

## 論文の内容の要旨

論文題目 自己形成量子ドットの超低密度化と異方的シュタルク効果の研究

氏名 大森 雅登

次世代の半導体素子の構成要素として、10 ナノメートル (nm) 程の寸法の微粒子状物質、量子ドット、が注目されている。このドットに電子や正孔を閉じ込めると、キャリアの位置が固定され、自由運動が禁止されてエネルギー準位が離散的になるとともに、キャリア間の相互作用が強まる。こうした特徴を素子に応用する試みが進んでおり、既にメモリーや単一トランジスタなどの電子素子、レーザや単一光子発生器や光検出器などの光素子、量子ビットなどの量子情報素子など、幅広い検討が進んでいる。本論文は、「自己形成量子ドットの超低密度化と異方的シュタルク効果の研究」と題し、GaAs 面上に InAs を堆積することで 10nm 級のドット群が自己形成される過程を調べ、成長条件を工夫することでドット密度を著しく下げられることを示すとともに、個々のドットの光学特性に注目し、この蛍光特性のドット間距離に対する依存性や、垂直・水平電界の印加に伴う蛍光スペクトルの変化（シュタルク効果）を実験的に究明した研究を記しており、6章からなる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を記している。

第2章「InAs 量子ドットの超低密度化とその制御」では、従来にない超低密度 InAs 量子ドットの作製方法とその形成メカニズムについて述べている。単一ドットの物性計測や素子応用には、ドット密度が低いことが望ましいが、これまで1平方センチ当たり10の8乗以下の密度を成長条件のみで達成した報告はなかった。本研究では一般的に知られているドット形成の臨界膜厚（1.7から1.8分子層）以下でも堆積後のアニールで形成できると考え、適当な条件の下で10の4乗以下まで制御でき、ドット間隔を100ミクロン以上まで広げられることを見出した。また、この形成法では、GaAs 面上に自然形成するマウンドの頂上部またはその近傍の斜面にドットが選択的に形成されることを発見した。このドットの形成過程を考察し、マウンドの頂上部付近にできる原子ステップが InAs の拡散に及ぼす障壁としての効果（Schwoebel 効果）や、小さなマウンド領域に堆積する InAs の総量の統計的な揺らぎなどが関与している可能性を指摘している。

第3章「超低密度量子ドットの光学特性」では、超低密度 InAs 量子ドットの光学特性を巨視蛍光法と顕微蛍光法によって測定した結果についてまとめている。従来の単一ドット分光には顕微蛍光法が用いられ、励起レーザを対物レンズにより1ミクロン程度に絞って少量のドットを励起するという方法が主であるが、超低密度ドットでは100ミクロン程度の励起スポットでも容易に単一ドット分光が可能であることを示している。また、InAs 濡れ層の蛍光測定と時間分解測定を行い、ドットのキャリア捕獲領域を見積もると共に、単一量子ドット分光による蛍光の温度依存性から、単純なモデルを立てて解析し荷電励起子の熱活性エネルギーを見積もった。

第4章「量子ドットのシュタルク効果とその異方性」では、単一 InAs 量子ドットに成長方向とそれに垂直な方向に同時に電界を印加できるような試料を作製し、そのシュタルク効果を測定した結果について述べる。これまで InAs 量子ドットのシュタルク効果を研究した報告は多数あ

るが、どの研究も電界の印加方向は 1 方向のみで、しかも成長方向がほとんどである。自己形成量子ドットは形状に異方性を持つため、1 方向のみに印加しただけではその物性を知ることは難しい。本章では量子ドットに 2 方向から電界を印加できる逆メサ構造を用いてシュタルク効果の測定を行い、その結果から電界印加方向に対する分極率の異方性について議論した。

第 5 章「量子ドット内の電子と正孔の空間分布」では、第 4 章で述べたシュタルク効果のさらに詳しい計測結果とその理論的な考察について記している。特に、成長方向電界と面内方向電界を同時に印加した時のシュタルク効果の実験結果から、ドット内ダイポールの方向と大きさを推定し、考察した結果を述べている。

第 6 章「結論」では本研究で得られた知見をまとめる。

以上述べたように、本論文では、先端素子材料として重要な 10nm 級の InAs 量子ドットの自己形成過程を検討し、ドットの面密度を著しく低い値まで広範に制御することを示すと共に、単一または複数ドットの光学特性をドットの密度や縦横から印加する電界の関数として系統的に調べることにより、InAs 濡れ層からドットへのキャリアの流入過程やドット内の電子と正孔の広がりや分極に関する新知見を得ており、電子工学に寄与するところが少なくない。