

氏名（本籍）	土井 敦史（兵庫県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 267 号
学位授与の日付	令和 6 年 9 月 17 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	走査型プローブ顕微鏡を用いたパワーMOSFET の動作観測とその評価
論文審査委員	(主査) 教授 佐藤 宣夫 (副査) 教授 新井 浩志 教授 小田 昭紀 教授 関 弘和 教授 清水 邦康 非常勤教員 山本 秀和

学位論文の要旨

走査型プローブ顕微鏡を用いたパワーMOSFET の動作観測とその評価

第 1 章 序論

本研究の背景と目的について述べた。世界中のエネルギー消費が重大な問題として取り上げられている中、省エネルギー化の実現に重要な役割を果たすパワー半導体デバイスの研究・開発が進められている。デバイス評価装置の 1 つである SPM は、デバイスのオペランド観測が可能であるが、評価用デバイスや二端子デバイスの観測に留まっている。そこで本研究では、SPM による動作中のパワーMOSFET の観測を目的とした。

第 2 章 パワーMOSFET の種類と内部構造

本研究で観測したパワーMOSFET について述べた。パワーMOSFET の一種であるスーパージャンクション型 MOSFET については、内部構造と動作メカニズム、特徴的な p 型領域の作製方法、加えて、プレーナ型とスーパージャンクション型との違いについて概説した。そして、プレーナ型 MOSFET では、プレーナ型の内部構造とその作製の流れを示し、動作メカニズムについて解説した。

第 3 章 走査型プローブ顕微鏡の原理と特徴

本研究で用いた SPM の動作原理について述べた。その技術の 1 つである原子間力顕微鏡 (AFM) は、カンチレバーという片持ち梁構造の探針を用いて、試料表面との間に生じる原子間力を検出

することで、表面形状を観測する手法である。AFM の垂直分解能は約 3.9 Å, 水平分解能は 3.43 nm と見積もることができた。もう 1 つの手法であるケルビンプローブフォース顕微鏡法 (KFM) では、バイアスフィードバック回路を利用することにより、探針試料間に生じる静電気力から接触電位差を検出することで、表面電位を測定することができる。そして、KFM 測定の最小検出電圧は、およそ 0.18 mV と算出することができた。最後に、走査型容量原子間力顕微鏡 (SCFM) は KFM 測定と同様に、探針試料間に生じる静電気力を利用した手法である。その SCFM 測定では静電気力の高周波成分に含まれる微分容量を検出することで、半導体のキャリア密度とその極性を取得することが可能であり、その手法のキャリア濃度検出分解能は $1.7 \times 10^{-15} \sim 1.7 \times 10^{-21} \text{ cm}^{-3}$ と見積もることができた。

第 4 章 Si パワーMOSFET 断面構造のナノスケール観測

AFM/KFM/SCFM システムを用いて、バイアス電圧を印加した Si-SJMOSFET の断面構造を同時・同一領域にてナノスケール観測を行った。KFM 測定により取得された表面電位像からは、内部構造が露出されたパワーデバイス内部の電極にバイアス電圧が印加されている様子を確認した。また、同時に KFM を同時測定したことにより、電圧印加時でも安定に AFM 測定が可能であることを実証した。さらに、静電気力の式に含まれる微分容量($\partial C/\partial V$)を SCFM 測定により、SJ 構造の特徴的な p 領域繰り返し構造と、エピタキシャル層の厚さに基づいた Si-SJMOSFET の内部構造を確認することができた。さらに、ON/OFF 時における微分容量のラインプロファイルの比較により、動作時の電圧印加によって縦方向に伸びる p-n 接合から横方向に 1 μm ほどの空乏層が広がるメカニズムを明らかにすることができた。

第 5 章 SiC プレーナ型パワーMOSFET の観測

先端材料である SiC を用いたローム社製のプレーナ型 MOSFET のオペランド観測を行った。KFM 測定を用いた表面電位像では、電圧印加に伴うチャネル形成された領域に、電流通電されたことで生じた約 0.6~0.7 V 程度の電位勾配が確認された。取得された電位勾配は、KFM の検出分解能で十分に検知できる電位変化であったことから、KFM 測定からチャネル領域における電圧降下が観測できるものと考えられる。そして、SCFM 測定では、SiC 基板から始まり、ドリフト層、ゲート電極直下のチャネル形成される p 型領域、ソース電極へと繋がる n+型領域のプレーナ型構造が観測された。加えて、KF 測定と同様に、ゲート電極直下のチャネル領域に、チャネル形成によるキャリア濃度の変化を SCFM の信号値から取得することができた。

また、SCFM の測定結果よりドリフト層の幅、デバイスの電気特性から絶縁耐圧値が分かったことで、デバイスの絶縁破壊電界を算出することが出来た。デバイスの絶縁破壊電界を求めたことにより、ドリフト層のキャリア濃度が $7.44 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-3}$ と見積もることが可能となった。

第 6 章 総括

第 4 章および第 5 章で得られた知見をまとめ、本論文の総括とした。

審査結果の要旨

第1章では、エネルギー事情とパワー半導体デバイスの重要性が最初に論じられている。経済成長に伴うエネルギー需要の増大は、化石燃料の消費増加と環境問題を引き起こしており、省エネルギー化社会の実現が必要であると指摘されている。この社会実現において中心的な役割を果たすのがパワー半導体デバイスで、電力の変換・制御を行う電力用デバイスとして、その性能向上がエネルギー消費の抑制に寄与すると期待されている。パワー半導体デバイスは電力、運輸、産業、家電、情報・通信といった多岐にわたる分野で使用され、SiC や GaN などの新しい材料が注目されている。

続いて、走査型プローブ顕微鏡によるナノスケール観測の重要性が述べられている。従来の評価方法では不十分となりつつある中、走査型プローブ顕微鏡は高い空間分解能を有し、測定環境や材料物性を問わず観測が可能であるため、デバイスの微細な構造領域に対して重要な電氣的測定が可能である。この技術は、デバイスの動作解析において有益であり、市販品のパワー半導体デバイスの評価・解析にも必要不可欠であるとされている。

第2章では、パワーMOSFETの種類と内部構造について詳細に解説されている。Si製スーパー Junction (SJ) 型パワーMOSFET と SiC 製プレーナ型 MOSFET の2種類が主に取り上げられ、それぞれの特性と構造が比較されている。Si製 SJ 型パワーMOSFET は、高い耐圧性と低いオン抵抗を実現するために開発されたもので、縦方向に電流を通電する方式が特徴である。一方、SiC 製プレーナ型 MOSFET は、SiC の優れた物理的特性を活かし、高温環境や高電圧での使用に適しており、耐圧性と高速スイッチング性能が求められる用途に最適であるとされている。これらのデバイスは、電力変換・制御において重要な役割を果たし、エネルギー効率の向上に寄与することが期待されている旨、述べられている。

第3章では走査型プローブ顕微鏡の原理と特徴について詳細に解説されている。周波数変調 (FM) 方式による原子間力顕微鏡 (AFM) はカンチレバーと呼ばれる片持ち梁構造の探針と試料との間に生じる原子間力を検出し、試料表面の形状を観測する装置である。この AFM の特徴は、観測試料の導電性の有無に制約されない他に、大気環境、真空環境、液中環境など、多岐にわたる測定環境下においても観測することができる点が挙げられる。さらに、電気、磁気、弾性、ジュール熱などの、試料表面の形状以外の様々な物理量の測定も可能である旨、記述している。

ここでケルビンプローブフォース顕微鏡法 (KFM) は、電位分布に基く静電気力の情報を取得する手法であり、バイアス・フィードバック制御を備えているため、電位情報を定量的に測定することができる特徴を有していることを詳解している。

さらに走査型容量原子間力顕微鏡法 (SCFM) は、探針-試料間の微分容量をナノスケールで測定する手法で、カンチレバーに働く静電気力の高周波成分から微分容量を取得することから、ダイナミックモードにて計測する。これらの手法は、半導体デバイスの評価に利用されており、高い空間分解能を有し、測定環境とデバイスを構成する材料物性を問わず観測できる点、デバイスの微細な構造領域に対して、デバイスにとって重要となる電氣的測定を可能とする特徴が詳解さ

れている。

以上のことを踏まえ、開発された走査型プローブ顕微鏡において、具体的な分解能をそれぞれ算出しており、それらをまとめると、まず AFM の垂直分解能は 3.9 \AA 、水平分解能は 3.43 nm 、KFM の電位分解能は 0.18 mV 、SCFM のキャリア濃度検出分解能： $1.7 \times 10^{15} \sim 6.8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ であることを述べている。

第 4 章では、Si パワー MOSFET 断面構造のナノスケール観測に焦点を当てている。観測用試料としては、市販のディスクリットデバイスを切断し、内部構造を露出させて研磨処理を施したものを使用している。本章での断面観測に基づく構造評価では、ソース電極に該当する電極構造が確認されており、半導体領域の耐圧層に相当する n 型領域と n⁺型基板領域という異なるキャリア密度で構成されている領域の観測に成功している。またオペランド観測に基づく動作評価では、チャンネル形成の様子などのデバイス動作で重要かつ特有の内部現象の可視化にも成功している。特に空乏層幅に関する議論では、デバイスが高電圧で動作する際に生じる空乏層の拡大とその影響について詳細に分析している。空乏層幅の増加はデバイスのオン抵抗に影響を及ぼし、その結果としてデバイス性能に直接的な影響を与えることが明らかにされている。この観測結果は、パワー MOSFET の設計において重要な指標となり、より効率的で高性能なデバイス開発への貢献が期待されている。

第 5 章では SiC プレーナ型パワー MOSFET の観測試料として、特定の耐圧特性を持つデバイスが選定された。耐圧性能の評価には、走査型プローブ顕微鏡を用いたナノスケールでの観測が行われ、デバイス内部の微細な構造が明らかにされた。これにより、SiC プレーナ型パワー MOSFET の動作原理と内部構造の関係についての理解、さらなるデバイス性能向上に向けた設計の改善点が示唆されている。また、耐圧に関する議論では、SiC は高い絶縁破壊電界を持ち、これが高耐圧性能に寄与している。デバイスの電気特性から絶縁耐圧値が分かったことで、デバイスの電界強度を見積もることが可能となった。それぞれのデバイスの電界強度を求めたことにより、ドリフト層のキャリア濃度が $7.44 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ と算出されるに至っている。

第 6 章は、総括と今後の課題を述べている。具体的には、FM-AFM / KFM / SCFM システムの構築、それを用いた市販のパワー MOSFET の動作観測の考証についてまとめている。また今後の課題として 3 つ挙げられており、(1) 他のデバイス構造 (トレンチ構造 MOSFET, Insulated Gate Bipolar Transistor など) のオペランド観測による内部状態の可視化により、デバイス開発に貢献することが期待されること、(2) SCFM によるキャリア濃度の定量化について、ナノスケール観測結果を用いたシミュレーション解析が、パワー半導体デバイス設計に寄与できること、(3) 開発した FM-AFM/KFM/SCFM システムによるデバイス内部の現象理解によって、デバイス開発に留まらず、デバイスの劣化や故障の解析にも貢献できる可能性があることを述べている。