

## 論文の内容の要旨

論文題目     AlGaNへの電子注入とその電子素子応用に関する研究

氏     名     前田   亮太

本論文はスパッタリング法を用いた結晶成長技術によるAlN/AlGaNヘテロ構造の作製とその薄膜の結晶性の高品質化、およびn型縮退Ga<sub>N</sub>再成長プロセス技術の開発を通して、低抵抗なAlGaNへの電子注入の実現とそのメカニズム解明、AlGaNを用いた高耐圧電子素子の評価について述べたものである。

AlN及び AlNとGa<sub>N</sub>の混晶であるAlGa<sub>N</sub>は3.4~6.1 eVのバンドギャップをもつ直接遷移型半導体であり、最大で17 MV/cm の高い絶縁破壊電界と340 W/mKの熱伝導率などの優れた物性を示す。このようなワイドギャップ材料は構成原子間の結合エネルギーが大きく、放射線のような高エネルギー粒子照射による衝突電離や格子変位に対して高い耐性を示す。したがって、AlGa<sub>N</sub>を用いた超高耐圧・高出力エレクトロニクスは、高温厳環境、電動航空機や宇宙空間用途の小型・軽量な高効率全固体電力変換素子や高出力通信素子として期待されている。

特にAlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ構造は各結晶の自発分極とピエゾ分極により界面に2次元電子ガス(Two-dimensional electron gas: 2DEG)を誘起し、高耐圧半導体媒質中に良質な電子伝導チャネルを形成する。そのためAlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ構造はAlGa<sub>N</sub>高電子移動度トランジスタ(AlGa<sub>N</sub> HEMT)への応用が期待される。AlGa<sub>N</sub> HEMTの作製には電子注入のために2DEGへ接触する電極の形成が必要である。Ga<sub>N</sub>を導電層とした電子素子で用いられる従

来の電極形成プロセスでは、金属電極をアニールすることで2DEGへのコンタクト形成が行われる。しかしながら、AlGa<sub>N</sub>は電子親和力が小さく、また、熱化学的にも安定であるために、AlGa<sub>N</sub>ベースのHEMTの場合は、金属のアニール技術を用いての2DEGへの電氣的な接触が本質的に困難である。そのため現在報告されているAlGa<sub>N</sub> HEMTは接触抵抗が高く、素子の実用化にはAlGa<sub>N</sub>への低抵抗な電子注入が大きな課題となっている。そこで本研究ではこのような課題に対して、スパッタリング法を用いて作製可能なn型縮退Ga<sub>N</sub> (degenerate Ga<sub>N</sub>: d-Ga<sub>N</sub>)に着目した。d-Ga<sub>N</sub>は $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>台の電子濃度と低い抵抗率を示し、電子親和力の小さいAlGa<sub>N</sub>材料への接触抵抗の低減に有利な可能性がある。本論文ではスパッタリング法を用いて作製したAlN/AlGa<sub>N</sub> ヘテロ構造に対して、電極部へのd-Ga<sub>N</sub>の選択再成長というアプローチからAlGa<sub>N</sub> HEMTを作製し、AlGa<sub>N</sub>への電子注入のメカニズム解明とその電子素子の諸特性について論じている。

本論文は以下の6章から構成されている。

第1章ではGa<sub>N</sub>を始めとした13族窒化物半導体の結晶成長技術や電子素子応用に関する現状について述べた後に、AlGa<sub>N</sub>を用いた次世代高耐圧電子素子の応用とその課題について論じている。以上の背景を踏まえた上で、AlN上に作製したAlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ構造についての利点に着目し、本研究の目的が述べられている。

第2章ではAlN/Sapphireテンプレート基板へのスパッタリング法を用いたAlNのエピタキシャル成長とAlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ構造の作製について論じられている。一般に薄膜の結晶性は下地基板の結晶性を引き継ぐため、結晶性に優れたAlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ構造の実現には、下地のAlN層の結晶性の向上が必要不可欠である。そこで最初にスパッタリング法により良好な構造特性の得られるAlN薄膜の条件検討を行った。その後Al組成の異なるAlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ構造を作製し、その構造特性と電気特性に関してAl組成依存性評価した。Al組成が50%までの試料において、AlGa<sub>N</sub>薄膜はAlNに対して面内で原子間隔を揃えてコヒーレントに成長しており、ミスフィット転位の発生は抑えられていた。AlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ界面には電子の蓄積が確認でき、77 Kから室温にかけてシートキャリア密度の温度依存性が無かった。実験的に得られたシートキャリア密度は自発分極とピエゾ分極の計算によって説明できる値であった。以上の結果からAlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ界面には2DEGが誘起されていることが確認できた。スパッタリング法により構造特性と電気特性に優れたAlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ構造を作製できた。

第3章では、AlN/AlGa<sub>N</sub>ヘテロ構造に対してのd-Ga<sub>N</sub>の選択再成長プロセスの開発について論じている。フォトリソグラフィとSiO<sub>2</sub>マスクを用いたd-Ga<sub>N</sub>のエピ・ポリ同時成長プロセスにより、d-Ga<sub>N</sub>再成長AlN/AlGa<sub>N</sub> HEMTの作製を行った。フッ酸溶液を用いたSiO<sub>2</sub>マスクのリフトオフによって、HEMTの電極部にd-Ga<sub>N</sub>の選択的形成を実現した。電子線後方散乱回折による測定から、微小領域に再成長したd-Ga<sub>N</sub>は単結晶であることがわかった。微小領域に再成長したd-Ga<sub>N</sub>は $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>を超える電子濃度と $100$  cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>を超える電子移動度を示し、十分低抵抗であることがわかった。以上の結果は、d-Ga<sub>N</sub>選択再成長

プロセスがHEMTの電極部の形成に適用可能であることを示している。

第4章では、第3章で作製したd-GaN再成長AlN/AlGaN HEMTの接触抵抗に関する評価とd-GaNによるAlGaNへの電子注入のメカニズムについて論じている。Al組成30%および50%の素子に対してTransfer Length Methods (TLM) 法を用いたところ、室温での接触抵抗はAl組成30%で $0.34 \text{ } \Omega\text{mm}$ 、50%で $0.43 \text{ } \Omega\text{mm}$ と求まった。この値はそれぞれの組成において現在報告されているAlGaN HEMTの中で最も低い値である。d-GaNによるAlGaNへの低抵抗な電子注入のメカニズムを解明するために、TLM法を用いて接触抵抗の77 Kから室温までの温度依存特性を測定した。Al組成30%の試料においては2DEGとd-GaNの接触抵抗は温度依存の変化が小さい一方で、Al組成50%の試料では77 Kから室温にかけて抵抗が減少する温度依存特性が確認できた。この温度依存特性に対して、d-GaNとAl組成50%のAlGaN間にエネルギー障壁 $\Phi_B$ が存在するThermal Field Emission (TFE) モデルを仮定しフィッティングを行った。その結果エネルギー障壁 $\Phi_B$ は $0.24 \text{ eV}$ の値が得られた。この素子のd-GaNの電子濃度はホール効果測定から $2.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ と求まった。電子濃度の値から、非放物線バンドを仮定してd-GaNのフェルミレベルの位置を計算したところ、d-GaNのフェルミレベルはMoss-Berstein効果によって伝導帯下端から $0.63 \text{ eV}$  高い位置に存在していることが分かった。フェルミレベルが高く実効的に仕事関数の低いd-GaNがAlGaNとのエネルギー障壁 $\Phi_B$ を $0.24 \text{ eV}$ まで低減したことで、他グループよりも低い接触抵抗を実現できたことが確認された。

第5章では、d-GaN再成長AlN/AlGaN HEMTの素子特性について論じている。電流電圧 ( $I$ - $V$ ) 測定により、Al組成30%と50%の素子について評価した。電流は電圧に対して線形的な立ち上がりを示し、良好なオーミック特性が確認できた。Al組成50%のAlN/AlGaN HEMTの $I$ - $V$  特性について77~473 Kの範囲での温度依存特性を評価したところ、測定温度全域にわたってオーミック特性を示した。473 Kでの最大電流密度は室温に対して17%の減少にとどまっていた。この減少は、温度上昇に伴うシート抵抗の増加によることがホール効果測定の温度依存測定から分かった。このような抵抗の増加はフォノン散乱によりAlGaNの電子移動度が減少することに起因する。各温度におけるドレイン電流とゲート電圧の関係を測定したところ、素子のオン状態とオフ状態の電流密度の比である $I_{on}/I_{off}$  比は最大で $10^7$ を超える値を示し、良好なスイッチング特性が確認できた。473 Kにおいてもオフ状態時のリーク電流は $\sim 10^{-7} \text{ A/mm}$ に抑えられていることを確認した。

作製したAlN/AlGaN HEMTの耐圧特性についても評価した。スパッタリング法で作製したAlN/AlGaN HEMTはAl組成60%において $5.4 \text{ MV/cm}$ の絶縁破壊電界の値を示した。この値は現在報告されているAlGaN系トランジスタの中で最も大きい値である。以上の結果はd-GaN再成長AlN/AlGaN HEMTは高温環境下及び高電圧での動作が可能であり、次世代パワーエレクトロニクスの応用に十分期待できることを示している。

第6章では本論文のまとめと今後の展望について述べる。

以上、本論文はスパッタリング法による結晶成長技術を用いてAlN/AlGaNヘテロ構造

の作製とその薄膜の結晶性の高品質化、及びd-GaN再成長プロセス技術の開発を通して、低抵抗なAlGaInへの電子注入の実現とそのメカニズム解明、AlGaInを用いた高耐圧電子素子の評価について述べたものである。スパッタリング法により構造特性および電気特性に優れた結晶性の高いAlN/AlGaInヘテロ構造を実現した。SiO<sub>2</sub>マスクを用いたスパッタリング法によるd-GaN再成長プロセスを開発し、微小領域への低抵抗なd-GaNの選択再成長を実現した。TFEモデルを仮定することでd-GaNと50%Al組成のAlGaInには0.24 eVのエネルギー障壁が存在することが分かった。Moss-Burstein効果によりフェルミレベルの上昇したd-GaNは、GaInとAlGaInのエネルギー障壁を0.24 eVまで低減し、低抵抗なAlGaInへの電子注入を実現することがわかった。d-GaN再成長AlN/AlGaIn HEMTは耐熱・耐圧に優れた素子特性を示した。

本論文で得られた知見は、次世代の超高耐圧・高出力AlGaIn素子の実現に向けてひとつのブレークスルーとなるものと考えられる。