

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 野入亮人

半導体単一量子ドット中の単一電子スピン、あるいは二重量子ドットの2電子スピンを単位とする量子制御の研究は、主として GaAs 系の量子ドットを用いて行われ、現在までに2量子ビット、量子もつれ制御などが実現されている。一方で、Ga、As がもつ核スピンのために電子スピンのコヒーレンスが乱れるという問題が深刻化している。野入君の学位研究では、このような背景を問題意識として、三重量子ドットを用いた量子制御がテーマとして取り上げられている。その結果、3量子ビット化、測定時間の短縮による核スピン環境揺らぎの影響の抑制、単一スピン量子ビットと2電子スピン量子ビットの複合化による制御位相 (CPHASE) ゲートと量子非破壊 (QND) 測定の実現など、いずれも世界初となる充実した成果が得られている。

本論文は「Control and detection of electron spin states in triple quantum dots」と題して、GaAs 三重量子ドットにおける電子スピンの量子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。

論文は7章からなり、第1章は研究の背景と課題の章で三重量子ドットを用いたスピン制御の研究概要について紹介した後、パウリ閉塞を利用したスピン読み出し、量子ビット化、デコヒーレンス、複合量子ビットによる CPHASE と QND 測定の実現、という本研究のシナリオが説明されている。

第2章では、量子ドットの電荷状態、単一電子を用いたスピン量子ビットの理論背景とスピン量子計算への応用を紹介している。二、三重量子ドットの電子状態とスピン量子ビット操作、複合量子ビットの構成とQND測定の意味、核スピン環境によるデコヒーレンスの影響などが丁寧に説明されている。

第3章では、3個の電流端子をもつ三重量子ドットを開発し、3端子の伝導測定を利用して、三重ドットの電子状態の決定、量子ビット化に必要となるパウリ閉塞の成立条件の確認など、4章以降の実験の前提となる知見と技術を得たことを述べている。また新たな知見として、2次のトンネル過程におけるパウリ閉塞効果を見出したことが述べられている。

第4-6章では本研究の中心的成果が書かれており、3スピン量子ビットの実現、核スピン環境によるデコヒーレンスとその影響の抑制、複合量子ビットを利用したQND測定と CPHASE制御の結果がまとめられている。

第4章では、微小磁石を備えた三重量子ドットを用いて、3個のドットで独立な電子スピン共鳴 (ESR)、そしてESRの時間制御によるラビ振動 (量子ビット操作に相当) を観測したことを述べている。また、2スピン間の交換結合のラビ振動への影響について計算をもとに議論されている。同量子ドット系での3ビット操作は初の成功例であり、またこの

結果は6章の複合量子ビットの実現に繋がる成果にもなっている。

第5章では、ラムゼー干渉を利用して単一ドットの核スピン環境における磁場の時間的変動を検出したこと、その磁場変動の遅延時間に対する相関関数が時間とともに増大し、数十秒以上で飽和するという非エルゴードからエルゴードへの遷移を示すことを説明している。さらに、非エルゴード領域でのラムゼー干渉測定により不均一デコヒーレンスレートが減少すること、また、このデコヒーレンスレートがラビ振動速度より相対的に小さくなることに起因してスピン回転の強駆動が達成できることが示されている。これらの結果は核スピン環境のダイナミクス、その電子スピニコヒーレンスへの影響と抑制法について重要な知見を提供している。

第6章では、単一ドットの単一電子スピンの量子ビットと残りの二重ドットの2電子スピンの1重項と3重項を基底とする量子ビット（ST量子ビット）からなる複合量子ビットを実現し、単一電子スピンを制御ビット、ST量子ビットを標的ビットとするCPHASE、またST量子ビットのST歳差運動の周波数を測定することにより、単一スピン量子ビットのz軸射影のQND測定を実行したことを示している。いずれも、電子スピン系で初めての実験であり、スピン量子計算の基礎実験として意義が大きい。

第7章は、本研究の結論であり、結果の要約と三重量子ドットを用いて達成された電子スピンの量子制御の研究成果、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、本研究は、GaAs 三重量子ドットを用いて、パウリ閉塞条件の確定、3スピン量子ビット化、核スピン環境ダイナミクスのスピニコヒーレンスへの影響の検出と抑制、複合量子ビットによる CPHASE と QND 測定の実現など、いずれもスピン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。これらの研究は独自性が高く、また実験手法には様々な工夫が盛り込まれている。スピン量子計算の物理と技術、ナノ構造の量子物理、統計物理の進展に大きな寄与があったと評価でき、物理工学としての貢献が大きい。

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。