

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 久津輪武史

### 序

本論文は6章と付録からなり、第1章では序論として量子ドットの分光学的研究とこれまでに得られている成果として単一量子ドットの遠赤外光単一光子検出について述べられている。第2章は実験装置の説明にあてられ、第3章では強磁場中の量子ドットにおけるサイクロtron励起状態の緩和過程が、励起状態の寿命の測定結果を元に考察している。第4章ではマイクロ波ノイズに関する対応と測定回路の改良によって得られた高速測定系を用いた高速単一光子検出について述べられている。第5章では二重量子ドットによるマイクロ波領域の光検出器について述べられている。第6章は本論文のまとめとなっている。最後に付録として、結合量子ドットのマイクロ波応答によるコヒーレント結合の観測について述べられている。

### 本論文の目的

本論文では強磁場中においた単一量子ドットを単一電子トランジスタ (SET) として働かせて、遠赤外光領域の単一光子検出が可能になったことを基礎としている。そのうえで研究目的は2つあり、一つは強磁場中量子ドットの単一光子レベルの光検出器として働く機能を利用した単一量子ドットそのものの分光学的研究を行いその基礎物性を探求すること、そして2つめの目的として、より綿密な量子ドット研究を行うために、あるいは検出器としての実用化に向けて単一光子検出器としての性能の向上させることである。

### 単一量子ドットの分光

論文提出者はこの目的に沿って、単一量子ドットにおける励起、緩和過程に調べている。まず強磁場中量子ドットのサイクロtron励起状態の寿命が印可する磁場に対してどのように振舞うのかを測定し、この測定によって従来の量子ドットの分光学的研究では調べることの出来なかったサイクロtron励起した量子ドットの緩和過程について調べている。そして、再結合寿命そしてその特徴的な振るまいを量子ドット内部の電子分布とその分布の変化との関連性から、緩和過程に関する一つのモデルを作り、そのモデルを用いて量子ドットの寿命の振るまいを再現することに成功している。また、このようなモデルを作ったことで単一光子検出器としてその波長範囲を拡張するために必要な示唆も行っている。

また量子ドットの励起過程を調べるために、強磁場中単一量子ドットと二重量子ドット

トについて励起スペクトルを測定している。このような単一量子ドットによる励起スペクトルは従来の測定方法では得ることのできなかつたものである。この単一量子ドット分光に成功したことで、量子ドットの分光学的研究は飛躍的にその精度を高めることができ、またより詳細な研究が可能になると思われる。ここでは得られた励起スペクトルについて定量的な解析が行われており、量子ドットの形成方法とその特徴的な閉じ込め構造を考慮したモデルを作成し閉じ込め構造に関する数値計算を行い、そのスペクトル構造を説明している。

### 測定系の高速化と新たな検出器

一方、本論文は量子ドットを光子検出器として応用性を広げるために、測定系の改良と検出器そのものの改良について述べられている。測定系の改良では、量子ドット間の電気伝導度測定系の高速化を図り、その結果として検出可能な波長領域を広くすることを目的としている。そのために必要なマイクロ波フィルターと SET の高速読み出し回路の原理と作製について述べられている。高周波回路を用いると高周波信号と同時にマイクロ波ノイズを量子ドットに伝えてしまい、そのマイクロ波ノイズは量子ドットを単一電子トランジスターとして動作させるときに誤作動の原因となる。これを防ぐためには同軸ケーブルを伝わるマイクロ波を非常に強く減衰させ、かつ極低温で働くマイクロ波ノイズフィルターが必要である。ここで述べられているマイクロ波フィルターは従来考えられてきた同種のフィルターに比べると、マイクロ波の吸収効率ははるかに良くなるように設計がなされている。また一方で単一電子トランジスター動作を高速で読み取ることができる測定回路も作っている。このようにマイクロ波フィルターと高速読み取り回路が完成させたことによって単一光子検出を高速で行うことに成功し、それによって10  $\mu$  s以下の単一光子による応答を検出することを可能にした。またそれによって従来の測定系に比べて広い波長領域の単一光子検出に成功させている。この高速測定系が完成したことで、量子ドットの光子検出器を実用化に向けて、その特性も向上し、新たな検出器を作成する際に設計自由度も増した。

また、量子ドットの検出器の改良として、二重量子ドットを用いた光検出の動作解析と測定系の改良が行われている。二重量子ドットは2つの量子ドットを並べたもので、その一つを単一電子トランジスターとして働かせて、もう一つの量子ドットによる光吸収の電子励起を観測するものである。その大きな特徴は磁場を必要とせず、また従来の検出器では不可能であったマイクロ波領域での単一光子検出を可能にするものである。しかし、これはマイクロ波領域の光を検出ができると同時に、冷凍機内にあるマイクロ波領域の光子が誤作動の大きな原因となる。そこでマイクロ波領域の光が試料に入射しないように、シールドキャップやマイクロ波吸収体を塗るなどのマイクロ波ノイズ対策を施した。この改良によって、二重量子ドットの測定において当初は光応答としてしか観測されなかつた信号を、単一光子吸収による信号として観測することに成功させている。

また、量子ドット研究には、電子系の位相制御という流れがあり、結合量子ドットによるコヒーレント結合をマイクロ波トンネル分光によって観測を行ったことが付録に述べられている。ここではコヒーレントに結合した結合量子ドットの量子物性を探ることを目的としている。またこれまでコヒーレント結合が観測されたことのある直列結合量子ドットでは、将来その量子力学的な性質を利用した量子ビットに発展させるには不利な点がある。これを補うために並列結合量子ドットを用い、そのコヒーレント結合をマイクロ波分光によって観測することに成功し、その解析が行われている。

このように、論文提出者は単一量子ドットを SET として働かせることによって高感度な量子ドット分光の研究を行い、励起、緩和過程について探求を行っている。また、量子ドットを長波長光の単一光子検出器として利用するために改善を行ってきた。

## 結び

なお、本論文中の第3、5章の一部は Oleg Astafiev 氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析を行ったもので、論文提出者の寄与が充分であると判断する。

よって本論文は博士(学術)の学位請求論文として合格と認められる。