

## シリコンマイクロ構造体の

### 高信頼化に資する表面酸化反応疲労現象の解明

Explanation of reaction layer fatigue in silicon micro-structure for development of highly-reliable MEMS devices

土屋 智由 (TOSHIYUKI TSUCHIYA)

京都大学・大学院工学研究科・准教授



#### 研究の概要

本研究では、静電チャックという独自の試験片把持法を用いた薄膜引張試験により、高温、高湿度などの様々な環境での引張疲労試験とデバイス構造を簡略化した静電駆動型振動子の共振振動疲労試験を用いて、シリコンの機械的材料としての信頼性を明らかにする。特に、信頼性が湿度に影響を受けることから表面の酸化に着目し、そのメカニズムを解明する。もって、実用が進む MEMS デバイスに機械構造体として用いられるシリコンの機械的信頼性を明らかにし、高信頼、高性能な MEMS の実現に寄与する。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：シリコン、MEMS、疲労、酸化、信頼性

#### 1. 研究開始当初の背景

MEMS デバイスの実用化が進む中で、シリコン構造体の信頼性が改めて注目されている。シリコンは脆性材料として、室温では転位が動かないという認識のもといわゆる疲労現象は起こらないという考えがあった。しかしながら、現実には繰り返し荷重印加による強度の低下が観察され、この強度低下が雰囲気湿度に影響を受けやすく、特に露点に近い高湿度では強度低下が顕著であることが明らかになっている。そこで、高信頼、高性能なデバイスを実現するためにシリコンの疲労現象の評価とメカニズムの解明が必要とされていた。

#### 2. 研究の目的

本研究では、シリコンの繰り返し荷重による強度低下のメカニズムとして、表面の酸化、特に応力印加により誘起される酸化膜に着目し、シリコンの疲労現象を理解することである。このために、単軸引張試験と曲げモード共振振動試験による評価を併用することでシリコンの機械材料としての特性をデバイスの信頼性設計データへの関連付けを容易にし、これによってより高信頼で高性能なシリコン MEMS デバイスを実現することを目指す。

#### 3. 研究の方法

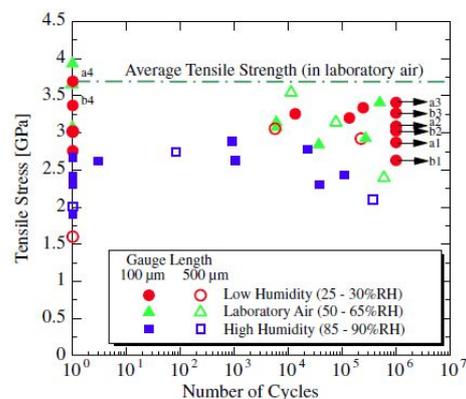
##### a) 引張疲労試験

独自に開発した静電チャックを用いた引

張試験方法はチャック機構がコンパクトであるので、高温、高湿度、真空などの様々な環境での試験に適用可能である。既設の雰囲気制御型、高温型引張試験装置、新たに開発した真空引張試験装置を用い、単軸引張応力下での単結晶シリコンの破壊と疲労特性データを収集する。

##### b) 共振振動疲労試験

既開発の扇形回転変位の静電容量型振動子を用いた高サイクル疲労試験方法を用いて、デバイスの設計に必要な信頼性データを収集する。



#### 4. これまでの成果

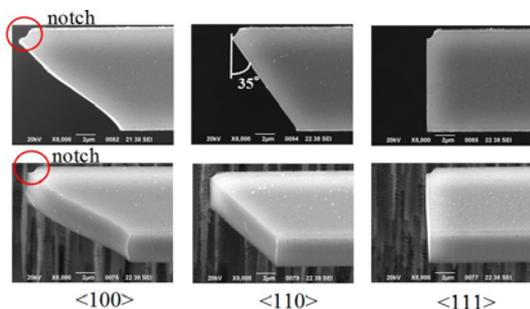
雰囲気湿度制御可能な引張試験装置を用い、低湿度～高湿度領域における単結晶シリ

コン試験片の引張疲労試験を実施した。その結果、特に露点に近い高湿度（85～90%RH）において、疲労強度、疲労寿命の低下が観察された。

赤外線放射加熱を用いた高温薄膜引張試験装置について、従来問題になっていた試験片部の温度分布を改善するために、装置の改良を実施し、試験片の温度分布を 60℃から 20℃以下に改善した。この装置を用いて、600℃で引張試験を実施した。結果、ひずみ 1%程度で塑性変形していると思われる試験結果を得た。

単結晶シリコンの表面層に形成される酸化膜層が試験片の破壊挙動に与える影響を評価するため、作製した試験片を酸化処理し、既知の膜厚の酸化膜層を有する試験片を作製し、引張試験を行った。結果、絶対強度に与える影響は小さかったが、破壊の起点が表面から、界面、さらにはシリコン試験片の内部に変化することを観察した。これは、試験片の酸化処理による酸素析出欠陥の形成に起因するものと考えている。

単結晶シリコンの破壊挙動を理解するために同一の(110)シリコンウエハ上に試験片長手方向が<111>、<110>、<100>方位の引張試験片を作製し、強度評価を行った。<110>試験片が他に比較して強度が高いことが明らかになった。また、破断面を観察するとすべて、<111>面で破壊がスタートしていることが確認できた。



デバイス構造の信頼性試験手法として、扇形静電駆動単結晶シリコン振動子の共振振動疲労試験を行った。自励振回路を採用し、最大 8 個の試験片を並列で試験可能なシステムにより、振動疲労特性を評価した。これまでに以下のことを明らかにした。(i) 本試験片は加工精度を高めたことでばらつきが小さく、比較的少数の試験片でも統計解析が可能である。(ii) 疲労寿命におよぼす湿度の影響を評価した。(iii) (100)ウエハ上に作製した<110>、<100>試験片を評価し、約 1.6 倍の強度の差を観察した。

単結晶シリコンの引張荷重疲労試験片や共振振動疲労試験用振動子の印加応力の非接触測定法として、顕微ラマン分光装置を導入し、試験中のその場観察を試みている。上記の扇形振動子の応力集中部における単結

晶シリコンのラマンスペクトルを観察し、振動振幅に対応したスペクトルの広がりを観察した。これらはこれまでに報告されている単結晶シリコンの応力印加によるラマンシフトの変化でよく説明でき、その場応力評価に用いることができることを確認した。

#### 5. 今後の計画

当初、提示していたシリコンの披露破壊モデルについて修正を加える。すなわち破壊を酸化膜の腐食と亀裂進展だけでなく、単結晶シリコンの表面に形成する欠陥との相関を検討していきたい。すなわち、シリコンの引張荷重下での強度、疲労と疲労特性の異方性評価やその場局所応力測定によって破壊現象の理解を深め、デバイス構造の共振振動子権の測定結果から高信頼なデバイスを設計するための寿命予測モデルを構築していく。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- 1) T. Ikehara, T. Tsuchiya, Measurement of anisotropic fatigue life in micrometre-scale single-crystal silicon specimens, *Micro & Nano Letters*, Vol. 5 No. 1, pp. 49-52 (2010).
- 2) T. Tsuchiya, Y. Yamaji, K. Sugano, O. Tabata, Tensile and Tensile-Mode Fatigue Testing of Microscale Specimens in Constant Humidity Environment, *Experimental Mechanics*, Vol. 50 No.4, pp.509-516 (2010).
- 3) T. Tsuchiya, T. Ikeda, A. Tsunematsu, K. Sugano, O. Tabata, Tensile Testing of Single Crystal Silicon Thin Films at 600°C Using IR Heating, *Sensors and Materials*, Vol. 22 No. 1 pp. 1-12 (2010).
- 4) T. Ikehara, T. Tsuchiya, High-cycle fatigue of micromachined single-crystal silicon measured using high-resolution patterned specimens, *Journal of Micromechanics and Microengineering* Vol. 18, No.7, 075004 (2008).
- 5) K. Miyamoto, K. Sugano, T. Tsuchiya, O. Tabata, Effect of Surface Oxide Layer on Mechanical Properties of Single Crystalline Silicon, *Material Research Society Meeting, Boston, MA, Nov. 25-30, 2007, DD2.3, (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1052)*

ホームページ等

<http://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp/>