

氏 名	西 原 元 久 にし はら もと ひさ
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	論 工 博 第 1853 号
学位授与の日付	昭 和 60 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	半 導 体 圧 力 セ ン サ の 高 精 度 化 に 関 す る 研 究

論文調査委員 (主 査)  
教授 松波弘之 教授 川端 昭 教授 佐々木昭夫

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、半導体シリコンのピエゾ抵抗効果を利用したダイヤフラム形半導体圧力センサの高精度化に関する研究をまとめたもので、7章から成っている。

第1章は緒論で、半導体圧力センサの動作原理と発展の歴史を論じ、高精度化に関する問題点を分析して、本研究の目的、意義を述べ、本論文の構成について触れている。

第2章では、拡散法で製作したP形シリコンのピエゾ抵抗効果の非線形性および温度依存性について述べている。カンチレバを用いた実験から、ピエゾ抵抗効果の非直線誤差が応力の方向によって異なり、その変化の仕方が縦効果と横効果が著しく違い、温度によっても大きく変化することを見い出している。これをもとに、従来は応力と抵抗変化が線形関係であったピエゾ抵抗の特性式を、非線形性と温度依存性を考慮した、より正確な新しい特性式に変える必要性を強調している。

第3章では半導体圧力センサの非線形特性の解析を行っている。実験結果から、弾性係数に結晶軸異方性があるものの、シリコンダイヤフラムの変形は軸対称で、ひずみには異方性がないことを明らかにし、ダイヤグラム上に発生する異方性のある膜応力を円板の大変形理論を用いて計算している。応力の解析結果とピエゾ抵抗効果の非線形特性式を組み合わせ、圧力センサ用ゲージ抵抗の非線形特性を詳細に解析するシミュレーション法を確立している。これを用いて、圧力センサの非直線誤差がダイヤフラム上のゲージ抵抗体の位置に依存して変化すること、および、非直線誤差を零としうる最適のゲージ抵抗体の位置が存在することを見いだしている。

第4章は半導体圧力センサのゲージパターンの設計に関するものである。第3章の特性解析シミュレータを利用して、センサの非直線誤差の温度依存性がブリッジ出力に比例して増大し、ゲージパターンによって異なる値をもつことを予測し、実験的に確かめている。結晶面方位(110)面、(100)面のダイヤフラムについての解析結果の比較から、(110)面上で、半径方向ゲージ抵抗を $\langle 111 \rangle$ 軸上の端部(半径の0.9倍の距離)に、接線方向のゲージ抵抗を $\langle 111 \rangle$ 軸から $45^\circ$ の方向で中心部(半径の0.26倍の距離)に置けば、非直線誤差の温度依存性が極めて小さくなることを見いだしている。

第5章では、半導体圧力センサの詳細設計ならびに試作結果について述べている。ゲージ抵抗は、イオン打込みと熱拡散プロセスによって形成し、表面不純物濃度  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、シート抵抗  $150 \Omega/\square$  に制御している。シリコンダイヤモンドの凹型加工に化学機械研磨法を開発し、精度  $2 \sim 5 \mu\text{m}$  の加工仕上げをしている。センサの零点の温度補償はブリッジ脚中に固定抵抗を挿入して行い、スパンの温度補償はサーミスタと抵抗で構成された回路で非線形に制御する方式を採用している。こうして、 $-40 \sim 120^\circ\text{C}$  の温度範囲で、非直線誤差  $\pm 0.1\%$  以内、ブリッジ出力  $65 \text{ mV/V}$  以上、零点の温度変化  $\pm 0.15\%$  以内、スパンの温度変化  $\pm 0.25\%$  以内の高性能の半導体圧力センサを試作している。

第6章は開発した半導体圧力センサの応用例を述べた章で、特に高い精度が要求される工業計器の圧力伝送器への応用例を詳しく論じている。最小圧力レンジ  $30 \text{ kPa}$  の低圧から、最大圧力レンジ  $50 \text{ MPa}$  の超高圧の範囲にわたる一連の圧力伝送器の性能を確かめている。さらに、自動車エンジン制御用の小型半導体圧力センサへの応用についても実証している。

第7章は本研究の成果をまとめた結論である。

### 論文審査の結果の要旨

半導体圧力センサは小型、高感度でヒステリシス特性がないので、近年、メタルストレンゲージや静電容量方式の圧力センサに代わり広く利用され始めている。半導体シリコンのダイヤモンド上につくりつけたゲージ抵抗体のpiezo抵抗効果（圧力印加による抵抗変化）を利用したもので、物性に起因する非線形性が大きく、温度変化が特性に敏感に影響を与える。したがって、工業計器のように高精度の計測が要求される分野で使用することができなかった。本研究は、精度が  $\pm 0.1 \sim \pm 0.2\%$  級の高精度半導体圧力センサの開発と工業計器などへの応用に関するもので、得られた結果の主なものは次の通りである。

1. P形シリコンのゲージ抵抗とカンチレバを用いた実験により、piezo抵抗効果の非線形性と温度依存性を正確に測定した。これを定量化して、従来は抵抗変化と応力が線形関係にあるとして記述されていたpiezo抵抗の特性式に代わり、非線形性と温度依存性を含む、より正確な新しい特性式を導いた。

2. シリコン結晶の弾性係数の結晶軸異方性と、先に得たpiezo抵抗効果の非線形性を考慮して、シリコンダイヤモンドの応力解析手法を確立した。これをもとに、ダイヤモンド上のゲージ抵抗の特性解析シミュレーション法を開発した。圧力センサの非直線誤差がダイヤモンド上のゲージ抵抗体の配置に依存して大きく変化することをシミュレーションで予測し、実験的に確かめた。さらに、非直線誤差を零とする最適なゲージ抵抗の位置が存在することを明らかにした。

3. 各種のゲージパターンを用いた半導体圧力センサの特性解析シミュレーションによって、センサの非直線誤差が温度によって変化し、特にそれがブリッジ出力の大きさに依存して増大することを明らかにし、実験的にも確かめた。この非直線誤差とその温度依存性を極めて小さくする新しいゲージパターンを提案し、高精度で高出力の半導体圧力センサを設計した。シリコンの(100)結晶面を用いたダイヤモンド上で、半径方向のゲージ抵抗を $\langle 111 \rangle$ 軸方向の端部（半径の0.9倍の距離）に、接線方向のゲージ抵抗を $\langle 111 \rangle$ 軸から $45^\circ$ 傾けた方向で中心部（半径の0.26倍の距離）に置けばよいことを実験的にも検証した。

4. 上記の設計結果に加え、ブリッジ脚中に固定抵抗を挿入してセンサの零点の温度補償を、サーミス

タと抵抗を用いた回路でスパンの温度補償を行う方式を取り込んで、半導体圧力センサを試作した。-40～120℃の温度範囲で、非直線誤差が±0.1%以内、ブリッジ出力 65 mV/V 以上、零点の温度変化±0.15%以内、スパンの温度変化±0.25%以内の高性能を得ている。工業計器である圧力伝送器への応用を試み、30 kPa の低圧用から 50 MPa の超高圧に至る一連の圧力伝送器で高性能を確かめた。また、自動車エンジン制御用の超小型センサとしての応用を試み、過酷な環境下で高性能を実現した。

以上要するに、本論文は半導体圧力センサの非線形性と温度変化の詳細な解明、それらを低減するための精密な設計手法の確立、高精度半導体圧力センサの製作と応用に関するもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。

また、昭和60年7月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。