

氏名	Choi jae-joon 崔 在濬
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4第条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) 機械電子工学専攻
学位論文題目	Silicon Micromachined Resonant Angular Rate Sensor
指導教官	東北大学教授 江刺 正喜
論文審査委員	主査 東北大学教授 江刺 正喜 東北大学教授 羽根 一博 東北大学教授 長南 征二

論文内容要旨

第1章 緒論

近年、様々な分野で角速度センサに関する必要性が高まってきている。例えば、車や飛行機などの自動航海システムやサスペンション制御、またカメラ等の手ぶれ補正、工事機械の振動制御等である。このように様々な分野で必要になってきているため小型、低価額、高性能の角速度センサが求められている。今まで機械的な加工によるもの、レーザを利用したものや光ファイバを利用した角速度センサが開発されているが、その性能は良いもののサイズが大きい、またコストが高い欠点がある。このような問題を解決するためにシリコンのマイクロマシニングによる振動型角速度センサに関する研究が行われた。マイクロマシニングのフォトリソグラフィ等の技術を用いる事によりセンサの小型化が容易になり、またバッチプロセスにより大量生産、低価格化が可能になる。また、シリコンが持つバネとしての良い機械特性を用いる事により高性能の角速度センサの作製が可能である。近年マイクロマシニングを用いて様々な振動型角速度センサが開発されているが、その感度が低いという欠点がある。主な問題は質量が小さくまた、振動子の駆動振幅が小さいからである。本研究ではこの問題を解決するために

1) 大振幅駆動、2) 共振型、3) バルクマイクロマシニングを用いることにした。まず、大振幅駆動のために静電駆動・電磁駆動の2つの方式を用いて研究を進めた。静電駆動の場合、電磁駆動のように磁石などの外部素子を必要としない長所があり、そのギャップを小さくすれば大きな駆動力が得られる。また、電磁駆動の場合は静電駆動に比べ、狭いギャップなどを必要としないので振動子の動きに制限がなく大きな振幅が得られる。次に駆動と検出振動の共振を利用するまたは2つの共振周波数を近づける事により高感度センサを得られる。最後にバルクマイクロマシニングを用いる事により、振動子の質量を大きく取る事ができ、高感度センサが得られる。

第2章 静電駆動容量検出型角速度センサ

・センサ構造及び動作原理

このセンサはガラス・シリコン・ガラスの3層構造をしている。ガラス上にはシリコン振動子の静電駆動及び角速度検出のための容量検出電極が設けられている。シリコンには反応性イオンエッチングと

XeF₂ ガスエッチングを用いてつくられた円盤型の振動子がある。駆動は面内を振動子が回転振動を行い、そのとき角速度が駆動振動の軸に対して90度ずれた軸に印加されると振動子はコリオリ力を受けて2つの軸と90度ずれた軸を中心に面外振動を起こす。この振動による容量変化を検出する事により角速度を知る事ができる。このセンサの場合、回転振動をしているが、測定回路に同期検波を用いることで加速度の影響を避けれる長所がある。また、振動子のビームはT字型をしていて回転駆動時に支持部に応力がかからないといった長所もある。

・製作技術

この振動子のビームはその重りの厚さ方向の真ん中に位置しており、このような加工のために反応性イオンエッチングとXeF₂ガスエッチングを組み合わせる加工方法が用いられた。また、大きな静電駆動力と高感度容量検出のためガラスとシリコンは狭いギャップで陽極接合されている。そのギャップは5μmである。

・測定及び評価

このセンサの振動特性をはかった結果、駆動と検出振動の共振周波数は1449と994Hzであった。この測定には光学変位センサとネットワークアナライザが用いられた。共振型を目的としていたが、制作時の誤差により2つの周波数がずれている。また、これらの振動の真空度依存性をはかった結果、真空度が悪くなるにつれQ値が急減する。これは狭いギャップによるダンピングの影響によるものである。角速度センサとしての評価のために真空角速度試験器が用いられた。センサはこの試験器の中にセットされ、中のターンテーブルを回す事でセンサの角速度を印加できる。この測定も空気ダンピングの影響をなくすために真空中で行った。角速度は-250~+250deg./secの範囲で測定され、センサ感度は10μV/(deg./sec.)であった。測定時のセンサの駆動振幅は約3μmであった。このセンサの場合、高い感度は得られなかったが、2つの共振周波数を近づければ高感度のセンサが得られると思われる。

第3章 電磁駆動誘導起電力検出型角速度センサ

・センサ構造及び動作原理

このセンサはシリコン・ガラス・永久磁石の3層構造をしている。シリコン部には振動子が加工されている。振動子の上面にはAu/Crの金属配線が4方向に配置されている。それぞれ2本を用いて駆動及び検出を行う。駆動配線に電流を流すことで、この電流と振動子の厚さ方向に発生している磁場により振動子にはローレンツ力が働き振動子は駆動される。角速度が磁場が働く軸周りに印加されるとコリオリ力が働き、振動子が駆動と角速度と90度ずれた軸に振動し始める。この振動により検出用の配線の両端には誘導起電力が発生する。このセンサの特徴は駆動と検出振動モードが基本的に一緒であり、簡単に共振型センサが得られる。また、片方のビームの寸法を変えれば簡単に非共振型になりセンサの感度と周波数特性のトレードオフの調整が簡単に可能になる。また、容量検出型センサと違って狭いギャップを必要としないのでシリコン振動子とガラス間のギャップも大きくとれて、空気ダンピングの影響も少ない。

・製作技術

このセンサの製作は非常に簡単である。製作に用いられた技術は金属のスパッタと反応性イオンエッチングだけである。マスクが少ない分、製作時の誤差をなくし精度良く振動子の加工ができた。

・測定及び評価

このセンサの振動特性を調べた結果、駆動と検出振動モードは 548 と 560Hz でありその Q 値も大気中で 1500 以上得られた。共振周波数に 12Hz 程度の誤差が見られているが、これは反応性イオンエッチング装置のばらつきからくるものであった。狭いギャップもないことから大気中でも高い Q 値が得られた。角速度センサとしての評価には同期検波回路が用いられた。駆動振幅は最大 70 μm も得られ、高感度の角速度センサが作られた。角速度は -150 \sim +150deg./sec. の間で測定され、感度は最大 233 $\mu\text{V}/(\text{deg./sec.})$ であった。

第4章 討 論

2つの振動の共振を利用する角速度センサの場合は感度は高いもののそれとは逆に周波数特性は悪くなる。角速度センサの検出回路の場合、加速度の影響を抑えるために同期検波回路を用いているが、その特性上、駆動と検出信号の周波数の差分のフィルタを設けてそれより高い周波数の信号はカットする。つまり、2つの振動の共振周波数の差が大きいほど角速度センサの周波数特性はよくなる。要するにセンサ感度と周波数特性にはトレードオフが必要である。この問題は実際センサの応用分野によりスペックが違っているのである。また、2つの振動モードの共振周波数が完全に一致した場合はメカニカルカップリングの問題も生じる。この共振周波数の調整が自由かつ簡単にできる振動型角速度センサが望ましい。

第5章 結 論

本研究では小型、低価格、高感度の角速度センサの開発を目的とした。本研究では静電駆動と電磁駆動の2つの方式の角速度センサを設計、制作およびその評価を行った。シリコンのマイクロマシニング技術を用いることにより小型、低価額、高感度の目的を達成することが可能である。また、振動子の製作にシリコンを用いる事で IC と集積化する事も可能であり、これによってより高感度の角速度センサが期待される。

審査結果の要旨

角速度センサはジャイロとも呼ばれ、加速度センサと共に運動の制御などに用いられる。特にマイクロマシニングで製作するシリコン振動型角速度センサは、小形のセンサを組み立てられた状態で安価に製作できることから、自動車の安全装備などにその実用化が期待されている。この振動型角速度センサは、共振駆動した振動子が回転したときに、コリオリ力によって生じる振動成分を検出するものである。本論文は、特に狭い幅で深い構造を自由に製作できるシリコンの反応性イオンエッチング(RIE)技術を適用して、高性能なシリコン振動型角速度センサを製作する研究を取り纏めたもので、全文5章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、振動子の駆動を静電引力で、また検出を静電容量の変化で行うセンサを試作し、評価した結果について述べている。このセンサはシリコンを上下からガラスで挟んだ構造で、シリコンの重りを静電引力で回転振動させるものであり、駆動側と検出側の振動がカップリングしにくい構造である。その製作は容易ではないが、RIE と XeF_2 によるガスエッチングを用いた新しい精密微細加工技術を開発し、これを製作した。

第3章では、振動子の駆動を電磁気力で、また検出を電磁誘導起電力で行うセンサを製作し、評価した結果について述べている。このセンサは共振周波数の交流電流を流し、電磁力で重りを動かすもので、RIE 技術で製作している。

第4章では、以上の試作研究を通して確立した、シリコン振動型角速度センサの設計指針について述べている。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、2種類のシリコン振動型角速度センサを RIE を中心としたマイクロマシニング技術で製作する研究を行い、小型高性能な角速度センサを安価に提供する技術を確立したもので、センサ工学、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。