

## 論文の内容の要旨

論文題目 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  
氏名 飯塚紀夫

1980年代から本格的な実用化が進められた光ファイバー通信システムは WDM (波長分割多重) 技術により 95 年ごろから、急速に通信量の大容量化が進められた。2001 年には 40Gbps/ch の伝送容量で合計 10Tbps もの伝送が研究レベルで実現され、実用システムにおいては 10Gbps/ch で 160 チャンネルクラスのものも供されている。このように、これまでは 1 チャンネルあたりの高速化およびチャンネルの多重化によって伝送容量の増大が図られてきた。今後、更なる伝送容量の増大を図るために波長多重度を向上させることは技術的には期待できる。しかしこの場合、各ノードにおいては、波長制御・モニター等の部品点数が飛躍的に増大することになり、コスト的に行き詰まる可能性が否定できない。

これに対して OTDM (光時分割多重)、すなわち、光学的に信号を時分割多重することで一波長あたりの伝送容量を 100 Gbps 以上とし、これに波長多重技術を加えて、総伝送容量の増大を図るというアプローチがある。一波長あたりの伝送容量を増大するために信号パルスの時間幅が短くなり、波長スペクトルは広がる。したがって、これを波長多重するのに必要なファイバーの帯域は、DWDM の場合とかわらない。しかしながら波長数が少ないので、波長制御等に関する部品の数は少なく済む。課題は、100 Gbps 以上もの伝送量処理する素子を如何に実現するかである。現状の光システムで行われているような、光信号を一旦電気信号に置き換えて処理を行い、これをふたたび光信号に変換して送信する、いわゆる OEO 変換では処理速度に制限があり、光信号をそのまま処理する、全光スイッチング素子が必要となってくる。

本研究は、パターン効果なしに高繰り返しパルス列に対応可能で、かつコンパクトで集積化可能な超高速全光スイッチの実現を目指し、その動作原理として GaN などの窒化物半導体量子井戸中のサ

バンド間遷移 (ISBT) を選択した。GaN を ISBT スイッチに適用することは 1997 年に提案された。しかし、当時は窒化物半導体材料の作製技術自体がそれほど成熟しておらず、ましてや、GaN と AlN あるいは高 Al 組成の AlGaIn との量子井戸構造に関する研究は皆無であった。もちろん、波長や応用を問わず、GaN 系材料での ISBT の実験的報告もなかった。このような状況で、本研究においてはじめて GaN/AlGaIn 量子井戸構造の結晶品質や光学特性の評価への取り組みがなされた。

本研究の最大の目的は GaN 量子井戸中の ISBT を応用した超高速光スイッチを実現することであるが、この過程で、GaN/AlGaIn 量子井戸の結晶成長技術の開発、量子井戸の結晶性や光学特性の評価、ISBT を通じた物性評価などを行うことをも目的としている。

まず、GaN と高 Al 組成 AlGaIn との量子井戸構造について、エクス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、検討をおこなった。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た。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 中間層を適切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た。

量子井戸構造と ISBT スペクトルの関係を調べる実験も行った。この結果が、井戸内に分極に起因する数 MV/cm という強い電界が生じているとする理論計算につながった。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。また、MOCVD 成長の 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考察を行った。

ISBT の非線形性に関する実験も行った。まず、波長 4.5  $\mu\text{m}$  に ISBT 吸収ピークを有する試料についてこの材料としては始めてポンプ・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た。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も行った。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 (figure of merit) を見積もった。

ISBT 光スイッチを作製するためには GaN 導波路の光伝播特性についての知見が必要である。MOCVD 成長の GaN 導波路についてはカンザス大学による先行研究があったが、光通信波長帯 ISBT を実現できる MBE 成長の GaN についての報告例はなかった。本研究において、MBE 成長導波路の場合には、刃状転位に起因する TM モードに対する強い吸収が存在することを見出した。さらに、MOCVD で層の一部を成長しその後を 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。

以上の知見を元に光スイッチ構造を試作し、波長 1.7  $\mu\text{m}$  の制御光パルスで波長 1.55  $\mu\text{m}$  の信号光パルスの変調に成功した。さらに、パルス間隔が 1 ps 間隔の 4 連信号光パルス列を作り、これに対する DEMUX 動作を実質的に実証した。さらに、過剰な偏波依存損失を低減したスイッチを作製し、スイッチング消光比 10 dB 以上を達成した。

本論文は、GaN/Al(Ga)N 多重量子井戸 (MQW) 中の ISBT とその光スイッチへの応用に関するものであり、7 章からなる。

まず第二章では、MQW 構造の作製について述べる。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。しかし、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 (MOCVD 法および MBE 法) と結晶性の関係について考察する。

また、窒化物半導体には強い自発分極や歪みに起因する piezo 分極が存在することが知られているが、これらが ISBT スペクトルに与える影響について第三章で考察する。そして井戸層の厚さと 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す。さらに、結晶性と ISBT スペクトルの関係についても議論する。

第四章において、ISBT の緩和時間および吸収飽和強度の測定結果について報告し、考察を行う。測定は as grown の試料について行い、GaN 量子井戸中の ISBT の吸収回復時間が 100 fs のオーダーであることを実証する。また、三次非線形性の大きさや性能指数 (figure of merit) を実験値から見積もる。

第五章では、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報告する。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ることを明らかにする。また、刃状転位密度が  $10^9 \text{ cm}^{-3}$  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 程度であることを導く。

ここまでの知見を元に、ISBT 吸収層を有する光スイッチ構造を作製し、その評価結果を第六章で報告する。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を報告する。次に、2 波長のポンプ・プローブ法で、ゲートスイッチ動作を実証する。また、ピコ～サブピコ秒間隔の 4 連信号光、あるいは 2 連制御光を用いて高繰り返し動作についての検証を行う。さらに、吸収回復過程と量子井戸構造の関係について考察を行い、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す。

第七章において、本研究によって明らかにされた 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、今後は展望する。