

論文審査の結果の要旨

氏名 西 義史

半導体量子ドットは、クーロンブロッケード効果を利用して、その内部の電子数をゲート電極により1個ずつ制御できるという著しい特徴を持つ。本研究では量子ドットに閉じ込められた少数電子系の強磁場中の相関電子状態をトンネルスペクトロスコーピーによって研究している。本研究において用いられている2重障壁円形縦型量子ドットは閉じ込めポテンシャルの対称性が高いため、その中の1電子軌道を正確に計算することができ、少数電子系の多体状態を精密な理論との比較に基づいて研究するのに適した系である。物理としては原子内の少数電子系の多体状態の研究と通ずるところが少なくないことから、量子ドットを人工原子と呼ぶことも多い。

本論文は6章からなる。第1章では研究の背景と動機が述べられている。第2章では量子ドットを通じた電子トンネル輸送の基礎的なことがらが述べられ、第3章では量子ドットに磁場を印加したときのFock-Darwin状態や、強い電子相関によって支配される特徴的な強磁場中少数電子系の多体状態についてのこれまでの研究が述べられている。第4章は試料作製の手法や極低温における測定など実験方法に関する諸点が記述されている。第5章は実験結果とそれに関する議論を展開した中核部分である。主要な成果を3つの節に整理した形で述べている。最後の第6章では、本研究で得られた新たな知見のまとめと今後の展望が述べられている。

本研究で得られた主な成果を以下に述べる。

(1) 量子ドットに閉じ込められた少数電子系の基底状態は磁場の増加とともに逐次変化してゆく。各状態は全軌道角運動量 L と全スピン角運動量 S を用いて (L, S) と表される。ある磁場範囲では最大密度液滴(MDD)状態と呼ばれる安定な状態に達する。これは2次元電子系でいうとスピン分離最低ランダウ準位が完全に詰まった $\nu = 1$ の状態に対応するものである。より強磁場ではMDD状態が不安定となってより角運動量の高い新たな状態が実現することが理論的に予測されている。しかしながら、従来の典型的な量子ドットではそのような磁場域に到達することは困難であった。本研究では従来よりも閉じ込めの弱い量子ドットを作製したことによって各状態をより低磁場で実現し、MDD状態よりも強磁場側の転移を観測することに成功した。2電子系について、MDD状態 $(1, 1)$ から、 $(2, 0)$ や $(3, 1)$ といった状態への遷移が観測された。

(2) MDD状態よりも強磁場側の電子状態については、古典的安定電子配置に対応した「電子分子」の描像が成り立つことが理論計算から示唆され、安定な魔法数状態の存在が予想されている。本研究では3電子および5電子系の強磁場中の状態を励起スペクトルの手法を用いて詳細に調べ、対応するモデルの理論計算と比較を行った。3電子系では

MDD 状態 $(3, 3/2)$ から $(5, 1/2)$ という低スピン状態を経て, $(6, 3/2)$ という次のスピン偏極魔法数状態へと移行すること, また 5 電子系では, MDD 状態 $(10, 5/2)$ から $(14, 3/2)$ という低スピン状態を経て $(15, 5/2)$ というスピン偏極魔法数状態に移行すること, がそれぞれ見出された. これらの実験結果は, 共同研究者らによって行われた厳密対角化による理論計算の結果と互いに補強し合って, 少数電子系の多体状態の精密な理解をもたらすものである.

(3) 上記のように強磁場中の少数電子系は (L, S) の異なる基底状態間を遷移する. 電子数が 1 変化するトンネル過程において, 始状態と終状態の全スピンの変化が $1/2$ よりも大きい場合, スピン選択則によるトンネルの抑制 (スピンプロケード) が起こる. 本研究では 5 電子系の MDD 状態が形成される直前の磁場域において, スピンプロケードの明瞭な観測に成功した. 4 電子 MDD 状態 ($S=2$) と 5 電子の低スピン状態 ($S=1/2$) がこの磁場域で重なったために生じたものと理解される. スピンプロケードの報告は以前にもあるが, 量子力学的状態が明瞭に理解できるこのような系での観測は初めてである.

以上のように, 本研究は半導体量子ドットのトンネルスペクトロスコピーによって強磁場中の少数電子系の相関電子状態を詳細に調べたもので, 少数多体系における電子相関効果の現れ方に関し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官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.