

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01336

研究課題名(和文) 温度場の直接観察による固液界面ダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Study on crystal growth dynamics at crystal/melt interface by in situ observation technique

研究代表者

藤原 航三 (FUJIWARA, Kozo)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：70332517

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、半導体、金属、化合物など様々な物質・材料を対象に、融液からの結晶成長過程を直接観察することにより、結晶成長過程の固液界面で生じる様々な現象を解明することを目的とした。結晶成長ダイナミクスに及ぼす温度場の影響を実験的に明らかにするため、非接触で温度測定が可能な新たな実験装置の構築を行った。本実験装置を用いることで、単元素半導体(Si)、半金属(Sb)、金属(Cu)、混晶半導体(SiGe)、および、化合物半導体(GaSb)という多くの物質・材料の固液界面の観察に成功し、固液界面で生じる様々な現象を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの実用材料は融液からの一方向凝固によって作製されており、材料組織を精密に制御するためには、固液界面で生じる諸現象のメカニズムを正確に理解する必要がある。多くの物質・材料の融点は数100 から1000 以上と非常に高温であるため、固液界面の観察は困難であった。このことが融液成長メカニズムの本質的理解および結晶成長条件の真の最適化の妨げとなっていた。本研究では、固液界面の直接観察法を確立し、半導体材料、化合物半導体材料および金属材料の固液界面現象を直接観察することにより、多くの現象を明らかにした。本成果は、結晶成長の基礎学理および結晶成長技術の発展に寄与するものがある。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aim to elucidate various phenomena that occur at the crystal-melt interface in the melt growth processes by in situ observation technique. In order to clarify experimentally the effect of the temperature field on the crystal growth dynamics, we constructed a new experimental apparatus that enables non-contact temperature measurement. By using this experimental apparatus, crystal-melt interfaces of many substances such as single element semiconductor (Si), semimetal (Sb), metal (Cu), semiconductor alloy (SiGe), and compound semiconductor (GaSb), were successfully observed directly, and various phenomena occurring at the crystal-melt interfaces were clarified.

研究分野：結晶成長学

キーワード：融液成長 固液界面 その場観察

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Si や GaAs などの半導体・化合物半導体材料や、ほとんどの金属・合金材料のバルク結晶は、工業的には、融液からの一方向成長（凝固）により製造されている。融液成長の基礎理論において、固液界面の温度場は、結晶成長速度を決める支配因子であるばかりでなく、固液界面不安定化やデンドライト成長など様々な現象の支配因子となっている。しかしながら、これらの現象の動的過程を直接観察した例は限られている。無機材料の融点は 1000°C 以上の高温である場合が多く、固液界面現象を直接観察すること自体が困難であった。申請者らは、融点が 1414°C の Si の固液界面を直接観察する装置を開発し、これまでに、Si のデンドライトの成長過程、Si 単結晶の固液界面不安定化過程、粒界グループ形成、粒界からの双晶界面の形成過程などの現象を明らかにしてきたが、他の半導体、金属合金、化合物などの固液界面現象には多くの不明な点が残されていた。特に、各現象における温度場の影響を明らかにすることは、実用的にも基礎学術的にも重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、固液界面ダイナミクスの本質的な理解を得るために、固液界面で生じる現象の実測、および各現象に及ぼす温度場の影響を明らかにすることを目的とする。本研究では、単元素半導体である Si および Sb、単元素金属である Cu、混晶半導体である $Si_{1-x}Ge_x$ および化合物半導体である GaSb を研究対象とし、それぞれの物質における固液界面ダイナミクスを温度場の影響も含めて実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

結晶成長炉とデジタルマイクロスコープを組み合わせた装置を用いて様々な物質の固液界面現象を直接観察した。また、非接触で温度場の測定が可能な二色温度計を用いて、固液界面近傍における温度場の実測を行った。結晶成長後に、SEM-EBSP 装置を用いて組織観察および結晶方位解析を行った。実験で観察された現象について理論的な解析も行った。

4. 研究成果

本研究では、半導体、混晶半導体、金属、および化合物半導体を対象として、主に (1) 固液界面不安定化、(2) デンドライト成長メカニズム、(3) 固液界面における結晶粒界の挙動、(4) 融点における粒界エネルギー、および (5) 化合物半導体の成長速度に及ぼす極性の影響について明らかにした。以下に、本研究で得られた成果を説明する。

(1) 固液界面不安定化現象

固液界面形状は、材料組織を制御するうえで最も重要な因子である。当グループでは、これまでに Si 単結晶において、固液界面の形状が平坦からジグザグ状に変化する固液界面不安定化現象を明らかにしてきた。本研究では、Sb、Cu、 $Si_{1-x}Ge_x$ における固液界面不安定化現象を調べた。また、結晶粒界が固液界面不安定化に及ぼす影響を明らかにするために、Si 多結晶の固液界面不安定化についても詳細な実験を行った。

① 純物質の固液界面不安定化

図 1 は、純 Sb の一方向凝固過程における固液界面形状を直接観察した結果である。平坦な形状が波状に変化し、最終的にジグザグ状のファセット界面へと変化する固液界面不安定化現象が観察された。このような固液界面形状変化は Si 単結晶の場合と同様である。界面の形状変化に伴う結晶成長速度 (V) の変化を実測したところ、 $V=60\mu\text{m/s}$ で平坦な固液界面が不安定化することが明らかとなった。この時の固液界面の温度場の影響を明らかにするために、本実験系における熱拡散方程式を立式した (1) 式。

$$\rho_{c,m} C_{pc,m} \frac{\partial T_{c,m}}{\partial t} = k_{c,m} \frac{\partial^2 T_{c,m}}{\partial x^2} + \left(\frac{k_q}{l_q} + \frac{k_{Ar}}{l_{Ar}} \right) \frac{1}{l_{Sb}} (Gx + T_i - T_{c,m}) \quad (1)$$

(1) 式中の各パラメータは文献に詳しく記載されている [1]。本方程式を解析的に解くことによって、固液界面近傍の温度場を知ることができる。

図 2 は、様々な成長速度における固液界面の温度場変化を計算した結果である。図 2 より、成長速度が遅い場合は、固液界面における融液側の温

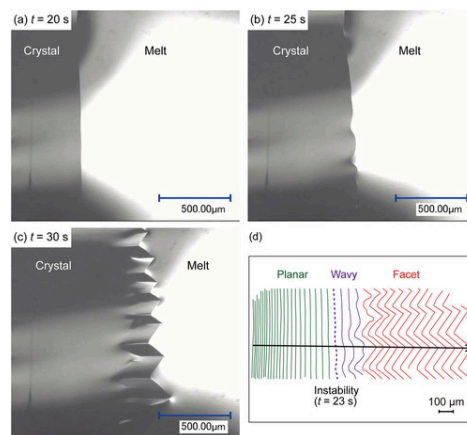


図 1 純 Sb の固液界面不安定化。

度勾配が正であるのに対し、成長速度が大きくなると ($V > 52 \mu\text{m/s}$) 融液側の温度勾配が局部的に負に変化することがわかる。これは、成長速度の増加に伴い、発生する凝固潜熱の量が大きくなり、この固液界面で発生する潜熱を結晶および融液側に逃がす効果に起因することが明らかとなった。

同様の実験を純金属である Cu においても行った。Cu の固液界面不安定化現象も直接観察することができた。純 Sb の場合と同様に平坦な固液界面が波状に変化する様子が観察された。純 Sb の場合とは異なり、ジグザグ状のファセット界面は形成されなかった。これは、金属の固液界面エネルギーは半導体に比べて異方性が小さいため、特定の面がファセット面として界面に現れることがないためである。

以上のように、純物質の固液界面不安定化現象に関して、半導体(Si)、半金属(Sb)および金属(Cu)について実験データが揃ったため、固液界面不安定化を引き起こす最も大きな要因について検討した。Si や Sb では熱伝導率の大きさは融液の方が結晶より大きく、Cu では結晶の熱伝導率の方が融液より大きい。また、凝固潜熱の大きさは半導体や半金属の方が金属より大きい。つまり、半導体や半金属の純物質では固液界面の融液側に負の温度勾配が形成されやすいため、純金属よりも固液界面不安定化が生じやすいことになる。

② 混晶半導体の固液界面不安定化

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ は全率固溶体型の混晶半導体である。本研究では Si-rich 側の $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 融液からの一方向成長過程を観察することにより、特に、固液界面不安定化が生じた際のジグザグファセットの間隔に及ぼす組成の影響を調べた。

図3は Ge 組成が 0.65at% の SiGe 融液からの固液界面不安定化の様子である。純物質と同様に、結晶成長速度が増加すると不安定化が生じた。また、Ge 組成が増加すると不安定化が生じる成長速度が小さくなることも実験的に確認された。

次に、不安定化直後のジグザグの間隔（初期のジグザグの間隔）と融液組成の相関について調べた。様々な組成の融液から一方向成長させ、固液界面不安定化直後の固液界面形状を直接観察した。Ge 組成が増加すると、不安定化直後のジグザグの間隔が狭くなることがわかった。図4はジグザグ間隔と成長速度の関係を、各組成においてプロットしたものである。比較のため、純 Si の結果もプロットしている。図4より、Ge が僅かでも入ると、純 Si よりも大幅に小さい成長速度で固液界面不安定化が生じることが明らかとなった。実用的に混晶半導体の高品質結晶を作製するためには、固液界面形状が平坦な状態で結晶成長を行う必要がある。そのためには、純 Si より 2桁以上遅い成長速度で結晶を作製する必要があることを示唆している。また、各組成において、成長速度が増加すると固液界面のジグザグ間隔が狭くなることから、界面不安定化におけるジグザグ間隔は、以下の理論式で記述される。

$$\lambda = 2\pi \left(\frac{\Gamma}{c(\Delta T_0 V) - G_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中の各パラメータは文献に詳細に記述されている[2]。図4中の実線は(2)式を用いて描いたグラフである。本研究で得られた実験値は理論計算とよく一致していることがわかる。混晶半導体においては、純物質の場合のように温度の過冷却度の影響だけではなく、固液界面における組成分布に起因する組成的過冷却の影響が大きく、不安定化が生じやすくなる。

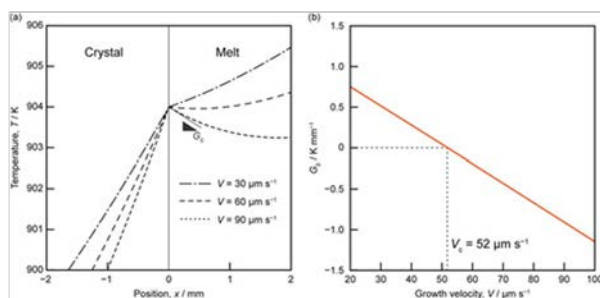


図2 純 Sb の固液界面における温度場。成長速度によって、融液側の温度勾配が正から負に変化する。



図3 $\text{Si}_{0.9935}\text{Ge}_{0.0065}$ の固液界面不安定化。

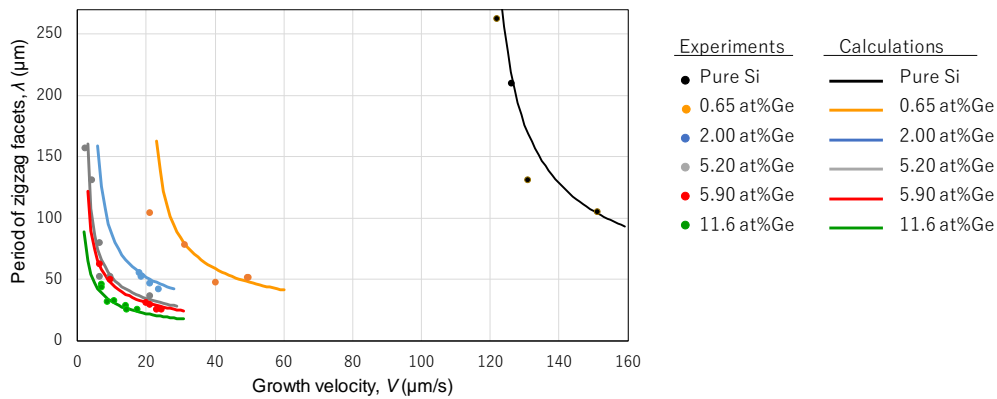


図4 界面不安定化直後のジグザグ間隔と成長速度の関係。

③ 固液界面不安定化に及ぼす結晶粒界の影響

実用材料には結晶中に粒界を含んだ材料が数多くあり、結晶粒界が固液界面形状に及ぼす影響を調べることは重要である。本研究では、太陽電池材料の主力であるSi多結晶を用いて、固液界面不安定化に及ぼす結晶粒界の影響を調べた。

図5は結晶中に小角粒界 (Small-angle-grain-boundary; SAGB) を含んだSi結晶の固液界面不安定化の様子を観察した結果である。図5の写真からわかるように、平坦な固液界面が不安定化する際、小角粒界の位置から界面形状が波上に変化していっていることがわかる。つまり、小角粒界が固液界面不安定化の起点となっていることを明確に示している。同様に、 $\Sigma 3$ 双晶粒界、大角粒界を含んだ結晶の場合においても不安定化の様子を詳細に観察し、いずれの場合も結晶粒界が起点となって不安定化が発現することが明らかとなった。さらに、Si単結晶の場合と比較して、結晶粒界を含んだ結晶では、不安定化が発現する成長速度が小さくなることが実験的に明らかとなった。これは、結晶粒界においては粒内に比べて熱伝導率が小さいため粒界部分に局所的に負の温度勾配が形成されやすいためであることが明らかとなった。

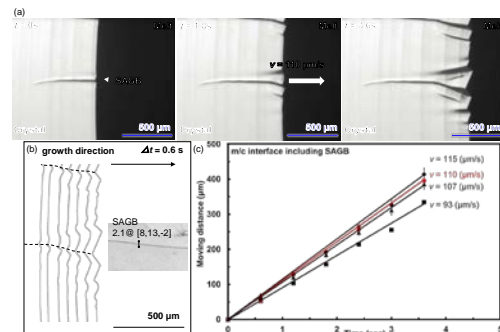


図5 小角粒界(SAGB)を含んだSi結晶の固液界面不安定化。

(2) デンドライト成長メカニズム

デンドライトとは樹枝状の結晶のことであり、金属合金をはじめあらゆる物質・材料の凝固過程で観察されている。一方、化合物半導体のデンドライトに関する研究はほとんどなく、どのような形態・メカニズムでデンドライト成長するのかは不明であった。そこで、本研究では化合物半導体であるGaSbのデンドライト成長について調べた。

図6はGaSb融液からGaSbのデンドライト結晶が成長する様子を観察した結果である。図6(a)-(c)はデンドライトの成長方向が $\langle 112 \rangle$ 方向であり、図6(d)-(f)は $\langle 110 \rangle$ 方向に成長するデンドライトである。このような2方向に成長するデンドライトはSiのデンドライトと同様であり、その成長形態も同じである。結晶成長後にデンドライトの組織解析を行ったところ、デンドライトの背骨部分には $\{111\}$ 面を双晶面とする双晶界面が2つ含まれていることがわかった。つまり、化合物半導体であるGaSbのデンドライト成長は、金属合金のデンドライトとは異なり、SiやGeと同様に、固液界面における双晶界面部分での優先成長が成長メカニズムに大きく寄与するファセットデンドライトであることが明らかとなった。

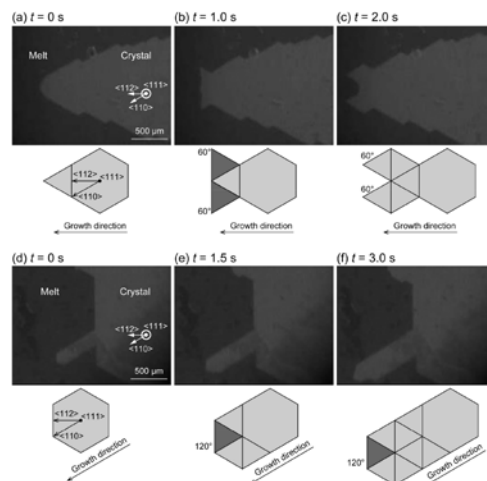


図6 GaSbのデンドライト成長。

(3) 固液界面における結晶粒界の挙動

本研究では、Si 多結晶の固液界面における結晶粒界の挙動に関して、①結晶粒界の伸展方向、②小角粒界の形成メカニズム、③固液界面における結晶粒界の衝突・反応、④固形界面における双晶界面の形成メカニズムに関して、実験的に明らかにした。本研究は、昨年度に終了した国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）の支援も受けて実施された。実験を東北大学金属材料研究所で行い、理論解析を結晶成長研究所（ドイツ）で行う国際共同研究である。得られた成果の詳細については、課題番号：15KK0198 の研究成果報告書に記載している。

(4) 融点における粒界エネルギー

粒界エネルギーに関しては、融点における報告値に限られており、データの蓄積が求められている。本研究では、その場観察実験を用いた手法により、Cu の粒界エネルギーの測定を試みた。平衡状態で粒界グループの形状を計測して、固液界面エネルギーと粒界エネルギーのつり合いの式から粒界エネルギーを決定することができる。そこで、固液界面の状態を見ながら炉の温度を精密に調整し、固液界面が動かない（結晶成長も融解もしない）状態に維持することで、固液界面を熱的平衡状態に維持することを試みた。図7はCuの固液界面を停止させた結果である。固液界面が停止していることから、極めて平衡状態に近い状態に制御できていると考えられる。この状態において、粒界グループの形状を測定することで、粒界エネルギーを決定した。図7で観察される粒界は、凝固後のEBSP測定により小角粒界であることがわかった。粒界グループの形状から粒界エネルギーを求めたところ、 $0.234 < \sigma_{gb} < 0.296$ [Jm^{-2}]であった。値に幅があるのは、粒界グループにおける僅かな温度揺らぎ等によりグループ形状が実験中に僅かに変化するためであり、本実験手法における測定限界である。

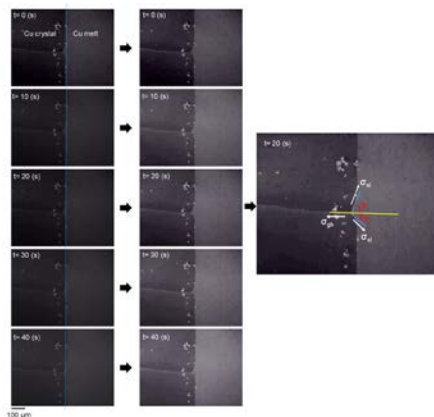


図7 平衡状態におけるCuの粒界グループ。

(5) 化合物半導体の成長速度に及ぼす極性の影響

III-V族半導体においては、 $\{111\}$ 面に極性が有ることが知られている。すなわち、III族元素が表面に現れる $\{111\}$ A面とV族元素が表面に現れる $\{111\}$ B面が存在する。本研究では、GaSbの結晶成長過程を直接観察することにより、固液界面の極性の変化が結晶成長速度に及ぼす影響を明らかにすることを試みた。

図8はGaSb多結晶の一方方向成長過程の観察結果である。写真中に示しているように、観察領域には3つの結晶粒が存在している（Grain 1-3）。このうち、Grain 2はもともと固液界面の面方位が $\{111\}$ B面の結晶粒である。結晶成長過程において、固液界面において双晶界面が形成され（図8中央写真）、これにより固液界面の面方位が $\{111\}$ A面に変化した。Grain 2について、双晶界面形成の前後における結晶成長速度の変化を実測したところ、双晶界面の形成後（極性変化後）は成長速度がおよそ半分になっていた。極性変化による成長速度の変化は、多結晶の粒成長挙動にも影響を及ぼす。Grain 2が $\{111\}$ A面で成長している間は、Grain 2は固液界面の面積を広げながら（粒成長しながら）結晶成長しているが、極性が変わり成長速度が低下すると、成長速度が大きなGrain 1やGrain 3が面積を拡大させている。このように、固液界面の極性は結晶成長挙動に影響を及ぼすだけでなく、材料組織にも大きく影響を及ぼすことが示された。極性の変化による成長速度変化は、固液界面におけるダングリングボンドの数が変わるため固液界面エネルギーが変化することに起因すると考えられる。

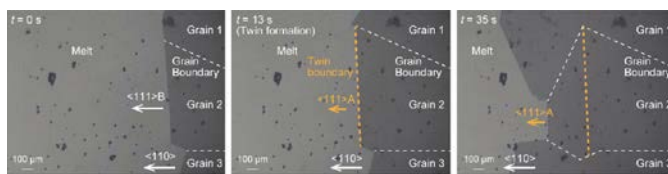


図8 GaSbの $\{111\}$ 固液界面の極性変化による成長速度変化。

<引用文献>

- [1] K. Shiga, L. Billaut, K. Maeda, H. Morito, K. Fujiwara, AIP Advanced 8, 075121 (2018).
- [2] M. Mokhtari, K. Fujiwara, G. Takakura, K. Maeda, H. Koizumi, J. Nomura, S. Uda, J. Appl. Phys. 124, 085104 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 M. Mokhtari, K. Fujiwara, G. Takakura, K. Maeda, H. Koizumi, J. Nozawa, S. Uda	4. 巻 124
2. 論文標題 Instability of crystal/melt interface in Si-rich SiGe	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 085104-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1063/1.5038755	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Maeda, A. Niitsu, H. Morito, K. Shiga, K. Fujiwara	4. 巻 146
2. 論文標題 In situ observation of grain boundary groove at the crystal/melt interface in Cu	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 169-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.11.039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 L. C. Chuang, K. Maeda, H. Morito, K. Shiga, W. Miller, K. Fujiwara	4. 巻 148
2. 論文標題 In situ observation of interaction between grain boundaries during directional solidification of Si	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 37-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 K. K. Hu, K. Maeda, H. Morito, K. Shiga, K. Fujiwara	4. 巻 153
2. 論文標題 In situ observation of grain-boundary development from a facet-facet groove during solidification of silicon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 186-192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Shiga, L. Billaut, K. Maeda, H. Morito, K. Fujiwara	4. 巻 8
2. 論文標題 In-situ observation of instability of a crystal-melt interface during the directional growth of pure antimony	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 075121-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1063/1.5038377	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 W. Yi, J. Chen, S. Ito, K. Nakazato, T. Kimura, T. Sekiguchi, K. Fujiwara	4. 巻 8
2. 論文標題 Investigation of Si Dendrites by Electron-Beam-Induced Current	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 317-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.3390/CRYST8080317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 L. C. Chuang, K. Maeda, H. Morito, K. Shiga, K. Fujiwara	4. 巻 3
2. 論文標題 Origin of small-angle grain boundaries during directional solidification in multicrystalline silicon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materialia	6. 最初と最後の頁 347-352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.mtla.2018.08.034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Fujiwara, R. Maeda, K. Maeda, and H. Morito	4. 巻 133
2. 論文標題 In situ observation of twin boundary formation at grain-boundary groove during directional solidification of Si	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 65-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2017.02.028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shiga Keiji, Maeda Kensaku, Morito Haruhiko, Fujiwara Kozo	4. 巻 185
2. 論文標題 Effect of twin boundary formation on the growth rate of the GaSb{111} plane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 453 ~ 460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2019.12.028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chuang Lu-Chung, Kiguchi Takanori, Kodama Yumiko, Maeda Kensaku, Shiga Keiji, Morito Haruhiko, Fujiwara Kozo	4. 巻 172
2. 論文標題 Influence of interfacial structure on propagating direction of small-angle grain boundaries during directional solidification of multicrystalline silicon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 105 ~ 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2019.07.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shiga Keiji, Kawano Masato, Maeda Kensaku, Morito Haruhiko, Fujiwara Kozo	4. 巻 168
2. 論文標題 The in situ observation of faceted dendrite growth during the directional solidification of GaSb	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 56 ~ 60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2019.04.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chuang Lu-Chung, Maeda Kensaku, Shiga Keiji, Morito Haruhiko, Fujiwara Kozo	4. 巻 167
2. 論文標題 A {112} 3 grain boundary generated from the decomposition of a 9 grain boundary in multicrystalline silicon during directional solidification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 46 ~ 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2019.03.037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hu Kuan-Kan, Maeda Kensaku, Shiga Keiji, Morito Haruhiko, Fujiwara Kozo	4. 巻 7
2. 論文標題 The effect of grain boundaries on instability at the crystal/melt interface during the unidirectional growth of Si	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materialia	6. 最初と最後の頁 100386 ~ 100386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtla.2019.100386	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chuang Lu-Chung, Maeda Kensaku, Morito Haruhiko, Shiga Keiji, Miller Wolfram, Fujiwara Kozo	4. 巻 7
2. 論文標題 Effect of misorientation angle of grain boundary on the interaction with 3 boundary at crystal/melt interface of multicrystalline silicon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materialia	6. 最初と最後の頁 100357 ~ 100357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtla.2019.100357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Arivanandhan Mukannan, Takakura Genki, Sidharth D., Kensaku Maeda, Shiga Keiji, Morito Haruhiko, Fujiwara Kozo	4. 巻 798
2. 論文標題 Crystallization and re-melting of Si1-xGex alloy semiconductor during rapid cooling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 493 ~ 499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2019.05.220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lau Victor, Maeda Kensaku, Fujiwara Kozo, Lan Chung-wen	4. 巻 532
2. 論文標題 In situ observation of the solidification interface and grain boundary development of two silicon seeds with simultaneous measurement of temperature profile and undercooling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 125428 ~ 125428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgr.2019.125428	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計32件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 L. C. Chuang, K. Maeda, K. Shiga, H. Morito, K. Fujiwara
2. 発表標題 Influence of grain boundary dislocations on the direction of a small-angle grain boundary in multicrystalline silicon during directional solidification
3. 学会等名 International Symposium & School on Crystal Growth Fundamentals 2018 (ISSCGF-2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 L. C. Chuang, K. Maeda, K. Shiga, H. Morito, K. Fujiwara
2. 発表標題 In situ observation of interaction between grain boundaries during directional solidification of Si
3. 学会等名 3rd German-Polish Conference on Crystal Growth (GPCCG3) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉澤拓哉、志賀敬次、前田健作、森戸晴彦、藤原航三
2. 発表標題 BiSbにおける固液界面不安定化のその場観察
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新津陽 前田健作 志賀敬次 森戸春彦 藤原航三
2. 発表標題 純銅の融点における粒界エネルギーの測定
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuan-Kan Hu, Kensaku Maeda, Haruhiko Morito, Keiji Shiga, Kozo Fujiwara
2. 発表標題 Grain boundary development during directional solidification of mc-Si
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 莊履中, 前田健作, 森戸春彦, 志賀敬次, 木口賢 紀, 兒玉裕美子, 藤原航三
2. 発表標題 Initiation and development of small-angle grain boundaries during directional solidification of multicrystalline silicon
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河野優人, 志賀敬次, 前田健作, 森戸晴彦, 藤原航三
2. 発表標題 一方向成長過程におけるGaSb固液界面のその場観察
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田健作, 根来仁, 志賀敬次, 森戸春彦, 藤原航三, 宇田聡
2. 発表標題 ホウ酸塩結晶成長における包有物の形成過程
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 胡寬侃, 前田健作, 森戸春彦, 志賀敬次, 藤原航三
2. 発表標題 Moving direction of grain boundary during directional solidification of mc-Si
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 莊履中, 前田健作, 森戸春彦, 志賀敬次, 藤原航三
2. 発表標題 Origin of small-angle grain boundaries during directional solidification in multicrystalline silicon
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 BILLAU Leo, K. Shiga, K. Maeda, H. Morito, K. Fujiwara
2. 発表標題 Influence of temperature gradient on solid-melt interface perturbation for pure antimony
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 莊履中, 前田健作, 森戸春彦, 志賀敬次, 藤原航三
2. 発表標題 Interactions between small-angle grain boundaries and Σ 3 twin boundaries during solidification of multi-Crystalline silicon
3. 学会等名 日本金属学会2018年春期(第162回)講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田亮一、前田健作、森戸春彦、志賀敬次、藤原航三
2. 発表標題 Si多結晶の凝固過程における双晶形成に固液界面形状が及ぼす影響
3. 学会等名 日本金属学会2018年春季（第162回）講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志賀敬次、ピヨレオ、前田健作、森戸春彦、藤原航三
2. 発表標題 純アンチモンの融液成長のその場観察と結晶方位解析
3. 学会等名 日本金属学会2018年春季（第162回）講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新津陽、前田健作、森戸春彦、志賀敬次、藤原航三
2. 発表標題 CuとSiの固液界面不安定化のその場観察
3. 学会等名 第46回結晶成長国内会議（JCCG-46）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前田亮一、前田健作、森戸春彦、志賀敬次、藤原航三
2. 発表標題 Si多結晶の固液界面における双晶界面の形成機構
3. 学会等名 第46回結晶成長国内会議（JCCG-46）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 荘履中、前田健作、森戸春彦、志賀敬次、藤原航三
2. 発表標題 Interactions between grain boundaries during solidification of multicrystalline silicon
3. 学会等名 第46回結晶成長国内会議 (JCCG-46)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 志賀敬次、ピヨレオ、前田健作、森戸春彦、藤原航三
2. 発表標題 一方向凝固過程におけるアンチモンの固液界面不安定化のその場観察
3. 学会等名 第46回結晶成長国内会議 (JCCG-46)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤原航三
2. 発表標題 Siの融液成長挙動のその場観察
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第174回秋季講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kozo Fujiwara
2. 発表標題 In Situ Observation of Melt Growth Processes of Silicon
3. 学会等名 2019Materials Research Society Fall Meeting & Exhibit (2019MRS-Fall) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志賀敬次, 前田健作, 森戸春彦, 藤原航三
2. 発表標題 GaSb融液成長過程における成長度に及ぼす(111)極性影響
3. 学会等名 第48回結晶成長国内会議 (JCCG-48)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 胡寬侃, 前田健作, 志賀敬次, 森戸春彦, 藤原航三
2. 発表標題 Instability at grain boundary included crystal/melt interface during Si solidification
3. 学会等名 第48回結晶成長国内会議 (JCCG-48)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 莊履中, 前田健作, 志賀敬次, 森戸春彦, 藤原航三
2. 発表標題 Unsteady growth of grain boundary groove during solidification of multicrystalline silicon
3. 学会等名 第48回結晶成長国内会議 (JCCG-48)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉澤拓哉, 志賀敬次, 前田健作, 森戸春彦, 藤原航三
2. 発表標題 純Sbの融液成長における結晶-融液界面の不安定化におよぼす成長方位の影響
3. 学会等名 第48回結晶成長国内会議 (JCCG-48)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田健作, 藤原航三, 宇田聡
2. 発表標題 四ホウ酸リチウムの双晶界面形成過程 の直接観察
3. 学会等名 第48回結晶成長国内会議 (JCCG-48)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 莊履中, 前田健作, 志賀敬次, 森 戸春彦, 藤原航三
2. 発表標題 On the growth behavior of the grooves at grain/grain/melt triple phase boundary during solidification of multicrystalline silicon
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期 (第165回) 講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 胡寬侃, 前田健作, 志賀敬次, 森戸春彦, 藤原 航三
2. 発表標題 The effect of grain boundaries on instability at the crystal/melt interface during the unidirectional growth of Si
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期 (第165回) 講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志賀敬次, 河野優人, 前田健作, 森戸春彦, 藤原 航三
2. 発表標題 GaSbのデンドライト成長速度と双晶界面間隔の関係
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期 (第165回) 講演大会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Shiga, M. Kawano, K. Maeda, K. Fujiwara
2 . 発表標題 In situ observation of dendrite growth in gallium antimonide
3 . 学会等名 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 L. Chuang, K. Maeda, K. Shiga, H. Morito, K. Fujiwara
2 . 発表標題 GRAIN BOUNDARY EVOLUTIONS AND INTERACTIONS AT THE CRYSTAL/MELT INTERFACE OF SILICON DURING DIRECTIONAL SOLIDIFICATION
3 . 学会等名 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Hu, K. Maeda, K. Shiga, H. Morito, K. Fujiwara
2 . 発表標題 THE EFFECT OF GRAIN BOUNDARIES ON INSTABILITY AT THE CRYSTALMELT INTERFACE DURING THE UNIDIRECTIONAL GROWTH OF SI
3 . 学会等名 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Maeda, K. Fujiwara, S. Uda
2 . 発表標題 TWIN BOUNDARY FORMATION DEPENDING ON CRYSTAL/LIQUID INTERFACE MORPHOLOGY IN LITHIUM TETRABORATE
3 . 学会等名 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	前田 健作 (Maeda Kensaku) (40634564)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	
研究 分担者	森戸 春彦 (Morito Haruhiko) (80463800)	東北大学・金属材料研究所・准教授 (11301)	