

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03836

研究課題名（和文）マイクロミラーの高ねじり角負荷に対する疲労寿命評価と疲労加速現象の解明

研究課題名（英文）Fatigue Lifetime of Micro Mirror on High Torsional Stress and Elucidation of Accelerated Fatigue Phenomena

研究代表者

泉 隼人（Izumi, Hayato）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：90578337

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：シリコンの疲労過程を明らかにするため、透過型電子顕微鏡の観察用試料ホルダーでねじり疲労試験が可能なマイクロ材料試験デバイスについて設計・製作を試みた。有限要素法解析を用いて応力・振動・座屈を検討し、3.8mm×4.0mmの寸法かつ周波数11kHzでせん断応力2GPaを試験片に負荷できる材料試験デバイスを設計した。全54工程による製作工程を立案し、SOIウエハに圧電駆動用PZTを5μm成膜する工程まで取り組んだ。材料試験デバイスの静的強度を測定するため、マイクロねじり試験機を設計した。pn接合を実装した試験片と予備実験から、シリコンの欠陥集積とせん断応力の関与を示唆する観察結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シリコンの疲労破壊が発見されて以来、四半世紀が経つにも関わらず、実験の困難さもあり、疲労破壊の本質に関する決定的な証拠は未だ得られていない。シリコンの疲労破壊の挙動を明らかにするための方法論として、本研究では透過型電子顕微鏡を用いた直接観察を提案し、透過型電子顕微鏡の極めて限られた観察スペース内において、疲労過程その場観察を実現するための材料試験デバイスが設計・製作できることを示した。また予備実験によりシリコンの欠陥集積とせん断応力との関係が示唆されたことから、今後、本デバイスを用いてねじりによるせん断応力とシリコンの疲労過程の詳細観察および疲労破壊メカニズムの解明が期待される。

研究成果の概要（英文）：To identify the fatigue behavior of silicon, micro testing device capable of fatigue testing and integration on transmission electro microscopy holder was designed. The stress, resonance frequency, buckling for micro testing device were calculated using FEM software, and it has become possible to design the size with 3.8mm×4.0mm, resonance frequency with 11kHz, shear stress with 2GPa. Fabrication process for micro testing device was considered, and pzt thin film was deposited on SOI wafer for piezoelectric drive. Micro torsion testing machine also was designed for measuring the static strength for fatigue test. Relationship between detect accumulation on silicon and shear stress was suggested.

研究分野：材料力学

キーワード：シリコン 有限要素法解析 マイクロミラー 材料試験 圧電素子 透過型電子顕微鏡

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

MEMS (Microelectromechanical Systems、微小電気機械システム) は我が国の国家課題「環境・エネルギー」、「医療・福祉」、「安心・安全」に貢献する革新技術の一つとして期待されている。近年、自動車や医療産業では HUD や網膜走査型レーザアイウェアの実用化が検討されており、これらはレーザ光源を利用した投射型ディスプレイと同じ、MEMS 技術によるマイクロミラーが用いられている。工業用レーザ顕微鏡などに利用される既存のミラーは、機械的振れ角(ミラーの傾く角度)が $2\sim 3^\circ$ 程度と小さいが、HUD や網膜走査型レーザアイウェアは高解像度大画面表示化や広範囲走査によって、 $7\sim 12^\circ$ と既存ミラーよりも大きな振れ角の仕様が求められている。マイクロミラーは「シリコン」をベースに製作されており、シリコンは典型的脆性材料にもかかわらず繰返し荷重によって「疲労破壊」するため、シリコン MEMS の安全・信頼性を脅かす重大問題として懸念されてきた。繰返し荷重を受けるマイクロミラーは、高ねじり角負荷でミラーを支持するトーションバー(ねじり棒ばね)の疲労破壊が既に顕在化している。特に車載電装部品の HUD は、「高温多湿」というシリコンにとって過酷な使用環境にも関わらず、高ねじり角負荷と環境効果に対するマイクロミラーの疲労寿命(せん断疲労特性)や故障解析は十分に評価されていない

2. 研究の目的

本研究では、透過型電子顕微鏡(TEM)の観察用試料ホルダーに搭載でき、その場観察実験によって高ねじり負荷に対するシリコンの疲労破壊の過程を明らかにするためのマイクロ材料試験デバイスの設計・製作を試みた。

3. 研究の方法

マイクロ材料試験デバイスの開発および観察実験を行うため、本研究では以下の内容に取り組んだ。

- ・有限要素法解析を用いたマイクロ材料試験デバイスの応力および共振周波数解析
- ・マイクロ材料試験デバイスの製作
- ・マイクロねじり試験機の設計・開発
- ・電子線誘起電流法を用いた欠陥観察の予備実験

4. 研究成果

- ・マイクロ材料試験デバイスの設計

図1(左)に示すように、高ねじり負荷に対するシリコンの疲労寿命を評価するため、圧電駆動によるマイクロミラーのねじり動作を利用したマイクロ材料試験デバイスを設計した。マイクロ材料試験デバイスは透過型電子顕微鏡の試料ホルダーに搭載できるように $3.8\text{mm}\times 4.0\text{mm}$ の寸法とした。また有限要素法を用いて圧電駆動型マイクロミラーの共振周波数解析を行い、約 11kHz で繰返しねじり負荷可能なことを確認した。さらに共振周波数時のマスの変位から、デバイスの試験片部に負荷される応力を考慮し、 50V 印加時に 2GPa のせん断応力(図1右)であったことから、十分な高ねじり負荷で疲労試験が実施できる見込みを得た。

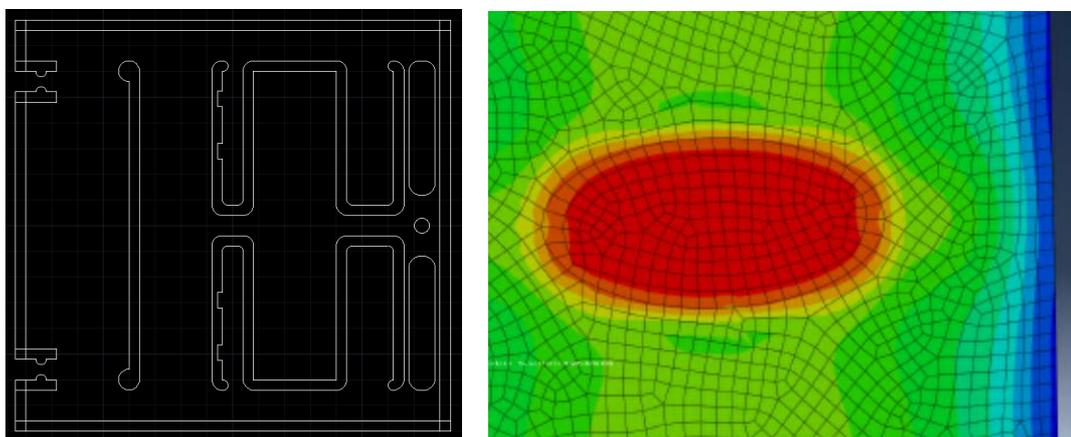


図1 マイクロ材料試験デバイス(左)およびねじり時の試験片のせん断応力(右)

・マイクロ材料試験デバイスの製作

マイクロ材料試験デバイスを製作するため、製作工程を検討し、以下の54工程を立案した(図2)。また下記の工程に取り組み、まずレーザー直描装置(DWL2000)を用いてフォトリソグラフィマスクを製作した。次にSOIウエハを薬液洗浄(硫酸過水) 純粋洗浄(メガソニック・二流体) スピン乾燥し、SOIを熱酸化(MT-8-A、光洋サーモシステム)した。裏面酸化膜をBHFで除去後、ウエハ表面に圧電駆動用PZT薄膜を多元スパッタリング装置(ANELVA EB1100)により5μm成膜した(図3)。

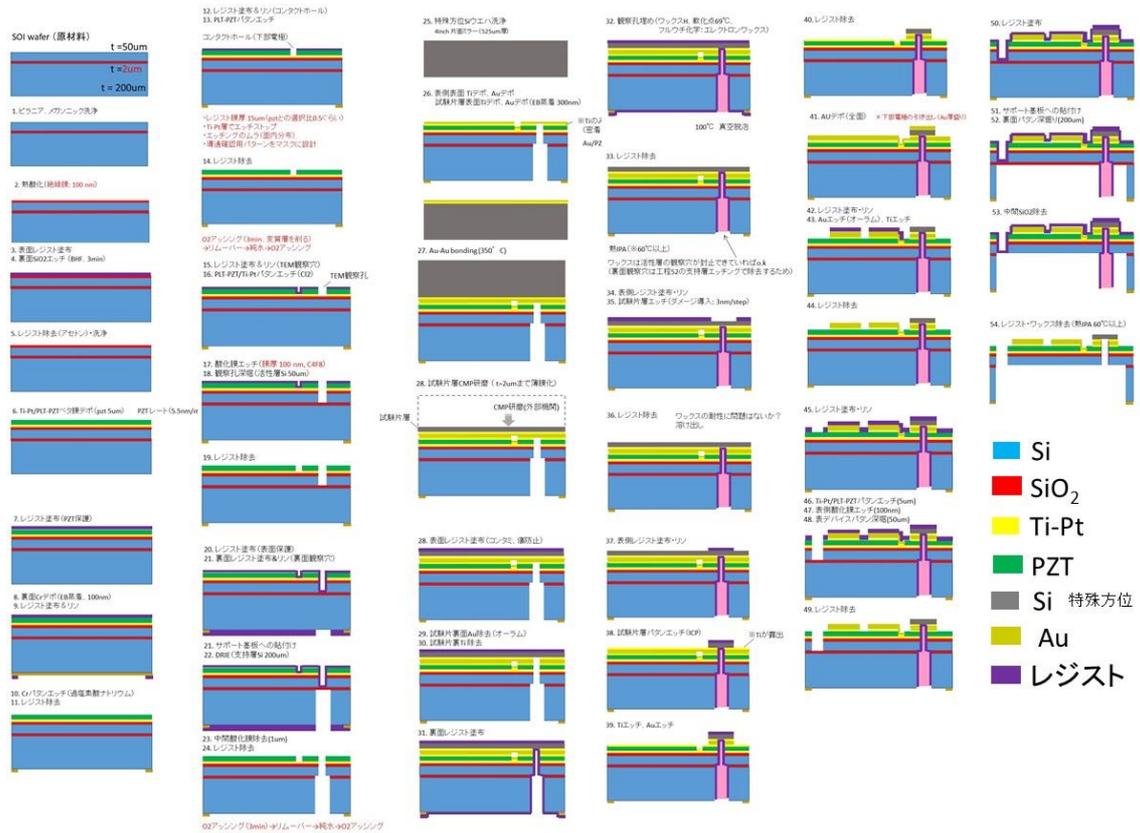


図2 マイクロ材料試験デバイスの製作工程

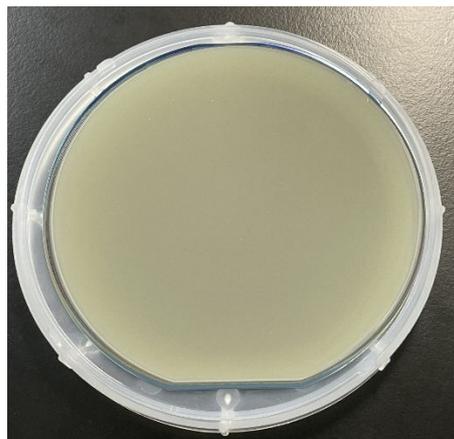


図3 多元スパッタリング装置により成膜したPZT薄膜

・マイクロねじり試験機の設計

マイクロ材料試験デバイスの静的強度を基準としてねじり負荷および疲労寿命を評価するため、図4に示すように、この原理とリンク機構を組み合わせたマイクロねじり試験機を設計した。

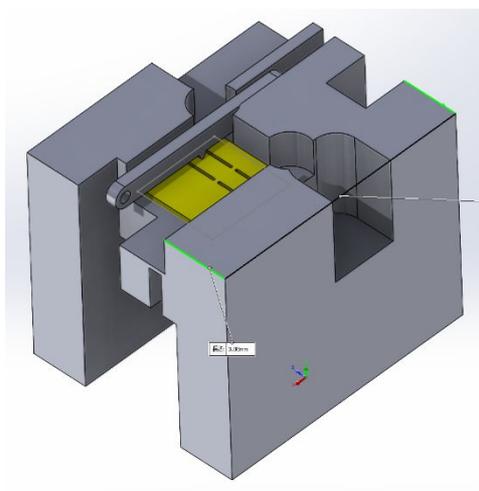


図4 マイクロねじり試験機

・電子線誘起電流法を用いた欠陥観察の予備実験

将来的に、マイクロ材料試験デバイスに欠陥検出機能を実装して疲労試験を実施するため、電子線誘起電流法を用いるためのpn接合を有する試験片を製作し(図5左) これを用いて欠陥可視化の予備試験を行った。温度 50°C湿度 75%で繰返し圧縮荷重を荷重し、100万サイクル後に観察すると、試験片のせん断応力の高い箇所でコントラストの変化および特異な模様が観察された。このことから、シリコンの疲労挙動にせん断応力が寄与することが示唆された。

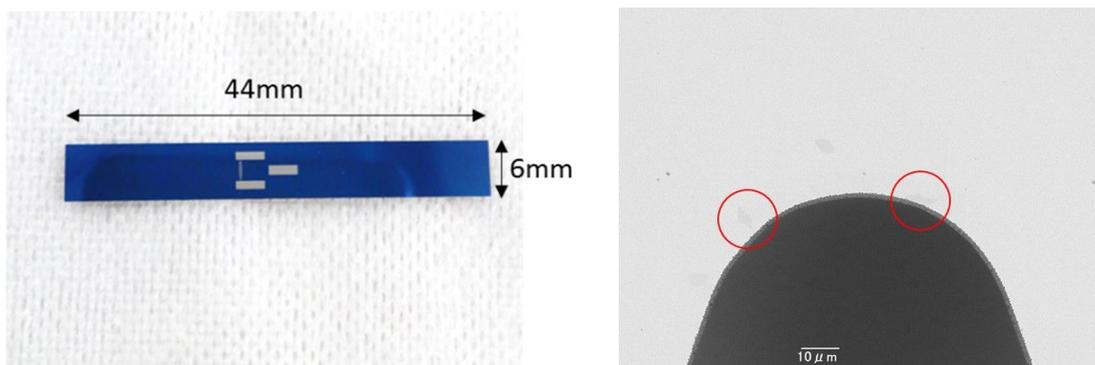


図5 pn接合を実装した試験片(左) 疲労試験後の試料表面の観察結果(右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Izumi, T. Kita, S. Arai, K. Sasaki, S. Kamiya	4. 巻 57
2. 論文標題 The origin of fatigue fracture in single-crystal silicon	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Material Science	6. 最初と最後の頁 8557-8566
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10853-022-07055-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Kamiya, H. Izumi, T. Sekine, N. Shishido, H. Sugiyama, Y. Haga, T. Minari, M. Koganemaru, S. Tokito	4. 巻 694
2. 論文標題 A multidimensional scheme of characterization for performance deterioration behavior of flexible devices under bending deformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 137613
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 S. Kamiya, H. Izumi, T. Sekine, N. Shishido, H. Sugiyama, Y. Haga, T. Minari, M. Koganemaru, S. Tokito
2. 発表標題 A novel scheme of characterization for performance deterioration behavior of flexible devices under bending deformation
3. 学会等名 46th International Conference on Metallurgical Coating and Thin Films（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山裕子, 泉隼人, 神谷庄司
2. 発表標題 繰返し圧縮負荷によるシリコン単結晶中の結晶欠陥集積とき裂進展の電子顕微鏡観察
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 灰本隆志, 松崎栄, 川合章仁, 泉隼人, 神谷庄司
2. 発表標題 極薄シリコンチップの曲げ強度測定
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Izumi M. Nakamura S. Kamiya
2. 発表標題 Plastic Deformation Enhanced Silicon Surface by Synergistic Effect between Defect and Hydrogen
3. 学会等名 The 9th Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano technology (APCOT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Izumi M. Nakamura S. Kamiya
2. 発表標題 Increasing the ductility of single crystalline silicon treated by hydrogen plasma
3. 学会等名 16th International Conference on Plasma Surface Engineering (PSE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉隼人
2. 発表標題 マイクロシステムの機械的信頼性評価
3. 学会等名 有機機能材料のリソグラフィ加工コンソーシアム (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------