

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 藤田 高史

本論文は「Detection of Angular Momentum Transfer from a Single Photon to a single Electron Spin in a Lateral Double Quantum Dot」と題し、GaAs 系二重量子ドットのドット間共鳴トンネルを利用した非破壊で信頼性の高い単一光子検出法とパウリ則を使った実時間スピン検出法の開発、それによる、単一光子で生成された単一電子スピンの検出、円偏光単一光子から単一電子スピンへの角運動量転写について、論文提出者が行った研究の成果をまとめたものである。

論文は全 9 章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章では、本研究の背景として量子計算・通信における電子スピンの有用性、光子-電子スピン角運動量転写に取り組む本研究の動機を明確に述べている。

第 2 章では、半導体におけるスピン選択光励起や g 因子などのスピン物性、光子-電子スピン間の量子状態転写の機構など、本研究の理論背景を説明している。

第 3 章では、二重量子ドットの電子状態とスピン状態について基本的物理の概要、次いで、パウリスピンブロッケード現象を利用したスピン検出と核スピンの影響、量子ポイントコンタクトを用いた高感度電荷検出、単一電子スピン検出の原理と検出について述べている。

第 4 章では、本研究の位置づけを明確にするために、単一量子ドットを用いた単一光子検出の先行研究を解説している。

第 5 章では、本研究で用いた素子の作製と特性評価、実験方法を説明している。特に角運動量転写を効率化し、かつ将来の量子状態転写も見据えて、量子井戸中に二重量子ドットを作製したこと、その電子スピン g 因子の評価について説明している。さらに、論文提出者が独自に開発した、微小な量子ドットへのビーム集光系について説明している。

第 6 章では、二重量子ドットを用いた単一光子検出の実験を中心に説明している。その中で、単一光子検出を初めて実現したこと、二重量子ドットのドット間共鳴トンネルを利用することで信頼性の高い単一光子検出ができることを明らかにしている。さらに、光生成単一電子を二重ドット中に閉じ込めている間に単一光電子の情報を検出するという、非破壊測定を実現したこと、この方法で 2 光子以上の検出もできること、また、励起光波長依存性から、重い正孔状態と軽い正孔状態を選択的に単一光子励起できることを述べている。

第 7 章では、パウリ則に基づいたスピン依存ドット間トンネルを実時間電荷測定で検出するという独自の方法で観測したスピン緩和の機構を議論している。低磁場領域では、従来、核スピン磁場の揺らぎによってスピン緩和することが知られている。本研究では新た

に、高磁場領域でスピン軌道相互作用が緩和要因となることを示唆する実験結果を得ている。この結果は、二重量子ドットのスピン緩和に新しい知見を与えるとともに、本研究で用いた光生成単一電子スピン検出法の最適化の指針を与えている。

第 8 章では、第 6 章のドット間共鳴トンネルを用いた単一光子検出と第 7 章のスピン依存ドット間トンネルを組み合わせ、単一光子が生成する単一電子スピンの向きを判定したこと、この方法を用いて単一光子から単一電子スピンへの角運動量転写を実証したことを述べている。後者では、照射する単一光子の偏光を右回り円偏光から直線偏光を経て左回り円偏光まで変化させ、観測される光生成単一スピンの向きが偏光に応じて予想通り変化することを見出している。本研究の中心的な成果といえる。また同角運動量検出の精度に関して、上向き・下向きスピン状態の熱分布が現在の制限要因であることを議論している。

第 9 章は本研究のまとめと今後の展望を述べている。

以上をまとめると、本研究では、二重量子ドットのドット間共鳴トンネルを利用した単一光子検出を確立し、パウリ則によるスピン依存ドット間トンネルと組み合わせることで、単一光子が生成する単一電子スピンの検出を実現し、単一光子の偏光を制御することで単一光子から単一電子スピンへの角運動量転写が実証されている。これは、本研究で初めて達成された重要な成果である。とくに、電子スピンを用いた 2 量子ビット操作が唯一実現されている電気制御量子ドットと光子の角運動量を結びつけた点で独自性と新規性が非常に高く、また光子からの量子状態転写や光子と電子スピンの非局所もつれ生成など、新しい量子力学的実験の研究領域の開拓にもつながる。また本成果は、量子情報通信における量子中継技術への応用につながることから、今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。