

半 導 体 セ ン サ

Semiconductor Sensors

高浜禎造* Teizô Takahama・白石秀夫* Hideo Shiraishi・佐藤則忠** Noritada Satô

I. ま え が き

人間の五官に相当する働きをするセンサの機能は多岐にわたっており、これに用いられる材料も多種多様である。とりわけ半導体はその構造敏感な性質のゆえに、いろいろな可能性をもち、センサとしても最も重要な材料である。このような半導体を用いたセンサの中で、現在開発中の三つのセンサについて報告する。

II. 半 導 体 圧 力 セ ン サ

圧力の計測には、古くからいろいろな方式のセンサが実用化されている。富士電機ではIC技術の発達に伴って、半導体の大きなピエゾ抵抗効果を利用した、拡散形の小型軽量の圧力センサの開発・製品化を進めている。

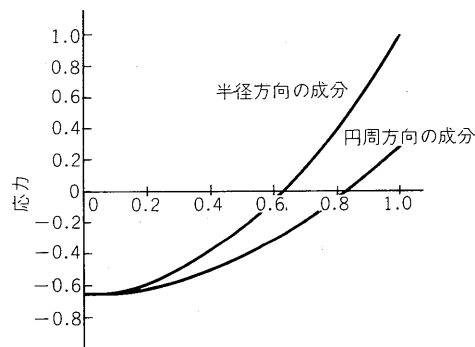
1. 原 理 及 び 構 造

この圧力センサは圧力を電気信号に変換する検出エレメント部分と、この電気信号を増幅、調整及び補償する回路部分とから構成されている。

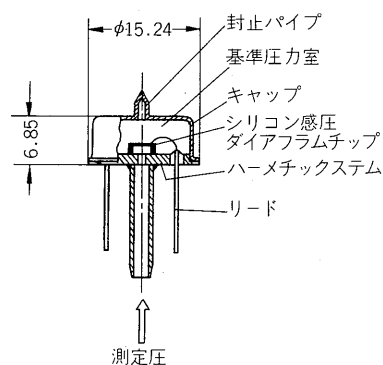
このセンサの動作原理は次のとおりである。半導体はその伝導形と結晶方位を適当に選ぶと、ゲージ率で100以上にも達する非常に大きなピエゾ抵抗効果を示す⁽¹⁾。この大きなピエゾ抵抗効果を利用するために、シリコン単結晶板の一部を薄くしてダイアフラムとし、このダイアフラムに測定圧を印加してこれを変形させ、そのひずみの大きな領域に作り込んだ拡散抵抗の値が変化することを利用する。

周縁固定の円形ダイアフラムに均一な圧力を印加した場合のダイアフラムの応力分布は、第1図のとおりである。横軸はダイアフラムの中心からの距離であり、0が中心、1.0が外縁を表す。縦軸は応力最大値を1に規格化した応力を示す。応力は外縁部近傍と中央部で大きく、その符号は逆となるので、両領域に各二つずつの拡散抵抗を作り込み、これらを交互に接続してフルブリッジに構成し、高感度化している。

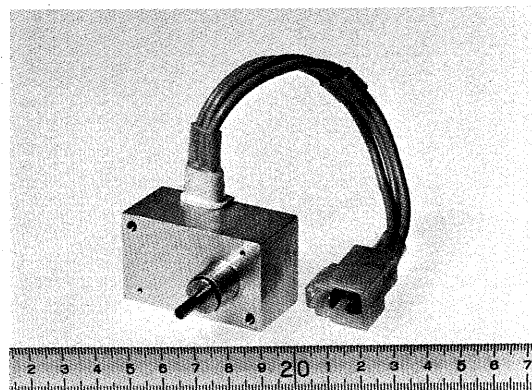
このような感圧ダイアフラムチップを用いて構成した、圧力検出エレメントの原理構造を第2図に示す。ハーメチックシステム上に感圧ダイアフラムチップ及びキャップで囲まれた空間を基準圧力室とし、ヘリウムを含む不活性ガスを一定圧力で封入している。



第1図 円形ダイアフラムの応力分布
Fig. 1. Stress distribution in a circular diaphragm



第2図 圧力検出エレメントの原理構造
Fig. 2. Schematic of pressure sensing element



第3図 試作圧力センサの外観
Fig. 3. Prototype pressure sensor

* (株)富士電機総合研究所 製品化研究所 ** (株)富士電機総合研究所 半導体研究所

この検出エレメントの出力を、オペアンプ、厚膜抵抗、感圧ダイアフラムチップに作り込んだ温度補償用拡散抵抗などからなる増幅・調整・補償回路によって、適当な大きさの電気信号に増幅し、感度及び零点の温度特性や電圧特性を補償して出力する。

検出エレメント及び回路部を測定圧導入管のついた金属ケースに収納している。試作圧力センサの外観を第3図に示す。

2. 特 性

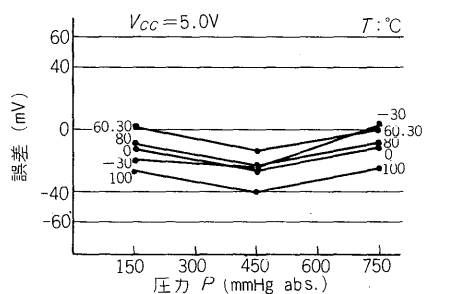
本圧力センサは絶対圧式であり、主な仕様は第1表のとおりである。動作温度範囲が $-30\sim 100^{\circ}\text{C}$ と広く、耐圧力も 5 kg/cm^2 以上と使用圧力範囲に比べて十分に大きい。

実測特性例を第4図に示す。(a)には温度をパラメータとした変換特性を示し、(b)には圧力をパラメータとした電圧特性を示す。非直線性は 0.5% 以下、圧力ヒステリシスはほとんど零に近い。

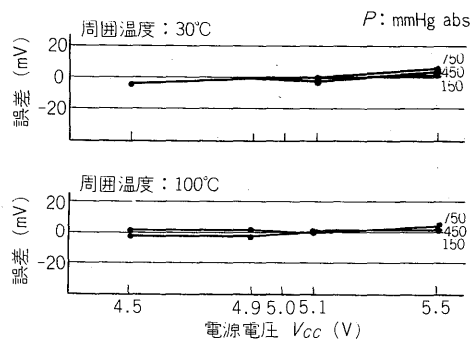
第1表 圧力センサの仕様

Table 1. Specifications for pressure sensor

| 項 目 | 仕 様 |
|---------|--|
| 電 源 電 圧 | 4.5 ~ 16 V |
| 動作圧力範囲 | 150 ~ 750 mmHg abs. |
| 最大耐圧力 | 5 kg/cm ² 以上 |
| 動作温度範囲 | -30 ~ 100°C |
| 保存温度範囲 | -40 ~ 120°C |
| 感 度 | 4 mV/mmHg (電源電圧: 5 V) |
| 出力レベル | { 0.9 V (電源電圧: 5 V, 圧力: 150 mmHg abs.) 3.3 V (電源電圧: 5 V, 圧力: 750 mmHg abs.) |
| 総合精度 | ±15 mmHg |



(a) 変換特性



(b) 電圧特性

第4図 圧力センサの特性例

Fig. 4. Characteristics of pressure sensor

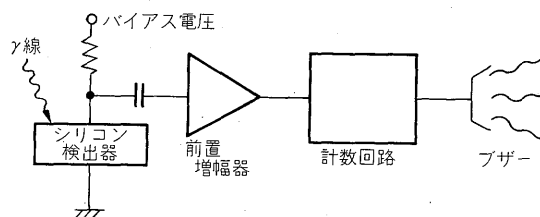
今後は、使用圧力範囲の拡大とゲージ圧センサなどニーズに対応した系列品の開発を進めていく予定である。

III. シリコン γ 線検出器

原子力発電所をはじめとして、医用、工業用などの分野で使用する、人体の被ばく量監視用線量計として、富士電機では各種の線量計を製品化している。これらの線量計の測定範囲を広げ、更に新機能を付加することを目的とし、GM計数管に代わるセンサとして、シリコン検出器を開発・研究している。

1. 原理及び構造

シリコン γ 線検出器は、 γ 線の作用でシリコン中に発生する電荷を電流として取り出し、検出するもので、線量計としては、第5図に示す構成で使用する。

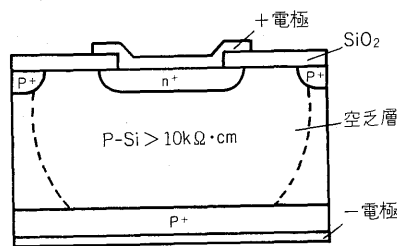


第5図 線量計の回路構成

Fig. 5. Block diagram of personal dosimeter

検出原理は、 γ 線が空乏層内を通過するとき、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成のいずれかの過程で発生した二次電子が、更にシリコンの格子原子と作用して、電子・正孔対を生成するので、これを電流パルスとして検出するものである。

構造は第6図に示すように、通常の半導体素子に比べ約3けた高い比抵抗のp形シリコン基板を使用したプレーナ形pn接合で、逆バイアスして空乏層を形成し、この部分を有感領域として利用する。高比抵抗シリコンを使用するのは空乏層を広くして感度を高めるため、本素子では $300\sim 400\ \mu\text{m}$ の空乏層幅としている。シリコンエレメントは長寿命化を図るため、TO5の金属ケースに封止している。



第6図 シリコン検出器の構造

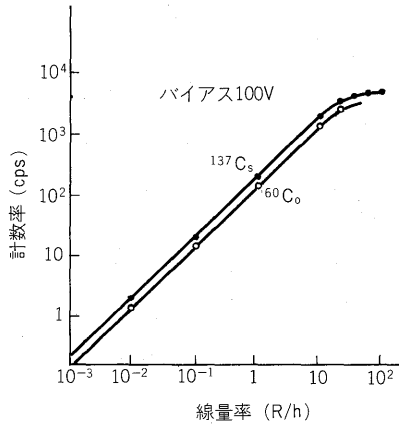
Fig. 6. Structure of silicon γ -ray detector

2. 特 性

本検出器の主要特性を次に示す。

1) 線量率直線性

第 7 図に示す。1 mR/h~10 R/h の範囲で ±10% の直線性が得られている。20 R/h 以上での直線性のずれは、電気回路部の特性によるもので、検出器単独の直線性は、更に高線量領域まで伸びている。GM 計数管の場合は、5 mR/h~5 R/h で ±15% の直線性であり、本検出器の採用により、この特性が改善できる。



第 7 図 計数率の線量率依存性
Fig. 7. Dose rate vs. counting rate of silicon γ -ray detector

2) 線質特性

同一線量率での計数率は γ 線のエネルギーに依存し、そのエネルギーが高いほど計数率は低くなる。線量計としては、エネルギーに依存しない特性が要求されるので、回路的に補正して 100 keV から 1.3 MeV の範囲で ±20% 以下に入るようにしている。

3) 検出範囲

γ 線エネルギーの検出下限値はノイズによって制限され、主として検出器の逆電流に依存する。温度の上昇とともに検出器の逆電流は増加し、ノイズレベルは 30°C で約 40 keV, 50°C で 50~70 keV になる。50°C までの温度に対し、100 keV 以上の γ 線検出には何ら問題のないレベルになっている。

第 2 表は本シリコン検出器の特性をまとめたものである。

第 2 表 シリコン検出器の特性
Table 2. Characteristics of silicon γ -ray detector

| 項 目 | 特 性 |
|-----------|----------------------|
| 線量率直線性 | ±10% (1 mR/h~10 R/h) |
| 線 質 特 性 | ±20% (0.1~1.3 MeV) |
| 検 出 下 限 値 | 100 keV (-20~+50°C) |
| 動 作 電 圧 | 100 V 以下 |
| 計 数 感 度 | 350 cps (1 R/h) |

IV. チタニア酸素センサ

自動車排ガス浄化エンジンシステムの一つに三元触媒方式があり、この方式は燃費の改善も同時に図られるこ

とから、適用車種は急激に増加する傾向にある。このシステムは、酸素センサにより排ガス中の酸素を検出し、これを燃料系にフィードバックして空燃比を理論値近傍の狭い幅に制御する方式であり、酸素センサは不可欠な要素である。現在、この目的のセンサとして、ジルコニアセンサが実用化されているが、資源的に有利で、低コスト化の可能なチタニアセンサが有望視されている。

1. 原理及び構造

酸化物半導体チタニア (TiO_{2-x}) は酸素圧によって抵抗値が変化する。これを利用して、排出ガス中の平衡酸素圧にตอบสนองし、理論空燃比において抵抗値が急変するようにしたのがこの酸素センサである。

チタニアは温度によっても抵抗値が変化するので、これを補償する必要があり、サーミスタによる方式が報告されている⁽⁴⁾。電士電機は、サーミスタを用いない二端子法を採用している。

試作した実装センサを第 8 図に示す。酸素センサは、取付位置が排気マニホールドであるため、温度(最大 900°C)、振動(30 G)、熱サイクル(50°C/s)、被毒(P, S, Pb)、飛水など環境条件が厳しく、これに耐えるセンサ構造が必要である。このため、エレメントの電気的接続とリード引出法、ガスシール法、温度分布を考慮した材料選定、保護カバー構造などに、信頼性を確保する工夫をしている。



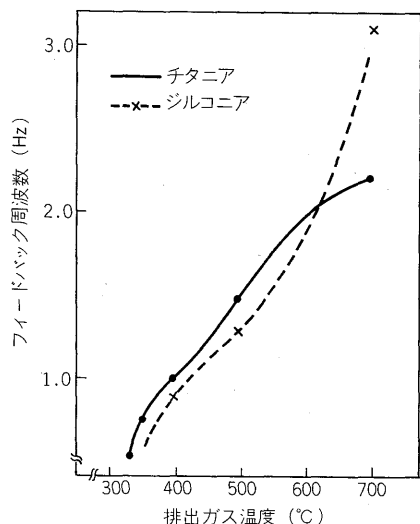
第 8 図 プロトタイプチタニアセンサ
Fig. 8. Prototype titania sensor

チタニアエレメントは、特性及びコスト上有利な厚膜⁽⁵⁾構造を採用しており、アルミナ母材上に白金電極厚膜、チタニア厚膜、プラズマ溶射保護膜を順次積層している。またこれら厚膜は多孔質に形成し、白金触媒を担持して感度及び応答性の向上を図っている。試作センサでは、このエレメントを金属ハウジングに加締固定している。

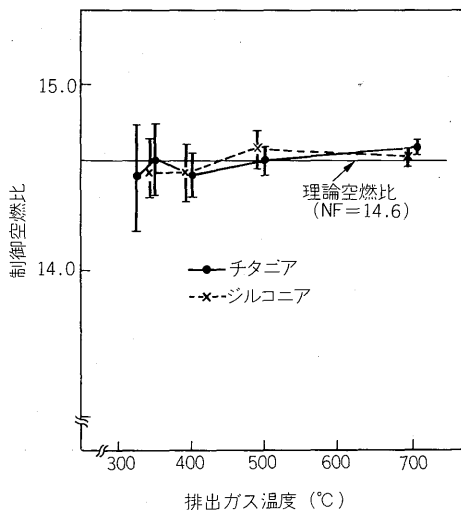
2. 特 性

センサ特性は主にエンジン実機法により評価している。富士電機のチタニアセンサの排出ガス温度に対するフィードバック特性を第 9 図、第 10 図に示す。

第 9 図は周波数特性であり、センサの応答性を示す。



第 9 図 フィードバック周波数の温度特性
Fig. 9. Temperature dependence of feedback frequency



第 10 図 制御空燃比・温度特性
Fig. 10. Temperature dependence of controlled air-to-fuel ratio

比較のために、ジルコニアセンサの特性も図示した。第 10 図は制御空燃比を示し、330~700℃で、空燃比が 14.6 ± 0.1 に制御されていることを示している。これらから、本センサはジルコニアセンサとほぼ同等の性能であることが分かる。

今後、寿命・信頼性の確認などを通して実用化への展開を図っていく。

参 考 文 献

(1) W.G.Pfann *et al.*: Semiconducting Stress Transducers Utilizing the Transverse and Shear Piezoresistance

Effects, J.Appl. Phys. **32**, No.10, 2008 (1961)
 (2) G.Bertolini *et al.*: Semiconductor Detectors (North-Holland Publishing Company-Amsterdam) p.447 (1968)
 F.H.Affix *et al.*: Radiation Dosimetry Second Edition Vol. II, Instrumentation (Academic Press-New York) p.291 (1966)
 (3) 内田ほか: トヨタ O₂ センサの開発, トヨタ技報 **28**, No.1, 99 (昭53)
 (4) M.J.Esper *et al.*: Titania Exhaust Gas Sensor for Automotive Applications, SAE Paper No.790140 (1979)
 (5) 谷口ほか: TiO₂ 酸素センサ, 電子通信学会予稿集 p.45 (昭54)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。