

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 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、これに一工夫を加え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章よりなる。

第1章は「序論」であり、本研究の背景と目的を記している。

第2章は、「InAs 量子ドットの超低密度化とその成長メカニズム」に関する研究を記している。GaAs 基板の上に格子定数の異なる InAs を堆積する時、堆積量が臨界値（約 1.7–1.8 分子層）を越すと、歪みエネルギーを緩和するためにドット状結晶が自己形成し、その密度は1平方センチ当たり10の10乗から11乗ほどの値になる。単一ドットの物性計測や素子応用には、このドット密度を桁違いに下げることが望ましい。その手段として、臨界厚以下の InAs を堆積し、続いてアニールする手法があるが、本研究ではこの手法の可能性や制御性を系統的に調べ、ドットの面密度を10の4乗以下まで制御でき、ドット間隔を100 μm 以上まで上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（小さな丘）の頂上部またはその近傍の斜面上に、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（シュウオーベル壁）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章は「超低密度量子ドットの光学特性」と題し、第2章の手法を駆使して、ドットの密度の異なる試料群を作成し、その光学特性を系統的に調べた研究について述べている。特に、励起レーザビームの直径が100 μm 程に大きなマクロな光学系を用いた計測でも、ドット密度を下げるにつれて、単一ドットまたは数個のドットからの蛍光信号が得られることを示すとともに、ドットの周辺にある InAs 濡れ層からの蛍光が相対的

に強まることを示した。濡れ層からの蛍光とドットからの蛍光の相対強度がドット密度にどのように依存するかを定量的に調べ、光キャリアの濡れ層内部での面内拡散とドットへの流入過程に関して新知見を得ている。また、単一ドットからの蛍光スペクトルを詳細に調べ、荷電した励起子が重要な役割を果たすことを示し、その起源を論じている。

第4章は「単一量子ドットのシュタルク効果とその異方性」と題し、第2章の方法で作られたドットに対し、垂直方向と水平方向の電圧 (V_T , V_S) を印加した時のドットの光学特性の変化 (シュタルク効果) を調べた研究を記している。特に、ドットを含むウェーファを逆メサ型に加工し、ドットの上下および左右に2組のショットキー電極対を設けたユニークな素子構造を作り、ドットからの蛍光スペクトルを (V_T , V_S) の関数として系統的に調べている。これらの測定結果を解析して、ドットの位置、ドット内の電子と正孔の空間的な広がりや相互のズレ (分極) などの物理量を推定するとともに、印加電圧 (V_T , V_S) とドットに印加される電界 (E_z, E_x) との関係を考察した結果を記している。

第5章は「量子ドット内の電子と正孔の空間分布」と題し、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、垂直電界と水平電界を同時に印加した時の蛍光スペクトルの変化から、ドットに加わる実効的な電界の方向と大きさを推定するとともに、電子と正孔との空間分離に伴う分極の大きさを推定し、その起源に関する検討を行っている。

第6章では、本研究で得られた主要な知見をまとめ、結論を述べている。

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できることを示すとともに、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、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。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。