

Grain boundary dynamics during directional solidification of multicrystalline silicon

著者	Chuang Lu-Chung
号	86
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3228号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00126095

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	CHUANG Lu-Chung (莊履中)	提出年	令和元年
学位論文の 題目	Grain boundary dynamics during directional solidification of multicrystalline silicon (多結晶シリコンの一方向凝固過程における結晶粒界ダイナミクス)		

論文目次

Chapter 1. Introduction

Chapter 2. Experimental methods

Chapter 3. Formation of grain boundaries

Chapter 4. Effect of misorientation angle on the interaction between grain boundaries

Chapter 5. Kinetics of grain boundaries during directional solidification

Chapter 6. Summary

論文概要

本論文は、シリコンの融液成長過程における結晶粒界のダイナミクスに関して纏められた。

第 1 章では、本研究の背景やこれまでの研究について詳細に述べた。第 2 章では、本研究で用いた実験装置の原理や使用方法について詳細に述べた。第 3 章では、融液成長過程において、固液界面で亜粒界が形成され発展していく様子を直接観察した。結晶化後の組織解析により、結晶成長に伴い転位が集積し亜粒界が形成されることが明らかとなった。本現象について熱力学的な考察を行った。第 4 章では、固液界面における亜粒界と大角粒界の反応に関して系統的に調べた。亜粒界と $\Sigma 3$ 粒界の反応において、亜粒界のミスオリエンテーション角度によって挙動が変わることが明らかになった。亜粒界のミスオリエンテーション角度が小さい場合は亜粒界が $\Sigma 3$ 粒界を貫通し、亜粒界のミスオリエンテーション角度が 15° に近い場合は大角粒界が形成された後に再び亜粒界と $\Sigma 3$ 粒界に分裂することが明らかとなった。また、ミスオリエンテーション角度が 15° 以上の大角粒界の場合は、 $\Sigma 3$ 粒界と反応して新たに 1 つの大角粒界が形成されることが明らかとなった。第 5 章では、結晶粒界のカイネティクスに関するいくつかの現象を取り扱った。一方向成長過程における $\{112\}$ $\Sigma 3$ 粒界の形成、亜粒界の成長方向の決定機構、粒界から双晶界面が形成されるメカニズムに関してモデルをたてて議論を行った。第 6 章では、本研究で得られた結果について纏めた。

以上、本論文ではシリコン多結晶の固液界面における結晶粒界ダイナミクスに関して、その場観察実験を中心に研究を行い、結晶成長物理学の発展に寄与する成果が得られた。

論文審査の結果の要旨

太陽電池のエネルギー変換効率向上のために、太陽電池素子の基板材料として利用されるシリコン多結晶の高品質化が求められている。特に、結晶粒界や亜粒界が太陽電池の高効率化を妨げている主要因となっており、それらの制御技術開発は急務の課題の一つである。太陽電池用シリコン多結晶は、シリコン融液からの一方向凝固法により作製されるため、結晶成長過程において結晶粒界や亜粒界の制御を行う必要がある。従来から、結晶粒界や亜粒界が電氣的・光学的特性に及ぼす影響を調べる研究は盛んに行われてきた。一方、結晶成長過程での固液界面において結晶粒界や亜粒界がどのような挙動を示し、どのように伸展していくのかといった、結晶成長学的視点からの研究は少ない。

本研究では、シリコンの一方向凝固過程を直接観察する方法を用いて結晶粒界や亜粒界が関与する様々な固液界面現象を調べることにより、結晶成長の基礎原理を明らかにすること、および太陽電池用シリコン多結晶の組織制御法に対する指導原理を得ることを目指した。この目的に対して、(1)固液界面における亜粒界の形成メカニズムの解明、(2)亜粒界と $\Sigma 3$ 粒界やその他の大角粒界との相互作用の観測、(3)亜粒界の伸展方向の決定メカニズムの解明、(4) $\Sigma 9$ 粒界の分解による $\{112\}$ $\Sigma 3$ 粒界の形成、(5)固液界面の粒界溝における双晶界面形成モデルの構築、という固液界面における現象の解明に焦点を当てた成果を得た。実用面で重要な成果は(2)であり、亜粒界と $\Sigma 3$ 粒界が固液界面で衝突する際、亜粒界は $\Sigma 3$ 粒界を貫通して伸展していくが、亜粒界と大角粒界が衝突すると亜粒界は大角粒界に吸収されてそれ以上伸展しないことを実証したことである。つまり、太陽電池用シリコン多結晶の高品質化のためには、大角粒界の密度を増やすことで亜粒界を低減できるという指導原理が得られた。シリコンの融点は 1414°C と高温であるため、結晶成長の過程において固液界面で結晶粒界や亜粒界がどのような挙動を示すのかを実験的に明らかにすることは困難であったが、本研究では固液界面を直接観察することにより、結晶粒界や亜粒界が関与するダイナミクスの直接的証拠を示した。

本論文の構成を記す。第1章では、研究背景や従来の研究について概説し、本研究の目的を述べている。第2章では実験方法や測定技術に関する原理について説明している。第3章から第5章では、上記(1)～(5)について報告している。第6章は本研究の結論である。

本論文は、結晶成長の基礎学理のみならず、太陽電池の性能向上にも寄与するものと評価できる。本論文に記載された成果は、提出者の 氏 履中が自立して研究活動を行うに必要な研究能力と学識を有することを示している。よって、博士(理学)の学位論文として合格と認める。