

審 査 の 結 果 の 要 旨

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大量に生産され、モバイル機器を中心に普及が進んでいる。こうした慣性センサは錘を微細な梁で支持した構造であるため、センサ素子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によるセンサ特性変動の抑制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。

本研究の目的は、代表的な MEMS 慣性センサの一つであるピエゾ抵抗型 3 軸加速度センサを対象として、上記の応力による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性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が新たに提案された。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。

本提案構造の効果を検証するため、本研究では、まず 3 軸加速度センサの単純化モデルを対象に、材料力学計算による理論式を導出し、圧縮のセンサ感度への影響を定式化している。圧縮がない場合に対する Z 軸の感度増大率 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し、信頼性確保が困難になることを示した。伸縮梁については、伸縮部を従来のストレート梁との剛性の比較で一般化して定義し、ストレート梁に対する縮み増大率 H_c と曲げ増大率 H_d により上述の感度増大率 H_s を表現した。伸縮梁では座屈変位（梁が座屈に至る圧縮変位）が H_c/H_d 倍に増加するので、 H_c/H_d を大きくするほど座屈から遠ざかり、特性変動を抑制できる。 H_c/H_d を大きくできる伸縮部形状としてリング形状が適していることも示された。

実際に加速度センサに適用した場合の伸縮梁の特性変動抑制効果は、世界最

小クラスの小型化 ($2.5 \times 2.5 \times 1.0 \text{ mm}^3$) を目指して開発された 3 軸加速度センササンプルを対象として、FEM 解析と試作評価の両面から検証された。1 リング ($H_c/H_d=3$) と 2 リング ($H_c/H_d=5$) の 2 種類の伸縮梁とストレート梁を比較している。

薄膜の残留応力、WLP のキャップ接合時のウェハ反り矯正、樹脂モールドの収縮という 3 つの梁圧縮原因の影響を評価するため、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が提案された。試作評価でも上記 3 条件に相当するサンプルを試作して評価し、解析と試作評価から、伸縮梁の特性が検証された。樹脂モールド前後の感度増大率はストレート梁の 7 に対して、2 リングで 1.3 倍に抑制でき、また MEMS 加工技術に特有の加工誤差に起因する特性ばらつきを抑制できることも確認された。

一方で、伸縮部の導入により耐衝撃強度は低下するため、特性変動抑制と耐衝撃性を両立するための設計技術について詳しく論じている。X、Y 軸方向の衝撃に弱く、伸縮梁で耐衝撃強度が低下するメカニズムが、衝撃試験を模擬した過渡応答解析を通して分析されている。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、梁に軸方向の引張が加わることが明らかとなった。上記考察から、衝撃試験において伸縮梁に発生する最大応力 σ_{ring} を、錘に加わるピーク加速度荷重によるストレート梁中央の応力 σ_s に、リング部への応力集中による応力増大率 C_{ring} と、キャップへの衝突による応力増大率 C_{crash} を掛けた式で表現できることが示された。 C_{crash} は、キャップと錘の間のギャップ高さを $3 \text{ }\mu\text{m}$ 以下に低減することでほぼ 1 まで抑制される。さらに、センサ特性変動抑制に必要な縮み増大率 H_c を損なうことなく、 C_{ring} を低減できる伸縮梁形状の検討を行い、 H_c を 8 割増加した形状でも C_{ring} を 4 割低減できる 3 リング形状が導かれた。試作評価の結果、本 3 リング形状の伸縮梁の適用と、ギャップ高さを約 $2 \text{ }\mu\text{m}$ に低減することで、目標の耐衝撃 20000 G 以上が達成された。

以上のように、piezo抵抗型 3 軸加速度センサを対象に、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高信頼性設計手法が示された。本研究を通して得られた MEMS 慣性センサの信頼性に関する広範な知見や、解析を用いた評価手法などは、MEMS センサの研究開発における現象分析や高信頼性設計に大いに生かせるものである。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。