

審査の結果の要旨

論文提出者 飯塚 紀夫

本論文は、"窒化物半導体サブバンド間遷移とその光スイッチへの応用に関する研究"と題し、GaN/Al(Ga)N多重量子井戸(MQW)中のサブバンド間遷移(ISBT)について、結晶成長、光吸収特性および超高速緩和特性の観測・評価、およびそれを利用した導波路型全光スイッチの作製に関して論じたものであり、7章より構成されている。

第1章は序論であって、研究の背景、動機、目的と、論文の構成が述べられている。

第2章は"GaN/Al(Ga)N多重量子井戸の構造と結晶性"と題し、本論文で対象とする窒化物MQW構造の作製と結晶性評価結果について述べている。光通信波長帯でのISBTを実現するには、井戸層と障壁層の伝導帯オフセットが十分な大きさを持つ必要があるが、これを実現するために障壁層のAl組成を上げると井戸と障壁の結晶の格子定数差が大きくなり、高品質のエピタキシャル成長が困難になる。そこで、この章では層構造や結晶成長方法と結晶性の関係について考察している。まず、GaNと高Al組成AlGaInとの量子井戸構造について、X線回折やフォトルミネッセンス(PL)測定、断面透過型電子顕微鏡(TEM)観察によって、評価を行った。その結果、結晶性やPL特性は井戸層や障壁層の厚さに依存することを明らかにしている。また、多層の量子井戸構造を作製する場合に、連続的に多層化するよりも、GaN中間層を適当な間隔で挿入する方が良い結晶性が得られることを見出している。

第3章は"GaN量子井戸中のサブバンド間遷移による光吸収の観測"と題し、窒化物半導体に存在する強い自発分極や歪みに起因するピエゾ分極が、ISBTスペクトルに与える影響について考察している。井戸層の厚さとISBT吸収波長の関係から、井戸内部には数MV/cmもの大きな電界が存在することを示した。また、上記GaN中間層構造によりISBTスペクトル幅が狭くなり吸収強度が増強されることを見出した。さらに、有機金属気相エピタキシー(MOVPE)により成長されたMQWについて光通信波長帯ISBTが実現できない原因の一つが、ヘテロ界面での原子の相互拡散にあるのではないかと推論している。

第4章は"サブバンド間緩和時間および吸収飽和強度の評価"と題し、ISBTの緩和時間および吸収飽和強度の測定結果について述べている。まず、波長4.5 μm にISBT吸収ピークを有する試料について、この材料系としては初めてポンプ・プローブ法で吸収回復時間の測定を行い、150 fsと理論予測の通りに、GaN系ISBTが高速応答特性を有することを実証している。さらに、この結果とスペクトル解析から吸収飽和強度の見積もりを行っている。光通信波長帯のISBT吸収についても、そのスペクトル形状から吸収飽和強度を計算し、これと吸収係数や緩和時間から三次の非線形性 $\chi^{(3)}$ 、および性能指数を見積もっている。

第5章は"GaNリッジ導波路の光導波特性"と題し、ISBTを利用した光スイッチ作製の前段階として、量子井戸を含まないGaNリッジ型導波路の光導波特性について論じている。ここでは、結晶中の刃状転位がTMモードの伝播光に対する偏波依存損失の原因になっていることを明らかにし、刃状転位密度が 10^9 cm^{-3} 程度のとき、ノンドープGaN導波路の偏波依存損失は1 dB/mm程度になることを示している。さらに、MOVPEで層の一部を成長し、その後の多重量子井戸層を含む層構造を分子線エピタキシー(MBE)で成長すればこの偏波依存損失は充分低減できることを実証した。

第6章は"光スイッチの作製と特性評価"と題し、ここまでの知見を元に、ISBT吸収層を有する全光スイッチ構造を実際に作製し、その特性評価を行った結果について述べている。まず吸収飽和特性を調べ、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 、パルス幅130 fsの光パルスに対して100 pJのパルスエネルギーで11.5 dBの飽和が得られたことが述べられている。次に、波長 $1.7 \mu\text{m}$ の制御光パルスで波長 $1.55 \mu\text{m}$ の信号光パルスを変調し、全光ゲートスイッチ動作を実証した。続いて、パルス間隔が1 psの4連光パルス列を作り、これによる全光デマルチプレクシング動作を示した。また、過剰な偏波依存損失を低減した光スイッチを作製し、スイッチング消光比10 dB以上を達成した。吸収回復過程と量子井戸構造の関係についても考察を行い、量子井戸の外部にトンネルで漏れたキャリアが再度井戸層に戻るというピコ秒オーダーの遅い緩和過程が存在する可能性を示唆した。

第7章は"まとめと今後の展望"と題し、本研究で得られた成果を総括するとともに、GaN量子井戸中サブバンド間遷移を応用した光スイッチの可能性と課題をまとめ、今後を展望している。

以上のように本論文は、III族窒化物多重量子井戸に基づいた光ファイバ通信波長帯におけるサブバンド間遷移(ISBT)に関し、結晶成長技術、およびISBTによる光吸収特性、超高速緩和特性、吸収飽和特性について研究するとともに、GaN導波路の作製と損失要因評価を行って、これらの知見を総合し実際に全光スイッチを作製してそのゲートスイッチ動作、全光デマルチプレクシング動作を実証したもので、電子工学分野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。