

氏 名	ひろさわ たく
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	工博第 2329 号
学位授与の日付	平成 15 年 11 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科機械工学専攻
学位論文題目	薄膜の機械的特性の評価方法と MEMS の高機能化に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 小寺 秀俊 教授 島 進 教授 北村 隆行

論 文 内 容 の 要 旨

MEMS (マイクロマシン) は薄膜材料で構成されており、その機械的特性は MEMS の特性に影響を与えることになるため、MEMS の実用化、発展の為に、従来の機械部品と同様に材料の機械的特性を計測し、それを用いて設計を行うことが必要である。本論文は、MEMS 分野において重要な役割を担う薄膜材料のうち、スパッタリングや蒸着により作製された薄膜材料の機械的特性を評価するための引張り試験法を考案するとともに、考案した引張り試験法を用いて行った作製時の成膜条件が薄膜材料の機械的特性に及ぼす影響に関する研究と、MEMS の作製プロセスの特性を生かした最適構造・最適設計を実現することを目的として、動作時のマイクロマシンの変形を数値解析するための支配方程式の導出とそれを用いた構造最適化手法に関する研究についてまとめたものであり、7 章からなっている。

序論である第 1 章では、本研究の目的及びその必要性について述べるとともに、既往研究との関連性について概説している。

第 2 章では非接触でひずみを高精度に計測することが可能なレーザースペckル相関を用いた微小ひずみ計測装置を開発するとともに、試験中の薄膜の破壊を保護することを可能にする基板を用いることにより、引張り試験による薄膜材料の機械的特性の計測を簡便に行うことを可能にしている。さらに、考案した試験方法を用いて、成膜と引張り試験を交互に行い、アルミニウム薄膜の成膜時の機械的特性の変化を明らかにしている。

第 3 章では、薄膜構造と機械的特性の関係を調べる為に、第 2 章で開発した引張り試験装置を用いて、PZT 薄膜の面内方向の弾性定数と成膜時の基板温度の関係を計測し、次のような結果を得ている。基板温度を変えて成膜した PZT 薄膜の構造を SEM, AFM, XDR により測定し、基板温度が 550℃ 以下では薄膜はパイロクロア構造の薄膜となり、600℃ 以上ではペロブスカイト構造となることを明らかにしている。誘電率、PE ヒステリシスなどの電気的特性は成膜時の基板温度に応じて変化するが、面内方向の弾性定数は成膜温度が異なる場合にも変化が現れず、弾性定数の構造依存性が低いことを明らかにしている。

第 4 章では、MEMS の作製方法の自由度を拡大し、効率的な開発を行う方法として、成膜後に薄膜材料の材料特性を調製することを提案している。熱膨張係数の異なる基板上に PZT 薄膜を成膜し、それぞれの薄膜の誘電率を計測することにより、誘電率の残留応力依存性を明らかにしている。さらに、PZT 薄膜に機械的なひずみを加えることにより、誘電率が変化することを示すと同時に、機械的なひずみを加えることにより圧電定数が制御可能であることを明らかにしている。

第 5 章では、数値解析を用いて MEMS の最適設計を行う為に、薄膜メンブレンが空気中で動作する場合にメンブレン周囲の空気が動作特性に与える影響を実験的に明らかにしている。また、マイクロ部品間の微小な隙間の流体抵抗を考慮してマイクロ部品の変形解析を行う為の支配方程式を求めている。

第 6 章では、組み立てが困難であるマイクロマシン作製の問題点を克服する方法として、膜厚および駆動用電極を分布させることで、マイクロ構造の変形特性を制御することを提案し、その有効性を明らかにしている。さらに、所望の変形特性

を發揮する膜厚および駆動用電極の分布を求める方法として、有限要素法を用いて前章で求めた支配方程式を解き、その解析方法に遺伝的アルゴリズムを組み合わせて構造最適化を行う方法を構築している。開発した手法の有効性は、マイクロボンプの動作膜の膜厚分布と電極分布の最適化に応用することで明らかにしている。

第7章では、本研究を通して得られた知見を総括し、本研究の今後の進展と将来の研究課題について言及している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、マイクロマシン分野において重要な役割を担う薄膜材料のうち、スパッタリングや蒸着により作製された薄膜材料の機械的特性を評価するために引張り試験法を考案し、考案した引張り試験法を用いて行った作製時の成膜条件が薄膜材料の機械的特性に及ぼす影響に関する研究と、マイクロマシンの作製プロセスの特性を生かした最適構造・最適設計を実現することを目的として、動作時のマイクロマシンの変形を数値解析するための支配方程式の導出とそれを用いた構造最適化手法に関する研究についてまとめたものであり、得られた主な研究成果は以下の通りである。

(1) 非接触でひずみを高精度に計測することが可能なレーザースペckル相関を用いた微小ひずみ計測装置を開発するとともに、試験中の薄膜の破壊を保護することを可能にする基板を用いることにより、引張り試験による薄膜材料の機械的特性の計測を簡便に行うことを可能にした。また、考案した試験方法を用いて、成膜と引張り試験を交互に行い、アルミニウム薄膜の成膜時の機械的特性の変化を明らかにした。

(2) 上記で考案した引張り試験法を用いて、マイクロマシンにおけるアクチュエータ材料として重要なPZT薄膜において、成膜条件がPZT薄膜の機械的特性および圧電特性に与える影響を明らかにするとともに、PZT薄膜の内部ひずみと圧電特性の関係を求め、それを元に、成膜後に塑性変形を与えることでPZT薄膜の圧電特性を調節することを可能にした。

(3) マイクロマシンの動作に空気が大きく影響を及ぼすことを示し、マイクロ構造の動作時の変形を数値解析するための支配方程式を導くとともに、成膜・エッチングというマイクロマシン作製プロセスの特徴を生かし、マイクロ構造を分布させることで、薄膜の変形や動作を制御することが可能であることを示した。その考え方を元に、有限要素法に遺伝的アルゴリズムを組み合わせ、所望の機能を發揮するマイクロ構造を算出する数値計算方法を考案し、マイクロアクチュエータの設計に適用することにより、考案した手法の有効性を示した。

以上要するに本論文は、マイクロマシンの構造材料及び機能材料として用いられる、薄膜材料の機械的特性を簡便に引張り試験する方法を考案し、薄膜の機械的特性に及ぼす成膜プロセス条件の影響を明らかにするとともに、成膜・エッチングというマイクロマシン作製プロセスの特徴を利用し、数値解析を用いて最適構造・最適設計を実現する方法を構築し、その有用性を示したものであり、得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年10月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。