

審査の結果の要旨

氏名 近藤 直樹

10nm 級の厚みの半導体ナノ薄膜構造は、その内部に閉じ込められた電子が量子力学的な波動性など独特な性質や機能を備えているため、レーザやトランジスタなど先端素子の性能向上および新機能素子の実現に広く用いられている。この可能性をさらに広げるために、10nm 級の極微の半導体細線（量子細線）や箱構造（量子ドット）を形成し、内部に閉じ込められた電子や励起子（電子正孔対）の物性を解明し、素子応用を探索する研究が活発化している。本論文は、「半導体量子細線・リングの光物性」と題し、電子閉じ込めの状況を異にする 2 種の量子細線を対象に、その光学特性がドーピングや印加磁場の作用で、如何に変化するかを実験・理論の両面から解明するとともに、量子細線を円環状にした量子リング構造を対象に、電子状態に対する歪の効果や電気多重極的放射の可能性を理論的に明らかにする研究を記しており、6 章から成る。

第 1 章は、「序論」であり、本研究の背景、目的、構成について記している。

第 2 章は、「AlGaAs/GaAs 変調ドーブ T 型量子細線における 1 次元励起子の光学特性」に関わる。5 nm 程の GaAs 量子薄膜の端面に第二の量子薄膜を堆積すると、両者の交差部には電子正孔対が閉じ込められ、1 次元励起子が形成される。この T 型量子細線の障壁部にドナー不純物をドーピングすることで、細線内の電子密度を系統的に制御した一連の量子細線を作成し、励起子からの蛍光線が、電子の導入に伴って如何に変調されるかを、顕微分光の手法で調べた。その結果、電子密度を増すと、励起子からの蛍光の強度が、一旦増加した後に、急激に減少することを見出した。この現象を考察・解析し、細線内に流入した電子が斥力を発生させ、細線における電子の閉じ込め機能を弱めること（非局在化）が、蛍光強度減少の主原因であることを指摘している。これにより、T 字細線で、電子の導入で励起子発光過程が顕著に変調できることも示された。

第 3 章では、「V 溝 InGaAs/InP 量子細線における 1 次元励起子とその磁気光学ルミネッセンス特性」の研究を述べている。InP の V 字型溝構造に微量の InGaAs を堆積すると、その底部には 10nm 級の量子細線ができる。この細線は、電子と正孔を強く閉じ込め、電子の基底準位と励起準位との間隔は 50meV 以上にも及ぶ。この細線からの蛍光スペクトルを、磁場を加えながら系統的に計測したところ、励起準位からの蛍光強度のみが垂直磁場の下で著しく減ることを発見した。1 次元励起子の磁場中での振る舞いを理論解析したところ、観測事実は、ある種の電流・磁気効果によって生じており、1 次元励起子の振動子強

度は、励起準位のそれに限って強く減衰することによることが判明した。また、垂直磁場下における量子細線の蛍光スペクトルの測定・解析は、1次元励起子の量子状態を解明する上で極めて有用な知見を与えることも示された。

第4章は、「量子リング構造における Type II 量子状態」と題し、GaAs 基板上に自己形成手法で作られた GaSb 量子リングを対象に、リング内に閉じ込められた正孔とリング外に留まる電子の量子状態に関する理論的研究を述べている。特に、リング周辺の歪み場とピエゾ場を考慮しつつ量子状態を数値解析し、正孔の量子状態がリング全体に広がるか否かを検討した。歪みに伴うピエゾ場は特定方向に沿ってより強く作用するため、正孔の基底状態は軸対称性を失い、2回対称性を示す。内径 20nm 外径 60nm 程のリングでは、基底状態の正孔の存在確率には数十%の濃淡が生じること、リング外の電子はピエゾ場の作用で複雑に分布することが示された。また、歪みやリング寸法を調整すれば、ピエゾ電荷の効果が増減できるため、正孔の量子状態をも制御できることも指摘された。

第5章では、「量子リングの幾何効果の光輻射制御への利用：電気多極放射制御」に関する理論的研究を記している。リング内の多様な量子状態を活かすと、どんな電磁放射（光学遷移）が可能となるかを解明するために、電磁波源と電磁場を多極展開し、電気多極放射を理論的に解析した。遷移の始状態と終状態の方位量子数の差が n の場合、 n よりも小さな次数を持つ多極遷移は禁止されるが、可能な遷移全体を考慮すれば、双極遷移が他を圧倒して強いことを示した。さらに、多極遷移の寄与を相対的に増す試みとして、量子リングと量子ドットを同心円状に配置し、両者の間にバンド間の不連続量 E を付与できる複合ナノ構造を案出・解析した。この構造は、 E の設定によって発光波長をほぼ固定化できること、高次の多極放射の相対強度比もリング径の設定で制御できる特徴を持つことが示された。また、終状態をキャリアで充填すれば、特定の遷移を抑止できる可能性なども指摘された。多重極遷移で放出される光子は、種々の軌道角運動量をも持つ。従って、本構造は、今後は放射光子の軌道角運動量を制御する上で重要な役割を果たす可能性がある。

第6章では、本研究で得た主要知見を纏めるとともに、結論を述べている。

以上述べたように、本論文では、2種類の量子細線を対象に、1次元励起子の量子状態や蛍光特性が、電子の導入や磁場印加によって如何に変調されるかを実験理論の両面から解明するとともに、量子細線を環状にした量子リング構造を対象として、電子と正孔の量子状態に及ぼす歪の影響や電気多重極放射への応用可能性を理論的に明らかにしており、電子工学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。