

## 論文審査の結果の要旨

氏名 天羽 真一

本論文は、半導体結晶中に二つの量子ドットを近接して作成し、その電気伝導特性を測定して二重量子ドットの電子状態を実験的に明らかにした研究である。つまり、二つの量子ドットを隔てるトンネル障壁厚を変えて量子ドット間の結合を制御し、また、側面に設置したゲート電極によって量子ドット内の電子の化学ポテンシャルを変えて電子数を制御し、さらには、磁場を印加することによって電子の波動関数およびスピン状態を制御することによって、「人工分子」と呼ぶべき電子状態が二重量子ドットに形成されていることを示した。また、その電子状態が外部パラメータによってさまざまに変化することを詳細に解析し、理論と照合して理解することに成功した。これらの研究成果は、半導体量子ドットによって形成される人工分子の理解を飛躍的に進歩させ、固体物理の研究にとっても重要な知見を与える研究となっている。

本論文は9つの章から構成されている。第1章では本研究の背景と関連するこれまでの研究を概観し、その中から生まれた問題意識および本研究の目的が述べられている。第2章および3章では、半導体中に形成される単一量子ドットおよび二重量子ドットについての基礎的事項および過去の研究が概観されており、第4章では二重量子ドットについての理論的研究が紹介されている。第5章では本研究で使った実験手法と試料を説明している。第6章以下で、本研究の結果および考察が詳述されている。第6章では、二重量子ドットに電子が1個あるいは2個存在する場合、第7章では、電子が4, 5, 6個存在する場合の実験結果および解析を述べている。第8章では、電子相関の効果に着目して、今回はじめて見出された人工分子特有の状態について詳述している。最後に、第9章において本論文で明らかにされた結果、その意義、および今後の研究の展望をまとめている。

最近の高品質半導体結晶の作成技術および微細加工技術の進歩により、電子をその波長程度の微小空間に閉じ込めて、その振る舞いを自在に制御することが可能となってきた。それにより、さまざまな量子

力学的効果を直接的に、しかも制御性良く観測することができるようになった。本研究で使用された二重量子ドットは、厚さ数ナノメートルのトンネル障壁を隔てて隣接して作成されており、そこに閉じ込められた電子は、このトンネル障壁を透過して二つの量子ドット間にまたがって存在することができる。これは2原子分子と似た状態となっているため、この二重量子ドットは「人工分子」と呼ばれる。その興味深い特徴は、自然の分子と異なり、その電子状態を外部から制御して変化させられること、また、その状態を超低温での電気伝導の測定によってプローブできることである。本研究は、このような最先端の試料作成技術および実験技術を駆使して行われた。

本研究の成果は大きく分けて三つある。

(1) 1電子および2電子状態の解明：

電気伝導度のゲート電圧および印加磁場依存性（励起スペクトロスコピー）によって、基底状態より 10meV 程度上に励起状態を見出し、これが反結合状態であることを明らかにした。その励起エネルギーは、横磁場の二乗に比例して変化することを示し、理論的予言を実証した。2電子状態では、結合状態を2電子が占有する Singlet 基底状態と、結合と反結合状態を1電子ずつ占有した Triplet 励起状態が存在することがわかった。さらに、横磁場を印加することによって、それら2つの状態のエネルギー準位が逆転する Singlet-Triplet 遷移が起こることをはじめて見出し、Hund-Mullikan の近似式によってほぼ説明することに成功した。

(2) 多電子状態の解明

電子が4つ以上占有した二重量子ドットの電子状態を、トンネル障壁の厚さの異なる試料について測定を行い、自然界の分子と比較しながら解析した。トンネル障壁が薄く、量子ドット間の結合が強い場合には、ある磁場領域で新たな基底状態（ $\beta$ 相）が存在することが見出された。これは人工原子（単一量子ドット）には見られない状態であり、横磁場依存性から、反結合状態が電子によって占有されている状態であることを明らかにした。結合の弱い二重量子ドットでは、人工原子と異なる電気伝導特性を示し、イオン結合性の強い状態になって

いると考えられる。

### (3) 二重量子ドットでの電子相関効果の解明

スピン・スピン相関に伴う状態遷移（2電子状態の Singlet-Triplet 遷移、4電子状態の Hund 結合、多電子状態の Singlet-Triplet-Singlet 遷移）を調べ、電子間の交換相互作用が人工原子に比べて減少していることを明らかにした。これは系のサイズの違いに起因するといえる。また、強磁場領域において、完全スピン偏極状態（Maximum Density Drplet, MDD）が実現し、MDD 特有の大きな安定性が見られる傾向を確認した。これは人工分子特有の性質と考えられる。

以上のように、論文提出者は、トンネル結合した二重量子ドットの電子状態を電気伝導特性の測定から詳細に研究し、多電子状態特有の現象を理解するための重要な知見を得た。このように本研究は、最先端の実験技術を駆使して初めてなされたものであり、その独創性が認められたため、博士（理学）の学位論文として十分の内容をもつものと認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文は、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行や結果の解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。