

論文の内容の要旨

論文題目 **INTERSUBBAND TRANSITIONS IN SB-BASED
QUANTUM WELLS FOR ALL-OPTIC SWITCHING**
(全光スイッチングのための Sb 系量子井戸における
サブバンド間遷移)

氏 名 アチャンタ ヴェニューゴパル

導入および本研究の動機

波長多重 (WDM) に基づく光通信ネットワークの容量は、究極的にはチャンネル数の限界(200~300 程度) で制限されると予測される。このため、データ通信量と需要の増大への現実的な対処法として、WDM と光時分割多重 (OTDM) の混合システムが現れた。かくして現在の OTDM 技術の関心は、200~300Gb/s 以上の実用的なネットワークの実現にある。信号多重分離、パルス整形、タイミング再生、再生増幅 (3R)、論理動作等の種々の重要な機能を果たす全光スイッチは、光通信ネットワークの実現に必須である。WDM において実証されている光学のおよび機械的な光スイッチング技術は応答速度が遅いため、超高速 OTDM には、高効率でサブピコ秒のスイッチ動作機構が必要となる。

これまで、半導体光増幅器 (SOA) に基づく様々な光スイッチング素子において、超高速応答が実証されているが、それらは真の全光デバイスではなく、キャリア緩和時間も最終的にはバンド間遷移の動特性に制限される。よって、OTDM 用の超高速かつ高効率な真の全光スイッチのため、種々の動作機構が研究されている。そのひとつは、量子井戸におけるサブバンド間遷移 (ISBT) の吸収飽和であり、強い制御光パルスにより ISBT 吸収が飽和し、弱い信号パルスが透過することを利用する。スイッチの主要なデバイス変数は応答時間と動作エネルギーである。応答時間は高次準位の励起電子の緩和時間として、動作エネルギーは吸収を飽和させる光パルスのエネルギーとして定義される。ISBT 緩和時間はサブピコ秒からピコ秒領域にあると期待されるが、動作エネルギーに関する有用な情報はあまり無い。ISBT 光スイッチを実現する際の課題は、1)

1.55 μm の ISBT の達成、2) サブピコ秒の応答時間の達成、3) 低エネルギー動作のための ISBT 量子井戸構造の最適化、である。

波長 1.55 μm の ISBT の達成のため、大きなバンド不連続量が期待されるいくつかの材料系が提案され、InGaAs/AlAsSb、InGaAs/AlAs、窒化物および II-VI 族化合物の量子井戸において 2 μm 以下の ISBT が報告されている。中でも InGaAs/AlAsSb 系は、InP 基板に格子整合し、バンド不連続量も 1.6eV と大きく 1.55 μm の ISBT に十分であり、エネルギー緩和時間は単一量子井戸 (SQW) で 2~3 ピコ秒となり、超高速 OTDM のためのスイッチング素子を実現するのに、最も有望な材料系のひとつである。

次は、ISBT 波長、キャリア緩和時間および吸収飽和エネルギーの評価である。ISBT 波長は、フーリエ変換赤外分光 (FTIR) により測定した吸収スペクトルから求める。キャリア緩和時間も、時間分解ポンプ・プローブ法により ISBT を励起した後のバンド間の吸収変化の減衰時間から見積られる。しかし、 I_s の測定に関する報告例は僅かしかない。吸収飽和の直接測定は、光通信波長の高出力 CW レーザが無いため複雑になる。 I_s の理論計算も、ISBT の動特性を支配する多体相互作用の完全な知識が無く、利用できる計算技術にも限界があるため困難である。よって、ISBT 材料の I_s の評価手法の開発が、最初の重要なステップとなる。かくして、この学位論文の最初の部分は、 I_s の評価手法の開発に焦点を当てた。

InGaAs/AlAsSb 量子井戸は有望な特質を持つが、実測された ISBT 吸収スペクトルは不均一性で広がり、波長はバンド不連続量と井戸幅からの予測値よりずっと長波長である。その上、波長 2 μm 以下の SQW で測定されたキャリア緩和時間は約 2psec である。これらの問題を克服し、サブピコ秒の緩和時間を有する 1.55 μm の ISBT を達成するため、結合 2 重量子井戸構造 (CDQW) が提案された。InP 基板に格子整合する CDQW において、波長 1.55 μm でサブピコ秒 (約 680fsec) の応答時間が報告され、最初の 1Tb/s 全光信号分離、パルス整形およびタイミング再生 (2R) 動作も報告されている。しかし、動作エネルギーは約 27pJ と高く、実用化には低減する必要がある。この新しい量子井戸材料の不均一性の起源の理解は、ISBT を短波長化し、非線形性を最適化するためにも必須である。したがって、この論文の第 2 部では I_s の低減のための原理と方法に関する問題を論ずる。

もうひとつの興味ある問題は、サブピコ秒の応答時間と大きな非線形性を有する、実用可能な 1.55 μm の ISBT を実現するための CQW 構造の設計指針である。さらには、CQW 構造における位相緩和時間等の材料パラメータを見積ることも、 I_s の実験および理論値の妥当性の確認に必要である。位相緩和時間の間接的な評価はいくつか報告があるが、室温で ISBT について直接測定したものは無い。この論文の第 3 部では、これらの問題を検討した。

要約するに、この学位論文は、ISBT 光スイッチの動作エネルギー (I_s) に関する問題に取り組み、 I_s を見積り、その低減法を見出し、観測された I_s の妥当性について様々な因子への依存性を調べて検討し、光通信波長で超高速かつ高効率な ISBT を示す量子井戸構造の設計に至るまでの、研究内容を報告するものである。これらの結果は、不均一性の低減された材料の実現と確立に貢献し、光

通信波長域での報告例の中で最も低い I_S の観測に繋がった。以下では、この論文の各部分を手短かに説明する。

第1部 I_S の評価手法

この研究の第1部は ISBT 材料の I_S 評価のために開発された手法を論じる。3つの技術を I_S 評価に用いた。第1の方法は2準位系の利得飽和と同様のモデルに基づく解析方法であり、平衡状態で均一広がりを持つ系に有効である。 I_S 評価に必須である様々な変数（キャリア緩和時間以外）を CW 光の吸収スペクトルから見積る。この手法では定常状態での I_S が得られる。第2のモデルはパルス励起による吸収飽和の測定データの曲線回帰に基づく。これら2つの方法は作製した試料の I_S 評価に用いられるが、第3の方法は既知の材料パラメータから I_S を見積るために開発した。この方法は、密度行列計算に基づいて、既知のスポット径のガウス型パルス形状、双極子モーメント、位相緩和時間、キャリア緩和時間等を考慮して、パルス励起の実験をシミュレートするものである。このモデルは既知の材料パラメータと測定した I_S から位相緩和時間を見積もる際にも適用できる。また、既知の T_2 から I_S を見積って、 I_S が最適か否かを調べることも出来る。このモデルにより、 I_S のパルス幅依存を調べ、測定結果から正しい I_S を求める方法を得た。これら3つの手法を用いて、CW およびパルス励起における I_S を評価し、その値がその構造での最適値か否かを検証することができる。

第2部 ISBT 材料における I_S の低減の検討

この論文の第2部において、 I_S を低減する量子井戸構造について検討した。量子井戸の不均一性の起源は重要な検討課題であり、格子整合系の試料の ISBT 波長が予想より長いのはなぜかを理解するのに重要となろう。 I_S の様々な因子への依存性も検討した。InP 基板に格子整合する SQW 構造で、波長 $1.72\mu\text{m}$ において最も低い I_S ($90\text{fJ}/\mu\text{m}^2$) も報告した。これらの結果から、 $(\chi^{(3)}/\alpha\tau) \propto I_S^{-1}$ ($\chi^{(3)}$: 3次の非線形感受率、 α : 線形吸収係数、 τ : キャリア緩和時間) が I_S のよい指標であることが立証された。また、基板の TPA を測定して、SQW 試料の $1.72\mu\text{m}$ での TPA はほとんど基板のものである確証を得た。InGaAs/AlAsSb 量子井戸の不均一性は、主に Sb の井戸層への拡散と、III 族と V 族の原子の相互拡散による界面の荒れに因ると考えられるが、井戸と障壁の界面での拡散防止 AlAs 層の効用を検討し、格子整合系の量子井戸で最短波長 ($1.35\mu\text{m}$) の ISBT を報告した。これは、量子井戸面内での部分的な拡散の抑制により、バンド不連続量が部分的に回復するためと考えられる。また、全ての試料の吸収ピーク波長の測定値を統一的に説明するバンド構造を提案した。これらの研究から、相互拡散の十分な抑制には、両界面に3原子層以上の AlAs 層が必要と予測された。短波長 ISBT スペクトルのドーピング濃度依存も調べた。さらに、AlAs 中間層と高 In 組成井戸層を有する SQW 構造による I_S の低減の起源を明確にするため、検討を行った。AlAs 層の無い試料の種々の材料パラメータを比較検討し、測定された I_S の改善が材料パラメータと物理的に整合するか否かを検証した。これらの検討から改善の要因は、井戸層のキャリア密度の増大、長い位相緩和時間および、約 1/3 に減

少し不均一線幅であることが示された。これにより、AlAs 層の無い試料に比べて I_S は約 1/40 に減少することが導かれた。これらの結果は、新しい InGaAs/AlAs/AlAsSb 量子井戸が、実用デバイスに必要な超低エネルギー I_S の達成に理想的であることを立証している。さらに、位相緩和時間のドーピング濃度依存について、クーロン遮蔽とイオン化不純物散乱を含む、電子-電子、電子-フォノン散乱による散乱レートの計算により検討し、より長い位相緩和時間と大きな非線形感受率 $\chi^{(3)}$ を得るために高濃度ドーブが有利になり得ることが示された。

第3部 結合量子井戸構造

この論文の最後は、結合量子井戸について検討した。CDQW 構造がサブピコ秒の緩和時間を持つ 1.55 μm 帯の ISBT に有利であることは、既に提案され、実証されている。ここでは、双極子モーメントとキャリア緩和時間を高効率なスイッチのために最適化した構造を提示する。SQW 構造に適した2準位系用に開発した密度行列モデルを、CDQW 構造に対する4準位系に拡張する。このモデルにより、CDQW 構造で観測された低い I_S (約 34fJ/ μm^2) が物理的に妥当であり、キャリア緩和時間は約 0.6psec、位相緩和時間は約 250fsec であることが導かれた。実際、ポンプ・プローブ法で測定されたキャリア緩和時間は約 0.7psec であった。位相緩和時間のドーピング濃度依存を調べるため、濃度の異なる複数の CDQW 構造について、室温での4光波混合実験を行った。これらの結果から、高濃度ドーブの試料は低濃度のものに比べて、確かに位相緩和時間が長くなり得ることが示された。測定された位相緩和時間は約 300 \pm 50fsec であり、既に報告されている見積り値や、ドーピング濃度 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ の試料に対する密度行列計算で用いた値とも良く一致している。

本学位論文の概要

第1章は導入として、超高速全光スイッチの必要性を他の技術と対比して述べる。ここで ISBT 吸収飽和機構の利点と、この研究以前の状況についても論ずる。この論文の残りの部分は3つに分かれる。第1部では、 I_S 評価のために開発した手法を論ずる。第2章では I_S 評価の解析的方法、第3章で吸収飽和の直接測定、第4章で SQW 構造に適した2準位系の密度行列モデルについて述べる。第2部は I_S の低減について検討する。第5章では I_S を支配する他のパラメータを列挙し、 I_S の低減の可能性を議論する。第6章では格子整合系の SQW 構造での 1.72 μm における低い I_S の結果を示す。第7章では井戸と障壁の界面の薄い AlAs 中間層の効用と、格子整合系 SQW で最短の ISBT 波長について論ずる。第8章は、より厚い AlAs 中間層と高 In 組成井戸層を有する試料による I_S の低減を理解するための検討に当てる。初めの2つの部分は SQW 構造を扱うが、第3部では CQW 構造を提示する。第9章では、結合量子井戸の設計指針の詳細を示し、第10章では I_S の理論検討と直接測定および、室温での CQW 構造の位相緩和時間の測定について述べる。最後に、第11章でデバイス応用の観点から、この論文で得られた結果の意義を手短に述べ、全体を要約する。