

## 論文の内容の要旨

論文題目      4H-SiC MOSFET の反転層における電子移動度評価とキャリア散乱機構モデルの研究

氏 名      野口 宗隆

第1章では、本研究の背景とパワーエレクトロニクス機器の省エネ化の鍵である SiC を用いたスイッチング素子である電界効果トランジスタ(MOSFET : Meta-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)について説明するとともに、本研究の目的を述べた。地球温暖化の抑止には、温室効果ガス排出量の削減に向けたエネルギー供給の低炭素化に加えて、エネルギー消費効率および電化率の向上が欠かせず、電力の効率利用を担うパワーエレクトロニクス機器の省エネ化の鍵として、SiC を用いたパワーデバイスが電力変換効率を高めるための開発と応用機器への適用が拡大している。SiC MOSFET の低損失化には素子の低抵抗化が求められ、ゲート酸化膜/SiC 界面直下の反転層における電子移動度(反転層移動度)の向上が有効である。一般的に SiC MOSFET のゲート酸化膜には酸窒化膜が用いられるが、その反転層移動度は十分に高いとは言えず、SiC MOSFET の性能向上を阻害している。電子の反転層移動度を制限要因とするキャリア散乱機構を検討するため、これまでに解析式やシミュレーションモデルへのフィッティングを用いた解析が行われてきた。しかし、SiC 特有のクーロン散乱の影響が大きいことに起因して、キャリア散乱機構は実験的には明らかになっていない。そこで本研究では、SiC MOSFET の反転層移動度を決める要因を解明するため、反転層移動度の系統的な評価を行い、実験的にキャリア散乱機構モデルを構築することを目的として議論を進めた。SiC は結晶多型が存在し、複数の面方位をもつ材料である。本研究ではパワーデバイスに用いられる 4H-SiC の Si 面における反転層移動度を詳細に検討した。

第2章では、本研究における評価手法とデバイス作製プロセスをまとめた。SiC MOSFET の反転層移動度の評価にはホール効果測定が有効であることを述べ、さらに SiC のキャリア散乱機構を実験的に評価する手法を提案した。標準的なアクセプタ濃度のウェル領域上に形成された SiC MOSFET では、クーロン散乱が反転層移動度に及ぼす影響が大きく、従来の Si MOSFET と同様の手法ではキャリア散乱機構を実験的に分離評価できない。そこでクーロン散乱の影響度がアクセプタ濃度に依存することに着目し、クーロン散乱の影響を抑制するためにアクセプタ濃度を制御下限まで低減し、フォノン散乱の影響度を相対的に大きくすることで、キャリア散乱機構を分離評価する解析手法を提案した。

第3章では、SiC MOSFET における反転層移動度に影響を与える因子を抽出した。反転層移動度に影響を与えうる因子として、(1)アクセプタ濃度、(2)ボディー電圧、(3)温度、(4)チャネル構造に着目した。ゲート酸化膜に酸窒化膜を用いた SiC MOSFET の反転層移動度について、各因子が反転層移動度に及ぼす影響を系統的に評価し、SiC MOSFET の反転層移動度にはクーロン散乱の影響が支配的であ

ることを検証した。確かに標準的なアクセプタ濃度ではクーロン散乱の影響が大きく、ボディー電圧の影響に基づき、主要なクーロン散乱源はイオン化不純物ではなく、酸化膜/SiC 界面近傍におけるクーロン散乱源であると結論付けた。室温近傍より低温領域で生じる反転層移動度の低下はクーロン散乱の温度依存性と矛盾せず、チャンネル構造に着目した評価もクーロン散乱源が酸化膜/SiC 界面近傍に存在することを支持した。

第4章では、ゲート酸化膜に酸窒化膜を用いた SiC MOSFET における反転層移動度のキャリア散乱機構モデルを室温において構築した。広範囲のアクセプタ濃度における反転層移動度を評価し、反転層移動度を決定する主要なキャリア散乱機構として、(1)フォノン散乱、(2)クーロン散乱、(3)界面ラフネス散乱を想定し、提案手法に基づいてキャリア散乱機構の分離評価を行った。アクセプタ濃度の低減により反転層移動度が増加し、アクセプタ濃度が  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  台まで低減するとその増加が飽和し始めることから、最もアクセプタ濃度を低減した素子の反転層移動度よりフォノン散乱移動度を定式化し、その値がフォノン散乱移動度に近い値であると推定することの妥当性を反転層移動度の温度依存性で検証した。アクセプタ濃度が  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  から  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  では主要なキャリア散乱機構はフォノン散乱とクーロン散乱であり、今回評価した実効垂直電界の範囲では界面ラフネス散乱の影響は限定的と判明した。さらに、クーロン散乱移動度のアクセプタ濃度依存性およびボディー電圧依存性は、空乏層電荷密度をパラメータとして統一的に記述できることを初めて実証した。SiC MOSFET におけるクーロン散乱移動度の減少は、アクセプタ濃度およびボディー電圧によらず、反転キャリアと酸化膜/SiC 界面近傍のクーロン散乱源との平均的な距離の減少を主要因として生じるという物理描像に対応する。

第5章では、第4章において室温で構築した反転層移動度のキャリア散乱機構モデルを高温で検証した。高温では室温と比較して、フォノン散乱の影響が強まる一方で、クーロン散乱の影響が弱まるため、フォノン散乱移動度に対する定式化の精度が高まることに着目した。ゲート酸化膜に酸窒化膜を用いた SiC MOSFET では、473K の高温でも実効垂直電界が高い領域まで含めた反転層移動度のユニバーサリティーは観測されないが、アクセプタ濃度が  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  以下の素子では反転層移動度と実効垂直電界の関係がほぼ一致することが判明した。従って、アクセプタ濃度を低減し、かつ高温で評価することで、ゲート酸化膜に酸窒化膜を用いてフォノン散乱移動度を評価可能であることを初めて実証した。提案手法を用いた解析より、高温でも室温と同様に支配的なキャリア散乱機構はフォノン散乱とクーロン散乱であり、高温でも室温で構築したキャリア散乱機構モデルが成立することを示した。これより、SiC MOSFET の反転層移動度を定めるキャリア散乱機構は、従来の Si MOSFET における枠組みを大きく変更することなく理解できると結論付けた。

第6章では、第4章および第5章で構築した反転層移動度のキャリア散乱機構モデルを基に、その拡張性を検討するため、他のゲート酸化膜として熱酸化膜およびリン処理した熱酸化膜における反転層移動度をホール効果測定で評価し、酸窒化膜の反転層移動度と比較した。熱酸化膜と酸窒化膜の比較より、窒化処理は熱酸化膜/SiC 界面の電荷捕獲準位密度を大幅に低減するものの、いずれのゲート酸化膜でも評価できる領域(表面キャリア密度が低い領域、または実効垂直電界が低い領域)において、反転層移動度にはほぼ影響しないことが判明した。一方で、リン処理した熱酸化膜と酸窒化膜の比較

より、室温と 473K の高温のいずれもリン処理による反転層移動度の向上が判明した。高温にて反転層移動度と実効垂直電界の関係を検討することで、これらのゲート酸化膜では酸化膜/SiC 界面におけるフォノン散乱移動度が一致する可能性を見出した。提案手法を用いた解析より、高温におけるリン処理した熱酸化膜を有する素子の主要なキャリア散乱機構はフォノン散乱とクーロン散乱であると判明した。さらに、リン処理による移動度向上が酸化膜よりも表面キャリア密度の増加に伴ってクーロン散乱移動度が増加しやすいことに起因すると初めて実証した。これらのゲート酸化膜では酸化膜/SiC 界面近傍におけるクーロン散乱源のエネルギー分布が異なることが示唆された。酸化膜で構築したキャリア散乱機構モデルの枠組みは、ゲート酸化膜ごとのクーロン散乱移動度の振る舞いを考慮することで、その他のゲート酸化膜へも拡張できると明らかにした。

第 7 章では、本研究を総括し、今後の展望を述べた。本研究では、反転層移動度を決める散乱機構を解明するため、ホール効果測定により Si 面 4H-SiC MOSFET の反転層移動度を評価し、SiC MOSFET ではクーロン散乱が反転層移動度に大きく影響するという特徴を基に、SiC MOSFET に適したキャリア散乱機構の実験的な解析手法を提案することで、キャリア散乱機構モデルを実験的に構築した。まず、反転層移動度に影響を与える各因子への依存性を評価し、SiC MOSFET ではクーロン散乱が反転層移動度に大きく影響することを検証した。そのうえで、クーロン散乱の影響を抑制した素子を作製し、フォノン散乱の影響度を相対的に大きくすることでキャリア散乱機構を評価した。ゲート酸化膜に酸化膜を用いた SiC MOSFET の反転層移動度を広範囲のアクセプタ濃度と温度に対して系統的に評価した。提案手法を用いた解析より、反転層移動度を決定する主要なキャリア散乱機構として、(1)フォノン散乱、(2)クーロン散乱、(3)界面ラフネス散乱を想定することで、実験的にキャリア散乱機構モデルを構築することに成功した。さらに、ゲート酸化膜の形成法が反転層移動度に及ぼす影響を検討し、ゲート酸化膜ごとのクーロン散乱移動度の振る舞いを考慮することで、酸化膜で構築したキャリア散乱機構モデルの枠組みはその他のゲート酸化膜へも拡張できることを明らかにした。以上より、SiC MOSFET の反転層移動度を決める要因は従来の Si における枠組みを大きく変更せずに、SiC 特有のクーロン散乱の影響を取り入れることでモデル化できる可能性を示した。

本研究では、最も標準的なゲート酸化膜である酸化膜における反転層移動度のアクセプタ濃度依存性および温度依存性を系統的に評価し、反転層移動度を議論する基準を与えた。本研究で構築したキャリア散乱機構モデルの枠組みと、その解明に向けたアプローチは、本モデルの是非を含む議論を呼び起こしただけでなく、最先端のデバイスで用いられる Si 面以外の結晶面における反転層移動度の評価へと応用が始まっており、SiC MOSFET の反転層移動度の理解を深める重要な足がかりとなった。また、本研究の結果は SiC MOSFET の反転層移動度が既に物理的起源を明確に想定して定式化された物理モデルのみで表現できることを意味し、物理的な根拠に立脚した精緻なデバイス設計を可能にすると期待される。