

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 前田 亮太

本論文はスパッタリング法を用いたAlN/AlGa_Nヘテロ構造の作製と評価に関するもので、薄膜の結晶性の高品質化技術、n型縮退Ga_N再成長プロセス技術の開発を通して、低抵抗なAlGa_Nへの電子注入の実現とそのメカニズム解明、AlGa_Nを用いた高耐圧電子素子の作製・評価について述べている。本論文は以下の6章から構成されている。

第1章ではGa_Nをはじめとした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_N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_N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_Nヘテロ構造の作製について論じられている。Al組成の異なるAlN/AlGa_N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_N薄膜はAlNに対して、*a*軸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。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_N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_Nヘテロ構造が実現したことが確認できた。

第3章では、AlN/AlGa_Nヘテロ構造に対しての縮退Ga_N (d-Ga_N) の選択再成長プロセスの開発について論じている。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_N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_Nは 10^{20} cm^{-3} を超える電子濃度と $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ を超える電子移動度を実現しており、低抵抗な電気特性を示した。以上の結果はd-Ga_N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-Ga_N再成長AlN/AlGa_N HEMTの接触抵抗に関する評価とd-Ga_NによるAlGa_N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AlGaIn HEMTの中で最も低い値である。d-GaNによるAlGaIn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AlGaIn間にエネルギー障壁 Φ_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 Φ_B は0.24 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 $2.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ と求めたが、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 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AlGaInとのエネルギー障壁 Φ_B を0.24 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分かった。

第5章では、d-GaN再成長AlN/AlGaIn 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/AlGaIn 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AlGaInの電子移動度が減少することに起因する。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/AlGaIn 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/AlGaIn HEMTはAl組成60%において5.4 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AlGaIn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/AlGaIn 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ている。

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/AlGaIn 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。本論文で得られた知見は、厳環境応用に向けた超高耐圧・高出力 AlGaIn 素子の実現に向けて重要な知見を与えている。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。