

ヤマオカ ユウヤ

氏名 山岡 優哉  
学位の種類 博士（工学）  
学位記番号 博第1116号  
学位授与の日付 平成30年3月26日  
学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士  
学位論文題目 Si基板上AlGaN/GaN HEMTにおける結晶品質と電気特性の関係に関する研究  
(Study on relationship between the crystal quality and electric properties of AlGaN/GaN HEMT on Si substrate)

論文審査委員 主査 教授 江川 孝志  
教授 三好 実人  
准教授 Niraula Madan

## 論文内容の要旨

本研究では、次世代パワーデバイスとして実用化、普及に期待が大きい Si 基板上 AlGaN/GaN HEMT の信頼性向上にかかすことができない、縦方向リーカ電流および反りとエピタキシャル成長層の結晶品質および構造との関係を検討した。本論文は7つの章にて構成される。

第一章では、本研究の背景、課題、目的と論文の構成について述べている。

第二章では、本研究にて採用した結晶成長方法および MOVPE 装置の構成と本研究における Si 基板上 AlGaN/GaN HEMT における層構造について述べている。

第三章では、AlN 核形成層の結晶品質が Si 基板上 AlGaN/GaN HEMT 構造の反りおよび縦方向リーカ電流に与える影響を検討した。表面ピット密度および転位密度の異なる AlN 核形成層を用いた HEMT 構造エピウエハの反りの挙動の検討の結果、AlN 核形成層の表面ピット密度および転位密度が減少すると、AlN 核形成層に蓄積する引っ張り応力および AlGaN buffer/SLS/GaN 層中に蓄積する圧縮応力が増加し、HEMT 構造エピウエハのそりが低減することを見出した。HEMT 構造縦方向リーカ電流は AlN 核形成層中の貫通転位密度の減少とともに減少した。さらに、Si 基板/AlN 核形成層界面から発生した貫通転位が、SLS 層/AlGaN 緩衝層界面に V 字欠陥を引き起こすことがわかった。これらのことから、

V字欠陥により SLS 層の層構造にゆらぎが発生したため、縦方向リーケ電流が増加していると考えられる。原料分圧および Al 核形成層の膜厚の最適化によって、AlN 核形成層の結晶品質をこれまでに報告されている結晶品質とくらべ、高品質な AlN 核形成層の成長に成功した。高品質 AlN 核形成層を HEMT 構造へ適応することによって、HEMT 構造の縦方向リーケ電流の電極間ばらつきを低減することに成功した。

第四章では、Al 緩衝層の Al 組成が Si 基板上 AlGaN/GaN HEMT 構造の縦方向リーケ電流および結晶品質に与える影響を検討した。AlGaN 緩衝層単膜の縦方向リーケ電流は AlGaN 緩衝層のバンドギャップに応じて低減し、表面ピット密度の影響は小さいことがわかった。AlGaN 緩衝層の Al 組成は HEMT 構造中の GaN 結晶品質および 2DEG 特性には影響を与えないため、HEMT 構造の反りは AlGaN 緩衝層の Al 組成によって制御することが可能であることを実証した。HEMT 構造の縦方向リーケ電流は AlGaN 緩衝層単膜のリーケ電流特性では決定しないことがわかった。HEMT 構造の縦方向リーケ電流の増加の要因は、AlGaN 緩衝層/SLS 層界面の V 字欠陥の斜面より発生したと考えられる貫通転位が SLS 層および GaN 層まで到達し、リーケパスを形成していると考えられる。

第五章では、HEMT 構造中 SLS 層膜厚が HEMT 構造縦方向リーケ電流に与える影響を検討した。HEMT 構造縦方向リーケ電流を低減するための層構造の設計指針を得るために各層の耐圧時における電界を見積もった。さらに見積もり結果から得られた指針から、総膜厚に対して SLS 層構造の膜厚割合を増加した場合の縦方向リーケ電流低減効果を検討した。その結果、いずれの層の耐圧時における電界は理論値とくらべ小さく、AlN 核形成層および AlGaN 緩衝層の耐圧時における電界は貫通転位、SLS 層および GaN 層は、各層における平均 Al 組成によって決定されていることを見出した。また、SLS 層が最も高い耐圧時における電界を有していることがわかった。HEMT 構造総膜厚に対して、SLS 層構造膜厚の割合を増加することで縦方向リーケ電流を減少することができるこを確認した。

第六章では、HEMT 構造中 C doped GaN 層成長圧力が結晶品質および電気特性に与える影響を検討した。その結果、C doped GaN 層の成長圧力が増加することによって、SLS/C doped GaN 層界面に発生する GaN のグレインサイズが増大することによって、SLS/C doped GaN 層界面での緩和が発生したため HEMT 構造エピウエハのそりが増加することがわかった。C doped GaN 層の成長圧力が低いほど、縦方向リーケ電流が減少することを確認した。10kPa および 25kPa にて C doped GaN 層を成長した HEMT の OFF 状態におけるドレンリーケ電流はゲートリーケ電流が支配的であった。一方、90kPa にて C doped GaN 層を成長した HEMT の OFF 状態におけるドレンリーケ電流は、ゲートリーケ電流ではなく、ソース電極—ドレン電極間の横方向リーケが支配的であることがわかった。

第七章では本論文の総括および、今後の課題について述べている。

# 論文審査結果の要旨

本論文は、次世代パワーデバイスとして実用化、普及に期待が大きい Si 基板上 AlGaN/GaN HEMT の信頼性向上にかかすことができない、縦方向リーク電流および反りとエピタキシャル成長層の結晶品質および構造との関係を検討し、その結果をまとめたものである。

第一章では、本研究の背景、課題、目的と論文の構成について述べている。

第二章では、本研究にて採用した結晶成長方法および MOVPE 装置の構成と本研究における Si 基板上 AlGaN/GaN HEMT における層構造について述べている。

第三章では、AlN核形成層の結晶品質がSi基板上AlGaN/GaN HEMT構造の反りおよび縦方向リーク電流に与える影響を検討した。AlN核形成層の表面ピット密度および転位密度が減少すると、AlN核形成層に蓄積する引っ張り応力およびAlGaN buffer/SLS（歪超格子）/GaN層中に蓄積する圧縮応力が増加し、HEMT構造エピウエハのそりが低減することを見出した。HEMT構造縦方向リーク電流はAlN核形成層中の貫通転位密度の減少とともに減少した。さらに、Si基板/AlN核形成層界面から発生した貫通転位が、SLS層/AlGaN緩衝層界面にV字欠陥を引き起こすことがわかった。

第四章では、Al 緩衝層の Al 組成が Si 基板上 AlGaN/GaN HEMT 構造の縦方向リーク電流および結晶品質に与える影響を検討した。AlGaN 緩衝層単膜の縦方向リーク電流は AlGaN 緩衝層のバンドギャップに応じて低減し、表面ピット密度の影響は小さいことがわかった。AlGaN 緩衝層の Al 組成は HEMT 構造中の GaN 結晶品質および 2DEG 特性には影響を与えないため、HEMT 構造の反りは AlGaN 緩衝層の Al 組成によって制御することが可能であることを実証した。また、HEMT 構造の縦方向リーク電流は AlGaN 緩衝層単膜のリーク電流特性では決定しないことがわかった。HEMT 構造の縦方向リーク電流の増加の要因は、AlGaN 緩衝層/SLS 層界面の V 字欠陥の斜面より発生したと考えられる貫通転位が SLS 層および GaN 層まで到達し、リークパスを形成していると考えられる。

第五章では、HEMT 構造中 SLS 層膜厚が HEMT 構造縦方向リーク電流に与える影響を検討した。HEMT 構造縦方向リーク電流を低減するための層構造の設計指針を得るために各層の耐圧時における電界を見積もった。さらに見積もり結果から得られた指針から、総膜厚に対して SLS 層構造の膜厚割合を増加した場合の縦方向リーク電流低減効果を検討した。その結果、AlN核形成層および AlGaN 緩衝層の耐圧時における電界は貫通転位、SLS 層および GaN 層は各層における平均 Al 組成によって決定されていることを見出した。また、SLS 層が最も高い耐圧時における電界を有していることがわかった。

第六章では、HEMT 構造中 C doped GaN 層成長圧力が結晶品質および電気特性に与える影響を検討した。その結果、C doped GaN 層の成長圧力が増加することによって、SLS/C doped GaN 層界面に発生する GaN のグレインサイズが増大することによって、SLS/C doped GaN 層界面での緩和が発生したため HEMT 構造エピウエハのそりが増加することがわかった。C doped GaN 層の成長圧力が低いほど、縦方向リーク電流が減少することを確認した。

第七章では本論文の総括及び今後の課題について述べている。

以上の研究成果は、5 編の学術論文として発表されており、Si 基板上 AlGaN/GaN HEMT における結晶品質と電気特性の関係に関する重要な知見を与えている。従って、本論文は本学の博士（工学）論文として十分な価値を有するものと認められる。