【385】

氏　名（本籍）	山　内　掌　吾（熊 本 県） （やま　うち　しょう　ご）
学 位 の 種 類	博　　士（理　　学）
学 位 記 番 号	博　乙　第　2272　号
学位授与年月日	平成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科
学 位 論 文 題 目	**Investigation of Optical Properties in InAs/GaAs Coupled Quantum Dots** （InAs/GaAs 結合量子ドットの光物性研究）

主　査	筑波大学教授	理学博士	舛　本　泰　章
副　査	筑波大学教授	工学博士	浅　川　　潔
副　査	筑波大学助教授	理学博士	白　石　賢　二
副　査	筑波大学助教授	理学博士	服　部　利　明
副　査	筑波大学助教授	理学博士	野　村　晋太郎
副　査	産業技術総合研究所研究グループ長	工学博士	小　森　和　弘

論 文 の 内 容 の 要 旨

本論文は以下の内容から構成されている。

①結合量子ドット構造の試料作製技術から検討を行い，単一結合量子ドットが観測できる良好な結合量子ドット構造を作製・実現した。

結合量子ドット構造の作製には，成長方向に量子ドットを積層させた縦結合量子ドット構造を採用し，インジウムフラッシュ法を適用する事で狭バリア厚においても良好な結合量子ドット構造が得られる事を示した。

②作製された試料を用いて，非共鳴結合量子ドット集合体のキャリアトンネル過程を観測した。

マクロスコピックな測定によって非共鳴結合量子ドットを集合体として観測し，隣接ドットへの波動関数染み出しによる実効的量子閉じ込めの減少がおこり，ドット間距離に依存したキャリア移動が観測された。発光時間分解分光法を用いてトンネル過程によるドット間のキャリア移動時間が見積られ，発光再結合時間を上回る 1nsec 以上の長いキャリア移動時間が観測され，フォノン・ボトルネック効果が電子のトンネル移動を抑制している事が指摘された。

③単一結合量子ドットを，強結合量子ドット，中間結合量子ドット，弱結合量子ドットに分類し，各結合系におけるドット間相互作用の観測を行った。

ドット間距離に依存した単一結合量子ドット系の電子状態について議論され，単一結合ドットのフォトルミネッセンススペクトルより，電子の波動関数結合によって結合(X^+)／反結合(X^-) 準位が形成され，バリア厚“d”の変化によって量子力学的結合の強さが変化する様子が確認された。また，発光の励起スペクトル測定によって結合量子ドット系の励起状態を観測し，波動関数結合による X^+/X^- 準位間での共有励起準位系列と，正孔の励起状態に起因した個別の励起準位系列が存在する事が明らかにされた。これらの結果より，結合ドット（d＝3，5nm）を量子力学的結合系，結合ドット（d＝7nm）を電磁気学的結合系と分類出来る事を指摘した。

量子力学的強結合量子ドット系（d ＝3nm）においては結合(X^+)／反結合(X^-）準位を同時に励起する事によって，X^+/X^- の２つの励起子から成る exciton-molecule 状態（XX^{+-}）が形成される事が明らかにされた。また，この exciton-molecule 状態の形成に X^+/X^- キャリアが優先的に消費され，励起子分子よりも高い生成率を示す事を明らかにされた。

量子力学的結合の残る中間結合量子ドット系（d＝5nm）では結合(X^+)／反結合(X^-）準位の独立励起が実現された。X^+/X^- 準位の同時励起によって，X^+ 準位の低エネルギー側に新しい発光ピークが出現した。これは，exciton-molecule 状態である事を示し，２量子ドット間の量子力学的結合は２つの結合準位から成る exciton-molecule 状態を形成する事が明らかとされた。これら exciton-molecule 状態は結合量子ドット系における量子ゲートの可能性を示すものである。

電磁気学的弱結合量子ドット系（d＝7nm）では，２波長励起発光／発光励起スペクトル実験において，２つのドットへのキャリア同時生成によって発光強度の異常増大効果が観測された。これはドット間の双極子相互作用によってキャリアのエネルギー緩和が促進された為と考えられる。

時間相関光子計数法を用いて結合量子ドット（d＝7nm）のドット間相互作用がさらに調べられた。結合ドットを構成する２つの量子ドットは，単一量子ドットと同様に各々が単一光子を放出している事が確認された。この光子放出過程ではキャリア－フォノン相互作用が重要であり，残留する音響フォノンによってエネルギー緩和が促進される事を明らかにされた。２量子ドット間の光子相互相関スペクトルにはアンチバンチング構造が観られ，双極子間相互作用によるエネルギー緩和の促進に起因している可能性がある事が示唆された。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本研究は結晶成長・試料加工の最適化によって良好な結合量子ドットを作成し，強結合，中間結合，弱結合に分類される結合量子ドット系における電子状態とドット間相互作用を明らかにした。最も重要な知見としては，量子力学的結合が exciton-molecule 状態を引き起こす事を明らかにしたことである。

結合量子ドット系を自供結合，中間結合，弱結合に分類し，これを統一的に捉える視点を確立した点，結合励起子と反結合励起子が形成する exciton-molecule 状態を見い出したことは高く評価できる。

よって，著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。