

論文審査の結果の要旨

氏名 角田 雅弘

本論文は、III 族窒化物半導体の準安定相である立方晶 GaN、AlGa_{0.3}N および AlN 薄膜を分子線エピタキシー法により作製し、立方晶相純度をはじめとする成長特性のほか、構造的、電気的および光学的特性を明らかにした研究成果を述べたものであり、全 7 章からなる。

第 1 章は序論であり、III 族窒化物半導体の応用上の重要性に、応用の進展する六方晶 III 族窒化物を参照しつつ言及したのち、立方晶 III 族窒化物の予想される有利な特性と可能性および従来研究、さらに基板材料として MgO を用いることの利点など、本研究の背景に引き続き、本研究の目的を述べている。

第 2 章は、本研究で用いた実験方法の説明であり、結晶成長法である分子線エピタキシーの原理と手法、結晶評価方法として反射高速電子線回折、線回折(XRD)、フォトルミネッセンス(PL)、光吸収、ホール効果などの各測定法の原理と手法について概要を述べている。

第 3 章では、アンドープ立方晶 GaN および AlGa_{0.3}N 混晶の結晶成長とその評価結果について述べている。MgO(001)基板を用いて、Al 濃度 34%までの立方晶 AlGa_{0.3}N の作製に成功した。XRD 逆格子空間マッピング測定により、立方晶相純度は Al 濃度増加とともに低下し、Al 濃度 0%において 98%であったものが、Al 濃度 34%において 18%となることを示した。これは Al 濃度増加に伴う III 族原子の表面マイグレーションの低下による成長表面の平坦性低下に起因すると解釈できる。光学特性評価では、Al 濃度 18%までの立方晶 AlGa_{0.3}N において室温 PL におけるバンド端発光を確認したが、それを超える Al 濃度では発光は見られていない。これは結晶性の低下に起因する。電気的特性の評価では、いずれの試料も高抵抗でありキャリア濃度および移動度の評価はできていない。

第 4 章では、Si ドープ立方晶 GaN および AlGa_{0.3}N 混晶の結晶成長とその評価結果について述べている。Si セル温度を変化させることで、Si ドープ量の異なる一連の試料を得た。一定のドープ量以上の立方晶 GaN においてホール効果測定が可能な程度に抵抗率が低下し、Si ドープ量の増加に伴い $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ から $2.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の範囲のキャリア濃度による n 型伝導性を確認した。キャリア濃度は高濃度側で飽和傾向にある。キャリア濃度の増大は、PL 測定における励起子発光の高エネルギーシフトからも確認された。Si ドープによる立方晶相純度の低下はみられない。キャリア移動度は最大 $27 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ であり、立方晶相純度が高いほど移動度も高い傾向がみられた。立方晶 AlGa_{0.3}N においても Si ドープによる結晶性の低下を引き起こすことなく、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリア濃度を得た。Al 濃度による移動度の違いはとくになく、移動度は立方晶相純度に強く依存する。立方晶のキャリア移動度は六方晶に比較して低く、立方晶相純度の向上が課題であることを指摘している。

第 5 章では、立方晶 AlN の結晶成長とその評価結果について述べている。MgO 基板上の直接成長によっては専ら六方晶 AlN が成長し、立方晶 AlN は得られないが、立方晶 GaN をバッファ層として用いることで、立方晶 AlN が得られる。さらにバッファ層を低温と高温の 2 段階成長とすることで、立方晶 GaN 層の表面平坦性が向上し、立方晶 AlN の表面平坦性も向上した。2 段階成長バッファ層を用いることにより、立方晶 AlN の相純度が、単層バッファ層の場合の 18%から 62%へ大幅に向上した。分光エリプソメトリー測定から、立方晶 AlN の室温バンドギャップ値として 5.95 eV を得た。この値は他で報告された値 5.88 eV よりやや大きく、六方晶混入の影響を受けている可能性がある。電気的评价において、立方晶 AlN はアンドープおよび Si ドープのいずれにおいても高抵抗であった。こ

れはSiドナー準位が立方晶 GaN 中よりも深いことに起因していると考えられる。

第6章では、立方晶窒化物系で量子井戸などデバイス構造を作製する上で必要となる要素について成長特性を明らかにした結果を述べている。立方晶 AlN 上の立方晶 GaN 成長においては、AlN の層厚が 10 nm 程度を超えると、立方晶 GaN の結晶性が低下する。立方晶 GaN バッファ層上の高 Al 濃度立方晶 AlGaN の成長では、立方晶 AlN の最適成長温度である 700 °C において、Ga の添加が困難であり、結晶性も低下する。また成長中に発生する Ga ドロップは 650 °C 以上で蒸発するが、Al ドロップは 750 °C でも蒸発しないため、Al ドロップの発生を抑制する必要がある。

第7章は、本研究で得られた知見をまとめることにより本研究の結論を述べるとともに、立方晶窒化物半導体研究の課題と将来展望にふれている。

なお、本論文の第3章、第4章および第6章は尾鍋研太郎と窪谷茂幸、第5章は尾鍋研太郎、窪谷茂幸、矢口裕之、片山竜二、石田崇、牧野兼三、森川生との共同研究をそれぞれ含んでいるが、論文提出者が主体となって実験および解析を行ったもので、本人の寄与が十分であると判断される。

以上、本論文は、物質科学へ大きく寄与するものであり、よって、博士(科学)の学位を授与できると認められる。

以上 2000 字