

審査の結果の要旨

論文提出者 Achanta Venu Gopal

本論文は、"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)"と題し、アンチモン系の量子井戸を対象に、超高速サブバンド間遷移(ISBT)全光スイッチの動作エネルギー低減に関する問題に取り組み、飽和強度測定評価法の開発、光通信波長域で超高速かつ高効率なISBTを示す新たな量子井戸構造の提案、解析設計、試作評価について英文で纏めたもので、3部11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。時分割多重(OTDM)/分離、パルス整形、再生増幅、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、次世代光ネットワークに必須である。OTDM用の超高速かつ高効率な全光スイッチに向けて種々の動作機構が研究されている中で、量子井戸サブバンド間遷移(intersubband transition; ISBT)における吸収飽和は有望なもののひとつである。スイッチの主要な性能指数は応答時間と動作エネルギーであるが、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ものの、動作エネルギーに関しては従来あまり知られていなかった。ISBT全光スイッチを実現する際の課題は、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯におけるISBTの達成、サブピコ秒の応答時間の達成、低エネルギー動作のためのISBT量子井戸構造の最適化、と言える。本論文は、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ のISBTが可能なInP基板上のInGaAs/AlAsSb系量子井戸に焦点を絞り、低エネルギー動作とサブピコ秒応答の実現に向けた研究を行ったものである。第一部(2,3,4章)では、飽和強度の評価ツールについて、第二部(5,6,7,8章)では飽和強度の低減手法について、第三部(9,10章)では高効率なISBTを示す結合量子井戸について、それぞれ論じている。

第2章は"Analytical method to estimate saturation intensity"と題し、飽和強度の解析的評価方法を論じている。本論文では主に3つの技術を飽和強度評価に用いるが、本章ではその第1の方法、即ち2準位系の利得飽和と同様のモデルに基づく解析方法について述べている。これは、平衡状態で均一広がりを持つ系に有効である。

第3章は"Direct saturation measurement"と題し、吸収飽和の直接測定について論じている。ここでは、吸収飽和評価に必須であるキャリア緩和時間以外の様々な材料パラメータを、連続光の吸収スペクトルから見積っている。この手法により定常状態での飽和強度が得られる。さらに、本論文における飽和強度評価の第2のツール、即ちパルス光励起下の吸収飽和測定データの曲線回帰手法について記述している。

第4章は"Density matrix model to estimate saturation intensity"と題し、単一量子井戸構造に適した2準位系の密度行列モデルについて述べている。前述の2つの評価ツールは、作製した試料の飽和強度評価に用いられるが、第3のツールは、既知の材料パラメータから飽和強度を見積るために開発されたものである。この方法は、既知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、密度行列計算に基づきパルス光励起の実験結果を模擬計算するものである。このモデルは、既知の材料パラメータと測定した飽和強度から位相緩和時間を見積もる際にも利用できる。また既知の位相緩和時間から飽和強度を見積り、飽和強度の妥当性を調べることもできる。このモデルに基づいて、飽和強度のパルス幅依存性測定結果から飽和強度を正確に定める手法を確立している。

第5章は"Factors governing saturation intensity"と題し、飽和強度を支配する他のパラメータを列挙して、飽和強度低減の可能性を議論している。また、格子整合系試料のISBT波長が予想より長いのはなぜかを理解するために重要な、量子井戸不均一性の起源についても論じている。

第6章は"Low saturation intensity at $1.72\ \mu\text{m}$ "と題し、InP基板の格子整合系単一量子井戸構造で、波長 $1.72\ \mu\text{m}$ において非常に低い飽和強度($90\text{fJ}/\text{m}^2$)を観測したことについて述べられている。様々な因子の飽和強度への影響も検討している。また基板の二光子吸収を測定し、単一量子井戸試料に見られた $1.72\ \mu\text{m}$ での二光子吸収は、ほとんど基板のそれであることを示した。

第7章は"Advantages of AlAs stopping layer"と題し、井戸と障壁の界面の薄いAlAs中間層の効用と、格子整

合系単一量子井戸構造で最短のISBT波長を得たことについて論じている。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族原子の相互拡散による界面の乱れによると考えられる。これに対し、井戸／障壁界面に拡散防止用AlAs層を挿入することを提案し、格子整合系の量子井戸で最短波長となる $1.35\ \mu\text{m}$ のISBTを得ることに成功した。また、全ての試料の吸収ピーク波長の測定値を統一的に理解するバンド構造を導出し、これらの議論から、相互拡散の抑制には両界面に3原子層以上のAlAs層を挿入すればよいことを明らかにした。

第8章は”Understanding the origin of low saturation intensity”と題し、より厚いAlAs中間層と高In組成井戸層を有する試料において飽和強度の更なる低減が観測されたことと、その起源について論じている。AlAs層の無い試料の種々の材料パラメータを比較検討し、測定された飽和強度の改善と材料パラメータとの相関を調べた。その結果、改善の要因は、井戸層のキャリア密度の増大、位相緩和時間の増大、および不均一線幅の減少にあることが示され、AlAs層の無い試料に比べて飽和強度は約1/40に低減するという結論が導かれた。これより、新しいInGaAs/AlAs/AlAsSb量子井戸が、実用化に必須の小さな飽和強度達成に理想的であることが示された。さらに、位相緩和時間のドーピング濃度依存性を、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-フォノン散乱のレート計算により検討し、より長い位相緩和時間と大きな非線形感受率を得るためには、高濃度ドーピングが有利であることを明らかにしている。

第9章は”Design criteria for coupled quantum wells”と題し、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯のISBTに有利なサブピコ秒の緩和時間を有する結合二重量子井戸の設計の詳細を述べ、高効率なスイッチのために、双極子モーメントとキャリア緩和時間を最適化した構造を提示している。

第10章は”Density matrix model for coupled quantum wells”と題し、結合二重量子井戸構造における飽和強度の理論検討と直接測定、および室温での位相緩和時間の測定について述べている。単一量子井戸構造に適した2準位系密度行列モデルを、結合二重量子井戸構造に対する4準位系モデルに拡張している。このモデルにより、結合二重量子井戸構造で観測された低い飽和強度（約 $34\text{fJ}/\text{m}^2$ ）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・プローブ法で測定したキャリア緩和時間は約 0.7psec であった。さらに、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結合二重量子井戸構造について室温での4光波混合実験を行い、高濃度ドーピングの試料は低濃度のものに比べて位相緩和時間が長くなることを実証している。測定された位相緩和時間は約 300fs で、既に報告されている値や密度行列計算で得られた値とも良く一致した。

第11章は結論であって、本研究で得られた成果を総括している。

以上のように本論文は、超高速サブバンド間遷移全光スイッチの動作エネルギー低減に向けて、特にInP基板上のアンチモン系量子井戸を対象に、飽和強度測定評価技術の開発、光通信波長で超高速かつ高効率なサブバンド間遷移を示すAlAs中間層挿入単一量子井戸構造の提案と試作実証、および結合二重量子井戸構造の設計と解析評価を行って、高均一なサブバンド間遷移量子井戸の実現に寄与すると共に光通信波長域でこれまでで最も低い飽和光強度を得たもので、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。