

氏名（本籍）	劉 健男（中華人民共和国）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 220 号
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	SOI-MEMS 技術による静電容量式マイクロ加速度センサの最適化に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 室 英夫 (副査) 教授 陶 良 教授 山本 秀和 教授 脇田 和樹 准教授 安川 雪子

学位論文の要旨

SOI-MEMS 技術による静電容量式マイクロ加速度センサの最適化に関する研究

加速度センサは MEMS 技術の適用により小型化、低価格化が進み、様々な用途に用いられるようになった。各検出方式の中静電容量式加速度センサは作り易さ、また安定な特性によって主流となっている。これら静電容量式加速度センサでは重りが複数の構造の弾性体で支持されていて、各種の形状が用いられてきた。将来のさらなる小型化・高感度化のためには必ずしも最適な形状が明確にはなっていないように思われる。

一方、感度はビームの長さ、幅や形状にも依存し、それらのパラメータにより共振周波数も大きく変化する。しかしながら、従来技術のビームの折り返し構造は多種多様で、系統的に検討がなされておらず、また重りは比較的大きいという課題があった。そこで本研究では、製造工程が簡易な SOI(Silicon On Insulator)-MEMS 技術を用いた静電容量センサを対象とし、重りを一定として、ビームのパラメータを変化させた時の感度、共振周波数、高次共振モードをシミュレーションにより系統的に求め、各種パラメータによるこれらの特性の依存性を明確化し、最適化する手法の検討を行った。具体的には重りの辺の長さまでビームの長さを延ばすような構成、およびその技術に基づいて、さらに小型化の可能性についての検討を行った。更に高感度、小型化を実現するために静電容量検出方式をベースとした共振形加速度センサの可能性についても検討を行った。

第 4 章では重りの辺の長さまで梁の長さを延ばすような構成についての可能性の検討を行った。

まず、シミュレーターIntelliSuiteを用いて、重りが一定の場合、構造の片側の梁の長さを $100\ \mu\text{m}$ から $1000\ \mu\text{m}$ まで変化させ、さらに折り返し構造によって、検出軸の変位、他軸感度、共振周波数、高次モードの比について、その依存性を明確にした。重りの辺の長さと同じビーム長さのセンサの高次の共振周波数の基本共振周波数に対する比率は梁の全長が $500\ \mu\text{m}$ 以上であれば高次共振周波数の比は従来形の折り返し構造と比較して2倍以上にできることがわかった。同じ梁の全長で重りの寸法が $1\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ 場合、折り返し5回のセンサに対し、2本梁で折り返しをなくすことにより感度は約2倍にすることができる。この時第1モードの共振周波数は $680\ \text{Hz}$ から $330\ \text{Hz}$ へと低下するが、 $100\ \text{Hz}$ 以下単純な動きの検出、制御には十分に応用できるものと思われ、重りの辺の長さまで梁の長さを延ばすような構成は感度向上に有効であると確認できた。

第5章では感度と共振周波数の梁のパラメータ依存性とその構成を検討し、デバイスの小型化のための重りの一边の長さのビーム長を有する静電容量加速度センサの基本構造設計方法を検討した。重りの辺の長さまで梁の長さを延ばすような構成で、正方形重りの寸法を変更しながら、パラメータを変化させた時の感度、共振周波数、高次共振モードをシミュレーションにより系統的に求め、各種パラメータによるこれらの特性の依存性を明確化し、構造の小型化についての可能性の検討を行った。

重りのサイズが $1000\times 1000\ \mu\text{m}$ 、 $750\times 750\ \mu\text{m}$ 、および $500\times 500\ \mu\text{m}$ である3種類のMEMS静電容量型加速度センサの感度および共振周波数について、FEMシミュレーターIntelliSuiteを用いて計算した。重りの辺と同じビーム長さ場合、重りの寸法が $1000\times 1000\ \mu\text{m}$ で折り返しビームなしセンサの感度が $476\ \text{mV/G}$ に対し、 $750\times 750\ \mu\text{m}$ でビーム1回折り返しセンサは $452\ \text{mV/G}$ になり、ほぼ同じ感度という結果を得た。一方、 $500\times 500\ \mu\text{m}$ でビーム7回折り返しセンサの感度は $285\ \text{mV/G}$ であり、試作したプロトタイプの実験結果はシミュレート結果とよく一致した。折り返しビーム構造を用いて、重りサイズを低減しながら、性能を維持する手法の有効性を確認することができたと考える。

第6章ではさらなる小型化を実現するために、SOI-MEMS技術を用いた静電駆動の共振型加速度センサにおいて、変位検出用歯輪電極にDCの制御電圧を重畳させることで静電ポテンシャルを発生させて感度を向上させる方式の提案を行い、2種類のプロトタイプを設計・試作し、制御電圧対共振周波数特性の評価を行った。基準となる重り寸法 $1000\times 1000\ \mu\text{m}$ に対し、2つタイプのプロトタイプは重り寸法が $750\times 750\ \mu\text{m}$ と $500\times 500\ \mu\text{m}$ で、後者については同等の共振周波数と感度を実現するために支持ビームを折り返し構造とした。FEMシミュレーションでは制御電圧を $2\ \text{V}$ 程度とすることで $\pm 1\ \text{G}$ の加速度印加に対して、共振周波数変化が数十%と大幅に変化する特性が得られた。プロトタイプの実験でもほぼ同様な傾向の特性が得られ、提案した方式の有効性を確認することができた。モデル1の感度は $105\ \text{Hz/G}$ であり、モデル2は $135\ \text{Hz/G}$ の感度を得ることができた。これにより折り返し梁構造が共振型加速度センサの小型化に有効と確認できた。今後応用分野に応じ、適切な周波数応答範囲を設計し、共振型加速度センサの最適化を検討するとともに制御電圧の調整手法の確立を目指していく。

以上、本研究において得られた成果を総括した。小型化・高感度の基本構想から構成検討・設計

製作・特性評価という一連の研究を行い、SO-MEMS 技術を用いた小型静電容量式加速度センサの最適化手法を示すことができたと考えている。

審査結果の要旨

本研究は半導体微細加工技術を用いて作成される MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度センサの設計最適化に関するものである。加速度センサは運動の制御や振動検出などの電子制御システムのキーデバイスであり、MEMS 技術の適用により小型化、低価格化が進み、近年自動車からゲーム・携帯電話まで様々な用途に用いられるようになった。最近では IoT (Internet of Things) への適用をにらんでさらなる小型化、低価格化のニーズも高まっている。但し、小型化した場合低感度化・狭周波数帯域化するだけでなく、衝撃時の高次共振モードや他軸感度の影響も無視できなくなり、最適化の手法は必ずしも明確にはなっていないように思われる。このような背景から本研究では比較的良好に用いられている製造プロセスである SOI (Silicon-on-Insulator) - MEMS 技術によるデバイスに焦点を当て、シミュレーションとプロトタイプ的设计・試作・評価を通して静電容量式マイクロ加速度センサの設計最適化手法の検討及び新構造の櫛歯電極バイアス式共振形加速度センサの提案を行っている。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

最初にデバイス層厚さを $25\mu\text{m}$ 、重り寸法を $1\text{mm}\square$ の一定とし、梁の形状を変えたときに感度や共振周波数などの基本特性がどのように変化するかシミュレーションを用いて系統的に解析し比較している。特に高感度化を狙った重りの辺の長さの梁を用いたデバイスの可能性を調査している。感度は梁の長さの 3 乗に比例し、梁の折り返し本数に比例する基本特性を確認した後、梁を重りの変中央に接続しない限り、チップ面内の他軸感度は 0.2% 以下、チップ面垂直方向の他軸感度は 0.1% 以下になるという知見が得られ、その要因を考察している。一方、高次共振モードの共振周波数が基本共振周波数の何倍になるかについてもシミュレーションを行い、梁を重りの変中央に接続しない限り、2 次の共振については梁の長さを $500\mu\text{m}$ 以上とすることで 3 以上となること、3 次の共振については 6 以上になるという知見が得られた。これらのことについてもその要因を考察している。シミュレーションをもとにプロトタイプ的设计、試作、評価を行って、重りの辺の長さの梁を用いたデバイスの有効性を確認している。折り返し 5 回のセンサに対し、2 本梁で折り返しをなくすことにより感度は約 2 倍、基本共振周波数は 680Hz から 330Hz へと約半分となり、低速の動きの検出システムへの適用可能性を提示している。

次に上で検討した重りの辺の長さの梁を用いた加速度センサにおいて、小型化を実現するために重りの寸法を $1\text{mm}\square$ (A タイプ) から $750\mu\text{m}\square$ (B タイプ)、 $500\mu\text{m}\square$ (C タイプ) と縮小していったときに梁の折り返しを行うことでどのような特性になるかの検討を行っている。 $750\mu\text{m}\square$ では 1 回折り返し、 $500\mu\text{m}\square$ では 7 回折り返しを行い、それらの特性のシミュレーションを実施している。その結果、B タイプでは感度は A タイプとほぼ同等、C タイプでは感度は A タイプの約半分となり、基本周波共振周波数に対する 2 次の共振周波数の比はともに 4.5 以上、基本周波共振周波数に対する 3 次の共振周波数の比はともに 6 以上であるという知見が得られ、重りの辺の長さの梁

を用いた加速度センサにおいて重りを $500\mu\text{m}$ 程度まで小型化しても梁の折り返しを用いることで所定の性能の実現が可能であることを議論している。これをもとにプロトタイプ的设计, 試作, 評価を行って, シミュレーション結果の検証を行い, 折り返しビーム構造を用いて, 重りサイズを低減しながら, 性能を維持する手法の有効性を提示している。

以上の検討結果をもとにさらなる小型化を実現するために, 変位を共振周波数に変換する静電駆動の共振型加速度センサの可能性検討を行っている。これを実現するために重りの左右に検出用楡歯電極を, 重りの上下に駆動用楡歯電極を形成し, 重りの対角 2 頂点でビーム接続し, 支持するレイアウトを考案している。駆動用楡歯電極に AC 電圧を印加することで重りは上下に振動し, これを検出用楡歯電極とチャージアンプで電圧信号に変換している。この信号に位相シフトを加えてフィードバックすることにより自励で共振をさせることが可能となる。但し, このままでは重りの慣性質量が小さいために共振周波数変化も極めて小さいため, 感度を向上させるために変位検出用楡歯電極に DC の制御電圧を重畳させることで静電ポテンシャルを発生させて, 負のばね定数を実現することで感度を向上させる新しい方式の提案を行っている。この基本構想についてシミュレーションを行い, 重りが小さくとも制御電圧を調整することで $\pm 1\text{G}$ の加速度変化に対して共振周波数が数十%も変化するという知見を得て, 新提案の有効性を検証している。この結果をもとに重り寸法が $750\mu\text{m}$ と $500\mu\text{m}$ で前者は折り返し無し, 後者は折り返し 5 回で感度はほぼ同等となるような 2 種類のプロトタイプを設計・試作し, 制御電圧対共振周波数特性の評価を行っている。このプロトタイプの評価ではシミュレーション結果とほぼ同様な傾向の特性が得られ, 提案した方式の有効性を検証している。これにより折り返し梁構造が共振型加速度センサの小型化に有効と確認している。

以上より本論文は SOI-MEMS による静電容量式加速度センサの梁の寸法・形状に対する基本特性の依存性を明らかにし, 重りの辺の長さの梁を用いた加速度センサの有効性を検証したこと, さらに楡歯電極バイアス式共振形加速度センサの提案と原理検証したことから重要な知見が得られたものとして価値あるものであることを認める。

したがって, 学位申請者劉健男は博士 (工学) の学位を取得する資格があると認める。