

氏 名	ウ レ フイ V U L E H U Y
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博第862号
学位授与の日付	平成25年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	A Study of Statistical Characterization of Strength and Fatigue Lifetime for Silicon and Polysilicon Structures in MEMS (MEMS構造材料としてのシリコンおよびポリシリコンを対象とした強度と疲労寿命の統計的性質に関する研究)
論文審査委員	主 査 教 授 神 谷 庄 司 教 授 井 門 康 司 教 授 松 本 健 郎 教 授 渡 邊 義 見 教 授 佐 藤 一 雄 (愛知工業大学)

論文内容の要旨

Silicon and polysilicon are the most common structural materials for micro electro-mechanical systems (MEMS). Since the end of the last century, many evidences have been found that they are susceptible to fatigue. The strength of structures made of silicon has also been found to be strongly dependent on the fabrication process of structures such as etching. Designing MEMS with quantitatively evaluated long-term mechanical reliability is indeed one of the most important and urgent issues in order to push them through further development for future applications requiring higher levels of reliability. This thesis describes the development of evaluation and design scheme for the strength and fatigue lifetime of silicon and polysilicon materials in MEMS.

Firstly, from a statistical point of view, polysilicon thin films were examined whether their fatigue behavior can be formulated uniquely on the basis of initial defects which determine their strength distribution. The fatigue process determining the lifetime is modeled with the well-known Paris law as the fatigue crack extension process from the initial defects, whose equivalent crack lengths were evaluated from the initial strength distribution described by the Weibull distribution. The parameters in Paris' law were fit to

the results of tensile fatigue tests with constant stress amplitudes performed on three groups of polysilicon thin film specimens patterned using different etching conditions leading to different etching damage. The results support a possibility that the fatigue behavior is independent of etching condition and that therefore the fatigue lifetimes can be practically predicted from their strength distributions by using the same values of the parameters in Paris' law.

The above theory was then extended to evaluate the strength distribution and fatigue behaviors of polysilicon thin film specimens patterned by etching into arbitrary shapes. The results show that the fracture and fatigue behaviors of the specimens can be described on the basis of local characteristics determined again by using the same set of parameters despite the different stress distribution. This means that the local characteristics of etching damage and the subsequent damage accumulation under fatigue loading were independent also of the shapes and the stress distributions. Therefore, the theory enables prediction for fracture strength and fatigue lifetime and thus designing silicon thin film structures.

For the case of very long fatigue lifetime, by the way, experiment may have to be stopped before failure when the number of cycles exceeds an affordable time limit. To overcome this hurdle, a new experimental method was proposed in order to estimate the fatigue behavior of polysilicon thin films by using cyclic loading with gradually increasing stress amplitude. The results show that the parameter values are the same as those obtained from the fatigue tests with constant stress amplitude, and that the new experimental method can be used to predict the fatigue lifetime in a more efficient manner.

Finally, a scheme for predicting the strength of thick structures patterned into arbitrary shapes by deep reactive ion etching of silicon wafer was also proposed. The scheme is based on the inhomogeneous defect distribution on the etched surfaces. Distributions of the fracture strength were described using two-parameter Weibull statistics, where the two parameters are defined as functions of the etching depth representing the inhomogeneity of the damage on the etched surface in the etching direction. The results showed that the fracture strength of arbitrarily-shaped structures can be predicted with statistical significance on the basis of the information obtained from a set of reference specimens, by taking into account the characteristics of etched surface, i.e., the inhomogeneous damage.

After accumulating these new findings, the fracture strength and fatigue lifetime of silicon structures in MEMS becomes predictable, and therefore they enable designing silicon MEMS structures with a specified level of mechanical reliability. This will help to save the time and expenses in the development of MEMS structures.

論文審査結果の要旨

半導体加工技術を応用して作製される微小電子機械システム (Micro electro-mechanical systems: MEMS, マイクロマシン) においては、半導体材料であるシリコンが機械構造材料としても多用されている。シリコンは典型的な脆性材料であるが、繰返し負荷により疲労破壊が発生することが最近になって明らかとなり、特にMEMS構造の長期信頼性に対する脅威となっている。本学位論文ではこれまでに有効な手段が知られていなかったシリコンの疲労挙動の評価に対して、疲労き裂進展モデルに基づく初期強度からの寿命予測方法論の提案と検証を行っており、材料科学的な疲労機構の考察と工学的な信頼性評価技術の両面から学術的価値が高い。具体的な内容は以下の全6章および2項目の補遺から構成されている。

第1章は本研究の序論であり、従前の知見と信頼性確保の重要性とを論じており、本論文の背景が詳細に解説されている。

第2章では、加工条件の違いにより異なる強度（静的荷重に対する破壊強度）を有する多結晶シリコン試験片を対象とし、疲労寿命の定量評価を試みている。強度に対応する初期き裂からの疲労き裂進展モデルを提案し、予測結果を実験で得られた疲労寿命分布にフィットしたところ、き裂進展挙動を決定するパラメータの最適値が統計的に一定の範囲に分布することが初めて明らかとなった。

第3章では第2章での議論を任意応力分布を有する試験片の疲労寿命評価に拡張し、構造設計の工学的な方法論として同様の考えが有効であることを示している。またその過程において、第2章で扱った均一応力分布を有する試験片においては、試験片把持部の応力集中による破壊が統計解析に誤差をもたらすことを指摘し、これを除去することでパラメータの本来の存在範囲がさらに狭い領域に限定されることを見出した。以上の結果により、多結晶シリコンで作製される任意形状の構造の強度および疲労寿命の分布が予測可能であることが立証されており、今後のさらなる応用面の発展が十分に期待できる。

一方、シリコンの疲労試験には一般に長時間を要し、特に不活性環境下では実験可能な範囲で全く疲労しないというのがこれまでの通説であった。第4章ではこの問題に対して応力振幅を漸次増加させる試験を行って上記パラメータを取得する新しい方法を提案し、得られた値から通常の疲労試験の結果が予測可能であることを示している。この新しい疲労試験方法によれば、ごく長い期間での疲労破壊確率を決定するためのデータを限られた一定期間内に取得することができ、MEMS構造の長期信頼性の定量化に道を開くことが期待される。

第5章では、第4章までの薄膜試験片に対する方法論を厚さが大きい場合に拡張すべく、反応性イオンによる深堀りエッチングで任意形状を付与したシリコン単結晶ウェハ試験片の強度を、単純形状の参照試験片の強度から予測することを試みている。エッチングによる加工面の損傷が加工深さによって変化することに着目し、新たに深さ方向の強度分布を関数として定量化し予測に反映した結果、形状のいかんにかかわらず高い精度で実験結果と一致することが確認された。その原理から疲労寿命予測にも同様の方法論を適用することが可能と期待される。

第6章は結言であり、本研究で得られた知見の総括と、それに立脚した構造強度設計のフローをまとめている。

さらに2項目の補遺では、本論文の基礎となる疲労モデルをサポートするものとして、疲労損傷の蓄積と疲労き裂進展状況の詳細な観察結果を提示している。

以上、本論文はシリコンにより作製されたMEMS構造物の長期信頼性の定量化において世界に先駆けた成果をまとめたものであり、博士論文として十分な価値を有すると判断される。