

単結晶Siの塑性変形挙動に関する研究

鈴木, 飛翔

<https://hdl.handle.net/2324/4784575>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士

バージョン :

権利関係 : Public access to the fulltext file is restricted for unavoidable reason (3)

氏 名 : 鈴木 飛翔

論 文 名 : 単結晶 Si の塑性変形挙動に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

半導体デバイスの製造工程あるいはその実用段階において、高温による熱応力が原因となり Si 単結晶に転位が導入される。それらの転位は製造歩留まりを著しく低下させてしまうため、種々の欠陥を制御する必要がある。これらの欠陥の特性理解のためには力学試験が有用であるが、その力学試験の最も基盤ともいえる引張試験のデータは未だに多くないのが現状である。このように工業的に Si の塑性変形挙動の解明が必要とされている一方、単結晶材としての力学特性も興味深い。特に加工硬化現象については未解決問題も多く、Cottrell が指摘する様に「加工効果は、塑性変形挙動解明のために最初に取り組み始められた現象であると同時に、最後に明らかにされうる問題」でもある。又、多結晶は単結晶の集合とみなせるため、単結晶材の力学試験によって得られた理論を多結晶にも展開することで、加工硬化の理解・制御が可能となることが期待される。そこで本論文では単結晶 Si について引張試験を高温下で行い、Si の高温における塑性変形の基礎的な特性を明らかにするとともに、引張軸方位と試験温度が塑性変形に与える影響、塑性変形により現れる降伏現象、加工硬化現象の素過程について明らかにすることを目的とした。

本論文は 6 章で構成されており、それぞれの概要を以下に示す。

1 章では、Si を含む半導体材料についての製造方法、また塑性変形、特に単結晶材料における加工硬化理論について従来研究を中心にまとめた。又、Si 結晶中の転位運動の素過程であるキンク対形成運動について述べた。

2 章では、引張試験によって降伏応力の温度、引張軸方位依存性を明らかにした。その結果、1323K 以上での降伏応力は $[\bar{1}34]$ および $[011]$ 方向を引張軸とした際にはほぼ一定となったが、引張軸方向が $[001]$ 、 $[\bar{1}11]$ の場合には温度依存性を示した。これは、シュミットの法則が成立しないことを示しており、負荷応力方向によってらせん転位の転位芯周りのパイエルスポテンシャル場に不均一性が生じる可能性が示唆された。更に、活性化エネルギーおよび活性化体積の温度依存性を明らかにし、転位移動の律速過程はキンク対形成過程とは異なり自己拡散が律速過程に携わっていることを明らかにした。

3 章では、単一迂り方位である $[\bar{1}34]$ を引張軸方位として 1173K~1373K において引張試験を行った。その結果、応力-歪曲線はいずれの試験温度においても明確な加工硬化の 3 段階硬化が現れた。さらに塑性変形による結晶回転を追跡するために、EBSD 法を用いて結晶方位の変化を追跡した結果、引張軸方向の結晶方位が分散していること示し、引張軸に平行な結晶方位が試料内部の場所によって異なることを明らかにした。また、主迂り系のシュミット因子が共役迂り系のシュミット因子に比較して大きいにもかかわらず、二次迂り系である共役迂り系は活動を開始しており stage II は開始していた。このことは stage II の開始が試験片内を引張軸方向に平行な単軸応力と仮定した単純なシュミット因子の値の比較では決定できない事を示している。また EBSD 法により stage II の前

後における結晶方位マップを得た。その結果、stage II の開始に際して明瞭なキンクバンドが観察され、このことからキンクバンドが共役迂り系の活動の引き金であることが示された。

4 章では、結晶塑性解析の基礎構成式について簡潔に述べ、fcc 結晶の 3 次元単結晶引張試験片モデルを用いて、格子摩擦応力、引張軸方向、加工効果係数、平均自由行程係数、相互作用行列の各主入力パラメータを変更しつつ塑性解析を行なった。その結果、格子摩擦応力は降伏応力だけでなく、加工硬化率にも影響を及ぼしており、格子摩擦応力が大きいほど加工硬化率は小さい事を明らかにした。また、SSD 密度に注目すると、格子摩擦応力が小さいほど二次迂り系が多く活動しており、加工硬化が進行していることを明らかにした。

5 章では、多重迂りが起こる引張軸方位である $[011]$ 、 $[001]$ 、 $[\bar{1}11]$ を引張軸方位とし、1173K~1373K において引張試験を行った。全ての多重迂り方位において stage I は見られずに降伏後直ちに stage II が現れた。EBSD 法により、 $[011]$ 引張軸においては 2 つの共面迂りによる二重迂りにより塑性変形が生じていることを明らかにした。更に、 $[001]$ 、 $[\bar{1}11]$ 引張軸の場合には、何れも多重迂りであるが、加工硬化率に違いが有ることを明らかにした。結晶塑性有限要素解析の結果、引張軸方向に対する幾何学関係の相違によって、剪断歪が異なる事を明らかにした。更に、交叉迂りの容易さを考慮する事で、多重迂りが生じる際の加工硬化率の違いを説明できる事を明らかにした。

6 章では、得られた結果を総括した。

〔作成要領〕

1. 用紙はA4判上質紙を使用すること。
2. 原則として、文字サイズ10.5ポイントとする。
3. 左右2センチ，上下2.5センチ程度をあげ，ページ数は記入しないこと。
4. 要旨は2,000字程度にまとめること。
(英文の場合は，2ページ以内にまとめること。)
5. 図表・図式等は随意に使用のこと。
6. ワードプロ浄書すること（手書きする場合は楷書体）。
この様式で提出された書類は，「九州大学博士学位論文内容の要旨及び審査結果の要旨」
の原稿として写真印刷するので，鮮明な原稿をクリップ止めで提出すること。