

京都大学	博士 (工学)	氏名	上 杉 晃 生
論文題目	単結晶シリコンマイクロ構造の引張強度と疲労に関する実験力学的研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、半導体微細加工技術、すなわち紫外線リソグラフィと深堀反応性イオンエッチング(Deep RIE)を用いて SOI (silicon-on-insulator)ウエハから作製される幅、厚さが数 μm 程度の微細な単結晶シリコンマイクロ構造の機械的信頼性を向上させることを目的として、初期破壊強度と破壊進展に及ぼす表面損傷と結晶異方性の影響の評価、周囲温度が破壊挙動に及ぼす影響の評価、また、非圧縮条件下で疲労寿命を短時間で計測するための新規試験方法の開発を行い、単結晶シリコンマイクロ構造の引張強度と疲労に関する実験力学的評価、考察を行った結果をまとめたものであって、5章からなっている。</p> <p>第1章では、序論として本研究の背景及び目的について述べている。</p> <p>第2章では、マイクロ構造の作製時に生じる表面損傷と結晶異方性がマイクロ構造の初期破壊強度と破壊進展に及ぼす影響を報告している。形状パターンニングプロセスの加工条件を変更することによって表面損傷に差異を持たせた単結晶シリコン試験片(試験部長さ $120\ \mu\text{m}$、幅 $5\ \mu\text{m}$、厚さ $5\ \mu\text{m}$)を、面方位(110)の SOI ウエハから $\langle 100 \rangle$、$\langle 110 \rangle$、$\langle 111 \rangle$ の 3 方位の引張軸にあわせて作製し、また面方位(100)のウエハから $\langle 100 \rangle$、$\langle 110 \rangle$ の 2 方位の引張軸にあわせて作製した。室温大気解放下での準静的引張強度を静電チャック方式の薄膜引張試験装置により計測し、走査電子顕微鏡(scanning electron microscope: SEM)観察を用いた破断形状及び破壊起点の分析によって、表面損傷と引張強度の関係、並びに結晶異方性が破壊進展に及ぼす影響を議論している。</p> <p>第3章では、赤外光集光加熱を用いた真空高温引張試験装置の開発を報告し、結晶方位・寸法の異なるマイクロ構造に対する $600\ ^\circ\text{C}$ までの高温引張試験結果を、引張強度変化と脆性延性転移(BDT)によるすべりの出現に焦点を当てて考察している。引張方位を $\langle 110 \rangle$ 方位とする試験部長さ $120\ \mu\text{m}$、厚さ $5\ \mu\text{m}$ で幅 $4\ \mu\text{m}$ あるいは $9\ \mu\text{m}$ の単結晶シリコン試験片を面方位(100)の SOI ウエハから作製して高温引張試験を行い、試験装置の検証を行うとともに、引張強度、塑性変形であるすべりやくびれの現れる温度域と破壊形状について評価を行った。また、BDT 温度の寸法効果の評価方法として、面方位(110)の SOI ウエハから幅寸法や引張方位の異なる試験片を一括して作製して測定する方法を提案するとともに、作製した試験部幅 $2\ \mu\text{m}$ と $5\ \mu\text{m}$ の試験片を用いて、すべりやくびれの形状に対する結晶異方性の影響やそれらの引張強度への影響を考察している。</p> <p>第4章では、ナノ・マイクロ構造の引張疲労寿命データを短時間で多数取得するための集積化ひずみゲージを用いた並列引張疲労試験の開発を報告している。試験デバイス上に単結晶シリコン試験片(試験部長さ $120\ \mu\text{m}$、幅 $2.5\ \mu\text{m}$、厚さ $22\ \mu\text{m}$)を多数並列配置することで引張荷重を一括印加可能な機構を考案した。それぞれの試験片</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	上 杉 晃 生
<p>にシリコンのピエゾ抵抗効果を用いたひずみゲージを一体化して試験中に並列で荷重計測、各試験片の破断の検出を行う提案手法の概要、試験デバイスの設計、試験装置の構成を示している。実際に製作した集積化ひずみゲージの校正実験から得られた出力の線形性・ノイズからマイクロ構造の材料試験での有効性を考察している。また試験デバイスを用いた準静的引張試験を実施し、並列試験の検証を行い疲労試験時に適用可能な負荷周波数範囲と計測精度、提案手法の課題について考察している。</p> <p>第 5 章では、本論文で得られた結論をまとめている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は半導体微細加工技術を用いて作製される幅、厚さが数 μm 程度の微細な単結晶シリコンマイクロ構造の機械的信頼性を向上させることを目的として、初期破壊強度と破壊進展に及ぼす表面損傷と結晶異方性の影響の評価、周囲温度が破壊挙動に及ぼす影響の評価、また、非圧縮条件下で疲労寿命を短時間で計測するための新規試験方法の開発を行い、単結晶シリコンマイクロ構造の引張強度と疲労に関する実験力学的評価、考察を行った結果をまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 引張破壊強度と破壊進展に及ぼす表面状態と結晶方位の影響

室温大気解放下での準静的な引張試験による強度計測を用いて、表面状態と結晶異方性が初期破壊強度に及ぼす影響並びに破壊進展に及ぼす結晶異方性の影響を評価した。SEM を用いた破壊の起点となった表面損傷と欠陥の推定及び測長では引張強度との間に定量的な関係がみられ、これと同様の加工法で作製したマイクロ構造の初期破壊強度の予測に資するものである。引張軸方位の平均引張強度への影響はどの表面状態においても 15 %以下であったが、共通する傾向として $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ の順に高いワイブル係数を示し、これは疲労寿命にばらつきを与えうるものと考察した。

2. 真空高温引張試験装置の開発と破壊挙動に周囲温度が及ぼす影響の評価

疲労寿命推定方法の一つである加速試験の適用可能範囲を定めるための検討として、周囲温度による破壊挙動の変化を新規に開発した赤外光集光加熱真空高温引張試験装置を用いて評価した。作製した(100)及び(110)試験片では、いずれも 500 °C ですべりが現れ、600 °C でくびれが現れたことから、測定を行った断面寸法 10~45 μm^2 の範囲のマイクロ構造では BDT 温度にほとんど差異はないと考察し、このことから 400 °C 以下の温度域では室温と同様の破壊メカニズムによって破壊が起こるとみられ、加速試験の雰囲気温度として適用を検討できることを示した。

3. ひずみゲージ集積並列引張疲労試験法の開発

短時間で多数の引張疲労寿命データを取得するための並列引張疲労試験法を提案した。試験チップには単結晶シリコン試験片が複数並列に配置され、一括で引張荷重を印加し、多数の試験片を短時間で試験可能である。すべての試験片に集積したひずみゲージにより引張荷重および破断を独立に検出可能であることを示した。しかし、試験系の剛性が低く、一つの試験片の破断が他に影響を及ぼすことが明らかになった。装置および試験片の剛性を向上し、さらに、チップ上の配線抵抗による計測精度低下を配線の修正により解決することで 110 Hz 以上の負荷周波数での高精度引張疲労試験が実現可能であることを示した。

以上のように、本論文は、単結晶シリコンマイクロ構造の長期信頼性の向上のための実験力学的な研究として、疲労寿命予測には初期破壊強度の把握と破壊進展の解明が重

氏名	上杉晃生
----	------

要であると考え、マイクロ加工プロセスが単結晶シリコンの初期強度に与える影響を定量的に把握し、高温引張試験により温度加速試験の適用範囲を明らかにしたうえで、ひずみゲージ集積化並列引張疲労試験方法を提案し、その有効性を明らかにしたものであり、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28年8月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。