

# 論文審査の結果の要旨

氏名 五十嵐 悠一

本研究は InAs 自己形成量子ドットの電子状態およびスピンの関連した伝導現象を実験的に調べたものである。本論文は5章からなる。第1章は序章であり本研究の動機と本論文の構成が述べられている。第2章では研究の背景と関連する理論、第3章では実験に用いられた試料の作製方法と測定手法が述べられている。第4章が本論文の主要部分で実験結果とその解析が述べられている。第4章は4つの節からなり、それぞれ量子ドットの電子状態、近藤効果、 $g$ -因子、電荷読み出し実験、についての記述がある。第5章はまとめと将来の展望の記述に当てられている。

量子ドットとは電子系を微小空間に閉じこめたゼロ次元構造を指す。伝導現象の実験では量子ドットが電極とトンネル接合でつながった構造が用いられる。量子ドットの研究は従来その多くが GaAs 系半導体の微細加工による系を用いるものであった。InAs 系は狭いバンドギャップ、大きなスピン  $g$  因子、強いスピン軌道相互作用など、GaAs 系にはない特徴の数々を有するので、InAs 系の量子ドットの研究により新しい物性や機能の展開が期待される。

本研究で用いられた InAs 量子ドットは、GaAs 基板上に数原子層の InAs を積層させた際に格子定数の違いによる歪みを緩和するために自己形成されるものである。実験は、GaAs のキャップ層で覆った埋め込み型と、表面露出型の2種類の InAs を対象とした。埋め込み型で直径 20nm、表面露出型で直径 90nm の試料について詳しい測定とデータ解析を行った。両者はサイズの他にも歪みの度合いなどに違いがある。伝導特性の測定は、前者では垂直伝導型の電極配置、後者ではナノギャップ電極を配することによっている。

ゼロ磁場および磁場中のクーロン振動およびクーロンダイヤモンドの測定から量子ドット中の電子状態に関する知見を得た。埋め込み型では、殻構造、スピン対が明瞭に観測され、またフォック・ダーウィン状態との対応が比較的よく成立するなど、少なくとも電子数  $N$  が6程度までは閉じこめポテンシャルが2次元調和振動子型で近似できることがわかった。それに対して表面露出型ではサイズが大きいことと形状効果が効いて電子状態はかなり異なった様相を示す。

表面露出型のドットで電極との接触面積を広くとった試料では、近藤効果の発現が期待される。InAs ではスピン軌道相互作用の影響により近藤効果が発現しにくいと考えられていたが、ゼロ磁場で  $N=3$  および5のクーロン谷において近藤効果のふるまいを観測した。温度依存性から見積もった近藤温度は約 2K という大きな値になった。磁場中ではゼーマン効果および軌道準位のシフトのために準位間の交差が起こる。一般に準位

縮重のあるところでは高い近藤温度が期待されるが、強いスピン軌道相互作用のもとでは準位反撥により反交差が起こるため縮重が解けるという事情がある。実験では、高磁場域の準位交差点のうち、7.1T 付近で起こるスピン↓の最低ランダウ準位とスピン↑の高次ランダウ準位との縮重状態において明瞭な近藤効果が見いだされた。それに対して、より低い磁場領域ではどの交差点においても近藤効果は見いだされなかった。これは、十分高磁場で起こる交差では軌道角運動量の差が大きいため、スピン軌道相互作用による反交差のギャップが小さく、近藤効果が発現したものと解釈された。この結果は、量子ドットにおける近藤効果発現に対するとスピン軌道相互作用の効果をはじめて明らかにしたものと評価される。

表面露出型試料についてスピン  $g$  因子の詳しい測定と解析が行われた。励起スペクトルの磁場依存性、近藤効果のゼロバイアス異常の磁場分裂、非弾性コトネリングピークの磁場分裂、という3種類の手法を適宜適用することによって、スピン  $g$  因子およびその異方性を評価し、面内磁場と面直磁場で  $g$  因子が2倍程度異なることを見いだした。また角度依存性を測定し理論計算との一致を見た。

以上のように、本研究は InAs 自己形成量子ドットの少数電子系の相関電子状態をトンネルスペクトロスコピーによって詳細に調べ、近藤効果や  $g$  因子などスピン関連の物性を明らかにしたもので、InAs 量子ドットについて重要な新しい知見を得たものと認められる。本論文の中核をなす研究内容は指導教員らとの共著論文として学術誌に印刷公表ないしは公表予定であるが、実験の遂行および結果の解析の大部分は論文提出者が主体となって行なったものと判断される。

したがって、本論文は博士(理学)の学位授与に値するものと認める。