

氏名（本籍） ^{すぎ}杉 ^{うら}浦 ^{よう}洋 ^{へい}平（東京都）
 学位の種類 博士（工学）
 学位記番号 博甲 第136号
 学位授与の要件 学位規則 第4条 第1項
 学位授与年月日 平成27年3月31日
 学位論文題目 III族窒化物半導体上III族酸化物形成とその窒化物表面付近における電荷移動に関する研究
 論文審査委員 主査 本田 徹
 副査 鷹野 一朗
 高橋 泰樹
 山口 智広
 東脇 正高（独立行政法人情報通信研究機構工学院大学大学院非常勤講師）

論文要旨

目次

第1章 序論

- 1.1 研究背景
- 1.2 研究目的

第2章 実験装置

- 2.1 成長装置
 - 2.1.1 プラズマ支援分子線エピタキシー法
 - 2.1.2 in-situ プラズマ支援分子線エピタキシー法
- 2.2 評価装置
 - 2.2.1 X線光電子分光法
 - 2.2.1.1 X線光電子分光法
 - 2.2.1.2 ピークフィッティングおよびピーク較正
 - 2.2.1.3 角度分解X線光電子分光法
 - 2.2.2 原子間力顕微鏡
 - 2.2.3 ホール効果測定
 - 2.2.4 伝送長法
 - 2.2.5 透過電子顕微鏡
- 2.3 表面酸化膜層の形成
 - 2.3.1 (0001) Sapphire 基板上 Al 薄膜の成長条件
 - 2.3.1.1 基板温度変化による(111)Alの表面モフォロジー
 - 2.3.1.2 Alビーム強度変化における(111)Alの表面モフォロジー
 - 2.3.2 RF窒素プラズマを用いた(111)Al/(0001) Sapphireの表面窒化によるAlN層の形成

第3章 GaN 自立基板を用いた表面酸化物量と表面フェルミ準位の依存性

- 3.1 はじめに
- 3.2 実験方法
- 3.3 実験結果

3.3.1 AR-XPSによる ΔE シフトの算出

3.3.2 表面酸化物量に対する ΔE シフト量

3.4 まとめ

第4章 AlO_x/AlN/GaN ヘテロ構造成長

4.1 AlO_xバッファ層/AlN/GaN ヘテロ構造成長

4.1.1 はじめに

4.1.2 AlO_xバッファ層/AlN/GaNの成長条件

4.1.3 実験結果

4.1.3.1 AlO_xバッファ層のXPS測定

4.1.3.2 AlO_xバッファ層の表面AFM像

4.2 AlO_xトップ層/AlO_xバッファ層/AlN/GaN

ヘテロ構造成長

4.2.1 はじめに

4.2.2 AlO_xトップ層/AlO_xバッファ層/AlN/GaNの成長条件

4.2.3 実験結果

4.2.3.1 AlO_xトップ層の表面AFM像

4.2.3.2 AlO_xトップ層/AlO_xバッファ層/AlN/GaN構造の断面TEM像

4.3 まとめ

第5章 AlO_x/AlN/GaN デバイス構造の製作及び評価

5.1 デバイス製作プロセス

5.2 実験結果

5.2.1 ホール効果測定

5.2.2 TLM測定

5.2.3 I-V測定

5.2.4 I_{DS}-V_{DS}測定

5.3 まとめ

第6章 結論

研究業績

付録

謝辞

青色LED等に用いられている窒化ガリウム(GaN)は、材料特性より高耐压デバイスへの応用が期待されている。GaNは結晶上に窒化アルミニウムガリウム(AIGaN)または窒化アルミニウム(AIN)を形成すると、ドーピング無しでAIN(またはAIGaN)のピエゾ分極効果により界面付近にシート状に分布する電子、二次元電子ガス(2DEG)を発生させる。電子は2DEG中で不純物による散乱が受けにくくなるため、バルク中よりも高移動度となる。よって、AIGaN(AIN)/GaNヘテロ構造は高周波通信用デバイスへの応用が期待されている。

2DEGの発生する理由は以下の通りに考えられている。AIGaN表面に高密度のドナー準位がバンドギャップ中央付近に存在し、AIGaNを成長させると表面ドナー準位がフェルミ準位に近づいていく。AIGaNが臨界膜厚以上になった時、表面ドナー準位とフェルミ準位が一致し、ドナー準位からAIGaN/GaN界面に電子を供給する。上記のシステムはAIN/GaNヘテロ構造の場合も同様である。上記のモデルが広く支持されているが、実際の表面ドナー準位分布や起源についての詳細は未だ不明である。

近年、表面ドナー準位はAIGaNの表面に形成される酸化物構造と深い関係があると示唆されている。AIGaN表面に形成される酸化物は酸化アルミニウム(AlO_x)と酸化ガリウム(GaO_x)が想定され、それぞれの酸化物は更に2つの構造を有し、最低でも4種類の酸化物構造が形成される。それぞれの酸化物構造は異なった表面準位分布を形成し、表面準位は4タイプの分布が重畳して形成されている。特に2DEGはAIGaN表面に形成されるAl酸化物に依存する可能性が示唆されている。よって、AIGaN表面の酸化物を制御することにより、表面順位の制御が可能となる。第1章ではこれら本研究の背景および目的を述べる。

第2章は実験に使用した成長装置および評価装置について説明する。窒化物半導体の結晶成長装置として用いられる、プラズマ支援子線エピタキシー(RF-MBE)装置を説明した後、特殊な装置構成となっているin-situ RF-MBE装置について説明する。in-situ RF-MBE装置の最大の特徴は、酸化物/窒化物構造を同じ成長室で連続して成長が可能となる点である。通常AIN(AIGaN)/GaNヘテロ構造上の酸化物構造の堆積は原子層堆積法(ALD)等の別の成膜装置が使用される。その際、窒化物表面は大気中に曝露され、自然酸化膜による意図しない準位が発生する。in-situ RF-MBE装置は、成長室に窒素と酸素プラズマセルが両方装備されており、同じ成長室内で連続して酸化物/窒化物構造の成長が可能であ

る。よって、自然酸化膜による準位の発生を抑え、表面(界面)準位が制御された酸化物/窒化物ヘテロ構造の成長が可能である。成長装置の説明を行った後に、評価装置について説明した。角度分解光電子分光法(AR-XPS)による測定は、薄膜中に存在する電界の方向と相対的な強度変化の判別が可能である。薄膜中に自発分極やピエゾ分極等による電界が発生している場合、表面とバルク内部でポテンシャルエネルギーが変化する。XPSの検出器に対してサンプル角度を変化させ、より表面の情報を検出すると、内殻準位スペクトルのピーク位置がシフトする。シフト量を ΔE として算出し、その値によって電界の方向や相対的な強度変化を求める。第2章は他の評価装置についても説明している。

第3章はGaN自立基板を用いた表面酸化物量と ΔE シフト量の関係性について検討した。GaNの表面が大気中に曝されると、自然酸化膜(主に β - Ga_2O_3)が形成され表面準位が発生する。表面準位は電荷中性準位(CNL)と呼ばれるドナーとアクセプター準位の境界が存在し、CNLとバルク中のフェルミ準位が一致するまでバルク中から表面へ電荷の移動が起こり、表面付近のバンドが曲がる。よって、表面準位分布が変形すればバンド曲がりも変化する事となる。第3章はAR-XPSを用いて、GaN表面に形成されている自然酸化膜量に対するバンド曲がり量の相対的な変化と関係を求めた。この結果は他のグループが報告している、窒化物表面の酸化物構造によって形成される表面準位の分布と同じ傾向であった。

第4章は AlO_x /AIN/GaNヘテロ構造の成長を行った。報告されている表面準位分布を考慮し、AIN/GaNヘテロ構造上に AlO_x 薄膜の形成を試みた。また、酸化物構造形成時にAIGaN中に含まれるGaが酸化され GaO_x となり、意図しない表面準位を形成すると考えAIN/GaN構造を用いた、in-situ RF-MBEを用いた酸化物/窒化物ヘテロ構造の成長は、他の研究グループで報告されていない。よって、窒化物構造上 AlO_x バッファ層の成長条件を検討した。まず窒化物構造上にAl金属を1.5, 3.0, 5.0, 10 nm堆積した後、酸素プラズマを照射してAlを酸化させた。その後高真空中内で基板温度を800℃まで昇温し、アニール処理を施して AlO_x 薄膜を形成した。Al金属を5.0 nm以上堆積して形成した AlO_x 薄膜は多数のドロップレットとピットが表面に存在していたのに対し、Al堆積量が3.0 nm以下の AlO_x 薄膜は均一な表面であった。バッファ層形成後、ゲート絶縁膜への応用を考え更に AlO_x トップ層を堆積した。基板温度400℃で形成した AlO_x トップ層の表面は

バッファ層よりもグレインが連続して平坦な膜を形成しており、ほとんどの部分でアモルファスだった。一方、基板温度 800 °C で堆積した AlO_x トップ層は更に平滑な表面を形成し、酸化物 / 窒化物界面から全て結晶化していた。

第 5 章は、第 4 章で成長した $\text{AlO}_x/\text{AlN}/\text{GaN}$ ヘテロ構造を用いてデバイス構造を製作し、評価した。窒化物系電界効果トランジスタ (HFETs) は、ゲート漏れ電流等の現象が高周波特性に大きな影響を与えると報告されている。窒化物表面は、自然酸化膜による影響により酸化物 / 窒化物界面 (表面) に意図しない準位を発生させる。第 4 章で成長した $\text{AlO}_x/\text{AlN}/\text{GaN}$ ヘテロ構造はその成長装置の特性から、酸化物 / 窒化物構造に意図しない準位の発生を抑えての成長が可能であるが、その詳細なデバイス特性は不明である。よって、in-situ RF-MBE を用いて形成した $\text{AlO}_x/\text{AlN}/\text{GaN}$ ヘテロ構造のデバイス特性評価を行った。基板温度 400 °C で AlO_x トップ層を形成したサンプルに対して、基板温度 800 °C で形成したサンプルの 2DEG 濃度が減少していた。400 °C で形成した AlO_x 薄膜はほとんどの部分でアモルファスであったため、AlN の表面準位は AlO_x に関係する幾つかの表面準位が重畳して形成していると考えられる。基板温度 800 °C で形成した $\text{AlO}_x/\text{AlN}/\text{GaN}$ ヘテロ構造は AlO_x/AlN の界面から全て結晶化しているため、表面準位の制御に成功していると考えられる。

第 6 章は各章ごとの成果を改めて述べ、今後の展望および応用について述べる。

論文審査要旨

本論文は、III 族窒化物半導体である窒化アルミニウム (AlN) および窒化ガリウム (GaN) を用いたヘテロ構造電界効果型トランジスタ (Heterostructure field-effect transistor, HFET) に関する表面酸化物形成に関する研究をまとめたものである。

近年 III 族窒化物半導体は青色・白色発光ダイオード (LED) などの光デバイスに応用され、実用化している。また、これらの材料は、高周波・高出力トランジスタ、ダイオード用途においても有望視されている。窒化物 HFET は、窒化物ヘテロ界面に電子が 2 次元ガス状態で存在する。ゲート電圧による空乏層 (電界が存在し、伝導電子が存在しない領域) 制御による電流通過断面積変化により、2 次元電子ガスの抵抗が制御されるしくみである。2 次元電子ガスとなる電子は、これまでの研究

により、AlN 表面から供給されている。AlN 表面には、未結合手が多数存在し、この電荷が供給源である。AlN 表面未結合手を表面酸化物形成により結合させると 2 次元電子ガスが供給されず、ゲート電圧未印加時に電流が流れない「ノーマリー・オフ」状態を有する素子が実現できる。通常、2 次元電子ガスがゲート電圧未印加時に存在しており、この素子は「ノーマリー・オン」素子という。システム応用時には、回路安全性の観点から「ノーマリー・オフ」素子が必要であり、その研究が世界各地で進められている。この点について第 1 章に示されている。

本博士論文の中心的課題は、III 族窒化物半導体と III 族酸化物半導体を用いた複合 (コンポジット) ヘテロ構造のための薄膜成長技術の開発である。さらに本技術を用いた窒化物半導体の新しいデバイス応用の可能性を提案している。2 次元電子ガスおよび窒化物半導体表面の状態把握、特にコンポジット化の際の酸化の影響について X 線光電子分光法 (XPS) を用いた評価を行った結果についても示されている。

これまでに報告されている理論的予測では、酸化物 / 窒化物界面状態によって 2 次元電子ガス量の制御が示唆されている。この際に大きく分けて 2 つの状態、すなわち、オキサイド・ストイキオメトリ (OS) とエレクトロン・カウンティング (EC) 状態である。OS の場合には表面 AlN は AlO_xN_y を形成しており、2 次元電子ガス量制御には向いていない。一方、EC の場合には明瞭な AlO_x/AlN 界面が形成され、2 次元電子ガス量制御に有効と考えられている。主に、表面未結合手が形成する状態密度を計算しており、まず GaN 結晶とその自然酸化物に関して、既報論文の理論予測の妥当性について XPS 測定結果から検討した (第 3 章)。この結果、酸化物量依存性に関して検討した結果、既報論文で予想される結果と一致し、EC 状態を持つ AlO_x 酸化物を AlN/GaN ヘテロ構造に形成する実験を実施することにした。

AlN/GaN ヘテロ構造上に形成する III 族酸化物場合には、窒化物 / 酸化物界面制御が重要となるため、窒化物ヘテロ構造形成に連続して酸化物形成を行う必要がある。このため、複合 (コンポジット) ヘテロ構造のための薄膜成長技術の開発が必要となり、その点について第 4 章にて言及している。酸化物の形成手法については、第 2 章で述べられているが、原料を同時供給して III 族酸化物を名乗る場合には、その薄膜連続性が実現困難であること、および AlO_xN_y が形成される懸念があることから Al の成長およびその酸化によって形成する手法を採用している。

OS 構造形成を抑えた III 族酸化物を AlN/GaN ヘテロ構造上に形成し、その 2 次元電子ガス特性及びトランジスタ特性について検討した結果が第 5 章で述べられている。同構造を用いたヘテロ構造 FET の動作に成功しており、工学的に素子応用が可能であることを実証した。また、表面制御した酸化物を形成した AlN/GaN ヘテロ構造における 2 次元電子ガス量は、酸化物を意図的に形成しなかった場合と比べて半減しており、理論的予想通り、電圧無印加時の 2 次元電子ガス量を制御できる可能性を示唆している。

本論文は、今後新たな学術分野としての広がりが期待されると同時に、工業的応用が将来期待される結果を含んでいる。本論文は、博士（工学）の学位を与えるに相当すると考える。

本博士論文の成果は、学術論文や国際会議などで適宜公開・公表されており、それらを通じて外部評価を受けている。また、公聴会・最終審査においても相応な発表内容と質疑応答が認められた。以上の結果を鑑み、博士（工学）の学位最終審査に合格したと判断する。