

氏 名	まつもと よし のり 松 本 佳 宣
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	集積化容量型センサの研究
指 導 教 官	東北大学教授 江刺 正喜
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 江刺 正喜 東北大学教授 大見 忠弘 東北大学教授 樋口 龍雄

論 文 内 容 要 旨

本論文は、容量型センサと容量検出回路を同一シリコン上に集積化した集積化容量型センサに関するものである。容量型センサは2枚の電極の間の静電容量の変化を利用するもので、高感度、低温度特性という特徴を持っているが、寄生容量の影響を受けやすいという問題点を持っている。そこで、集積回路技術とマイクロマシニング技術を用いてセンサと検出回路を集積化して寄生容量の影響をなくして高性能のセンサを製作した。本研究では、特に圧力、加速度という機械量を高精度に測定できるセンサの開発を行った。これらのセンサにはダイヤフラムや梁で支えられた重りといった機械的構造が必要であるが、シリコンは単結晶であるためヒステリシスやクリープのない優れた機械的特性を持っており、また加工にマイクロマシニング技術を利用できるためセンサ材料としては最適である。

そこで、シリコン容量型センサについて考察して、集積化のために必要な要素技術の開発をおこなった。集積化容量型センサは、陽極接合技術を用いてシリコン基板とパイレックスガラスをはり合せた構造になっており、シリコンとガラスの間の空洞に容量型センサと容量検出回路が集積化されている。このため、この空洞を気密封止しつつ、同時に空洞内の集積回路から電圧端子を取り出す必要がある。そこで、電解放電加工技術を用いてあらかじめガラスに微細穴を開け、このガラスをシリコンとはり合せ、ガラスの穴越しに電圧端子を取り出す新しい構造（以下、フィードスルー構造とする）を開発した。そしてこのフィードスルー構造を用いたピエゾ抵抗型圧力センサを試作して、この構造の評価を行った。

続いて容量型圧力センサの理論、構造について考察して最適な構造を決定した後、その特性を計

算した。また、寄生容量や基準圧室の空気および静電引力が圧力センサの特性に及ぼす影響について述べた。一方、容量型加速度センサの構造についても考察を行い最適な構造を決定した後、その感度や周波数特性について述べた。容量型加速度センサは測定範囲や周波数特性が狭いが、センサを静電サーボ方式で駆動するとその特性が改善できる事を述べた。

その後、各種の容量検出回路を比較、検討した後、集積化容量型センサ用の検出回路として周波数変換型容量検出回路（C-Fコンバータ）を選び、その原理について述べた。C-Fコンバータは周波数出力であるためデジタル処理しやすく外来雑音の影響も小さい。さらに、CMOS回路で構成したC-Fコンバータはスイッチング時にのみ消費電流が流れるため、電源線に流れる消費電流から発振周波数が検出できて、電源線とグランド線のみから信号を検出する2線式検出方式が可能である。そして、寄生容量、温度特性、電源電圧依存性などセンサアプリケーション固有の問題を考慮に入れて、数種類のC-FコンバータICをCMOS技術を用いて設計、試作しその特性を評価した。そして、これらの回路が集積化容量型センサ用の回路として十分な性能を持っている事を確認した。

これらの結果を踏まえ、センサと回路を一体化した集積化容量型圧力センサを設計して、CMOS技術とマイクロマシニング技術を用いてセンサを試作した。この構造を図1に示す。このセンサはパイレックスガラスとメサ型シリコンダイヤフラムがはり合わされた構造をしており、大きさ1.7×2.2mm²と小形である。このセンサは、マイクロマシニング技術を用いてパッケージングまでウエハプロセスで行われるため量産性に富み、さらにシリコン基板とガラス自体をパッケージング容器として用いる構造であるためパッケージング容器が不要となり小形、低価格化しやすい、この圧力センサを評価したところ、出力周波数と印加圧力は比例しており、従来のピエゾ抵抗型圧力センサよりも高感度であった。そして電源電圧を調整して零点の温度補償ができる事が確認できた。この圧力センサは、電源線を通る電流変化から出力周波数を検出する2線式検出方式が可能など従来のセンサにない特徴を持っている。これらの特徴を生かし、医療用カテーテルの先端などに付けて使用すればセンサから引き出すリード線は最小限で済み、従来の圧力センサには適用不可能であった新たな応用分野を切り開く可能性を持っている。また、周波数出力であるためデジタル処理に適しており、本研究で製作した平均周期測定方式の周波数カウンタを用いれば、センサからの出力周波数を高速、高分解能のデジタル情報に変換できる。このカウンタを用いれば数msec以下の応答速度で16bitの分解能のデジタル情報が得られる

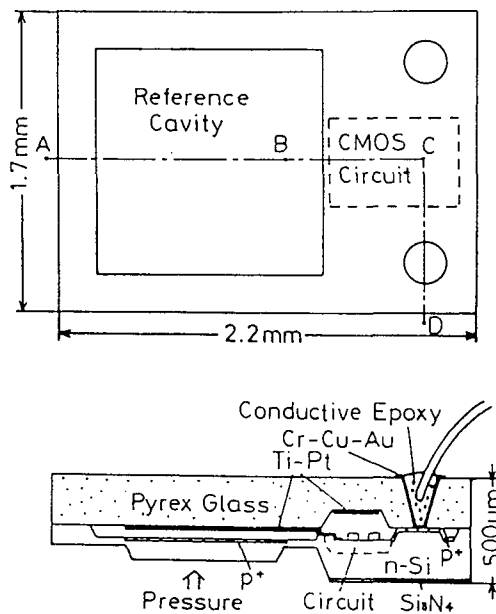


図1 集積化容量型圧力センサの構造

ため、マイクロプロセッサと組み合わせれば高度の情報処理が可能となる。

続いて、静電サーボ方式の容量型加速度センサに着目して、各種の静電サーボ方式を比較、検討した後、集積化加速度センサに適した静電サーボ方式を考案した。その原理をもとに、集積化容量型加速度センサの設計を行ない、センサ製作に必要な集積化技術の開発を行った。その後、この集積化技術と CMOS 技術を用いて図2のような集積化容量型加速度センサを試作して、センサ単体の特性を評価した。次に、この加速度センサと図3のような Phase-Locked Loop 回路を用いて静電サーボシステムを構成して、このシステムの特性的評価を行った。この加速度測定システムは出力直線性に優れ、さらに PLL 静電サーボ回路の回路パラメータを変更することで零点、感度を調整できる。

次に、この加速度センサで問題となった歩留まり、電源電圧依存性、経時ドリフトの問題を解決するために、新たな C-F コンバータを集積化した集積化加速度センサとドリフト補正型 PLL 静電サーボ回路を設計した。また、周波数特性を広げるために真空中で陽極接合を行う事を検討した。製作上の問題のためシステムの実証を行う事はできなかったが、原理的にはこのシステムを用いて上記の問題を解決できると思われる。このシステムを用いて、小形、高性能、低価格な加速度測定システムが実現できれば、高精度の加速度情報を容易に得る事ができるようになり、ロボット、自動車などの高度な運動制御に寄与できると思われる。

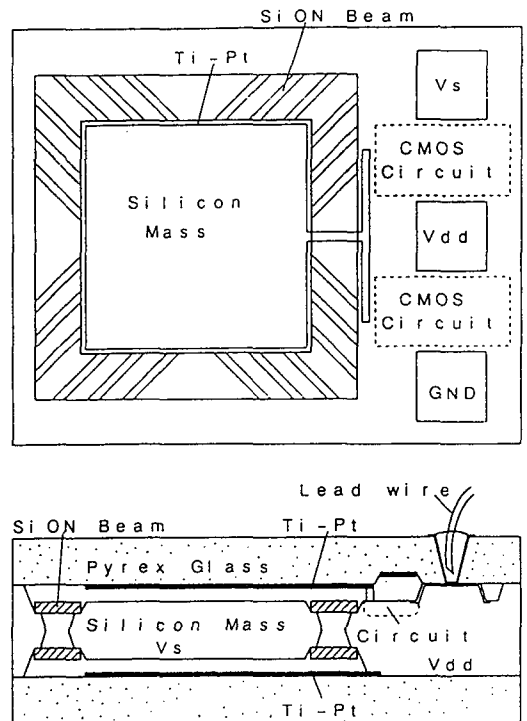


図2 集積化容量型加速度センサの構造

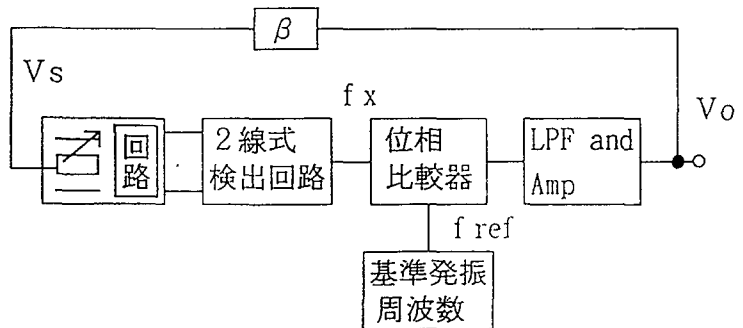


図3 Phase-Locked Loop 静電サーボシステム

審 査 結 果 の 要 旨

機械量の制御においては、圧力や加速度などを正確に計測することが重要である。半導体を素材にしたフォトファブリケーションによる微細加工を適用することで、小形で高性能なセンサが実現できる。著者は、平行平板構造の静電容量の変化を用いた容量型センサで、容量検出回路を集積化したセンサに関して研究を行い、その設計指針を明らかにするとともに、圧力センサや加速度センサを実現してその有効性を実証した。本論文はその成果をまとめたものであり、全編9章よりなる。

第1章は緒論である。第2章では、シリコンを用いたセンサのうち、 piezo抵抗型と容量型について述べ、両者を比較している。

第3章では、センサの小形化や高信頼度化に重要なパッケージング技術について述べている。特にフィードスルーと呼ばれる端子取り出し部に工夫を施すことで、内部に電子回路を集積化し小形にパッケージングされたセンサを可能にしている。

第4章では、容量型圧力センサに関して、問題になる寄生容量や静電引力などの影響を議論し、最適設計法を明らかにしている。

第5章では、容量型加速度センサの方式として特に静電サーボ型が優れていることを示し、その設計法を明らかにしている。

第6章では、周波数出力型の容量検出回路について検討を行い、温度特性や電源電圧依存性またドリフト補正などの点で高性能化できる方法を示している。

第7章では、容量型圧力センサと容量検出回路の設計結果を踏まえ、容量検出回路を一体化した集積化容量型圧力センサを設計・製作し、特に高感度で優れた特性が得られることを示した。これは実用上極めて重要な成果である。

第8章では、前章までの結果を基に、容量検出回路と同時に静電アクチュエータもセンサに一体化した静電サーボ方式の集積化容量型加速度センサを設計・製作した結果について述べている。感度を自由に外部設定でき、自己診断やドリフト補正なども可能にした高性能な加速度センサを実現している。これは興味深い結果である。第9章は結論である。

以上要するに、本論文は集積化容量型センサについて研究を行い、小形で高性能なセンサを構成する基礎を与えたもので、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。