

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760714

研究課題名（和文）振動一方向凝固法によるシリコンインゴットの結晶粒径制御

研究課題名（英文）Microstructure control of polycrystalline silicon ingot by the vibrating unidirectional solidification method

研究代表者

成田 一人（NARITA ICHIHITO）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：50404017

研究成果の概要（和文）：一方向凝固過程の Si 融液に振動を印可することにより、初期凝固部に粗大な結晶粒が得られることがわかった。凝固速度が $20\mu\text{m}/\text{sec}$ （温度勾配： $10\text{K}/\text{cm}$ ）程度を超えると、Si の $\langle 211 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 方位が凝固方向に対して優先成長方位となり、初期凝固部の結晶粒径がさらに粗大化した。振動印可と凝固速度を制御することにより、初期凝固部に粗大な Si 結晶粒を種結晶として生み、最終凝固部に向けて柱状晶として育成できることを見出すことができた。

研究成果の概要（英文）：Large Si crystal grains were obtained below position of an alumina protective tube which was used to apply vibration to melted Si. The vibrated samples with high-solidification rate formed large crystal grains in initial solidification area. When the solidification rate was increased over $20\mu\text{m}/\text{sec}$, $\langle 211 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ and $\langle 100 \rangle$ direction turned into preferential growth orientations of Si, and the crystal grains grew larger in initial solidification area. By adding vibration and controlling the solidification rate, large Si crystal grains grew up toward the final solidification area.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| 交付決定額 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：太陽電池、多結晶シリコン、双晶、一方向凝固、振動、超音波

1. 研究開始当初の背景

石油に代わる安定したエネルギー供給源として、原子力・火力・水力・風力・太陽光発電等が挙げられる。特に、1954年に米国のベル研究所にて M.B. Prince らにより開発された太陽光発電方式は、砂漠地帯・海上・山岳部・宇宙などのケーブル送電が困難な場所においても発電が可能であるという特徴があり、地震・津波等による被災地での電力供給源になる。また、二酸化炭素などの温室効果ガス

の排出削減に貢献し、システム稼働にあたっての燃料供給を必要としないという資源保護の面での優位性もある。

太陽電池を材料別にみると、Si 系（多結晶 Si、単結晶 Si、アモルファス Si など）、薄膜化合物系（CIGS、CdTe など）、有機系（色素増感型、有機薄膜など）がある。2008年度の統計によると、太陽電池生産量は、多結晶 Si が 46.4%、単結晶 Si が 38.2% と結晶 Si 系が全体の 90% のシェアを占めている。現時点で最

も光電気変換効率に優れた太陽電池は、Si の単結晶品を使用したものであり、理論限界と言われている 25~26%に近い 23%以上の光電気変換効率が報告されている。しかし、生産コストが高いため、採算が取れる多結晶品での性能向上が望まれている。多結晶 Si 太陽電池の性能改善の鍵となるのは一方向凝固法による Si 融液の凝固過程での組織制御である。凝固組織中の結晶粒粗大化 ($>1\mu\text{m}$)・格子欠陥低減・不純物除去によって、単結晶品並みの性能を引き出すことが可能となる。

申請者らの研究室にて行われてきた Si 融液の凝固に関する研究から、Si の結晶成長では、凝固速度が速く、過冷度の大きい場合に競争成長が顕著に現れ、初期凝固部にて結晶粒が粗大化するという知見がある。この現象は、東北大学の中嶋一雄教授らの研究グループによっても詳細に研究され、過冷度が 10°C 以上になると $\langle 112 \rangle$ または $\langle 110 \rangle$ 方位に平行双晶を内包したデンドライト結晶が大きく成長することが報告されている。中嶋教授らは、この凝固速度 (過冷度) 制御により、従来のキャスト法を利用した場合よりも大きな結晶粒からなる Si インゴットの作製に成功した。

申請者らは、今回新たに Si 融液の一方向凝固中に振動を付与すると結晶粒が粗大化する現象を発見した。一般的には、凝固時に振動を付加すると全体的に組織が微細になることが知られているが、Si の凝固では逆に結晶粒が粗大化する場所が見つかり、且つ鑄壁からの結晶成長が従来観察されてきたものとは異なっていた。

2. 研究の目的

本研究では、Si 融液の一方向凝固中に、電動 (200~300Hz) または超音波 (33~37kHz) 振動を印加した際に起こる組織変化について研究し、その結果を太陽電池用多結晶 Si インゴットの結晶粒径粗大化法に応用することを目的としている。粗大な結晶粒からなる多結晶 Si インゴットを創ることは、最終製品の光電気変換効率の向上に繋がるため、産業界での実用化に直結した重要な技術として価値がある。

3. 研究の方法

(1) 電動印可一方向凝固 (VUS) 試料の作製

試料には太陽電池の原料として用いられている高純度 Si 塊 (純度 11N)、約 30g を粉碎して使用した。溶解・凝固用には内径 $\phi 20\text{mm}$ 、高さ 140mm の石英 (SiO_2) 製坩堝を用いた。なお、石英製坩堝が熔融 Si と反応するのを防ぐため、坩堝内壁には Si_3N_4 離型剤を塗布し、空焼きして使用した。また、振動を発生させる

装置として、振動モーター (回転数: 7500 \pm 2000rpm、振動数: 約 $120 \pm 30\text{Hz}$) を用いた。この振動モーターをアルミナ保護管 (内径 4mm、外径 6mm、長さ 1000mm) の下端から 650mm の位置に固定し、坩堝内に挿入することにより、試料に振動を伝えた。

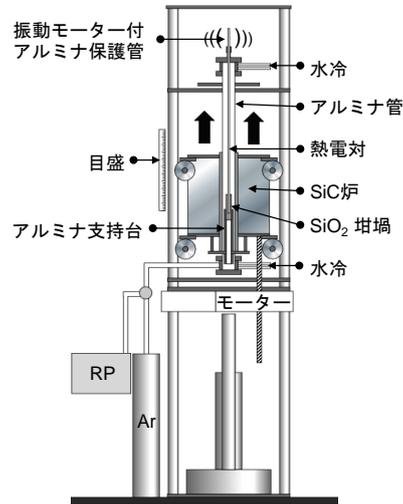


図 1. 電動印可一方向凝固 (VUS) 装置の概略図。

図 1 に本研究にて使用した Bridgman 型一方向凝固装置の概略図を示す。装置は真空排気系、温度制御系、雰囲気制御系、駆動系および加熱炉から構成されており、炉を上昇させることにより試料を坩堝底部から一定速度で一方向に凝固できる。実験では、石英坩堝に挿入した高純度 Si を炉内チャンパーに設置し、ロータリーポンプにより炉内を真空排気した後、99.9%Ar ガスによりガス置換を行った。この操作を数回繰り返してアルゴン雰囲気とした後、加熱部を 1490°C まで昇温させ、原料を溶解した。 1490°C で試料の溶解を確認した後、駆動系のモーターにより所定の速度で炉を上昇させ、試料が抵抗炉の均熱帯から離れることにより生じる温度勾配 (10K/cm) を利用して下部から上部への一方向凝固を行った。このとき試料に振動モーターを固定したアルミナ保護管を挿入し、振動付加を行った。振動位置の影響を確認するため、アルミナ保護管は坩堝下端より 0mm、10mm、35mm に変更した試料を作製した。また、炉の引き上げ速度を $5\mu\text{m/s}$ 、 $20\mu\text{m/s}$ 、 $40\mu\text{m/s}$ 、 $80\mu\text{m/s}$ に設定し、凝固速度が組織に及ぼす影響について調査した。

凝固が完了し炉冷した試料は、樹脂埋めした後、マイクロカッターおよびダイヤモンドカッターで切断し、エメリー紙 (#180~2000)、ダイヤモンドペースト ($1\mu\text{m}$) により鏡面研磨した。その後、試料を約 65°C に保たれた水酸化ナトリウム水溶液 ($\text{H}_2\text{O} \cdot \text{NaOH} = 1:1$ (mass%)) により、15~20 分間腐食し、光学顕微鏡でマ

クロ組織を観察した。

(2) 超音波印可一方向凝固 (UVUS) 試料の作製

UVUS 試料作製には、純度 11N の Si 塊約 80g を使用した。坩堝として内径 $\phi 30\text{mm}$ 、高さ 120mm の石英坩堝を用い、内壁には Si と SiO_2 との反応を防ぐために Si_3N_4 離型剤を塗布し、自然乾燥させて使用した。

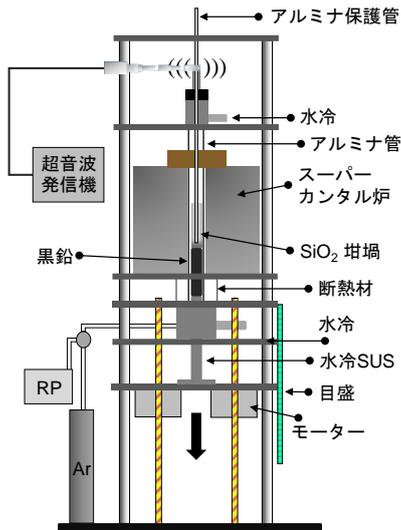


図 2. 超音波印可一方向凝固 (UVUS) の概略図。

図 2 に実験装置の概略図を示す。装置は試料駆動系、振動系および加熱炉からなっており、試料台を下降させることでスーパーカントル炉の均熱帯から離れることによって生じる温度勾配 ($15^\circ\text{C}/\text{min}$) を利用して試料底部から上部へ凝固させることができる。また、超音波発振器 (約 $30000\sim 38000\text{Hz}$) と $\phi 6\text{mm}$ のアルミナ保護管を接続することにより、Si 融液に振動を伝えることができる。アルミナ保護管の上部は炉の天板と連動しており、試料の引き下げと同時に保護管も下降し、坩堝底部からのアルミナ保護管の位置を一定に保つ機構になっている。一方向凝固条件は、雰囲気 Ar ガスフローにし、炉内温度を約 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ で昇温させ、 1490°C にて 2 時間温度保持して十分に Si を溶解させた後、アルミナ保護管を試料中に挿入して振動印加を開始し、所定の引き下げ速度 ($5\ \mu\text{m}/\text{s}$ 、 $20\ \mu\text{m}/\text{s}$ 、および $70\ \mu\text{m}/\text{s}$) にて一方向凝固させた。

得られた試料は、樹脂埋めし、試料底部から 10mm 間隔で切断した後、断面をエメリー紙 (#180~2400) とダイヤモンドペースト ($1\ \mu\text{m}$) を用いて研磨し、約 65°C の 50vol%NaOH 水溶液で 15~20 分腐食させ、光学顕微鏡を用いてマクロ組織観察を行った。

(3) EBSP 解析

結晶方位解析を行うために後方散乱電子解析像 (EBSP) を用いて Si 結晶の面方位を観察した。特に、各試料の初期凝固部における結晶粒の大きさ、結晶方位などを比較し、その規則性や傾向を調査した。EBSP 分析は、SEM の加速電圧 20kV、スポットサイズ $30\sim 35\ \mu\text{m}$ の条件下にて、ステップ $30\ \mu\text{m}$ でスキャンし、方位差 5° を粒界として測定した。

4. 研究成果

(1) VUS 試料の凝固組織

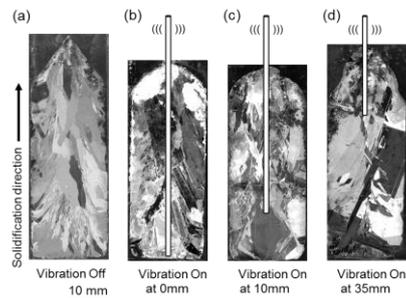


図 3. VUS 法を用いて作製した Si インゴットの切断面図。(a) 振動なし、(b) アルミナ保護管の位置が坩堝底、(c) 坩堝底から 10mm、(d) 坩堝底から 35mm。

VUS 法を用いて作製した Si インゴットの切断面図を図 3 に示す。アルミナ保護管の坩堝底部からの位置を変えて、 $40\ \mu\text{m}/\text{s}$ の凝固速度 (炉の引き上げ速度) で一方向凝固した結果、粗大な結晶粒が、アルミナ保護管先端よりも下部で観察された。また、アルミナ保護管を 35mm の位置に固定して凝固速度を $5\ \mu\text{m}/\text{s}\sim 80\ \mu\text{m}/\text{s}$ の間で変化させた結果、 $20\ \mu\text{m}/\text{s}$ 以上の凝固速度で初期凝固部の結晶粒が粗大化することがわかった。EBSP を用いて初期凝固部の結晶粒界を観察した結果、粗大に成長した結晶では、Si 結晶の $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 211 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 方位が凝固方向に対して優先成長方位になっていることがわかった。また、凝固速度の増加に伴い、 $\Sigma 3$ 双晶の観察頻度が増加した。粒界長さと凝固速度の関係調べた結果、 $40\ \mu\text{m}/\text{s}$ の凝固速度の場合、振動印可により、初期凝固部での単位面積当たりの粒界長さが $1.5\text{mm}/\text{mm}^2$ から $1.2\text{mm}/\text{mm}^2$ へと減少していた。これは、振動印可による結晶粒の粗大化を意味する。この単位面積当たりの粒界長さは、凝固速度が増すにつれて減少する傾向にあったが、凝固速度が $20\ \mu\text{m}/\text{s}$ を超えてからは、約 $1.2\text{mm}/\text{mm}^2$ の値から変化しなかった。これは、坩堝サイズが結晶の成長量に対して

小さすぎるため、本来の結晶成長を阻害していると考えられる。

VUS 法により初期凝固部の結晶粒は粗大化した、その成長を最終凝固部まで引き継ぐことはできなかった。20 $\mu\text{m/s}$ の凝固速度が安定した Si の育成には速すぎるためである。そこで、VUS 法により初期凝固部に成長する粗大な結晶粒を種結晶とみなし、凝固速度を制御して、柱状晶に育成することを試みた。電動振動 (120 \pm 30Hz) を印可しての 40 $\mu\text{m/s}$ での一方方向凝固途中に、振動の印可を中止し、凝固速度を 5 $\mu\text{m/s}$ に落として一方方向凝固させたところ、初期凝固部から最終凝固部に向けて結晶を育成できることを確認した。

(2) UVUS 試料の凝固組織

試料の凝固速度 (試料引き下げ速度) を 5 $\mu\text{m/s}$ 、20 $\mu\text{m/s}$ 、70 $\mu\text{m/s}$ と変え、振動印加したものとしなかったものについて一方方向凝固試料を切断・研磨および腐食させて観察を行った初期凝固部の横断面組織写真を図 4 に示す。振動を印加しない試料を速度別に比較すると、速度の速い試料においては底部の組織の粗大化が観察された。これは凝固速度が速いために試料内の温度の低下が大きくなり、初期凝固部において大きな駆動力 (過冷度) が得られ、様々な方位の核が生成したと同時に結晶成長の競争が起こり粗大化したと考えられる。次に振動を印加した試料同士を速度別に比較していくと、5 $\mu\text{m/s}$ における最大結晶粒面積は約 38 mm^2 であったのに対し 70 $\mu\text{m/s}$ では約 100 mm^2 と速度の上昇に伴い、同様に結晶粒の粗大化が観察された。次に同じ凝固速度同士の試料について振動の有無による影響を比較すると、高周波振動の有無による初期凝固部での決定的な組織の差異は見られなかったが、後述すように振動の印加によって試料底部の組織が上部へと一方方向凝固していることが観察された。

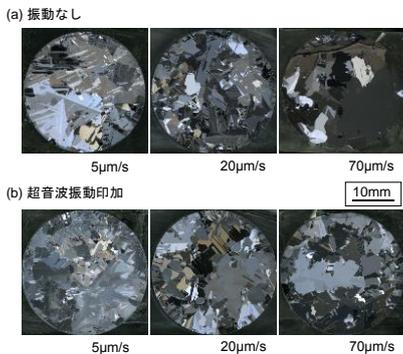


図 4. UVUS 法を用いて作製した試料初期凝固部の横断面組織写真。(a) 振動なし、(b) 超音波振動印加。

凝固速度を 5 $\mu\text{m/s}$ 、20 $\mu\text{m/s}$ 、70 $\mu\text{m/s}$ とし

て、底から 30mm の位置において振動印加しつつ一方方向凝固させた試料と振動印加を行わずに一方方向凝固させた試料の横断面を底部から 3mm、10mm、20mm、30mm の位置で切断・研磨および腐食させて横断面組織写真を観察した結果、どの試料においても多数の双晶が観察された。また、振動印加していない試料の組織を速度別に比較すると、5 $\mu\text{m/s}$ で凝固させた試料では底部において見られた結晶粒がおおよそそのまま一方方向凝固し試料上部においても観察できるのに対し、20 $\mu\text{m/s}$ および 70 $\mu\text{m/s}$ の試料上部では、試料底部の組織が引き継がれておらず、代わりに中央部付近にきわめて微細な組織ができていた。凝固速度を速くすると大きな過冷度が得られるため結晶が粗大化するが、20 $\mu\text{m/s}$ 程度になると凝固速度が結晶の成長に対して速すぎ、固液界面前方に等軸晶が発生し、底部組織が一方方向凝固できなかったと考えられる。一方、振動を印加した試料においては、振動印加部より下部において結晶粒が坍塌底部から一方方向に凝固しており、微細組織の減少が観察された。これは振動を印加したことによって試料の内部が攪拌され核生成した Si の種結晶が巻き上げられ上部で再融解し、底部からの結晶成長が阻害されることなく一方方向凝固が進行した結果と考えられる。

次に 20 $\mu\text{m/s}$ の試料について振動を印加していないものと振動印加したものをそれぞれについて試料断面組織の粒界を観察した結果、組織内部を直線に走る双晶の存在を確認した。双晶は粒界と違い、電子や正孔のトラップ源とならず、太陽電池材料としての Si に悪影響を及ぼさない。試料底部においては振動印加していない試料と振動印加した試料とでは両者とも双晶を除く結晶粒径はそれほど劇的な変化は見られなかった。また、振動印加していない試料は、底部から約 10mm の位置までは試料が一方方向に凝固しているが、それより上部では微細な別の組織が現れ、底部組織の引継ぎは確認できなかったのに対して、振動印加した試料は、底部にて観察された結晶が一方方向凝固し、引き継がれていることがわかった。また、振動を印加せずに一方方向凝固した 20 $\mu\text{m/s}$ の試料と振動印加して一方方向凝固させた 5 $\mu\text{m/s}$ 、20 $\mu\text{m/s}$ および 70 $\mu\text{m/s}$ の試料の底部について最大粒面積を比較した結果、凝固速度が速くなるにつれて約 38 mm^2 、57 mm^2 、99 mm^2 と大きな粒が得られることがわかった。また、振動を印加しない 20 $\mu\text{m/s}$ における底部の最大粒が約 60 mm^2 であり、振動印加した 5 $\mu\text{m/s}$ の粒面積よりも振動印加していない 20 $\mu\text{m/s}$ の方が大きく成長した。このことから、凝固初期部における結晶粒径制御には、振動量と凝固速度のバランスを上手く調整する必要のあることがわかる。

次に、前述と同じ凝固速度の試料について

底部から 20mm の位置における最大粒面積を比較した結果、振動印加した試料は凝固速度が速くなるにつれて 68mm²、77mm²、101mm² と結晶粒も大きくなることがわかった。また、20 μm/s における振動印加の有無において粒面積を比較すると、試料底部においては振動を印加しなかった組織の方が大きかったのに対し、底部から 20mm の位置においては振動印加していない試料の最大粒面積が約 22mm² であり、振動印加した試料の粒面積の方が大きくなっている。これは振動印加しない方の内部に等軸晶が発生し、底部にあった組織の成長が妨げられたのに対し、振動印加した試料については、底部の組織が成長していき粒成長を継続することができたためであると考えられる。

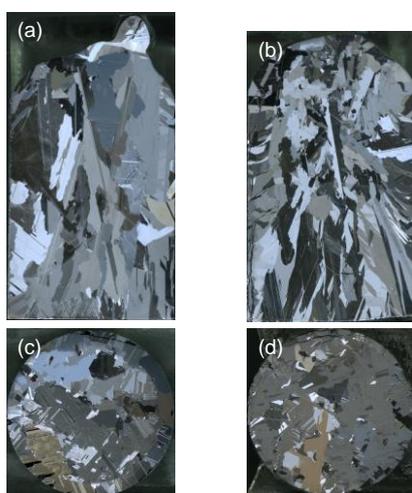


図 5. UVUS 法を用いて凝固速度 70 μm/s で作製した試料の縦断面組織写真。(a) 振動なし、(b) 坩堝底部から 10mm の位置で振動印加、(c) 写真(a)の初期凝固部、(d) 写真(b)の初期凝固部。

凝固速度を 70 μm/s として、振動位置を坩堝底部から 10mm にして振動印加し、一方向凝固させて作製した試料と振動を印加せずに一方向凝固させて作製した試料のそれぞれについて、底部組織を縦に切断した断面を研磨および腐食させ観察した組織写真を図 5 に示す。試料底部における組織は振動を印加したことによる大きな変化は見られないが、振動を印加していない試料の断面は試料内部に途中から凝固した等軸晶が見られ底部に生成していた初晶が試料上部では見られなくなっていた。それに対し、振動を印加した断面図では振動印加位置より下部および上部 10mm 辺りの位置まで底部組織が凝固方向に沿って凝固した粗大な組織が観察された。その代わりに振動印加位置より上部の凝固終端部付近においては振動印加していない試料には見られなかった微細な組織が観察された。これは振動を印

加しなかった場合、凝固途中で生成した核が成長する前に凝固し、底部から成長している組織を阻害してしまうのに対し、振動を印加すると凝固速度が低下し、核生成よりも下部からの成長が優先され、底部からの組織が一方向に成長することができるため粗大な組織になると考えられる。一方、振動印加位置よりも上部では凝固した試料によって振動伝達のアルミナ保護管が固定されるため、振幅が小さくなり、坩堝周囲からの抜熱により端からの組織が成長してきたと考えられる。また、保護管と接している面は振動により異質核生成が起こりやすく、その周囲に微細な組織ができたと考えられる。このことから高周波振動印加下においては振動印加位置よりも下部においては凝固速度を速く設定しても一方向に凝固していき、底部に発生した組織がそのまま引き継がれていくと考えられる。つまり、結晶を粗大化させ、なお且つ一方向に凝固させるためには固液界面の近傍に振動する保護管の下端を設置し、固液界面の移動に合わせて保護管を上昇させる必要がある。

(3) Si 融液の凝固に及ぼす振動の影響

振動印加した試料と振動を印加しない試料について内部に挿した保護管の中の熱電対から温度履歴を測定し、そこから計算した冷却速度を縦軸、凝固速度を横軸にとったグラフを作成したところ、振動を印加した試料の冷却速度は、印加しないものに比べて低下していることがわかった。冷却速度 R (°C/s) と凝固速度 V (m/s)、そしてグラフの傾きである温度勾配 G (°C/m) には次式のような関係がある。

$$R = GV$$

この式より凝固速度を固定したとき、冷却速度が低下すると、それに伴い温度勾配が低下することが分かる。即ち、振動を印加すると冷却速度の低下に伴い、Si 融液内の温度勾配が緩やかになるということである。これにより、固液界面前方での新しい核の生成が抑制されるため、坩堝底部にある結晶は後出の核に衝突する頻度を減らし、一方向に凝固することができたと考えられる。

(4) まとめ

種々の凝固速度で振動を印加しながら Si インゴットを一方向凝固し、低周波および高周波振動が結晶粒径や凝固組織に及ぼす影響を調査したところ以下の結論を得た。

低周波振動 (VUS 法) に関して、

① 溶融 Si を振動しながら一方向凝固を行うと、振動を付加した位置よりも下部で、大き

な結晶粒が観察された。特に、初期凝固部で、振動を付加した試料は振動付加を行わない試料よりも粗大な結晶粒を形成した。

②振動付加を行いながら種々の凝固速度で一方向凝固すると、初期凝固部では、凝固速度の速い試料の方が、遅い試料よりも大きな結晶粒を形成した。一方で、凝固中心部および最終凝固部では、凝固速度が速いと結晶粒が微細になった。

③速い凝固速度の試料の方が遅い試料よりも、初期凝固部における単位面積当たりの粒界長さは短くなった。

④振動付加を行うと、初期凝固部における双晶を除く単位面積当たりの粒界長さは減少した。一方で、単位面積当たりの双晶長さは増加した。

⑤振動付加により形成した初期凝固部の粗大な結晶粒は、Si の〈211〉、〈110〉、〈100〉方位を凝固方向に対して優勢成長方位にとっていた。

⑥一方向凝固中、Si 融液を振動すると、振動を付加しない時よりも凝固時の過冷度が大きくなった。各結晶粒の結晶成長速度に差が大きくなり、優先成長方位が生じやすくなったと考えられる。

⑦一方向凝固時、振動付加を行いながら速い初期速度で冷却した後、直ちに振動を止め、凝固速度を減速して試料を作製すると、初期凝固部から、凝固中心部、最終凝固部まで粗大な結晶粒が成長した。

高周波振動 (UVUS 法) に関して、

①高周波の振動を印加すると、振動印加位置より下部において一方向に凝固した組織が観察された。一方、振動印加位置より上部には等軸晶からなる微細組織が形成した。

②高周波振動を印加しながら凝固速度を速くすると、初期凝固部に粗大化した結晶が発生するが、凝固が進むにつれて内部に微細組織が発生し、初期凝固部の結晶が最終凝固部まで成長しなかった。

③高周波振動印加した場合としない場合とで、初期凝固部における最大の結晶粒径に大きな差異は観察できなかった。

④試料の冷却速度を振動印加時とそうでないときと比較すると、同じ凝固速度において振動印加時には、印可していない場合に比べ冷却速度が低下しており、初期凝固部からの結晶成長が融液中での核生成よりも優位になっていると考えられた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 11 件)

(1) 内野 隆志、成田 一人、宮原 広郁、太陽電池用多結晶シリコンインゴットの一方向凝固組織に及ぼす窒化ケイ素離型剤の影響、第 161 回日本鑄造工学会全国講演大会、2012 年 10 月 14 日、いわて県民情報交流センター

(2) 内野 隆志、成田 一人、宗藤 伸治、宮原 広郁、多結晶シリコンの一方向凝固組織に及ぼす双晶の影響、2012 年日本金属学会秋期講演大会、2012 年 9 月 19 日、愛媛大学

(3) 成田 一人、内野 隆志、宮原 広郁、太陽電池用多結晶シリコンインゴットの一方向凝固組織に及ぼす離型剤の影響、第 65 回日本鑄造工学会九州支部講演大会、2012 年 4 月 9 日、福岡県工業技術センター

(4) 内野 隆志、成田 一人、宮原 広郁、太陽電池用多結晶シリコンの初期凝固組織制御、第 149 回日本金属学会秋期講演大会、2011 年 11 月 7 日、沖縄コンベンションセンター

(5) 成田 一人、淵上 遥平、内野 隆志、宮原 広郁、振動一方向凝固法によるシリコンインゴットの組織制御、第 149 回日本金属学会秋期講演大会、2011 年 11 月 7 日、沖縄コンベンションセンター

(6) 内野 隆志、石橋 主税、淵上 遥平、成田 一人、宮原 広郁、太陽電池用多結晶シリコンの初期凝固組織制御、H23 年度日本金属学会九州支部合同学術講演大会、2011 年 6 月 11 日、九州大学筑紫キャンパス

(7) Ichihito Narita, Yohei Fuchigami, Takashi Uchino, Muhammad Fahmi, and Hirofumi Miyahara, Microstructure control of polycrystalline silicon ingots by vibrating unidirectional solidification method, The 4th Korea-Japan Conference for Young Foundry Engineers, 11 Nov. 2011, Kolon hotel, Gyeongju, Korea.

(8) Ichihito Narita, Yohei Fuchigami, Yusuke Nakamura, Takashi Uchino, Masami Kamezaki, Chikara Ishibashi, nad Hirofumi Miyahara, Effects of vibrating unidirectional solidification on microstructure of polycrystalline silicon ingots, The 13th International Symposium on Materials Science and Engineering among Chonbuk Natinal University, Harbin University and Kyushu University, 13 Oct. 2011, Chonbuk, Korea.

<その他 3 件>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成田 一人 (NARITA ICHIHITO)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：50404017