

主論文の要約

論文題目 窒化物半導体パワーデバイスの高性能化と
プラズマによる低温成膜技術に関する研究
(Study on Performance Enhancement of
GaN Power Devices and the Low
Temperature Plasma Process
Technologies)

氏名 磯部 康裕

論文内容の要約

本研究では、省エネルギー社会を実現するために既存の Si 系パワー半導体デバイスに代わる次世代パワーデバイスの実現をめざし、物性特性の優れた窒化物半導体 GaN 系パワーデバイスの実用化に向け、1. ノーマリーオフ動作における高性能化、2. 電流コラプス抑制に関する検討、3. 低コスト化を目指した新規 GaN エピタキシャル成長方法の検討、の 3 つの課題に着目し、以下の成果を得た。

1. 非極性面 GaN のエピタキシャル結晶成長、特にバッファ層の検討を行い、非極性面を用いた結晶成長における問題点を明らかにした。特に、a 面を選択することにより GaN 層中酸素濃度を検出下限界以下まで低減させることができ、Fe などの意図した不純物ドーピングなしに高抵抗化、良好な FET 特性が得られることを実証した。また、非極性面での AlGaIn / GaN HEMT デバイスの動作実証を行い、閾値電圧の制御性とノーマリーオフ動作の可能性を示した。
2. 断面 CL 法を用いることにより、多層の GaN 層を有する GaN-HEMT 構造においても、それぞれの膜特性を独立して評価することが可能であり、2DEG が形成されるチャンネル層近傍の i-GaN と高耐圧化のために導入している Carbon doped GaN では BE, BL, YL の発光特性が異なることを示した。また、従来の PL 法の YL/BE 比との相関がみられなかった結果に対し、断面 CL 法で求めた i-GaN 層の

BL/BE 比および YL/BE 比の値とは良好な相関がみられたことから、電流コラプス改善の指針として役立つ解析手法であることを示した。

3. 新規 GaN 結晶成長法である REMOCVD の課題を抽出、新たに大口径対応の装置を設計した。プラズマを放電領域で閉じ込めることが GaN 結晶性の改善につながることを示し、ウェハ上へ供給する N ラジカルを増大させることで、従来よりも数倍の成長レートを得ることを示した。

以下に本論文を総括する。

第 1 章では、本研究の背景としてエネルギー問題について触れ、その解決策として省エネルギー化のために、パワー半導体デバイスの性能向上が求められていることを述べた。既存の Si 系パワーデバイスに代わる次世代デバイスとして窒化物半導体である GaN 系 HEMT が期待されていることを物性値の点から述べ、パワーデバイスとして高い可能性と実用化に向けての問題点について整理し、それぞれの問題点に対するアプローチを提案した。

第 2 章では、本研究で用いた GaN エピタキシャル結晶成長方法として、MOCVD 法および新規 GaN エピタキシャル成長方法である REMOCVD 法、および結晶評価方法とプラズマ評価方法について述べた。

第 3 章では、GaN 系 HEMT デバイスでのノーマリーオフ動作と特性改善をめざし、非極性面 GaN を用いた AlGaIn / GaN HEMT 構造に着目し、デバイス動作を目指した。デバイス動作のために、非極性面 GaN 基板上への GaN 結晶成長を行う際の基板前処理の検討、面方位の選択と GaN 成長条件最適化による膜中不純物取り込み抑制の検討を行い、基板・GaN エピ成長界面からの転位形成抑制と酸素濃度を検出下限界以下まで低減させる条件を見出した。この技術により、Fe などの意図した不純物ドーピングなしに高抵抗化、良好な FET 特性が得られることを実証した。また、非極性面での AlGaIn / GaN HEMT デバイスの動作実証を行い、閾値電圧の制御性とノーマリーオフ動作の可能性を示した。

第 4 章では、GaN 系 HEMT デバイス特有の現象である電流コラプスの抑制を目的とし、断面 CL 法を用いた GaN 結晶評価手法についての検討を行った。断面 CL 法を用いることにより、多層の GaN 層を有する GaN-HEMT 構造においても、それぞれの膜特性を独立して評価することが可能であり、2DEG が形成されるチャネル層近傍の i-GaN と高耐圧化のために導入している Carbon doped GaN では BE, BL, YL の発光特性が異なることを示した。欠陥起因での発光と考えられる BL や YL と、半導体の

伝導帯・価電子帯のバンド間遷移による BE の発光強度比率である BL/BE 比および YL/BE 比に関し、i-GaN 層の結晶成長条件では厚膜化に伴い値が減少、すなわち結晶回復の様子が確認された。これに対し、Carbon doped GaN 層の結晶成長条件では結晶劣化と考えられる振る舞いが見られた。電流コラプスとしての電気特性との相関を調べたところ、従来の PL 法の YL/BE 比との相関がみられなかった結果に対し、断面 CL 法で求めた i-GaN 層の BL/BE 比および YL/BE 比の値とは良好な相関がみられたことから、本手法が電流コラプス改善の指針として役立つ解析手法であることを示した。

第 5 章では、従来検討されてきたプラズマにより生成した N ラジカルを V 族原料とする REMOCVD 法をベースに大口径基板に対応するための新規設計事項である有機金属ガスの供給方法の変更を行い、さらに従来装置での GaN 結晶成長の課題であった GaN 結晶性と成長レートのトレードオフを改善するため、プラズマ遮蔽板の新規設計を行った。プラズマ遮蔽板の穴径が大きい条件では十分なプラズマ閉じ込め効果が得られないため良好な GaN 結晶性が得られないが、プラズマ遮蔽板の穴径を $\Phi 1\text{mm}$ としたことでプラズマ閉じ込めを行うことができ、積層欠陥のない GaN 結晶を作製することができた。しかしながら、プラズマ遮蔽板の穴内での N ラジカルの失活により、ウェハ上へ供給される N ラジカルが減少してしまったことで表面平坦性が悪化してしまう結果となった。シミュレーション結果からプラズマ遮蔽板の穴内での N ラジカル失活が非常に大きいことがわかり、プラズマ遮蔽板の材料検討を行うことで穴径が小さいまま、ウェハ上への N ラジカル供給量を増大させることができることを示した。しかしながら、表面平坦性・結晶性を維持しつつ、 $> 1\mu\text{m/hr}$ での高速成長を行うことは難しく、新規プラズマ源設計の必要性を示した。

第 6 章では、5 章にて得られた高品質 GaN 結晶を得る指針をさらに発展させ、新規高密度ラジカル源の検討を行った。シミュレーション、プラズマ発光分光、質量分析法による評価により、ICP 構造での H モード放電状態において、高密度 N ラジカルが得られることを見出した。この高密度ラジカル源を大口径対応 REMOCVD 法装置へ適用したところ、従来の数倍の成長レートを得ることができ、GaN 高速成長に対するポテンシャルを示した。

第 7 章では、本研究の総括を行い、今後の展望を述べた。

今後、さらなる研究・開発が進み、高性能化・低コスト化に寄与するブレイクスルーが起きることで、エネルギー問題、環境問題を解決する突破口となることが期待される。