

|             |  |
|-------------|--|
| 氏 名         | さこ ひでき<br>迫 秀樹   |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 ( 工 学 )  |
| 学 位 記 番 号   | 博 甲 第 9 9 7 号  |
| 学位授与の日付     | 令和 3 年 3 月 25 日  |
| 学位授与の要件     | 学位規則第 4 条第 1 項該当   |
| 研 究 科 ・ 専 攻 | 工芸科学研究科 電子システム工学専攻   |
| 学 位 論 文 題 目 | <b>4H-SiC エピタキシャル基板に存在する大型結晶欠陥の発生<br/>起点、および微細構造に関する研究</b> |
| 審 査 委 員     | (主査)教授 一色俊之<br>教授 武田 実<br>教授 今田早紀                          |

## 論文内容の要旨

省エネおよび温室効果ガス削減に対して期待されている技術の一つにパワーエレクトロニクスがある。シリコンベースのパワーデバイスが現在もパワーエレクトロニクスを支えているが、より高性能化には物性値の限界が近づきつつある。そこで、より高性能なデバイスを実現できる物性値を持つワイドギャップ半導体に注目が集まり、研究開発および実用化が近年進められている。ただし、シリコンと比較してエピタキシャルウェハの結晶欠陥密度はいずれも高く、デバイス性能や信頼性に大きな影響を及ぼしている。特に、より大電流・高耐圧の大面积パワーデバイスの作製にとって、大型結晶欠陥フリーなエピタキシャル基板は必須である。本研究の目的は、ワイドギャップ半導体の中でも SiC に注目し、エピタキシャル基板内に現在も認められる大型結晶欠陥の発生起点、および微細構造を明らかにすることである。さらに、これらの研究結果よりエピタキシャル膜内の大型結晶欠陥低減が達成され、パワーデバイスの高性能化や信頼性向上が実現に貢献できることである。

本論文は、全 7 章で構成されている。第 1 章では、本研究の研究背景、課題、研究目的を述べる。第 2 章では、本研究で注目するワイドギャップ半導体である 4H-SiC の特徴（結晶構造、物性値、パワーデバイス材料としてのこれまでの研究経緯）、エピタキシャル膜中の結晶欠陥、結晶欠陥評価技術について述べる。特に、本研究の主な解析手法として用いた電子顕微鏡関連の評価技術について詳細にまとめる。

第 3 章では、エピタキシャル成長後にエピ表面に広範囲に並ぶ表面欠陥(ステップバンチング)の発生起点である、化学機械研磨法(CMP)中に 4H-SiC バルクウェハに局所的に導入されたスクラッチ状研磨ダメージにおいて、表面形態、および導入された結晶格子欠陥の構造を走査電子顕微鏡(SEM) および透過電子顕微鏡(TEM)を用いて評価した。CMP 中に導入された局所研磨ダメージは一般的な光学顕微鏡では検出できず、僅かな表面ラフネスと表面直下に存在する転位ループ、積層欠陥、および Y 字形状欠陥などの格子欠陥で構成されていた。さらに、スクラッチ状研磨ダメージの方向によって、内部に導入された転位群の構造（形状やバーガスベクトル）が異なることも明らかにした。これらの結果より、CMP 中に偶発的に発生したチップング破片の大きさや形状の違いに起因して、ウェハにかかる局所応力の大きさも変化し、局所研磨ダメージの構造

に違いが生じたものと考えられた。

第 4 章では、エピタキシャル膜表面に新たに発見された表面欠陥に関して、構造評価および形成メカニズム、さらにゲート酸化膜の信頼性への影響について評価した。表面形状はスクレーパー形状の表面形態を持っており、下流ラインにはステップバンチングの形成が確認された。また、X 線トポグラフの結果より、上記の欠陥近傍に界面転位が存在することを明らかにした。界面転位と表面形状の関係を基に形成メカニズムを考察した結果、エピ成長中の界面転位のマイグレーションが原因となって、スクレーパー形状欠陥が形成されたと推察された。さらに、酸化膜経時破壊測定より熱酸化膜の劣化は下流ライン上でのみ生じており、下流ラインの断面 TEM 観察結果より熱酸化膜の膜厚変動が生じていることが確認された。これらの結果より、スクレーパー形状欠陥の下流ラインにおいて、熱酸化膜が相対的に薄くなる領域で電界集中が生じることで劣化が進み、MOS キャパシタの信頼性および歩留まりに悪影響を及ぼしていると結論付けた。

第 5 章では、エピタキシャル膜に現在も存在する拡張欠陥の一つであるキャロット欠陥について、エピタキシャル膜と基板にある欠陥発生起点の構造解析について述べる。キャロット欠陥は、発生起点位置を特定することが困難であり、起点の詳細な構造解析の報告は少ない。そこで、本章では、まず初めに発生起点部の特定、および TEM 観察用のサンプリング作製方法を確立し、断面および平面 TEM 観察を用いて、結晶欠陥構造解析を行った。さらに、各転位のバーガースベクトルを明らかにするために  $g \cdot b$  解析、および原子分解能レベルの高角度環状暗視野走査透過電子顕微鏡(HAADF-STEM)観察を用いて評価した。その結果、注目したキャロット欠陥は、これまで報告されている貫通らせん転位や貫通混合転位ではなく、基板内の 2 対の貫通刃状転位が発生起点となっていることを明らかにした。

第 6 章では、キャロット欠陥を構成する積層欠陥の一つであるプリズム面積層欠陥の構造評価について述べる。キャロット欠陥は表面ラフネスを伴う拡張欠陥であり、特に上記のプリズム面積層欠陥上に大きな溝が形成される。キャロット欠陥ごとにその溝の深さは異なるが、内部構造との関連性については報告されていない。そこで、本章では表面溝の深さが異なる 2 つのキャロット欠陥に注目し、プリズム面積層欠陥の表面構造についてはミラー電子顕微鏡および原子間力顕微鏡を用いて評価し、積層構造については、原子分解能 HAADF-STEM 観察を用いて評価した。これらの結果より表面溝の深さと内部の積層構造との関連性を明らかにした。

第 7 章では、本研究に得られた成果について総括を述べ、今後の研究課題と展望について考察することで本論文の結論とした。

## 論文審査の結果の要旨

エネルギー問題や環境問題解決のため、パワーデバイスを用いた電力制御・高効率利用が期待されている。しかしながらパワーデバイス用材料として期待されている SiC や GaN などのワイドバンドギャップ半導体は、性能向上のための結晶欠陥低減やウェハ品質向上が未だ不十分という問題を抱えている。本論文は、実用化が進んでいる SiC デバイスにおいても大きな不具合発生の原因となっている大規模ステップバンチングやキャロット型複合積層欠陥について、その発生起点の構造解明およびその欠陥構造の詳細な解析について述べている。エピタキシャル基板全面に現れるステップバンチングの起点に関する研究では、成長前の基板の研磨痕（スクラッチ、潜

傷) 周辺に形成された多数の転位群の種類や構造を明らかにしている。また、エピタキシャル基板表面に新たに発見したステップバンチングを伴う局所的なスクレーパー状欠陥に対して、その発生機構とゲート酸化膜の信頼性劣化への影響を議論している。キャロット型複合積層欠陥の解析では、基板とエピタキシャル層の界面でバーガースベクトルの異なる貫通らせん転位、貫通刃状転位が関連しあって欠陥の発生起点を形成していることを明らかにしている。さらにキャロット型複合積層欠陥の特徴であるプリズム面積層欠陥の構造を原子配列の直視解析により解明し、少なくとも 2 種類以上の積層欠陥構造が存在することを示している。これらの解析結果は SiC ウェハ中の欠陥発生とその構造の理解に関する有用な知見であり、結晶育成技術の改良を通じて SiC デバイスの信頼性向上に資するものと高く評価できる。また、キャロット型複合積層欠陥の解析で用いたミラー電子顕微鏡による欠陥位置情報取得と高度な観察試料加工技術を組み合わせた透過型電顕微鏡法による評価技術は大変有効で、より多くの欠陥の詳細解析に資する技術であると期待される。

本論文は、ともにレフェリー制度のある学術雑誌および国際会議プロシーディングスに掲載された以下の論文 4 報を基に作成されたもので、いずれも論文も申請者が筆頭著者である。

【学位論文の基礎となった論文】

- (1) Hideki Sako, Tamotsu Yamashita, Naoyuki Sugiyama, Junichiro Sameshima, Osamu Ishiyama, Kentaro Tamura, Junji Senzaki, Hirofumi Matsuhata, Makoto Kitabatake, and Hajime Okumura, Characterization of scraper-shaped defects on 4H-SiC epitaxial film surfaces, Japanese Journal of Applied Physics Vol.53, pp. 051301 1-6, 2014
- (2) Hideki Sako, Hirofumi Matsuhata, Masayuki Sasaki, Masatake Nagaya, Takanori Kido, Kenji Kawata, Tomohisa Kato, Junji Senzaki, Makoto Kitabatake, and Hajime Okumura, Micro-structural analysis of local damage introduced in subsurface regions of 4H-SiC wafers during chemo-mechanical polishing, Journal of Applied Physics, Vol.119, pp. 135702 1-10, 2016
- (3) Hideki Sako, Kenji Kobayashi, Kentaro Ohira, and Toshiyuki Isshiki, Microstructure of Stacking Fault Complex/Carrot Defects at Interface Between 4H-SiC Epitaxial Layers and Substrates, Journal of Electronic Materials, Vol.49(9), pp. 5213-5218, 2020
- (4) Hideki Sako, Kentaro Ohira, Kenji Kobayashi and Toshiyuki Isshiki, Structural Characterization of Prismatic Stacking Faults of Two Types of Carrot Defects in 4H-SiC Epi Wafers, Materials Science Forum, Vol.1004, pp. 421-426, 2020