

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 大平 圭介

本研究の目的は、組成、成長条件等を制御することにより、バンドアライメントがタイプIからタイプIIをもつ半導体量子ドットを作りわけ、特にタイプIIの量子ドットについて、その詳細な光学特性を探索することである。論文は5つの章から成り立っている。

第一章は序論として、本研究の背景と目的を述べる。半導体における閉じ込め構造の利点について述べるとともに、可視領域の発光をもち基礎光学特性の探求に有利なAlInAs/AlGaAs量子ドットでのタイプIIバンドアライメントの実現とその光学特性の詳細な研究が非常に有意義であることについて述べる。また、半導体量子ドットの成長様式や光学特性についての基礎知識についてまとめる。特に、 Γ -X混合や、磁場中での発光特性について詳細に記述してある。

第二章では実験手法について述べている。まず、結晶成長法として用いている分子線エピタキシー法に関して、装置の概要と実際の結晶成長の手順について述べる。次に、構造評価と熱処理について簡単に触れた後、光学測定に用いたフォトルミネッセンス、時間分解フォトルミネッセンス、磁場、圧力中でのフォトルミネッセンスの測定系について、詳細に説明している。

第三章は、主に磁場中での光学特性について述べている。まず、用いた試料の構造とその基礎光学特性についてまとめてある。 $\text{Al}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ と $\text{Al}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ の二種類を用いており、発光強度の励起強度依存、アニールによる発光特性の変化、時間分解フォトルミネッセンス測定から、Al組成0.6の試料の方がタイプIIドットを多く含んでいることが明らかにされている。

次に、磁場中でのフォトルミネッセンス測定について述べている。測定は、最高で約40 Tという強磁場中で、ファラデー配置($B\parallel Z$)、フォークト配置($B\perp Z$)で行っている。Al組成0.6の試料については、ファラデー配置では、比較的弱い磁場領域から、弱いキャリアの閉じこめを示す線形なエネルギーシフトが見られることが明らかになった。また、理論式から励起子半径、励起子の有効質量、磁場と垂直方向のキャリアの閉じ込めエネルギーを求め、タイプIIドットの形成を示唆する結果が得られた。発光強度については、ファラデー配置では発光強度は単調に増大し、逆にフォークト配置では単調に減少することが明らかにされ、このことから、電子がドットの上下に局在していることが示された。Al組成0.4の試料については、ファラデー配置において26 T付近まで発光強度が増大し、さらなる磁場の増加により一転して減少するという特異な現象を観測した。そしてこの現象が、磁場によるタイプIからタイプIIへのバンドアライメントの変化に由来するものであることが、モデル計算から明らかにされている。

第四章は、組成、成長条件によるバンドアライメントおよび光学特性の変化と、ほぼタイプ II ドットのみで構成される試料についての光学特性について詳細に調べた結果をまとめてある。AlGaAs 層の組成依存性に関しては、ドット層の Al 組成は 0.45 で固定し、AlGaAs 層の組成のみを 0.3 から 0.8 まで系統的に変化させた試料を用い、Al 組成上昇に伴う PL スペクトルのエネルギーシフトが Al 組成 0.6 付近で飽和することから、バンドアライメントのタイプ I からタイプ II への変化が起こっていることを明らかにした。そして、それぞれの試料について時間分解 PL 測定を行い、AlGaAs 層の Al 組成の増大につれてタイプ II 遷移に起因する長い発光寿命成分の割合が増大していることから、実際にタイプ II へのバンドアライメントの変化が起こっていることが示されている。

タイプ II ドットのみで構成される試料の実現を目的に、ドット層の成長温度が 470°C、520°C、560°C の 3 種類の試料を作製し、その発光特性の変化について調べた結果、成長温度 560°C の試料で、タイプ I 遷移に起因する短い発光寿命成分をほとんど含まない PL 減衰曲線が得られ、ほぼタイプ II ドットのみで構成される試料が GaAs(001)基板上に作製できることが明らかになった。そして、約 30ns という、間接遷移としては比較的短い発光寿命を観測したが、ここには Γ -X 混合の効果が大きく寄与していることを、発光寿命の温度依存性などから明らかにした。また、PL スペクトルの一軸性応力依存性から、AlGaAs 層の X_{xy} 点の電子が発光に寄与していることが明らかになった。

第五章では、以上の研究の結論として、AlInAs/AlGaAs 量子ドットのタイプ I からタイプ II へのバンドアライメントの制御およびその光学特性に関して、本研究で明らかになった点について要約されている。

以上を要するに、本研究は、AlInAs/AlGaAs 量子ドットのバンドアライメントの制御に関する具体的な手法と、タイプ II ドットの詳細な光学特性について、多くの新しい知見を見出したものであり、物性工学の進展に寄与するところが大きい。

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。