

# 主論文の要約

論文題目 窒化ガリウム MIS ゲート構造における界面およびキャリア輸送特性に関する研究  
(Study on Interface and Channel Transport Properties in GaN MIS Gate Stack)

氏名 安藤 悠人

## 論文内容の要約

本論文は縦型窒化ガリウム (GaN) パワーデバイスの高性能化のために重要となる、金属-絶縁膜-半導体 (Metal-Insulator-Semiconductor: MIS) ゲート構造における界面及びキャリア輸送特性に関する研究成果をまとめたものである。

第 1 章では、本研究の背景、次世代半導体パワーデバイス材料としての GaN の優位性、縦型 GaN パワーデバイスにおける課題を説明した後、GaN MIS 界面の研究動向と現状の課題をまとめ、本論文の位置づけを明確化している。アジア諸国の発展や情報化社会の進展に伴い、電力需要量は急速に増大している。そこで、電力変換における消費電力低減のため、電力変換システムに用いられる半導体パワーデバイスの高性能化が望まれている。現在パワーデバイスにはシリコン (Si) が主に用いられているものの、すでに材料が持つ物性の限界に達しており、飛躍的な性能向上のため新規の半導体材料の適用が必要である。そこで GaN は Si を凌駕する物性を有し、高性能なデバイスが実現可能であるとして期待され、研究開発レベルではその優位性が実証されている。しかしながら、デバイスの動作において最も重要な役割を持つ MIS ゲート構造に課題がある。これまでに報告されている MIS チャネル移動度は $\sim 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度であり、これは GaN のバルク移動度  $1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  と比較して非常に低い値である。MIS チャネル移動度はデバイスの導通損失に大きく影響し、デバイスの性能向上には MIS チャネル移動度の向上が必須である。現状、GaN MIS ゲート構造ではチャネル輸送特性に関する検討は不十分であり、チャネル移動度の向上には散乱機構の解明が必要である。加えて、界面形成技術が成熟しておらず、界面に存在する帯電し

たトラップなどの界面電荷によりキャリアが散乱を受け、移動度が低下している可能性がある。そこで、本論文においては GaN MIS 構造におけるチャンネル移動度の向上のため、界面特性とチャンネル輸送特性の相関及び、界面特性の劣化・改善機構に対する知見を得ることを目的としている。加えて、GaN で最も一般的に用いられる面である *c* 面と、デバイスにおいて MIS 界面が形成され得る *m* 面の比較により、これらの特性の面方位依存性について検討している。

第 2 章では、本研究で評価したデバイスの作製プロセス、作製に用いた装置の概要、また評価手法の概要について詳細に説明している。

第 3 章には、*c* 面及び *m* 面に形成された MIS ゲート構造の界面及びチャンネル輸送特性について検討している。*m* 面 GaN は分極が生じないことから、高効率な発光デバイスが作製可能であるとして注目された面方位であり、パワーデバイスとしても、トレンチ構造のデバイスでは MIS ゲートが形成される重要な面方位である。化合物半導体である GaN では面方位によって表面の構成原子が異なるため、絶縁膜/GaN 界面特性がその影響を受ける可能性がある。これらの理由から、*m* 面 GaN に形成した MIS 構造の界面・チャンネル輸送特性を系統的に評価することは非常に有用である。また、界面特性の改善に効果があるとされる電極形成後アニール (Post-metallization Anneal : PMA) 処理を施し、界面・チャンネル輸送特性に対する影響について比較を行っている。*c* 面と *m* 面では  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$  界面における界面準位密度が異なり、Ga の未結合手に起因するものであることが示唆された。PMA 処理によって、*c* 面と *m* 面の界面準位密度は  $10^{10} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  台まで低減し、両者で同程度の密度となった。面方位に依存しないことから、Ga の未結合手に起因する界面準位が不活性化され、伝導帯からの染み出しによる準位が観測されたものと考えられる。また、*c* 面と *m* 面で界面に存在する固定電荷密度が異なり、*c* 面において正の固定電荷密度が高いことを確認した。PMA 処理によって固定電荷密度が減少し、*c* 面で正、*m* 面で負の固定電荷が残存することが示唆され、その密度は *m* 面で低密度であることが示唆された。加えて、PMA 処理によるフラットバンド電圧のシフト量は *c* 面と *m* 面で同程度であり、同一の固定電荷が PMA 処理により不活性化されているものと考えられる。MISFET における閾値電圧は MIS キャパシタにおけるフラットバンド電圧と対応し、*c* 面・*m* 面および PMA 処理の有無の固定電荷密度の差を反映するものである。また、PMA 処理によって、*c* 面・*m* 面のどちらも、クーロン散乱が支配的であると考えられる表面キャリア濃度が低い領域における移動度が向上し、PMA 処理によって界面電荷密度が低減したことに起因すると考えられる。PMA 処理後の MISFET における低温におけるチャンネル移動度から、*c* 面ではクーロン散乱およびフォノン散乱の両者が支配的にチャンネル移動度を制限していることが示唆された。一方、*m* 面ではクーロン散乱による移動度の制限が *c* 面と比較して緩和されており、フォノン散乱により移動度が制限されていることが示唆された。両者の差は固定電荷密度の差に起因するものと考えられる。これらの結果から、*m* 面 GaN に形成された MIS チャンネルでは *c* 面と比較して界面電荷によるクーロン散乱に起因したチャンネル移動度の制限が抑制され、高

いチャネル移動度を示した。すなわち、 $c$ 面 GaN 上に作製した  $m$ 面をチャネルとするトレンチ構造では、プレーナー型と比較してチャネル抵抗の低減が可能であることが示唆された。加えて、 $c$ 面・ $m$ 面のどちらにチャネルを形成するとしても、PMA 処理は界面電荷密度の低減に効果があり、閾値電圧の正方向シフトおよびチャネル移動度の向上に効果的なプロセスであることを示した。

第 4 章では、電子線および抵抗加熱蒸着の二手法によりゲート電極を堆積し、作製した MIS デバイスの特性を比較することで、ゲート電極堆積手法が GaN MIS 界面・チャネル特性に及ぼす影響について調査している。電子線蒸着によって伝導帯近傍の界面トラップおよび、界面に正の固定電荷が導入されることを見出し、これらの界面電荷はクーロン散乱中心として振る舞い、チャネル移動度の劣化を招くことを示した。電子線蒸着による界面電荷の導入は他の半導体で見られる X 線などの高エネルギー光子の入射による界面劣化現象と同様であり、電子線蒸着において金属ターゲットへの電子線照射によって発生する X 線が入射することに起因することが示唆された。また、このように導入された界面電荷は 300 °C 程度のアニールによる不活性化が可能であることを示した。これらの結果から、デバイス作製プロセスが界面特性に影響を及ぼし、チャネル輸送特性の劣化を引き起こされることを系統的に示し、そのような界面電荷密度の低減や、それを回復するプロセス技術の確立が重要であることを示した。

第 5 章では、本研究において得られた GaN MIS 構造における界面特性とチャネル輸送特性に関する知見をまとめており、今後の展望について述べている。