

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 伊藤 匠

本論文は「Detection and control of electron spin states in multiple quantum dots (多重量子ドットにおける電子スピン状態の検出および操作)」と題して、GaAs多重量子ドットの電子スピン制御に関して論文提出者が行った研究の成果をまとめたもので、英語で執筆されている。

近年、量子計算における多スピン量子ビット化、スピン量子模型の構築などを目指して、半導体多重量子ドットの研究が急速に進んでいる。前者については3スピン量子ビットや3スピンを用いた高速制御位相ゲートの実装、後者については3重量子ドットによるハバード模型などが報告されている。一方で、多重量子ドットの電子状態を制御、検出するには未だ解決すべき技術課題が残されている。このような背景のもと、本学位研究では、多重量子ドットにおける電子スピン状態の操作と検出がテーマとして取り上げられている。その結果、拡張性のある5重量子ドット構造の実現、4スピン量子ビットの独立制御、4重量子ドットの電荷状態配置のゲート選択性などいずれも世界初となる充実した成果が得られている。

論文は全6章からなる。まず第1章では多重量子ドットの開発と電子スピンを量子ビットとする量子コンピュータ、電子相関の量子模型などについて世界の研究状況を紹介した後、拡張性のある1次元多重量子ドット構造の提案、電子スピンのコヒーレント制御、1次元量子スピン模型の構築の順に本研究のシナリオを説明している。

第2章では、単一から4重量子ドットの電荷状態制御と検出法、基本的な電子スピン操作（パウリ効果を利用した初期化と読み出し、電子スピン共鳴を原理とするビット操作）、デコヒーレンス問題など、本研究に関係する実験手法と原理を説明している。続いて、主たる狙いであるスピン量子計算への応用、そして量子模型の実験例として3重量子ドットを用いたフェルミーハバード模型を紹介している。

第3-5章では、研究の中心的成果が書かれている。第3章では、拡張性のある多重量子ドットを実現するうえでの技術的課題を説明した後、3重量子ドットと一つの電荷計と3重量子ドットの両端の外部電極を単位として、拡張性の問題に対処できること、そしてこの考え方に基づいて5重量子ドットを作製したことを述べている。また、測定した電荷状態安定図が、静電容量模型による数値計算で再現できることを確認している。これらは、量子ドットの分野に重要な技術と概念を提供している。

第4章では、多重量子ドットの第一の応用として、微小磁石法を4重量子ドット構造に適用して、電子スピン共鳴の原理によるスピンのコヒーレント制御（量子ビット操作に相当）を実現したことを述べている。また、電荷計の出力ゆらぎの補正によりスピン判定の精度を上げられたこと、各ドットのg因子とドットの位置を推定し、微小磁石法のパフォーマンス

マンスを評価したことなどを述べている。ここで達成された4個のスピ量子ビットは初の実験例であり、多量子ビット化の先頭を切る成果といえる。またこの結果は5章のスピ量子模型の研究の前提にもなっている。

第5章では、第二の応用としてフェルミハバード模型の実現を目指して、まず4重量子ドットについて、複数のゲート電圧平面を使うことで自由度の高い電子状態が作れることを数値計算により提案し、実験実証したことを述べている。さらに、各ドットに1個の電子を含む電荷状態について、反強磁性のスピ配置が作れること、その基底、励起状態が隣接ドット間のスピ交換結合をパラメータとして遷移することを数値計算で示している。そのうち中央の2個の量子ドットの交換結合が弱い場合には、スピ1重項が基底になることをパウリ効果による実験で確認している。一方、結合が強い場合には適当な電荷状態間のパルスゲート操作により確認できることを提案している。これらの結果は多重量子ドットのスピ状態の遷移や励起状態のスペクトルを検出するための新技術を提供するもので、意義が大きい。

第6章では、本研究の結論として、拡張性のある多重量子ドット構造の作製とスピ量子状態制御に関して達成された研究成果、及び今後の研究方針がまとめられている。

以上述べたように、本研究では、拡張性のある一次元多重量子ドットの提案と実験実証、その応用として、4重量子ドットによる4個の電子スピの独立な量子ビット操作の実現、ハバード型量子模型の提案と実験実証など、スピ量子情報の基礎物理、技術の分野において重要な成果をあげている。これらは、いずれも難しい実験を注意深く行った結果得られたものであり、その内容は、意義、独自性ともに高い。スピ量子計算の物理と技術、ナノ構造の量子物理の進展に大きく貢献していると評価でき、物理工学の発展に顕著な寄与をするものと期待される。

よって、本論文は博士（工学）の学位申請論文として合格と認められる。