

ORIGINALS (6)

Si 圧力センサの零点温度特性

白水 俊次・君島 進

東芝総合研究所 〒210 川崎市小向東芝町 1

(1984 年 4 月 23 日 受理)

Offset Temperature Characteristics of Silicon Pressure Sensor

Shunji SHIROUZU and Susumu KIMIJIMA

Toshiba Research and Development Center
Komukai, Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210

(Received April 23, 1984)

The offset voltage drift of silicon pressure sensors is analyzed, assuming that in semiconductor-diffused resistance the variation with temperature is approximated by the 2nd power of temperature. The mechanism of resistance variation from the initial value is investigated and its procedure is displayed in an analytical form. It is found that the internal stress or strain introduced in the various processes from wafer fabrication to bonding and packaging of chips is mainly responsible for the offset drift.

The discussion is also referred to the experiment of bonding, in which the temperature drift is greatly influenced by the thermal stress from the backplate.

1. まえがき

圧力や歪などの機械量を電気量に変換する手段として、金属被膜ゲージやブルドン管などの古典的方法はそれなりの使い易さを持っている。しかし、半導体技術がエレクトロニクスの分野に技術革新をもたらしたように、人間の五感に対応する各種のセンサも半導体化されることによって、小形化、多機能化の可能性を見出した。特に圧力センサは半導体技術の進歩、発展に負うところが多く、次の3つの段階を踏みながら目ざましい発展を遂げつつある。

- (1) 小形化、高性能化するために IC 技術、微細加工技術を取り入れる。
- (2) IC とほぼ同じプロセスで製造することによって、周辺部電気回路との結合を容易にし、出力の補償や増幅回路と一体化して小形化、高性能化を図る。
- (3) 圧力の情報と同時に他の物理量に関する情報も得て、相互の関連やその結果得られる新しい情報を取出す。

半導体圧力センサは(1)から(2)の段階に到達しつつ

あり、既に(3)の知能化センサとしての展開が始まっている。半導体圧力のセンサが直前している緊急な課題は低コスト化であり、それを妨げているのが素子の温度特性についての歩留り向上である¹⁾。拡散などのウエハー工程では同じに作られている歪抵抗層が、圧力センサに組上げられてゆく段階で不揃いが発生し、温度係数が変わってゆく。本論文では、抵抗層間のトラッキング特性に着目することによって、零点変動のメカニズムを解析した。

2. Si 圧力センサの検出回路

Si 圧力センサの中心部はシリコン単結晶を薄く加工したダイヤフラムで、気体や液体の圧力を直接受け起歪体として働く。IC やその他の半導体素子と同じく、シリコンウエハー上に拡散やイオン打込みによりピエゾ抵抗層を形成した後、裏面からケミカルエッチングによって周辺部を除き中央部のみ薄く加工して仕上げる。

Fig. 1 に示したように周辺部を固定したダイヤフラムに等分布加重が作用した場合、ダイヤフラム中心部と周辺部では応力の向きが逆になる。この効果とシリコンのピエゾ抵抗効果の結晶方位依存性を利用すれば、ピエ

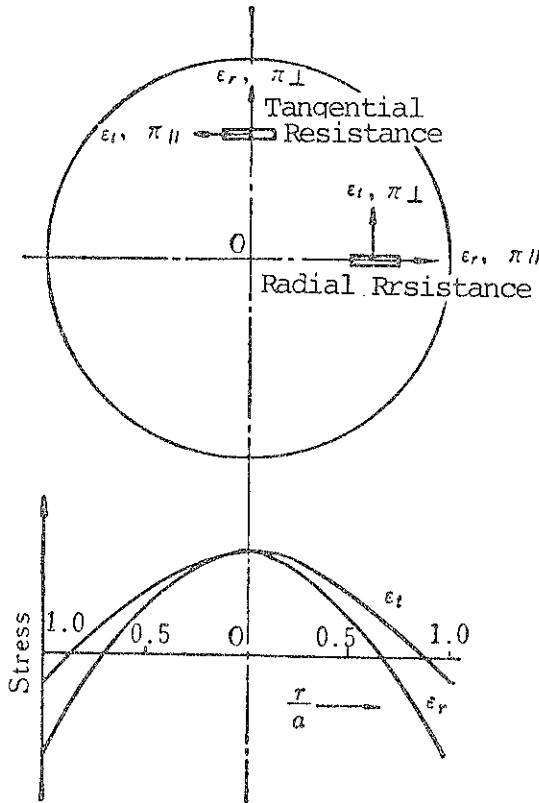


Fig. 1 Stress components of radial and tangential resistance on a circular diaphragm.

ノ抵抗層を組み合わせる種々の圧力検出回路を得ることができる。同一ダイアフラム面上の抵抗層から、圧力に対して最も大きな抵抗変化を示し、符号の相反する歪ゲージの組合わせを得ることができる。

半径方向および接線方向の応力を ε_r , ε_t とし、抵抗層の長手方向およびそれに直交する方向のピエゾ抵抗係数を $\pi_{||}$, $\pi_{\perp}$ とすると、抵抗層の圧力による変化率 $\Delta R/R$ は

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{||}\varepsilon_r + \pi_{\perp}\varepsilon_t \quad (1)$$

となる。ダイアフラムの半径を a とし、中心から r の位置に抵抗層を配置し、半径方向に長手方向を持つものを r の添字で、接線方向に長手方向を持つものを t の添字で示すと、(100) 面のシリコンで最大感度を得る抵抗配置と変化率は

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r &= -\pi_{||}\frac{3P}{8h^2}r^2(1-\nu) & r=a \\ \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t &= -\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r & r=a \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる²⁾。ここで ν はポアソン比、 P は印加圧力、 h はダイアフラムの板厚である。

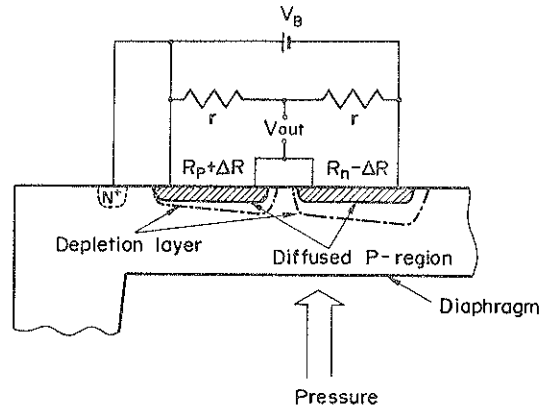


Fig. 2 Half bridge configuration of diaphragm pressure sensor.

Fig. 2 は(100)面を用いてこれらの配置に基づいて作成した抵抗層から、ハーフブリッジ構成の検出回路を示したものである。圧力によって増加する抵抗層を R_P 、減少する抵抗を R_N (P は Positive, N は Negative の意味)、ダミー抵抗を r 、ブリッジ印加電圧を V_B とすると、ブリッジの出力 V_{out} は

$$V_{out} = \left(\frac{R_N}{R_P + R_N} - \frac{1}{2} \right) V_B \quad (2)$$

となる。外部から加わる圧力が無くても、拡散抵抗層 R_P , R_N 間に差があればオフセット電圧として V_{out} が存在する。

3. 印加電圧で生ずる零点温度変動

Fig. 3 はオフセット電圧の温度変化を模式的に表わしたものである。圧力センサを動作させる温度範囲を -20°C から 80°C までとし、中間点の 30°C から見た場合、高温側と低温側の各々 50°C の中での零点変動 V_H , V_L は、

$$\left. \begin{aligned} V_H &= V_{out}(30) - V_{out}(80) \\ V_L &= V_{out}(-20) - V_{out}(30) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

として与えられる。

ダイアフラムを形成した圧力センサのシリコンチップは、熱膨張率の似た土台にいったん接着補強して、圧力導入用のパッケージに再接着される。パッケージへの接着による歪の影響を軽減するためであるが、土台との接着によっても少なからぬ歪の影響を受ける。シリコンチップと土台との間に介在する熱膨張の差や、接着層に用いるフリットガラスあるいは金-シリコン共晶合金層の歪によるものである。実験ではこれらの効果を除くために、接着前のチップで測定した。Fig. 4 は印加電圧をパラメータとして(2)式で示す V_H , V_L を統計的に求めた結果である。細長いサークルが変動の分布域を示し、

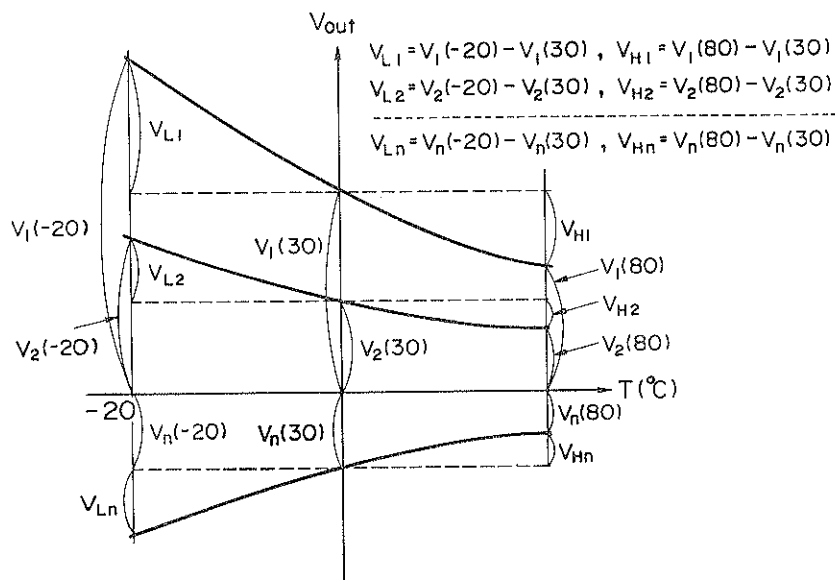


Fig. 3 Schematic illustration of offset voltage drift

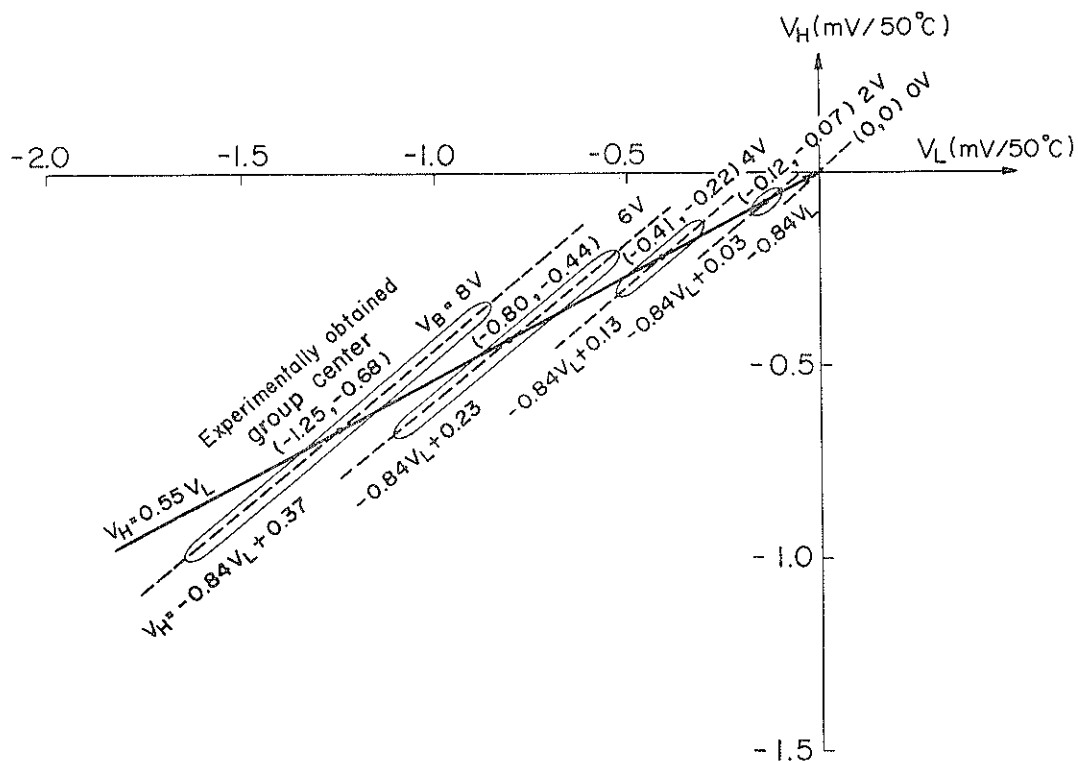


Fig. 4 Offset temperature drift caused by supply voltage.

破線は経験的に求めた各サークルの中心線である。この図を観察することによって以下のような推論が立てられる。

- 1) ブリッジ印加電圧 V_B の増加に比例して、分布の大きさも拡大する。このとき、分布の形状は中心線の勾配 $V_H/V_L=0.84$ を保ったまま拡大する。
- 2) 変動の分布を決めているのはブリッジ印加電圧であるから³⁾、ダイヤフラム上の2つの拡散抵抗を直列接続し、これに逆バイアス電圧を加えた場合に生ずる抵抗値の差が温度ドリフトとなっている。
- 3) 項目 2) に着目して、分布の中心の値はブリッジ印加電圧の極性を反転させ、逆バイアス電圧の差を反転させた場合に得られる温度ドリフト値から求まる。こうして求めた分布中心の間には

$$V_H=0.55V_L \quad (4)$$

の関係があることがわかる。

半導体の拡散抵抗である2つの歪ゲージは、一般に温度の2次式で近似させることができる。ブリッジ印加電圧 $V_B=0$ の理想状態では、2つの歪ゲージは同一の抵抗値と温度係数を持っているはずである。理想状態の抵抗値 $R(0)$ は温度の関数として

$$R(0)=R_0[1+\alpha(T-30)+\beta(T-30)^2] \quad (5)$$

と近似される。ここで R_0 は温度 $T=30^\circ\text{C}$ のときの基準抵抗値、 α, β はそれぞれ1次および2次の温度係数である。

ブリッジ電圧 V_B が加わることによって、直列に接続された2つの歪ゲージ間にはそれぞれ異なった逆バイアス電圧が加えられるため、空乏層の深いゲージは浅いゲージよりも抵抗値が大きく現われる。こうして生ずる R_N, R_P の抵抗差は

$$\left. \begin{aligned} R_N &= R(0) + r_N \\ R_P &= R(0) + r_P \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

と置く。 r_N, r_P はブリッジ印加電圧によって増加した抵抗値である。

Si 圧力センサの拡散工程では、歪ゲージは一般に n 形シリコン基板に $5\sim 8 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 程度の P 形純物 (B, ボロン) を拡散して作られている。 R_0 の値は付属回路との結合を考慮して常温で 4000 ohm 近傍に設定されている。これらの素子を実測すると、(5)式における温度の1次および2次の係数はそれぞれ 1500 ppm/ $^\circ\text{C}$ 、6.5 ppm/ $^\circ\text{C}$ 程度である⁴⁾。

Fig. 5 は(5)式の r_N, r_P の温度変化を実測した結果である。この抵抗変化もまた温度に関する2次式で近似できると仮定する。温度係数は Fig. 5 で実測した抵抗値を用いて求めることができる。例えばブリッジ印加電圧が 4 V の場合、 R_N と R_P における抵抗増加は次

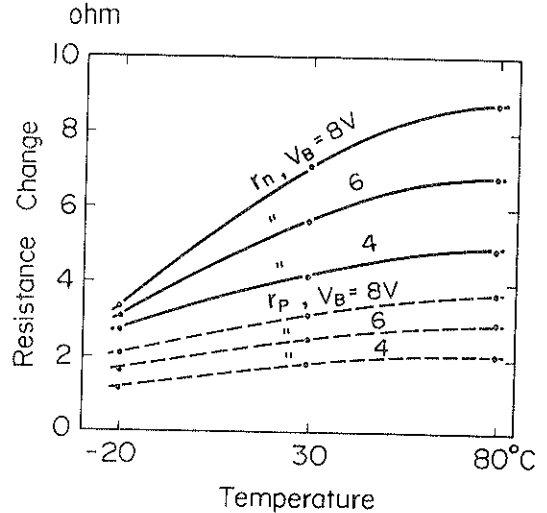


Fig. 5 Resistance change with temperature in additional resistance caused by supply voltage.

のような実験式となる。

$$\left. \begin{aligned} r_N &= 4.2[1 + 5200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}(T-30) \\ &\quad - 36 \text{ ppm}/^\circ\text{C}(T-30)^2][\text{ohm}] \\ r_P &= 1.9[1 + 4500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}(T-30) \\ &\quad - 52 \text{ ppm}/^\circ\text{C}(T-30)^2][\text{ohm}] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ブリッジ電圧が加わることによって生じた抵抗の増加分 r_N, r_P は、理想状態の抵抗 $R(0)$ と温度係数が異っている。この温度係数の差が零点の温度変動を生じさせる一つの原因である。

4. 圧力印加状態での零点変動

Fig. 6 はパッケージに組み込んだセンサに一定圧力を印加させ、周囲温度を変化させて零点変動を求め、その印加圧をパラメータとして動かした場合の軌跡である。軌跡の持つ傾斜がチップのままの状態で求めた零点変動分布の傾斜 0.84 と一致することがわかる。チップ状態で測定した零点変動分布の傾斜と、圧力を印加して求めた零点変動の軌跡の傾斜とが一致することから、この傾斜が圧力感度の高温側 50°C 巾と低温側 50°C 巾の比を示していると類推される。感度温度変動の比は既に Fig. 3 に示されているように

$$\begin{aligned} \frac{V_{H1}}{V_{L1}} &= \frac{V_{H1}}{V_{L1}} = \dots = \frac{V_{Hn}}{V_{Ln}} = \frac{V_1(30) - V_1(80)}{V_1(-20) - V_1(30)} \\ &= \frac{V_2(30) - V_2(80)}{V_2(-20) - V_2(30)} = \dots = \frac{V_n(30) - V_n(80)}{V_n(-20) - V_n(30)} \end{aligned} \quad (8)$$

で与えられる。センサに積極的に外圧を加えていないときの V_L, V_H の値を、一般に零点変動と称している。

しかし、積極的に加えた外圧ではなくても、センサに

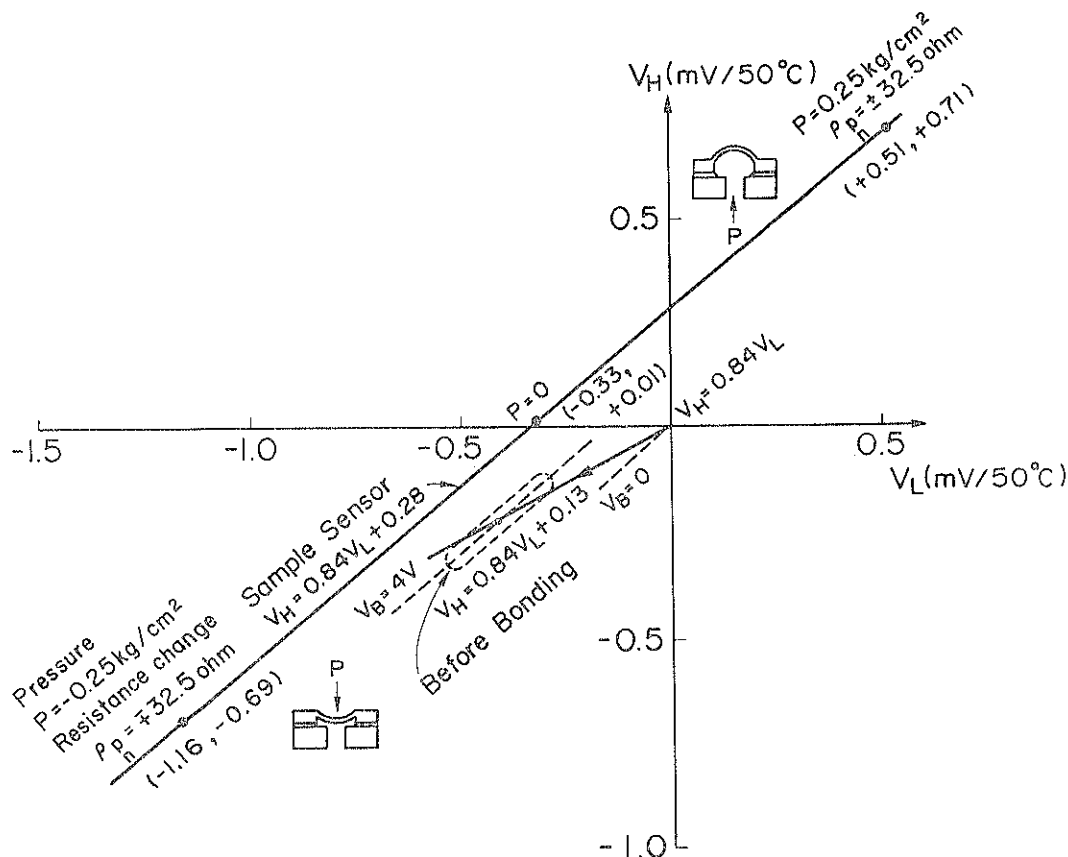


Fig. 6 Offset temperature drift of a complete sensor when a fixed pressure is applied.

は種々の応力や歪が加えられている。零点温度変動の原因がこれらの応力や歪（圧力）に対する歪ゲージの感度変動に起因すると仮定できれば、歪ゲージの抵抗変化と零点温度変動との関係を求めることができる。

センサに加わる応力や歪力を均等な圧力と仮定する。均等圧力による抵抗の変化は、ブリッジを構成する2つの歪ゲージで符号は反対であるが、絶対値は同じである。応力による変化分を ρ とすると、各々の歪ゲージの抵抗は(6)式から

$$\begin{cases} R_N = R(0) + r_N - \rho \\ R_P = R(0) + r_P - \rho \end{cases} \quad (9)$$

と書き直される。

Fig. 6 に示した試験用センサでは、 0.25 kg/cm^2 の一定圧力を受けると、 30°C では歪抵抗の変化 ρ は 32.5 ohm である。この圧力を受けたまま、周囲温度が -20°C から 80°C まで変化したときの零点変動は、圧力を受けない場合の零点変動値 (-0.33 mV , $+0.01 \text{ mV}$) からシフトした値をとる。圧力が正の場合は ($+0.51 \text{ mV}$, $+0.71 \text{ mV}$)、負の場合は (-1.16 mV , -0.69 mV) となる。印加圧力と零点変動の関係を低温側と高温側に分け

て求めると、それぞれの微係数は $(\Delta V_L / \Delta P) = (0.84 / 0.25) (\text{mV} \cdot \text{cm}^2 / \text{kg})$, $(\Delta V_H / \Delta P) = (0.70 / 0.25) (\text{mV} \cdot \text{cm}^2 / \text{kg})$ となる。圧力による零点変動の微係数、抵抗変化 ($\Delta R = 32.5 \text{ ohm}$) および変動の傾斜 ($V_H / V_L = 0.84$) の値を用いて、試験用センサの ρ は次のように求められる

$$\rho(T) = 65[1 + 848 \text{ ppm}/^\circ\text{C}(T - 30) + 6.5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}(T - 30)^2] \times (\text{ohm}) \quad (10)$$

温度 T の1次に関する係数は元の抵抗の値 ($1500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) から大巾に変化しているが、2次の係数は変わらないことがわかる。つまり、外部から加わる応力や歪によっては1次の温度係数のみが増加するというのである。

5. センサチップの接着応力による影響

零点の温度変動は接着やパッケージングの影響を大きく受ける。薄いダイヤモンドを形成したシリコンチップは補強のための土台に接着されるが、その前後ではブリッジのオフセット電圧、その温度変動ともに大きく変わることが観測されている。その変化はシリコンチップと接着する土台の熱膨張の差が大きいほど激しい。

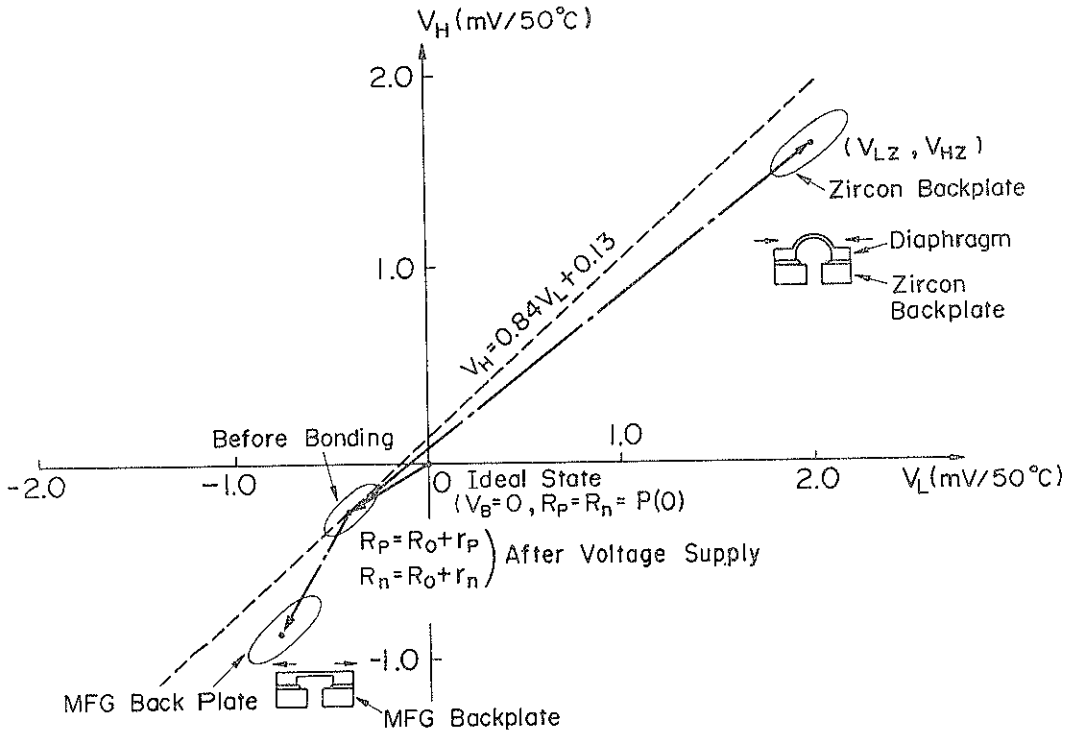


Fig. 7 Divergence from the regularity of temperature drift observed after bonding.

Fig. 7 は土台にシリコンよりも熱膨張の大きい材料（ジルコン）と、小さい材料（マルチフォームガラス：MFG）とを用いてフリットガラス（東芝 # 503 ガラス）で接着した場合の零点変動である。シリコンの熱膨張係数 $34 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ に対し、ジルコンでは $39 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 、マルチフォームガラスでは $26 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ である^{5,6}。接着に使ったフリットガラスの熱膨張係数はジルコンの約 2 倍の値を持っているが、ガラス接着層を $10 \mu\text{m}$ 程度まで薄くすることによって、土台からの影響に比べて無視できる程度に軽減できた。

シリコンよりも熱膨張の大きなジルコンに接着した場合、センサチップのダイアフラムは圧縮応力を受け、土台側から流体圧を受けた場合と同じ変形を生じる。したがって、零点変動の値は Fig. 7 に示すように (V_{Lz}, V_{Hz}) へ移動する。シリコンチップと土台との間に熱膨張係数の差があるために、 (V_{Lz}, V_{Hz}) 座標は $V_H = 0.84 V_L + 0.13$ の直線上からずれた位置にくる。

一方、マルチフォームガラスに接着した場合には、ダイアフラムは引張り応力を受ける。したがってダイアフラムには変形を起こさせる外圧ではなく緊張力が働く。Fig. 6 で示したように、土台と反対側から圧力を受けた場合の零点変動のシフトに似た挙動を示すことがわかる。

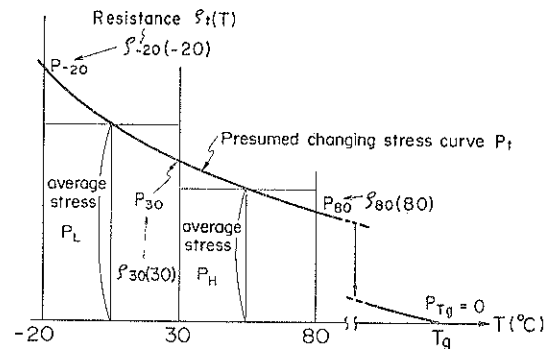


Fig. 8 Presumed stress curve when the thermal stress varies with temperature.

いずれの場合も、センサチップと土台の熱膨張係数が異なる以上、センサチップに加わる応力や歪力は温度によって変化する。(10)式において印加される圧力自身も温度で変わるから、

$$\rho(T) \rightarrow \rho_i(T) \quad (11)$$

と書き換えられる。 ρ_i は温度 t で変わる圧力によって生じる抵抗変化である。この様子を模式的に示したのが Fig. 8 である。フリットガラスでセンサチップと土台とを接着してあるから、ガラスの転位温度（この場合は 460°C ）で接着応力がゼロになる。図の太線はセンサに

加わる接着応力 P_i を示したものである。仮に低温側、高温側 50°C 巾での平均応力を P_L, P_H とすると、温度で変化する応力 P_i が温度 T の2次式で近似できると仮定し、更に次の関係

$$\left. \begin{aligned} P_i &= P_0[1 + A(T-30) + B(T-30)^2] \\ \int_{-20}^{30} P_i dt &= 50 \times P_L \\ \int_{30}^{80} P_i dt &= 50 \times P_H \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

を利用する。

Fig. 7 で示した零点変動値 (V_L, V_H) を求めることによって、低温側、高温側 50°C 巾での平均応力 P_L, P_H を知ることができる。これらの値と(12)の関係式から温度によって変化する応力 P_i の解析的に式を出せるので、各温度における抵抗値 $\rho_{-20}(-20), \rho_{30}(30), \rho_{80}(80)$ を得ることができる。これらの値を総て用いることによって、接着応力によってセンサチップに生ずる抵抗値の温度変化 $\rho_i(T)$ の実験式を求めることができる。(9)式と同じく温度に関する2次式で示せば

$$\rho_i(T) = \rho_0[1 + A'(T-30) + B'(T-30)^2] \quad (13)$$

となる。

センサチップが土台に接着され、ブリッジに組まれて電圧を印加されることによって、歪抵抗は理想状態 $R(0)$ から次の状態まで変化する。

$$\left(\frac{R_N}{R_P} \right) = R(0) + \left(\frac{r_N}{r_P} \right) \mp \rho_i(T) \quad (14)$$

ここで土台にジルコンを採用して接着し、このセンサに4Vのブリッジ電圧を加えた場合、元の抵抗値が 30°C で4000ohmに設計されたものは

$$\left(\frac{R_N}{R_P} \right) = \left(4000 \begin{array}{c} -82 \\ +88 \end{array} \right) \left[1 + \left(1500 \begin{array}{c} +40 \\ -64 \end{array} \right) \text{ppm}/^\circ\text{C}(T-30) + \left(6.5 \begin{array}{c} +0 \\ -0.08 \end{array} \right) \text{ppm}/^\circ\text{C}(T-30)^2 \right] (\text{ohm}) \quad (14)$$

となる⁷⁾。設計上は同じに作られていても、センサとして組上げられることによって基準抵抗も温度係数とともに変化する事がわかる。一般に R_N, R_P は対称な影響

を受けると考え易いが、動作上は非対称になって働いていることがわかる。

6. まとめ

ダイヤフラム形 Si 圧力センサの零点温度特性のメカニズムを解析した。零点温度変動はブリッジに組まれる歪抵抗間のトラッキング特性によるものである。素子の拡散工程では同じ特性のものが作れたとしても、圧力センサとして動作させることによって不揃いにさせる要因がいくつか存在する。その一つが土台との接着で受ける応力である。接着する土台の熱膨張係数がセンサチップと異っている場合に受け、応力自体が温度で変化する。したがって温度変動は複雑な挙動を示す。

いま一つがブリッジに電圧を加えることによって起るもので、歪抵抗値の逆バイアスによる変化である。ブリッジを組めば、電圧の高い側と低い側に位置する抵抗層の間に必ず生ずる差で、避けられない。フルブリッジに組めば原理的には相殺されるはずであるが、動作中の歪抵抗を比べた場合、設計上は同じに作られていても、異なった値になって動作しているわけである。

以上のように、センサとして組上げるために生ずる零点変動については明らかになった。本論文では応力による影響を土台との接着に限定して解析したが、二酸化シリコン膜とシリコン膜の間に生ずる応力にも拡張すれば、ウエハ工程で不揃いを生ずる原因究明に役立つと考えられる。

文 献

- 1) 白水俊次: 電子材料 21 (1982) 25.
- 2) S.K.D. Wise and J.B. Angell: IEEE Trans. BME-20 (1973) 101.
- 3) 白水俊次, 野田龍三, 君島進: 第28回春季応物理学会予稿 (1981) 1a-B-9.
- 4) 白水俊次: 応用物理 45 (1976) 49.
- 5) 君島進, 野田龍三, 白水俊次: 第42回秋季応物理学会予稿 (1981) 8p-W-8.
- 6) 君島進, 野田龍三, 白水俊次: 第29回春季応物理学会予稿 (1982) 3p-X-8.