

論文の内容の要旨

論文題目 伸縮梁構造を用いたピエゾ抵抗型 3 軸加速度センサの
高信頼性設計技術

氏 名 風 間 敦

半導体微細加工技術を応用した MEMS 技術の進展により、加速度センサやジャイロセンサなどの慣性センサが安価に生産され、主に民生用モバイル機器向けに搭載されるようになってきた。こうした慣性センサは錘を梁で支持した構造を有し、慣性力による錘の変位を、ピエゾ抵抗変化や静電容量変化を利用して検出する原理を用いている。今後の適用範囲拡大に向けて小型化や高感度化を図るためには、センサ素子の製造プロセス中に発生する薄膜残留応力や、樹脂モールドパッケージに組み立てる際の樹脂収縮力などの影響で梁が圧縮されることで発生するセンサ特性変動を抑制することが大きな課題となっている。また、可動部を有する MEMS センサにおいては、耐衝撃強度の確保も重要な課題である。センサが電子機器に実装されるまでの過程では、パッケージ単体で過大な衝撃を受ける場合があり、20000 G もの衝撃加速度に耐えることを要求される場合がある。

本研究の目的は、代表的な MEMS 慣性センサであるピエゾ抵抗型 3 軸加速度センサを対象として、センサ特性変動の抑制と耐衝撃性の確保という 2 つの信頼性課題を解決する高信頼設計技術を確立することである。

センサ特性変動の抑制のため、本研究では、梁の中央部に形成した伸縮部により圧縮の影響を緩和する伸縮梁構造を新たに提案した。本構造は、従来手法と比較して、サイズや製造コストが増加することがなく、樹脂収縮のような外部からの力だけでなく、薄膜残留応力のような内部応力に対しても効果を有する利点がある。本構造の効果を検証するため、まず梁が軸方向圧縮を受ける状態をモデル化し、材料力学計算による理論式から、圧縮によるセンサ感度への影響を定式化した。その結果、圧縮の増加に伴いセンサ感度が非線形に増大する現象を明らかにし、伸縮梁構造の導入によりその影響を抑制

でき、かつ2倍程度までの感度向上も図れることを示した。

本提案手法は、世界最小クラスの小型化 ($2.5 \times 2.5 \times 1.0 \text{ mm}^3$) を目指して開発した3軸加速度センササンプルを対象として検証した。本サンプルは、ウエハレベルパッケージ (WLP) 技術を用いて上下キャップ封止したセンサチップを樹脂モールドして、小型樹脂パッケージに収めたものである。2つのリングを直列配置した形状の伸縮梁構造により、感度の線形性維持とばらつき抑制が実現できることを、有限要素法 (FEM) 解析と試作評価を通して明らかにした。一方で、伸縮性を増加するほど伸縮部の耐衝撃強度は低下するため、耐衝撃性との両立について次に検討した。衝撃試験を模擬した過渡応答解析を用いた梁破壊メカニズムの分析に基づき、上下キャップと錘の間のギャップの低減と、伸縮梁形状の最適化を組み合わせ、目標の耐衝撃強度 20000 G 以上を達成する加速度センサの設計手法を明らかにした。

第1章では、本研究の背景として、MEMS 技術を用いて製作される慣性センサの概要を示した後、小型・高感度化を目指した際の信頼性上の課題として、梁圧縮によるセンサ特性変動と耐衝撃性の低下について述べた。両課題を解決する加速度センサの高信頼設計手法の確立を本研究の目的とした。

第2章では、本研究で対象とするピエゾ抵抗型3軸加速度センサの検出原理と製造プロセスについて述べた。ピエゾ抵抗型で WLP を適用するため、著者のグループでは、上下のキャップウエハとセンサウエハの3枚を同時に接合する WLP 技術を開発した。本技術を含め、次章以降の本論における議論の基礎となる、センサの構造および製造プロセスの概要を述べた。

第3章では、梁が軸方向圧縮を受けた際に、加速度センサの感度特性が受ける影響について、梁の理論式を用いて基礎的な検討を行った。まず、単純化した3軸加速度センサのモデルに対し、X (Y) 軸およびZ軸の感度について理論式を導いた。本理論式は、加速度センサの設計初期段階で、センサ素子構造の概略設計をする際に有用である。次に、梁が軸方向圧縮を受ける場合を検討し、梁圧縮がZ軸感度に与える影響について考察した。その結果、圧縮なしの場合に対する比率として定義される感度増大率 H_s が、オイラーの座屈荷重 P_{cr} の関係式として表され、圧縮荷重が P_{cr} に近づくほど感度が非線形に増大することを示した。

次に、上記梁圧縮の影響を緩和するため、軸方向に柔軟な伸縮部を梁の中央に配置する伸縮梁構造を提案した。伸縮梁構造の効果を検証するため、伸縮部の長さ、伸縮および曲げに対する剛性を、ストレート部に対する比率で一般化して定義し、Z軸感度の理論式を導出した。その結果、伸縮性を増加するほど、梁が座屈に至る圧縮変位を増加でき、座屈から遠ざけることで特性変動を抑制できることを示した。また、伸縮性を調節することで、感度の線形性を維持しつつ感度を2倍程度に増大できることも示した。望ましい伸縮部の形状についても検討し、リング形状とすることで、曲げ剛性を変えずに伸縮性を増加でき、特性変動を抑制できることを示した。

第4章では、具体的な伸縮梁形状に対して、FEM解析と試作評価を通して特性を評価し、センサ特性変動の抑制効果について検証した。まず、FEM解析を用いて梁圧縮の影響を評価するための解析手法を検討した。薄膜の残留応力、WLPのキャップ接合時のウエハ反り矯正、モールド樹脂の収縮という3つの梁圧縮原因に対し、熱応力解析により上記梁圧縮を再現した後に加速度に対する応答を求める解析手法を検討した。解析手法の妥当性は、市販済みの従来加速度センサの実測値と比較して検証した。本解析手法を用いて2リングの伸縮梁構造とストレート梁を比較したところ、ストレート梁の感度増大率6.52に対して、伸縮梁では1.22に抑制でき、特性変動抑制効果を確認した。また、固有振動数の解析も行い、伸縮部による固有振動の低下などはなく、むしろ圧縮の影響の抑制により固有振動数の増加が見込めることを明らかにした。

試作評価では、上記解析と同じ構造で加速度センサを製作し、上記3つの梁圧縮原因に対応した3つのパッケージ構造に組み立てたサンプルを用いてセンサ特性を測定し、伸縮梁の効果を検証した。試作評価結果の感度は、解析結果と定性的に一致した。樹脂モールドの前後において、ストレート梁ではZ軸感度が平均で約7倍に増大したのに対し、伸縮梁では1.26倍に抑制された。また、樹脂モールドしたサンプルのZ軸感度のばらつきも大幅に低減でき、MEMS加工技術に特有の加工誤差に起因する特性ばらつきに対しても抑制効果が確認できた。

第5章では、伸縮梁構造を適用した加速度センサについて、耐衝撃性と特性安定化を両立する設計手法について検討した。X方向の衝撃試験を模擬した時刻歴解析を行い、伸縮梁の破壊メカニズムを分析した。その結果、加速度波形に追従した錘のX方向の並進変位と、錘が回転してキャップに衝突した直後に励起される錘のX方向振動とにより、X軸に沿った梁に軸方向の引張が加わることを明らかにした。引張荷重に対し、伸縮梁ではリング内周への応力集中により最大応力が増加するため、耐衝撃強度が低下する。よって、リング部への応力集中を低減する形状最適化を検討し、3リングを直列配置した改善構造により、初期設計の2リングより伸縮性を8割増加した形状でも最大応力を4割低減した。キャップ衝突後の応力増加については、キャップと錘の間のギャップ高さを低減するほど小さくなり、錘の平面寸法が $700\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m}$ である本研究のセンサ素子においては、ギャップを $3\ \mu\text{m}$ 以下とすればほぼ抑制できることが分かった。

リング形状の最適化とギャップ低減の効果検証のため、試作評価を行った。初期設計2リング梁のサンプルで、ギャップを $15\ \mu\text{m}$ から $2\ \mu\text{m}$ に低減することで耐衝撃強度は $5000\ \text{G}$ から $15000\ \text{G}$ に増加し、さらに上記改善3リングの適用により $22000\ \text{G}$ でも破壊しないことを確認した。また伸縮性の増加により特性変動抑制効果も向上することを、感度の温度特性測定から確認した。

以上の結果を総合し、薄膜残留応力やパッケージの外力に起因するセンサ特性変動の抑制と、耐衝撃強度の確保を両立できる3軸加速度センサの高信頼設計は、概略以下の手順により達成される。

- (1) 理論式を用い、サイズや感度などの目標仕様を満足する素子寸法を概略設計する。
- (2) 伸縮梁形状を検討し、リング部の幅を変えた複数の候補仕様を設計して、ストレート梁に対する伸縮性の増大率 H_c と最大応力の増大率 C_{ring} との関係を得る。
- (3) 耐衝撃性について、耐衝撃加速度の目標と梁の破壊応力から、耐衝撃性確保に必要な C_{ring} の範囲を導き、候補を絞る。キャップ衝突による応力増加を防げるギャップ高さを解析から導き、それ以下のギャップに設計する。
- (4) 特性変動の抑制について、熱応力による梁圧縮を考慮した解析を行い、感度増大率 2 倍程度以下になる H_c の範囲を導き、候補を絞る。
- (5) 残った候補について試作評価を行い、センサ特性の補正と耐衝撃性確保が可能な範囲で、感度を大きくできる伸縮梁仕様を選択する。

本提案の伸縮梁構造は、樹脂収縮などの外力影響を遮断する従来技術と比較して、センサチップサイズと製造容易性を犠牲にすることなく適用でき、薄膜残留応力のようなセンサ素子内部の応力の影響も抑制できる特徴がある。汎用樹脂パッケージを適用した小型で高感度な慣性センサの実現において、本研究の成果を生かせるものと考えている。