

博士論文審査の結果の要旨

氏名	大葉 悦子
学位名	博士 (工学)
学位番号	甲第 747 号
論文題目	垂直ブリッジマン法による $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶育成に関する研究
論文審査委員	主査 太子 敏則 橋本 佳男 樽田 誠一 番場 教子 嘉数 誠 (佐賀大学大学院工学系研究科 電気電子工学専攻)

(博士論文審査の結果の要旨)

地球環境やエネルギー問題が大きな課題と議論されるようになり、パワーデバイスが電力の伝達のエネルギー損失を低減する効果が重視され、その研究開発、産業化に関心が高まっている。現在はほとんどのパワーデバイスが Si で製造されている。高耐圧かつ大電流を扱う Si パワーデバイスは、デバイス構造や使い方の工夫などで対応しているが、エネルギーロスが大きいため代替材料となるワイドバンドギャップ半導体の SiC や GaN の研究開発が活発になってきている。最近、4.8eV という大きなバンドギャップをもつ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶を用いてパワーデバイスを作製できる可能性が示され、注目されている。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は融液成長が可能な点から、競合する SiC や GaN と比べて大口径のバルク結晶を安価に製造できる利点を有する。しかし、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ はその異方性や劈開性のため結晶育成方法によっては特定の方位の結晶育成が難しく、任意の方位で円形のウェーハが得られていない。また、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶ウェーハをデバイス化したときに結晶欠陥が基板表面に露出し影響を及ぼしている。

本研究では、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶育成に垂直ブリッジマン (Vertical Bridgman: VB) 法を適用し、種子付け方位制御した単結晶育成や任意方位の円形ウェーハ取得を実現することと、結晶欠陥のサイズや形状、特徴の明確化のために研究を実施した。これまでに VB 法による $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶育成報告はなく、VB 法による $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶育成の実現には、最初に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の融解温度、最適なるつぼ材質と形状について検討が必要であった。これらの検討を経て、種子付けによる方位制御、結晶欠陥のサイズや形状の明確化、劈開を考慮した加工による任意方位の円形ウェーハの取得について論述した。

論文は全 7 章で構成されている。

第 1 章では、本研究の背景と目的を示し、本論文の構成について述べる。

第 2 章では、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶構造や劈開面、融点、成長速度異方性およびパワーデバイスへの適用例と課題について述べ、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶育成の研究が進められている主要な 3 つの育成方法と、本研究で適用した VB 法の優位点や欠点について述べる。さらに、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶から得たウェーハの欠陥評価の報告例について述べる。

第 3 章では、大気雰囲気中で $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の融解する温度を明確にし、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶育成に実用的なるつぼ材の検討を行った結果を述べる。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 以上の融点をもつ Pt-Rh と Pt-Ir 合金のつぼを作製し、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 融液の安定保持について調べた。VB 法における $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶育成に Pt-Rh 合金のつぼが適していると結論した。

第 4 章では、定径るつぼと細種子るつぼの 2 種類の形状の Pt-Rh 合金るつぼを用いて、種子結晶を使用せず原料のみを全融解させて一方向凝固で 1-inch の結晶育成を行った結果について述べる。得られた $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶を評価した結果、種子結晶を用いていないにもかかわらず(100)面成長した単結晶であることがわかった。そして、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の強い成長速度異方性を示す結果が得られた。育成した一方向凝固単結晶から得た(100)面ウェーハより、転位と、[010]方向に延伸する線状欠陥の存在を確認した。

第5章では、第4章で得られた一方向凝固(100)面成長 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶から(100)、(010)、(001)面の種子結晶をそれぞれ作製し、種子付けによる方位制御を行った結果について述べる。得られた各方位の単結晶について評価を行い、各方位における結晶の特徴を示した。方位ごとにエッチピットの形状やエッチング速度が異なり、(100)面が最もエッチング速度が速く、(010)面が最も遅かった。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶構造の異方性が影響していることを明確にした。

第6章では $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の劈開例を示し、加工変質層のない両面鏡面の円形ウェーハを得るための $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の劈開性を考慮した切断と研磨の検討を行った結果について述べる。(100)、(010)、(001)面で成長した結晶ごとに劈開面との関係は異なることから、各劈開面に対応した加工の必要性を示した。

第7章では、本研究を総括し、結論を述べている。

以上より、大気雰囲気でのVB法 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶育成においてPt-Rh合金るつぼを用いることで、任意の方位の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶育成が可能となった。結晶欠陥の実体も示し、さらに $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の劈開の特徴を掴むことで、任意の方位の両面鏡面の円形ウェーハの取得に成功した。

申請学位論文は、審査付発表論文3件に基づいてまとめられており、学術的に十分高い評価を得ている。得られた研究成果は、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶のVB法適用による高品質化、大形化の礎となるものであり、大いに評価できる。従って、本論文は博士(工学)の学位論文として十分に価値あるものと審査委員全員一致で判断した。

(公表主要論文名)

- (1) K. Hoshikawa, E. Ohba, T. Kobayashi, J. Yanagisawa, C. Miyagawa, Y. Nakamura, “Growth of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystals using vertical Bridgman method in ambient air”, *Journal of Crystal Growth* Vol. 447, 36-41 (2016).
- (2) E. Ohba, T. Kobayashi, M. Kado, K. Hoshikawa, “Defect characterization of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystals grown by vertical Bridgman method”, *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 55, 1202BF, (2016).
- (3) E. Ohba, T. Kobayashi, T. Taishi, K. Hoshikawa, “Growth of (100), (010) and (001) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystals by vertical Bridgman method”, *Journal of Crystal Growth* Vol. 556, 125990, (2021).