

## 審査の結果の要旨

氏名 梁 正 承

光ファイバーを用いた高速大容量通信が普及するに伴い、高速光スイッチング素子の重要性が高まっている。なかでも、半導体多重量子井戸構造を用いた伝導帯オフセットにできるインターサブバンド間の遷移 (Intersubband Transition, ISBT) を利用した全光スイッチは、遷移したキャリアの速い緩和速度によって、超高速光スイッチとしての応用が期待されている。これまでに、InGaAs/AlAs, Al(Ga)N/GaN, ZnSe/BeTe などの材料系で検討がなされてきたが、AlN/GaN 系はなかでも 2 eV という大きな伝導帯オフセットを持ち、速い LO フォノン散乱速度があるため、通信波長帯である 1.55  $\mu\text{m}$  での Tb/s オーダーの高速スイッチングが期待されている。

本論文は、“Low Temperature MOVPE Growth of AlN/GaN MQWs by Pulse Injection Method for Realization of Intersubband Transition at 1.55  $\mu\text{m}$ ” (1.55  $\mu\text{m}$  でのサブバンド間遷移の実現を目指したパルスインジェクション方式による AlN/GaN 多重量子井戸の低温 MOVPE 成長) と題し、有機金属気相成長法 (MOVPE) による AlN/GaN 多重量子井戸 (MQW) を用いて光通信波長帯である 1.55  $\mu\text{m}$  での ISBT の実現を目指したものであり、全部で 7 章からなる。

第 1 章はイントロダクションであり、研究の背景ならびに目的をまとめている。特に、AlN/GaN 系 MQW による ISBT の実現は、分子線エピタキシー (MBE) を用いて作製した場合には 1.08  $\mu\text{m}$  までの ISBT 吸収が観測されているのに対し、量産性に優れる MOVPE プロセスを用いた場合には、1.55  $\mu\text{m}$  までの弱い吸収しか観測されていないということを取りまとめ、本研究の課題は MOVPE による AlN/GaN-MQW により、1.55  $\mu\text{m}$  帯、さらには 1.3  $\mu\text{m}$  帯での強い ISBT 吸収の実現にあるとしている。

第 2 章では研究方針および戦略をまとめている。上記課題の解決のためには、AlN/GaN 界面の急峻性の確立と GaN 内での  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  程度のキャリア密度の確保が重要であることをシミュレーションなどにより明確にしている。また、その具体的解決策としては、界面での相互拡散による急峻性の劣化を防ぐために低温での成長が重要であること、また、低温成長では炭素の取り込みによりキャリア密度が減少するため、原料を間歇的に導入するパルスインジェクション方式を用いて炭素を有効に除去することが必要であることを示している。

第 3 章では、AlN/GaN-MQW を MOVPE 反応温度 1130  $^{\circ}\text{C}$  から 900  $^{\circ}\text{C}$  まで下げて作製し、構造変化、ISBT 吸収などの考察をおこなっている。X線回折の  $2\theta$ - $\omega$  測定からは、低温で作製した方がより高次の回折まで明確に現れ、低温での成長が界面急峻性向上に有効

であることを示している。しかしながら、各温度で作製した MQW の ISBT 吸収を測定したところ、1050°C以下の成長では ISBT 吸収が見られなくなってしまうことも報告している。この現象は、低温成長では残留炭素が急激に増大し、キャリアがトラップされて急激に減少してしまうことが原因であると推察し、残留炭素低減を次の目標と定めている。

第4章では、高品質 n 型 GaN を低温成長させるために、パルスインジェクション手法を導入した結果についてまとめている。具体的には、トリメチルガリウム (TMGa) とドーパントであるシラン (SiH<sub>4</sub>) ガスを間歇的に導入し、残留炭素の低減を図っている。TMGa 分圧やパルスの On/Off 時間の最適化により、表面の平滑性に優れ、残留炭素濃度の低い GaN 層を 800 °C 程度でも実現可能なことを示している。その結果、キャリア密度は 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> を達成した。

第5章では、第4章で確立したパルスインジェクション手法を用いて、AlN/GaN-MQW 構造を作製し、ISBT の観測を行った結果をまとめている。950 °C で作製した資料では、1000 °C 以下の成長ではじめて ISBT 吸収を観測することができ、また、吸収波長は MQW の井戸幅を小さくすることによって 1.9 μm 程度までブルーシフトすることを確認した。しかし、井戸幅が 1.1 nm 程度であっても、ISBT 吸収は 1.9 μm 程度までしかブルーシフトせず、同じ構造を MBE で作製した場合と比較してかなり長波長側に偏っていることが問題と考えられた。このため、成長温度を 710 °C まで下げ、MQW 構造の変化を X 線回折により観測したところ、770 °C まで低下させると界面急峻性がもっとも良いと判断された。そこで、770 °C にて井戸幅を変化させて MQW 構造を形成し、ISBT 吸収を観測したところ、井戸幅 1.0 nm にて 1.55 μm に強い ISBT 吸収を観測することに初めて成功した。

第6章では、バッファ層として AlN を用いた場合について、ISBT 吸収波長のさらなる短波長化が実現できるか検討した結果についてまとめている。井戸層幅、バリア層幅の最適化により、最短で 1.49 μm の ISBT 吸収を達成している。

第7章は総括であり、今後の展望などをまとめている。

以上、本論文は、MOVPE 法による AlN/GaN 多重量子井戸構造の作製とその最適化を通じて通信波長帯である 1.55 μm での強い ISBT 吸収を実現し、超高速光スイッチへの応用展開の端緒を開くものであり、マテリアル工学の発展に大いに寄与するものである。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。