

氏名	周防 裕政		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲第 8972 号		
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	コドーピング法を用いたパワーデバイス向け低抵抗n型 4H-SiC 単結晶の研究		
主査	筑波大学 教授(連携大学院)	工学博士	奥村 元
副査	筑波大学 教授	工学博士	上殿 明良
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	矢野 裕司
副査	筑波大学 准教授(連携大学院)	博士(工学)	児島 一聡

論文の要旨

審査対象論文は、喫緊の世界的課題である CO₂ 排出削減対策として、電力エネルギーの損失低減と効率的運用に極めて有効とされる炭化ケイ素(SiC)半導体低損失高耐圧パワーデバイスに関し、その実用化に向けたキーテクノロジーの一つである高品質 SiC ウェハの低抵抗化技術の開発を取り上げたものである。低抵抗(高濃度ドーピング)化と低欠陥(低積層欠陥密度)化のトレードオフ関係が存在する状況の下、その限界を打破するために「コドーピング」という手法に着目して、当該手法による積層欠陥低減現象の理論的裏付けを追求すると共に、従来の市販品を凌駕する低抵抗ウェハを実用レベルのサイズと低欠陥密度で実現している。以下に本論文の構成に沿ってその概要を述べる。

第1章では、SiC 半導体の特性、結晶成長方法と SiC パワーデバイスの概要が紹介され、SiC パワーデバイスが電力エネルギーの損失低減と効率的運用に資する研究背景、並びに高濃度ドーピングされた SiC 結晶における積層欠陥形成の先行研究をレビューして、それをもとに本研究の目的が述べられている。第2章では、低抵抗 n 型 4H-SiC 単結晶成長および結晶評価の実験方法についてその詳細が記載されている。

第3章では、先行研究で用いられた窒素アルミニウム(N-Al)コドーピングに変えて窒素ボロン(N-B)コドーピングを用いた結晶成長の結果が示され、N-B コドーピングにおいても N-Al コドーピングと同様の積層欠陥抑制効果が存在することが見出されている。この積層欠陥抑制効果について、原子サイズ効果の観点からの N-Al、N-B コドーピングの比較検討、並びに第4章における意図的に導入した積層欠陥拡大速度の評価から、4H 構造と積層欠陥の自由エネルギー差がコドーピングによる積層欠陥抑制効果の要因であると推察している。

第5章では、パワーデバイス向けの3インチ以上の大口径かつ低転位密度(市販バルク基板同等)の低抵抗($10\text{m}\Omega\text{cm}$ 以下)バルク結晶作製に向けたコードープ技術適用のトライアルがまとめられている。N-Al、N-Bコードープ成長の不純物濃度制御方法を確立したうえで、積層欠陥フリーのN-Al、N-Bコードープ低抵抗3インチバルク結晶作製と転位密度評価の結果に基づき、N-Bコードープ結晶では転位密度 5000 cm^{-2} 以下のパワーデバイス向けとして使用可能な低抵抗結晶が作製できることが実証されている。続いて第6章では、高温プロセスであるエピ成長プロセス中の積層欠陥形成についての検討がなされ、N-Alコードープ結晶は高温プロセスにおいても積層欠陥形成の耐性があることが見出されている。

第7章では、第3章から第6章までの結果が総括されると共に、今後の課題および展望について述べられている。

審 査 の 要 旨

入学後、中間審査、予備審査を経て審査委員全員出席の公開発表会を設け、その場で最終審査を行った。最終審査では、まず著者から上記論文要旨に基づいて成果発表が行われ、その後質疑応答の形で博士論文としての内容の検討を行った。主な検討内容を以下に記す。

[批評]

論文構成としては、予備審査時に指摘された章立ての不備が適切に改訂されている事が確認された。

第3, 4章での理論的考察に関して、積層欠陥抑制効果とコードープ種がアクセプタであることの必然性への疑問、4H構造と積層欠陥のエネルギー差 E_d がドーピング濃度やドーパント種に依存する可能性、部分転位の動きが不純物にピンングされる可能性等が指摘された。当該指摘に対して著者から相応の説明がなされ、理論的考察の前提である仮定やその適用可能範囲を明確にして説明することとなった。また、積層欠陥の抑制に関して速度論的なアプローチを取った理由の明示が求められた。更に、比抵抗自体に対する積層欠陥密度の影響への言及が求められた。

実用的な低抵抗ウェハに関する第5, 6章に関しては、扱われているB濃度の範囲が第3章と異なっていることが指摘されたが著者から適切な理由が説明された。一方、実用的な観点から、比抵抗目標とした $10\text{m}\Omega\text{cm}$ の意味と定義(ウェハ内での最小値なのか平均値なのか)の明示が求められた。また、結論に影響するものではないが、N-Bコードープ結晶における界面B濃度のTOF-SIMSデータに関して濃度測定や深さ位置の精度に懸念が示され、適切な修正を行う事となった。

まとめとしての第7章に関しては、本研究において出来た点と出来なかった点を明確にし、技術の実用化に向けて今後の展望/課題に関する記載をより充実させることが求められた。

[最終試験結果]

平成31年2月13日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

[結論]

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。