非線形特性を示し、かつ温度によって変化する。筆者らはゲージ抵抗を拡散形成した Si カンチレバーを用いて、ピエゾ抵抗効果の特性を詳細に実験した結果、つぎのような結果を得ている^{8),11)}。

すなわちゲージ抵抗値は、応力 σ_t , σ_t 及び温度差 t の関数で与えられ、ピエゾ抵抗特性を次式で示すことによって、その非線形性と温度特性を含めて現象論的に正確に表示できる。

$$\begin{aligned} R(\sigma_t, \sigma_t, t) \\ = R(0, 0, 0) \left[1 + \sum_{j,k} \{ a_k t^k + \pi_{tj} (1 + \beta_{tkj} t^k) \cdot \sigma_t^j \right. \\ \left. + \pi_{tj} (1 + \beta_{tkj} t^k) \sigma_t^j \} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Table 1 Piezoresistance coefficients and their temperature coefficients in the p-type diffused layer located along <111> axis in the {110} plane with the surface concentration $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

π_{t1} (MPa ⁻¹)	β_{t11} (°C ⁻¹)	β_{t21} (°C ⁻²)	π_{t2} (MPa ⁻²)	β_{t12} (°C ⁻¹)	β_{t22} (°C ⁻²)	π_{t3} (MPa ⁻³)	β_{t13} (°C ⁻¹)	β_{t23} (°C ⁻²)	a_1 (°C ⁻¹)
7.3×10^{-4}	1.4×10^{-4}	5.2×10^{-6}	6.2×10^{-8}	-3.2×10^{-3}	-4.3×10^{-6}	-1.9×10^{-10}	-5.2×10^{-3}	3.2×10^{-5}	1.9×10^{-3}
π_{t1} (MPa ⁻¹)	β_{t11} (°C ⁻¹)	β_{t21} (°C ⁻²)	π_{t2} (MPa ⁻²)	β_{t12} (°C ⁻¹)	β_{t22} (°C ⁻²)	π_{t3} (MPa ⁻³)	β_{t13} (°C ⁻¹)	β_{t23} (°C ⁻²)	a_2 (°C ⁻²)
-3.5×10^{-4}	-1.2×10^{-5}	1.2×10^{-5}	2.6×10^{-7}	-4.0×10^{-3}	2.2×10^{-5}	2.9×10^{-12}	2.5×10^{-1}	-2.1×10^{-4}	7.2×10^{-6}

ここに t は基準温度からの差、 a_k は拡散抵抗温度係数、 π_{tj} , π_{tj} は縦及び横ピエゾ抵抗係数、 β_{tkj} , β_{tkj} は π_{tj} , π_{tj} の温度係数である。この式の各係数は Si カンチレバーを用いた実験値と合致するように最小自乗法で求めることができる¹¹⁾。Table 1 はその 1 例で、ボロンの表面不純物濃度 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のゲージ抵抗を {110} 面 <111> 軸に沿って拡散した Si カンチレバーを用いて、{110} 面 <111> 軸に関するピエゾ抵抗係数とその温度係数を求めたものである。 π_{tj} , π_{tj} はそれぞれ 3 次項まで、温度係数は 2 次項まで考慮すれば十分である^{8),11)}。表面不純物濃度が $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ に

Fig. 4 Stress dependence of non-linearity in piezoresistive effect and its temperature dependence in the p-type diffused layer located along <111> axis in the {110} plane with the surface concentration $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

において、ブリッジを定電流励起した場合の出力の温度変化が最小となり、温度補償に有利である¹¹⁾ため、この表面不純物濃度を選んだ。

以上述べた {110} 面 <111> 軸に関する piezo 抵抗効果の非直線誤差は Fig. 4 のようになる。この図は、図中に示すように、ゲージ抵抗に σ_t , σ_r を独立に与えたときの抵抗値変化の非直線誤差とその温度依存性を示している。図中の $\pi_t \sigma_t$ は縦 piezo 抵抗効果の非直線誤差、 $\pi_r \sigma_r$ は横 piezo 抵抗効果の非直線誤差を意味する。各プロットはその応力を 100% (フルスケール) としたときの非直線誤差の実験値を示し、また各曲線はそれぞれの温度にて、(2)式と Table 1 から計算される非直線誤差の大きさを示している。

この図から、非直線誤差は応力の方向によって大きく異なり、また温度依存性も一様でないことが分る。Si ダイアフラム上では、応力 σ_t , σ_r は同時にゲージ抵抗に加えられるので、それぞれの非直線誤差が複雑に影響し合うわけである。

なお非直線誤差の定義はつきによる。すなわち Fig. 5 のように入力 X と出力 Y の関係が $Y=Y(X)$ であるとき、その非直線誤差 $NL(X)$ は、 $X=0$ と $X=X_f$ (フルスケール入力) を結ぶ直線からの偏差 $\Delta Y(X)$ (X) をフルスケール値に対する % 値で示したものである。通常は、 $NL(X)$ の $0 \sim X_f$ 間の最大値を単に非直線誤差と呼ぶ。

4. Si ダイアフラムの特性解析手法

以上述べた ρ 形拡散ゲージ抵抗における piezo 抵抗効果の複雑な非線形特性とその温度依存性が、Si ダイアフラム圧力センサの特性にどのように影響するかを解析するための特性解析手法について述べる。

圧力センサの特性解析には、圧力によって生じる Si ダイアフラム表面のひずみ及び応力の計算と、(2)式によるゲージ抵抗値の計算が必要であり、その特性解析のフローを Fig. 6 に示し、以下に要点を述べる。

応力解析については、筆者らは Si 結晶の弾性係数

Fig. 5 Definition of non-linearity

の結晶軸異方性¹⁵⁾と非線形な膜応力を考慮した Si ダイアフラムの応力解析法を先に報告¹²⁾したが、本論文もその手法を適用した。すなわち、弾性係数に結晶軸異方性がある円板状の Si ダイアフラムに圧力が加えられたとき、Si ダイアフラムの曲げひずみは、微小たわみの範囲で次式で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} w_p &= \frac{Pa^4}{64D'} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \\ D' &= \{3D_x + 2(D_1 + 2D_{xy}) + 3D_y\} / 8 \\ D_x &= E_{xx}h^3/12, \quad D_y = E_{yy}h^3/12, \\ D_1 &= E_{xy}h^3/12, \quad D_{xy} = G_{xy}h^3/12 \\ \varepsilon_{rb} &= -\frac{h}{2} \cdot \frac{d^2w_p}{dr^2}, \quad \varepsilon_{\theta b} = -\frac{h}{2r} \cdot \frac{dw_p}{dr} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに w_p はたわみ、 P は印加圧力、 a はダイアフラム半径、 h はその板厚、 r はダイアフラム中心からの距離、 ε_{rb} , $\varepsilon_{\theta b}$ は曲げひずみ (添字 r , θ はそれぞれダイアフラム半径方向と接線方向を表わす) である。また E_{xx} , E_{xy} , E_{yy} , G_{xy} は弾性係数で、{110} 面 Si では x 軸を <110> 軸にとれば、 $E_{xx}=1.891 \times 10^5$ MPa, $E_{yy}=1.457 \times 10^5$ MPa, $E_{xy}=0.531 \times 10^5$ MPa, $G_{xy}=0.796 \times 10^5$ MPa であり、また {100} 面 Si では x 軸を <100> 軸にとれば、 $E_{xx}=1.420 \times 10^5$ MPa, $E_{yy}=1.420 \times 10^5$ MPa, $E_{xy}=0.398 \times 10^5$ MPa, $G_{xy}=0.796 \times 10^5$ MPa となる¹⁶⁾。上式による曲げひずみは圧力に対し線形である。

しかしながら実際の Si ダイアフラムにおいては、圧力に対して非線形な膜ひずみが発生する。膜ひずみは、円板の大たわみ理論¹⁷⁾により次式で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} w &= w_0(1 - r^2/a^2)^2 \\ u &= r(a-r)(c_1 + c_2r) \\ w_0 &= \frac{Pa^4}{64D'} \cdot \frac{1}{1 + c_3(w_0/h)^2} \\ \varepsilon_{rm} &= \frac{du}{dr} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dr} \right)^2 \\ \varepsilon_{\theta m} &= u/r \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Fig. 6 Flow chart of the characteristics calculation for silicon diaphragm pressure sensor

ここに w , u はそれぞれダイアフラム中心から r の位置における垂直方向のたわみと半径方向の変位, ε_{rm} , $\varepsilon_{\theta m}$ は膜ひずみ, c_1 , c_2 , c_3 はそれぞれ弾性係数から決まる定数である.

Si ダイアフラム上に生じるひずみは(3)式から得られる曲げひずみと(4)式から得られる膜ひずみを重ねたものと考えられるので, 次式となる.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \varepsilon_{rb} + \varepsilon_{rm} \\ \varepsilon_{\theta} &= \varepsilon_{\theta b} + \varepsilon_{\theta m} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

したがって応力は

$$\begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{rr} & E_{r\theta} \\ E_{r\theta} & E_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_{\theta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

から計算できる. ここで E_{rr} , $E_{r\theta}$, $E_{\theta\theta}$ は, 先に述べた E_{xx} , E_{yy} , E_{xy} , G_{xy} を極座標系 (r, θ) ヘテンソル変換して求められる.

なお, ダイアフラムには微小なせん断応力が発生するが, これは σ_r , σ_{θ} に比べて十分小さく, かつせん断のピエゾ抵抗係数は $\{110\}$ 面 $\langle 111 \rangle$ 軸及び $\{100\}$ 面 $\langle 110 \rangle$ 軸で零であるため, これを無視した.

以上の計算によって応力が求められれば, つぎに(2)式によってゲージ抵抗値の計算を行う. この場合, ゲージ抵抗に加わる応力 σ_i , σ_t は, Fig. 1 のゲージ抵抗の配置方向に応じて, R_{R1} , R_{R2} に関しては $(\sigma_i, \sigma_t) = (\sigma_r, \sigma_{\theta})$, R_{T1} , R_{T2} に関しては $(\sigma_i, \sigma_t) = (\sigma_{\theta}, \sigma_r)$ に対応するのでその変換が必要である.

つぎに, ブリッジ出力 V_0 は次式で計算する.

$$V_0 = \frac{R_{R1}R_{R2} - R_{T1}R_{T2}}{R_{R1} + R_{R2} + R_{T1} + R_{T2}} \cdot I \quad (7)$$

ここに I はブリッジの励起電流である.

なおゲージ抵抗値の計算において, Table 1 に示したピエゾ抵抗係数 π_{ij} , π_{ji} は $\{110\}$ 面 $\langle 111 \rangle$ 軸に関する値であり, 他の結晶軸に関する値は, つぎのような仮定のもとにこれを変換している. すなわち, ピエゾ抵抗効果の非線形特性は他の結晶軸に対しても相対的に同一であるとみなし, ピエゾ抵抗係数の2次及び3次係数の1次係数に対する比は結晶軸によらず一定として, Table 1 の π_{ij} , π_{ji} を座標変換している.

5. 特性解析

以上の特性解析プログラムによって, Fig. 3 に示した $\{110\}$, $\{100\}$ 面のゲージパターンを持つ Si ダイアフラムの特性解析をした. 解析に用いた数値は, いずれの場合も Si ダイアフラム直径 $2a=8.4\text{mm}$, 板厚 $h=190\mu\text{m}$, 基準ゲージ抵抗値 $R(0, 0, 0)=5\text{k}\Omega$, 基準温度 20°C (293°K) とし, 圧力は 0.5MPa フルスケールとした.

まず, Fig. 3 に示したゲージパターンにおいて, 各ゲージ抵抗の位置 X_R , X_T を変えた場合に, ブリッジ出力がどのように変化するか, またブリッジ出力の非直線誤差が $\pm 0.2\%$ 以内となる高精度領域はどこか解析した. その結果を Fig. 7 に示す. 温度条件は基準温度 20°C とし, 出力の大きさはブリッジ両端にかかる電圧との比で示した.

この結果, (a) $\{110\}$ 面の場合には, ブリッジ出力の大きさは X_R/a に依存し, この値が1に近い程大きな出力が得られ, またブリッジ出力の大きい領域で高精度領域が広く存在していることが分る. 一方(b) $\{100\}$ 面の場合にはブリッジ出力は X_R/a , X_T/a が共に1に近い程大きくなり, 高精度領域が $X_T/a \approx 0.8$ の近辺に存在することがわかる.

さらに非直線誤差とゲージ抵抗位置の関係を詳細に知るために, X_R/a をパラメータとして, 非直線誤差

Fig. 7 Map of output voltage values and domains of the nonlinear error less than $\pm 0.2\%$ F.S. in terms of positions of radial and tangential resistors
(a) $\{110\}$ plane silicon diaphragm
(b) $\{100\}$ plane silicon diaphragm

Fig. 8 Non-linearity of output voltage versus positions of resistors
(a) {110} plane silicon diaphragm
(b) {100} plane silicon diaphragm

を X_T/a に対して求めると **Fig. 8** のようになる。

以上の結果から、最適なゲージパターンは {110}、{100} 面いづれの場合も、 X_R/a を出来るだけ1に近付けて大きな出力が得られるように配置し、 X_T/a は非直線誤差が零となる位置を選べばよいことになる。仮りに $X_R/a=0.9$ にしたとき、最適ゲージパターンは **Fig. 8** から

$$\left. \begin{array}{l} \text{{110} 面の場合: } X_R/a=0.9, X_T/a=0.8 \\ \phantom{\text{{110} 面の場合: }} X_R/a=0.9, X_T/a=0.26 \\ \text{{100} 面の場合: } X_R/a=0.9, X_T/a=0.8 \end{array} \right\} (8)$$

のように定められる。ただし以上は、基準温度 20°C (293°K) の条件の元での計算である。

つぎに非直線誤差の温度依存性について解析する。上の結果から $X_R/a=0.9$ として、ブリッジ出力の非

Fig. 9 Non-linearity of output voltage and its temperature dependence as a function of position of tangential resistor for $X_R/a=0.9$
(a) {110} plane silicon diaphragm
(b) {100} plane silicon diaphragm

直線誤差を X_T/a に対して温度条件を変えて計算した。温度範囲は、工業計器⁴⁾や自動車エンジン制御システム⁵⁾で要求される 120°C ~ -40°C の範囲とした。解析結果を **Fig. 9** に示す。

この結果、ブリッジ出力の非直線誤差を零とする最適なゲージ抵抗の位置は温度によって変化することが分る。いいかえれば、基準温度 20°C の条件下で最適なゲージパターン条件(8)式の値を決定した場合、温度が 120°C ~ -40°C の範囲で変化すれば、非直線誤差が図示の δNL だけ変化することになる。 δNL は図示のようにゲージ抵抗位置によっては、0.3%/160°C 近く発生するため、0.1~0.2% 級の高精度圧力センサの場合には極めて問題となることが分る。そして δLN

Fig. 10 Temperature dependence of the non-linearity versus output voltage of bridge circuit

の変化幅は同図 (a) {110} 面の $X_T/a=0.26$ の場合が最も小さいことを示している。

ところで以上の解析結果は, 圧力を 0.5 MPa フルスケールとした場合の計算であるため, (8)式に示す 3通りのゲージパタンのブリッジ出力値はそれぞれ若干異なっている。δNL の大きさは同一なブリッジ出力値に対して比較されねばならない。

そこでフルスケール圧力を変えて上記 3通りのゲージパタンのブリッジ出力を計算し, このときの δNL の大きさを計算により求めた。結果を Fig. 10 に示す。δNL は {(−40°C における非直線誤差)−(120°C における非直線誤差)} を示しており, グラフ横軸の各ブリッジ出力に対し, その値をフルスケールとした % 値である。

この結果から {110}, {100} 面共に, $X_T/a=0.8$ の場合には, δNL はブリッジ出力を大きく得るに伴って, 比例的に増加する。高精度な圧力センサを設計する場合, たとえば精度 0.2% 級の圧力センサを設計する場合には, δNL は少なくとも 0.1%/160°C 以内である必要がある。このため上記ゲージパターンでは, ブリッジ出力が 30 mV/V 程度を越えないように設計する必要がある。従来, 高精度圧力センサを設計する場合, 出力レベルを制限していた理由がここにある。

これに対して {110} 面, $X_T/a=0.26$ の場合には, δNL は前記の二つに比較して大幅に低減し, δNL ≤ 0.1%/160°C とすればブリッジ出力は 65~70 mV/V 程度まで許容できることが分る。この理由は, Fig. 4 に示した各々のゲージ抵抗の非直線誤差とその温度依存性が, ブリッジ出力としてうまく打消し合うためと考えられる。したがって, 以上 3つのゲージパターンを比較したとき, {110} 面, $X_T/a=0.26$ のゲージパタ

Photo. 1 External view of a silicon diaphragm pressure sensor

ンが, 広い温度範囲で, 高出力化, 高精度化の条件を最も良く満たすことになる。

6. 実験結果

以上の解析結果をもとに前記 3通りのゲージパターンを持つ圧力センサを試作した。Si ダイアフラムチップ写真を Photo. 1 に示す。このセンサは半導体集積回路の製作と同じプロセスで作られる。そのためゲージ抵抗体の拡散形成用光学マスクには, (8)式のゲージパターン 3通り全て混在できるようにしており, アルミ電極形成用のマスクをとりかえることによって, 任意のゲージパターンを引出せるようにしている。

試作センサの非直線誤差とその温度依存性の実験結果を Fig. 11 に示す。図は, 各センサに印加圧力として 0.5, 0.3, 0.1 MPa をそれぞれフルスケール圧力として加えた場合の非直線誤差のプロフィールを示している。非直線誤差の値は, それぞれのフルスケール圧力に対する % 値である (Fig. 5 参照)。

この実験結果は先の解析結果とよく一致しており, 同図(a)は非直線誤差の温度変化が極めて小さいことを実証している。そして 120°C ~ −40°C の全温度範囲にわたり非直線誤差は ±0.1% 以内を示している。

この結果から, 0.5, 0.3, 0.1 MPa それぞれの圧力レンジにおける非直線誤差の温度変化の最大変化幅を δNL として求め, これを前記 Fig. 10 にプロットした。この結果は計算値と良く一致している。

7. おわりに

半導体圧力センサの高精度化, 高出力化において問題となる非直線誤差の温度依存性について解析的にその現象を明らかにした。この解析によって, 非直線誤差とその温度依存性を極めて小さくし得る最適ゲージパターンが {110} 面 Si ダイアフラムに存在することを明らかにでき, この結果, 120°C ~ −40°C の広い温度範囲にわたって非直線誤差 ±0.1% 以内, 出力 65

Fig. 11 Temperature dependence of the non-linearity of silicon diaphragm pressure sensors as a function of pressure. (a) {110} plane silicon diaphragm for $X_R/a=0.9$, $X_T/a=0.26$, (b) {110} plane silicon diaphragm for $X_R/a=0.9$, $X_T/a=0.8$, (c) {100} plane silicon diaphragm for $X_R/a=0.9$, $X_T/a=0.8$

mV/V 以上の高精度かつ高出力の半導体圧力センサを実現した。従来、半導体圧力センサの温度影響としては零点変化とスパン(フルスケール出力)変化の2点が問題とされ、その途中の変化、すなわち非直線誤差の温度変化は無視されてきた。零点とスパンの温度変

化は、外部回路により容易に補償できるが、非直線誤差の温度補償は困難であった。本論文によりこの問題が理論的に明らかとなり、半導体圧力センサの高精度化に寄与できた。

終りに臨み、本研究を御指導下さった浜松医科大学 神田洋三教授、設計、試作に協力いただいた当社那珂工場島添道隆氏、また応力解析に有益な助言をいただいた同機械研究所保川彰夫氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) C. S. Smith: Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon, *Phys. Rev.*, **94**-1, 42/49 (1954)
- 2) W. G. Phann and R. N. Thurston: Semiconducting stress Transducers Utilizing the Transverse and Shear Piezoresistance Effects, *J. Appl. Phys.*, **32**-10, 2008/2019 (1961)
- 3) O. N. Tufte and E. L. Stelzer: Piezoresistive Properties of Silicon Diffused Layers, *J. Appl. Phys.*, **34**-2, 313/318 (1963)
- 4) たとえば, Y. Matsuoka, M. Nishihara, et al.: Transmitter Using Diffused Semiconductor Strain Gauges, *HITACHI REVIEW*, **30**-6, 290/296 (1981)
- 5) たとえば, T. Inui, H. Minorikawa and M. Nishihara: High Reliability Semiconductor Pressure Sensor for Automobiles, SAE Technical Paper 820515 (1982)
- 6) 西原, 松岡, ほか: 最近の半導体圧力センサ, 日立評論, **63**-2, 11/14 (1981)
- 7) L. B. Wilner: A Diffused Silicon Pressure Transducer with stress Concentrated at Transverse Gauges, *ISA Trans.* **17**-1, 83/87 (1978)
- 8) K. Yamada, M. Nishihara et al.: Nonlinearity of the Piezoresistance Effect of p-Type Silicon Diffused Layers, *IEEE Trans. on Electron Devices*, **ED-29**-1, 71/77 (1982)
- 9) 嶋田, 西原, ほか: 半導体圧力センサの直線性, 第17回 SICE 学術講演会予稿集, 1711, 223/224 (1978)
- 10) M. Nishihara, K. Yamada et al.: A Silicon Diaphragm Piezoresistive Pressure Sensor, *Proc. of The 2nd Sensor Symposium*, 167/170 (1982)
- 11) 山田, 西原, 外: π 形シリコン拡散層におけるピエゾ抵抗効果の温度特性, 電気学会論文集, **103**-A-10, 31/38 (1983)
- 12) 西原, 嶋田, ほか: 半導体圧力センサの非線形特性の解析, 計測自動制御学会論文集, **17**-2, 114/119 (1981)
- 13) A. D. Kurts and C. L. Gravel: Semiconductor Transducers Using Transverse and Shear Piezoresistance, *ISA Conf.*, P4-1-PHYMMID-67, 1/20 (1967)
- 14) Y. Kanda: Graphical Representation of Piezoresistance Coefficients in Silicon, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-29**-1, 64/70 (1982)
- 15) J. J. Wortman and R. A. Erans: Young's Modulus, Shear Modulus and Poisson's Ratio in Silicon and Germanium, *J. Appl. Phys.*, **36**-1, 153/156 (1965)
- 16) A. Yasukawa and S. Shimada: Design Consideration for Silicon Circular Diaphragm Pressure Sensors, *Japanese J. Appl. Phys.*, **21**-7, 1049/1052 (1982)
- 17) S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger: Theory of plates and Shells, McGraw-Hill Book Company, Inc. (1959)