

氏名	大橋 輝之
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 9381 号
学位授与年月日	令和2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	

SiC-MOSFET の新規信頼性評価手法の提案とチャネル移動度律速機構に関する研究

主査	筑波大学 教授 博士(工学)	岩室 憲幸
副査	筑波大学 教授 Ph.D.	佐野 伸行
副査	筑波大学 准教授 博士(理学)	櫻井 岳暁
副査	筑波大学 准教授 博士(工学)	矢野 裕司

論 文 の 要 旨

環境問題への対策に向け、電力を高効率に利用するパワーエレクトロニクス技術の重要性が高まっている。本研究は、その中核を担うパワーデバイスである SiC-MOSFET の性能向上に向けて、負ゲート電圧印加時の新規信頼性評価手法の開発、化学反応の理解に基づいた NO ガスによる窒化処理プロセス最適化によるチャネル移動度の改善、およびチャネル移動度のユニバーサル特性と実効電界に対する実験的・理論的解析を通じたチャネル移動度の律速機構に関して取り組まれたものである。本論文は、全 6 章で構成されている。

第 1 章では、本研究の背景として、近年は Si パワーデバイスに代わり高性能な SiC パワーデバイスが市場に出回り始め、電力消費量の低減に貢献していることが記載されている。しかし、スイッチングデバイスである SiC-MOSFET においては、MOS 界面における課題として、高密度に界面および酸化膜欠陥が存在し、それに由来したゲート電圧印加時の信頼性低下と低いチャネル移動度について述べられている。それらの課題に対する従来の取り組みが紹介され、いまだ不十分であることが説明されたうえで、本研究の取り組みおよび位置付けが明確に示されている。

第 2 章では、負ゲート電圧印加時の信頼性改善に向けて、新規信頼性評価手法の開発を行った結果について記述されている。試作に 2-3 か月が必要となる MOSFET に対し、数日で作製可能な n 型 MOS キャパシタを用いた信頼性評価手法を考案している。SiC は禁制帯幅が広いいため n 型 SiC 中には正孔はほとんど存在せず、n 型 MOS キャパシタでは負ゲート電圧印加による信頼性評価は困難であった。そこで、紫外線を照射することで n 型 SiC 中に正孔を生成することで負ゲート印加時にも酸化膜に電圧が印加されて信頼性評価が可能になると考え、実験を行っている。容量-電圧特性の測定周波数依存性や電極

面積依存性などから、正孔はゲート電極の周縁部の SiC 基板中に生成されて負ゲート電圧に応答していることを明らかにしている。また、MOSFET と n 型 MOS キャパシタで窒化条件に応じた特性変動の傾向が一致することを確認している。短時間で試作と評価を繰り返すことが可能となり、プロセス開発の加速化に貢献できることが示されている。

第 3 章では、低いチャネル移動度(電界効果移動度)の改善に向け、最も一般的に行われている NO ガスを用いた窒化プロセスの最適化を図った内容について記述されている。プロセス条件であるアニール温度・NO ガス濃度・アニール時間、界面で生じる酸化・窒化反応、およびそれらと電界効果移動度を結び付けて調査されている。界面窒素濃度、酸化膜増膜量、電界効果移動度のいずれもが NO ガス濃度とアニール時間の積に対して系統的に変化することを明らかにしている。電界効果移動度は窒化反応が支配的な領域で向上し、酸化反応が支配的な領域では低下することが示されている。これらの結果をまとめ、電界効果移動度をモデル化して経験式で表し、実験結果をよく再現することに成功している。NO アニール温度の低温下によりある程度の移動度向上は見込めるが、アニール時間の急増に加えて NO ガス消費量も急増することから、工業的には NO アニール処理のさらなる低温化による電界効果移動度の向上は現実的ではないと結論付けられている。

第 4 章では、SiC-MOSFET のチャネル移動度を律速する散乱機構を知るために、ユニバーサル移動度を実験的に調査した結果について記述されている。ユニバーサル移動度は、実効移動度 μ_{eff} を実効電界 E_{eff} の関数で表すことで、基板濃度や基板バイアス、標準的なプロセス条件によらず、 $\mu_{\text{eff}}-E_{\text{eff}}$ の特性が一つの包絡線上に重なるという概念である。Si-MOSFET ではユニバーサル移動度は物理モデルに基づき、かつ簡易な解析モデルで実験結果を精度よく表すため、TCAD や回路シミュレーションにおける標準モデルの一つとなっている。また、ユニバーサル移動度との比較から、開発した素子の支配的な散乱機構を知ることができる。しかし、これまで SiC-MOSFET においてはユニバーサル移動度が実験的に得られている報告は非常に少ない。著者は界面準位が多いためにユニバーサル移動度が得られていないと考え、SiC-MOSFET で最も良好な界面特性が得られている C 面基板を用いてウェット酸化プロセスを採用し、さらに残留している欠陥の影響を排除した手法により正確に実効移動度と実効電界を見積もることで、ユニバーサル特性が実験的に得られたことを報告している。 $\mu_{\text{eff}}-E_{\text{eff}}$ 特性の温度依存性を評価したところ、実効移動度は温度上昇に伴って低下する傾向が示されており、フォノン散乱とラフネス散乱により定まるユニバーサル移動度が確認できたという主張が裏付けられている。

第 5 章では、ユニバーサル移動度の理論的な調査が行われた結果について記述されている。実効移動度をユニバーサルに表すために実効電界を算出する際に反転層電子密度の重みづけを行う係数 η をどのように設定すべきかについて、解析的な調査が行われている。Si と異なり、SiC-MOSFET では η を 0.26 に設定することでユニバーサルに移動度を表すことができることが見出されている。また、実効電界の物理的起源について検討するため、反転層中の電子が受ける平均電界の計算を行い、ユニバーサルに移動度を表すために見出した実効電界と比較した。SiC-MOSFET においては、反転層中の電子が受ける平均電界とユニバーサルに移動度を表すための実効電界は異なることが判明した。さらに、Si-MOSFET においても同様の解析を行い、結晶面依存性があることが示されている。このことより、ユニバーサルに移動度を表すための η 、およびそれを用いて求められる実効電界は、それ自体が物理的な意味を有するのではなく、様々な散乱機構によって定まるチャネル移動度の結果を統一的に整理して表す

ための経験的なパラメータであると結論付けている。続けて、散乱機構を考慮した移動度の理論計算を行い、実験的に求めたユニバーサル移動度との比較を行った結果について述べられている。移動度の理論計算では、音響フォノン散乱、光学フォノン散乱に由来するインターバレー散乱、およびラフネス散乱が考慮されている。フォノン散乱では 4H-SiC のブルリアンゾーンの M 点に位置するエネルギーレベルの近い二つの伝導帯のエネルギー極小点である 1st CBM と 2nd CBM の間の電子遷移で移動度が大きく低下することを初めて見出している。それらの移動度の実効電界に対する関数形の違いを考慮して、ユニバーサル移動度の実験結果の再現を試みている。これらより、全実効電界領域において音響フォノン散乱が支配的であること、高い実効電界領域でわずかにラフネス散乱の影響が表れること、およびインターバレー散乱の影響は限定的であることが明らかにされている。

第 6 章では、本論文の結論とともに、今後の課題がまとめられている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本論文は、SiC-MOSFET の信頼性評価を迅速に行う手法、化学反応に基づく NO アニール条件の最適化、およびユニバーサル移動度と実効電界について議論されたものである。

新規信頼性評価手法の開発では、短期間で試作可能な n 型 MOS キャパシタに紫外線を照射することで負バイアス印加時の信頼性評価が可能となった。光照射における正孔生成およびその振る舞いも詳細に解析されており、電極面積依存性や測定周波数依存性が明快に記されている。これらはプロセス開発の加速につながり、産業応用上の価値が高い成果と考えられる。

NO アニール条件の最適化において、NO 濃度とアニール時間の積で様々な特性を統一的に表すことができることを見出されており、窒化と酸化の競合過程が丁寧に論じられている。これらを定量的に表すことで、様々な条件の NO アニールにより得られる電界効果移動度の予測が可能になったことは有用である。また、さらなる移動度向上のための NO アニール条件は工業的に現実的でないという結論を明確に示したことは、NO アニール以外のプロセス開発の必要性を示しており、今後の開発方向を示唆している。

実効移動度および実効電界について詳細に調査し、ユニバーサル特性が実験的に得られることを示した点は SiC-MOS 界面におけるキャリア散乱機構を議論する上で大きな意義がある。特に、ユニバーサル移動度を表す実効電界についての理論的な検討を含めた解析では、研究の進んでいる Si-MOSFET においても詳細な解析はほとんどなされていなかったが、実効電界を「チャンネル移動度を統一的に整理して表すための経験的なパラメータ」であることを明確に示した点は、その解析過程も含めて学術的な価値が高い。また、チャンネル移動度の理論計算においても、従来は考慮されていなかったエネルギーレベルの近い伝導帯端間の、サブバンド間の遷移も考慮した解析を行い、実効電界依存性を明らかにしている点も評価される。これらの成果は、SiC-MOSFET のキャリア散乱機構の理解に大きな役割を果たしている。

以上のように、大橋輝之氏の論文には、学術的な知見が十分に認められる。

〔最終試験結果〕

令和2年2月20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、合格と判断された。

〔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。