

氏名	水野潤		
授与学位	博士（工学）		
学位授与年月日	平成12年7月12日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項		
最終学歴	昭和58年3月 東北学院大学工学部応用物理学科 卒業		
学位論文題目	多軸運動を同時検出するためのシリコン静電容量型センサの研究		
論文審査委員	主査 東北大学教授 江刺正喜 東北大学教授 新妻弘明 東北大学教授 羽根一博		

## 論文内容要旨

### 第1章 緒論

加速度センサは、ばねで支えられた重りに慣性力が働くのを検出するものである。ここでは、本研究の背景と目的について説明する。シリコン加速度センサは1979年に、L.M. Roylance と J.B. Angell によって研究発表された。これは、ガラス—シリコン—ガラスの三層構造からなり各々が陽極接合されている。中央のシリコンには、異方性エッチングを利用して製作された重りとばね（片持ち梁）の構造体が形成されている。加速度によって生じた重りの変位を、梁の固定部付近に配置したピエゾ抵抗によって検出するものであった。上下のガラスはシリコン構造体を保護する役目をしている。その後、静電容量の変化で重りの動きを検出する静電容量型が開発された。80年後半には、自動車の安全性を増すためのエアバックシステムで、衝突検出のために各車種に搭載されはじめた。その流れの一つとして、多軸の加速度検出が要求され研究されている。

本研究では、1つのデバイスで多軸の加速度、角加速度、及び角速度を同時に検出することが可能なシリコン静電容量型センサの試作研究を行った。

### 第2章 多軸運動同時検出センサ

本章では、多軸加速度、角加速度及び角速度を、1つのデバイスで同時に検出することができるシリコン静電容量型センサの検出原理を提案し、そのシミュレーション結果とセンサ構造について説明を行った。バルクマイクロマシニング技術を使って、多軸運動を同時に検出するため、シリコン静電容量型センサの構造としてA～Eまでの5種類について検討を行った。Aタイプは1軸加速度（高感度タイプ）1軸角速度同時検出センサ。Bタイプは1軸加速度（高感度タイプ）2軸角速度同時検出センサ。Cタイプは1軸加速度（高感度タイプ）1軸角加速度同時検出センサ。Dタイプは1軸加速度（低感度タイプ）1軸

角加速度同時検出センサ。Eタイプは1軸加速度（低感度タイプ）1軸角加速度同時検出センサである。基本構造は陽極接合されたガラス—シリコン—ガラスの3層である。中央のシリコンで形成されている重りは、Aタイプのみがフレームからのトーションバーによって支えられ、B～Eタイプは中央柱からのトーションバーによって支えられている。この中央柱から支えたのは、外側からの直接的な衝撃を防ぐためである。加速度及び角加速度に対し、出力電圧は直線的に比例し、角速度に対して出力電圧はその2乗に比例している。

### 第3章 製作方法

バルクマイクロマシニング技術を使って本センサを製作するときに、課題となっている幾つかの製作技術がある。貫通穴製作では、電解放電加工で製作した貫通穴と、サンドブラストを使って製作した貫通穴の比較を行った結果、サンドブラスト技術が良いことがわかり、設計通りの形状が安定して製作できるようになった。KOHやTMAHを使った結晶異方性エッチング（ウェットエッチング）、及び反応性イオンエッチング（ドライエッチング）を使って、トーションバーの製作比較を行った。その結果、ウェットエッチングの方が、設計通りに近いトーションバーの断面形状になることがわかった。接合のためウエハどうしのアライメントについては、真空吸着機構の付いた装置の設計製作を部分的に行い、 $\pm 10 \mu\text{m}$ の精度でアライメントが可能になった。シリコンを切断する技術において、ウエハを $\text{NF}_3$ ガス雰囲気下に置き、YAGレーザアシストエッチング技術で、ダスト無しに切断することが可能となった。センサキャビティ内で重りの動きのダンピング調整に必要な真空封止技術を確立した。具体的には、真空陽極接合装置を設計製作して、センサ内の圧力を任意の圧力に設定することを可能にした。

以上の製造技術を組み合わせ、ドライエッチングを中心としたプロセスで試作したDタイプと、ウェットエッチングを中心としたプロセスA、B、C、Eタイプの各センサが製作された。

### 第4章 センサの特性評価

評価方法を検討し、その時に必要な計測装置の準備を行った。静的加速度を測定するためにセンサを重力方向に対して傾斜させるCテーブル及び高加速度領域で評価するための加振装置には、市販の装置を使用した。一方、角加速度を測定する装置、及び加速度と角加速度同時に印加して測定する装置は市販されていないので、その設計製作を行った。角速度については、ターンテーブルを製作し評価を行った。周波数特性については、センサの電極に電圧を加え、静電力で重りを振動させレーザ変位計とネットワークアナライザを組み合わせで評価した。

特性評価の結果、出力電圧は10Gまでの領域で、加速度に直線的に比例していることが明らかになった。また、角加速度についても、出力電圧は角加速度に対し直線的に比例

した。角速度については、検出原理通り出力電圧は角速度の2乗に比例した。Eタイプのセンサを、1軸加速度1軸角加速度同時検出用の製作した加振機で特性評価をし、加速度と角加速度を分離して同時検出することができた。このとき位相の遅れが見られたが、これはセンサ内のダンピング圧力によるものと思われる。Dタイプではトーションバーの断面形状が楔型となったために他軸感度の影響が現れたが、Eタイプは、トーションバーの断面形状がほぼ矩形となったために、他軸感度による影響が少なかった。周波数特性評価では、シミュレーション結果と実験結果はほぼ一致した。

最後に、他社センサとの比較して、加速度測定時における各センサの非直線性及び他軸感度について測定を行い、同程度の実験結果を得ることができた。

## 第5章 応用へ向けた考察

近年、欧州では車の横転（ロールオーバー）の事故例が増えている。しかし、角速度を検出して、車輛制御を行なう方法は確立していない。その原因は検出用センサの応答速度が遅いことであり、応答速度30ms以内が必要であることがわかってきた。

また今回試作したセンサの応用例の1つとして5つの斜衝突ケースを想定し、加速度、角加速度及び角速度の信号がどのように現れるかの検討を行なった。その結果、すべてのケースにおいて角加速度の検出が必要である。また、サイド衝突の2つのケースについて比較すると、同じサイド側からでも衝突位置によって角加速度の信号特性が違うことがわかった。以上のことから、角加速度の信号は、衝突状況を知る上で有効であると思われる。また、側面衝突の計算結果からは、衝突の位置を予測することもでき、従来のエアバックにこのセンサを組み合わせることで、衝突検出用センサを実現できると思われる。例えば、試作したEタイプセンサを2つ使用してV字に組み合わせると、正面からの加速度、横からの加速度（左右方向が判断できる）、ヨーイング及びロールオーバーの4軸方向を、検出することが可能になる。

## 第6章 結論

バルクマイクロマシニング技術を使って、1つのデバイスで加速度と角加速度を同時検出する原理を提案した。このセンサは単純な構造で、重りの大きさ及びトーションバーのアスペクト比を変数とすることにより、自動車の安全装備に必要な加速度領域と角加速度領域が計測可能である。このセンサを製作するにあたって、電極から信号を取出すための貫通穴製作、シリコン構造体を製作するための結晶異方性エッチング、及び真空陽極接合の課題があり、それらの技術を確立しセンサを製作した。

このセンサの特性評価を行い、加速度と角加速度を同時検出することができることを確かめた。また目標通りのセンサが実現でき、これを車の安全装備に応用するための考察を行った。

## 付録

試作研究用クリーンルーム及び付帯設備、製造治具の設計製作（洗浄、各種エッチング、スピンドライ）、マスク作製技術（パターンジェネレータ）、ダイシング技術、洗浄方法、酸化、拡散、スピンコータ、両面アライナー、現像技術、ベーク炉（プリ、ポスト）、各種エッチング技術（酸化膜、Au、Cr、ガラス）及びレジスト剥離（リフトオフ）、プラズマアッシング、スパッタ技術（Al、ITO）、蒸着（Cr、Au、Ti、Pt、Al）、ダイボンダ及びワイヤーボンディング技術、光学的手法を用いた微小形状計測及び膜厚計測技術、静的加速度計測装置（Cテーブル）、加振装置（高加速度用）、回転（ターン）テーブル、レーザ変位計について述べた。

## 審査結果の要旨

自動車の安全性を増すための加速度センサや角速度センサとして、低価格で高性能なシリコンセンサが期待されている。著者は、加速度や角速度の各方向成分（多軸運動）を1つのデバイスで同時に検出できるシリコン静電容量型センサに着目し、これをマイクロマシニング技術によって試作する研究を行った。このセンサでは、重りがばねで支えられた構造がガラス-シリコン-ガラスで封止された内部に形成されており、加速度や角速度による重りの変位を静電容量で検出するものである。本論文は、この研究成果についてまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、多軸運動を同時に検出できるセンサの検出原理を提案し、設計したセンサ構造とそのシミュレーション結果、および検出回路に関して記述している。

第3章では、製作方法に関して述べている。基本的なマイクロマシニング以外に本研究で必要な要素技術があり、その装置の製作および技術の確立を行っている。また静電容量型センサの製造プロセスとして、ドライエッチングを中心にしたものと、ウェットエッチングを中心にしたものを開発した。

第4章では、試作したセンサの特性を評価した結果について述べている。加速度や角速度に対する応答や周波数特性などを調べるセンサ評価装置を整備し、これを用い5種類の試作したセンサについて特性評価を行った。また従来センサと比較し、優れた特性を有していることを明らかにしたが、これらは有用な成果である。

第5章では応用へ向けた考察を行っている。試作したセンサは、自動車の横転事故や斜衝突事故時に衝突状況を検出する目的で使用できる。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、多軸運動を同時検出するためのシリコン静電容量型センサをマイクロマシニング技術で製作する研究を行い、自動車の安全装備などに有用なセンサを開発することに成功したものであり、センサ工学および機械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。