

## 審査の結果の要旨

論文提出者 小谷 晃央

半導体量子井戸のサブバンド間遷移はそのエネルギーギャップが赤外領域に対応することから、長波長デバイスの実現に有望とされている現象であり、主にガリウムヒ素等を用いて赤外領域の発光デバイスが開発されてきた。近年、発光デバイスである量子カスケードレーザにおいて、熱励起電子の縦型光学フォノン散乱により室温動作が困難であることが明らかになってきた。窒化物半導体は大きなフォノンエネルギーを有し、室温動作発光デバイスに有望な材料であると期待されている。ところが、これまで研究が進められてきた窒化物半導体 c 面量子井戸においては分極に起因する内部電界の影響により、サブバンド間遷移に関わる基礎物性が明らかになっていなかった。さらに、量子カスケードレーザのように結合量子井戸を利用したデバイスの設計が非常に困難であるという課題があった。

本論文は「Study on Characterization of Intersubband Transition in Non-polar m-plane AlGaIn/GaN Quantum Wells (非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸におけるサブバンド間遷移の評価に関する研究)」と題し、本質的に内部電界の存在しない非極性 m 面窒化物半導体量子井戸に着目し、非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸の作製、サブバンド間遷移に関連する基礎物性の評価及び量子カスケードレーザへの適用可能性に関して論じており、全 8 章から構成され英文で書かれている。

第 1 章は「Introduction」と題し、本博士論文の背景および構成について論じている。

第 2 章は「General Properties of III-Nitrides and Their Intersubband Device Applications」と題し、III 族窒化物半導体研究の歴史的背景及び変遷について述べた後、III 族窒化物半導体量子井戸の材料物性及び非極性 m 面量子井戸のサブバンド遷移評価に関する研究の重要性を論じている。

第 3 章は「Growth and Structural Properties in Non-polar m-plane AlGaIn/GaN Quantum Wells by Metal-organic Chemical Vapor Deposition」と題し、有機金属気相成長法による高品質な非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸の結晶成長及びその構造評価について論じており、後半では、薄い AlN 層の挿入によるクラックフリー AlGaIn/GaN 量子井戸の実現と歪緩和機構について論じている。

第 4 章は「Observation of Intersubband Absorption in Non-polar m-plane AlGaIn/GaN Quantum Wells」と題し、非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸のサブバンド間吸収評価について論じている。サンプル構造及び光学特性について論じた後、全反射測定法による非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸のサブバンド間吸収スペクトルの量子井戸幅依存性評価結果及びその数値解析について論じている。また、二重結合量子井戸における吸収スペクトル広がり観測とその起源について論じている。

第 5 章は「Many-body and Scattering Effects on Intersubband Absorption in Non-polar m-plane AlGaIn/GaN Quantum Wells」と題し、非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸のサブバンド間吸収に発現する多体効果及び散乱の影響について論じている。ドーピング濃度増加に伴うサブバンド吸収スペクトルのブルーシフト及びブロード化を観測し、それらの起源が多体効果及び散乱の影響によることを数値解析結果との比較により論じている。

第 6 章は「Temperature Dependence of Intersubband Absorption in Non-polar m-plane AlGaIn/GaN

Quantum Wells」と題し、非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸サブバンド間吸収の温度依存性評価について論じている。10 K 以下と室温とのサブバンド間吸収ピーク変化が数 meV と小さいことを実験的に観測し、数値解析結果との比較によりその要因を論じている。

第7章は「Proposal of Novel Non-polar m-plane AlGaIn/GaN Quantum Cascade Lasers: Theoretical Study」と題し、非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸を利用した量子カスケードレーザ構造の設計指針について論じている。マルチプルビュティカープローブ近似法を適用した非平衡グリーン関数法により非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子カスケードレーザが原理的に高温動作可能であることを示し、さらに、遺伝的アルゴリズムによる自動設計手法を組み合わせることで室温動作可能かつ低消費電力の非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子カスケードレーザ構造を提案し、デバイス構造の設計指針について論じている。

第8章は「Summary and Future Perspective」と題し、各章の主要な成果をまとめて総括し、本論文の結論、及び将来展望について述べている。

以上、これを要するに、本論文は、有機金属気相成長法を用いて非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸構造を形成し、量子井戸のサブバンド間吸収測定および多体効果を考慮した計算によりその光学的性質を評価するとともに、非極性 m 面 AlGaIn/GaN 量子井戸構造を有する量子カスケードレーザでは室温動作が可能であることを理論的に示したものであり、電子工学に貢献するところが少なくない。

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。