

氏名	濱田 公守
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 8393 号
学位授与年月日	平成 29年 10月 31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	

SiC m 面における NO 窒化によるゲート酸化膜界面特性改善に関する研究

主査	筑波大学教授	博士(工学)	末益 崇
副査	筑波大学教授	博士(工学)	佐々木正洋
副査	筑波大学教授	博士(工学)	岩室憲幸
副査	教授(連携大学院)	理学博士	山崎 聡
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	蓮沼 隆
副査	筑波大学特命教授	工学博士	山部紀久夫

論 文 の 要 旨

本学位論文は、社会インフラにおける省エネを、あるいは低炭素社会に適合する高燃費自動車を実現する半導体デバイスとして SiC パワーMOS デバイスが現在開発中である状況下、さらなる高品質化技術に向けたトレンチ MOS 構造での側壁となる m 結晶面と SiO<sub>2</sub> との界面の特性安定化技術に関する研究をまとめたものである。

第 1 章では、序論として、省エネあるいは低炭素社会とすることが必要であることを具体的なデータを基にまとめ、SiC-MOS デバイスがブレークスルーとなりうることを示した。中でもトレンチ型に期待が寄せられ、その側壁となる m 結晶方位表面に形成される SiO<sub>2</sub> と SiC の界面の電気的安定性が重要なキーテクノロジーとなること、そして、高い信頼性を獲得するためには、界面への N の導入あるいは脱離モデルを明らかにすることが重要とあり、それを本学位研究の目的としていることを述べている。

第 2 章では、SiC m 面に MOSFET を試作について詳細に説明するとともに、電気的特性と N 分布の詳細評価を基に、界面近傍の N 濃度と移動度の相関を改めて明らかにし、界面 N の導入および脱離機構を解明することの意義を実験的に示し、研究目的の妥当性を示している。加えて、容量－電圧特性、SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)、CL(Cathode Luminescence)、HAXPES (Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy)分析により、界面近傍の N 分布を評価し、導入後の N が膜中あるいは SiC/ SiO<sub>2</sub> 界面近傍でどのような分布を持つかを詳細に分析している。それらの結果から、界面近傍に導入した N 濃度に飽和値が存在することを明らかにし、導入・脱離機構解明の手掛かりを得ている。

第 3 章では、界面 N 導入後の追加熱処理における N 分布を第 2 章同様 SIMS で分析し、Si 基板/SiO<sub>2</sub>

界面への N 導入後の追加熱処理と大きく異なる事実があることを明らかにしている。これは、N 導入熱処理において、単に、Si-N 結合のみの考察では説明できず、何らかの形で C が N の導入・脱離に関与していることを考慮する必要があることを示している。

第 4 章では、まず m 面の格子構造を考慮し、CO 脱離に続く Si-N 結合形成モデルを構築し、さらに他の主要表面(Si 面、C 面、a 面)への展開を行い、モデルの妥当性を示している。

第 5 章では、結論として、SiC/SiO<sub>2</sub> 界面への N 導入・脱離・飽和に関するモデルをまとめると同時に、SiC パワーデバイスへの本研究成果の有効性を主張している。

## 審 査 の 要 旨

[批評]

環境問題において、CO<sub>2</sub> の排出削減は、世界的な技術課題とされている。中でも、自動車による排出は、2013 年の世界の総排出量の 17%に達し、燃費向上は人類全体の必須課題である。普及著しいハイブリッド自動車さえ、電力損失の 20%はパワー半導体由来とされている。そのブレークスルー技術として、SiC 結晶基板を用いたパワー MOS は有力である。その改善技術として、SiC に溝(トレンチ)を掘った立体形状は低抵抗化技術として期待が高い。トレンチ SiC-MOS では、トレンチ側壁に、m 面が露出する。一方、SiC-MOS では、SiC 基板の高いキャリア移動度に注目され期待が大きい、これまで SiC/SiO<sub>2</sub> 界面準位が障害し、バルク移動度のおよそ 10%程度しか達成できず、界面準位の低減・安定化技術の開発が求められてきた。NO-POA(post oxidation annealing)処理による N 化が効果的であることが報告されており、期待がかかる。実験的には確認されているものの、N 化効果の原理的理解はほとんど進んでいない。また、トレンチ側面に対する効果の報告もほとんどない。これらを背景として、本学位研究が進められた。

本研究では、トレンチ側面に現れる m 面を表面とする SiC 基板を用いて、NO-POA 処理による N 化の効果を実験的に調査するとともに、種々の分析を用いて、効果の基礎的理解を進めたものと評価することができる。

中でも、Si 面や C 面に対しても比較対象とすることで、m 面での知見が特異現象ではなく、SiC 単結晶/SiO<sub>2</sub> 界面に見られる、普遍的現象であることを明らかにした。つまり、NO-POA 処理後の N はほとんど界面に局在し、NO-POA 処理の温度が高いほど N 化が進むこと、1300°C30 分の NO-POA 処理で N 化はほぼ飽和すること、界面 N 濃度が基板 SiC 結晶面方位に依存し、m 面は Si 面の約 2 倍となり、N は Si 原子と結合(Si-N 形成)していることなどを明らかにした。また、界面近傍にのみ偏析することに対して、N 化時に界面で N の「導入」、「脱離」、「飽和」なるモデルを分析結果と関連付けて提案した。このことは、学術的にも工学的にも大きく評価できる。さらに、既存報告と関連付けて、N が界面の C と置換することで面方位依存性を説明したことで、議論に深みを与え、さらなる改善に対する糸口を示したことは学術的に評価できる。

SiC パワー MOS 技術の早期構築が望まれる中、実用構造を模したモデル実験での効果の検証と現象を説明する物理モデルの提案は、日本の自動車産業と半導体技術を融合させたもので、日本の技術の底力を見せていると考えることができる研究である。

[最終試験結果]

平成 29 年 9 月 1 日、数理物質科学研究科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。