

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 米田 淳

本論文は「High-speed electrical gating of single electron spin qubits with semiconductor quantum dots」と題し、GaAs 量子ドットの電子スピンを用いた量子ゲートの高性能化へ向けて、電子スピン共鳴用微小磁石の最適設計、ユニバーサル量子ゲートの高速化とそれによる核スピン環境の影響の抑制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。

第1章では、半導体量子ドット中の電子スピンを量子ビットとして利用する研究の歴史と背景、課題、とくに核スピンによるデコヒーレンス問題などを紹介した後、微小磁石法の最適化による x 軸周りのスピン回転の高速化とその回転時間を核スピンとの相互作用時間より十分小さくすることによる核スピン環境の影響の抑制、という研究のシナリオが説明されている。

第2章は、研究対象とする量子ドットの理論背景を紹介している。単一、2、3重量子ドットの電気伝導特性、電子状態、量子ポイントコンタクト電荷計を用いた電荷安定図の検出などが簡潔に説明されている。

第3章は、量子ドットの電子を用いたスピン量子ビットの研究の概要、種々のスピン回転操作、とくに本研究で使用する微小磁石を利用する電子スピン共鳴法、さらに、量子ゲート操作に必要なスピン交換結合とデコヒーレンスの問題が、理論をふまえながら詳細に述べられている。

第4-7章は、本研究の成果をまとめた中心的な章で、第4で微小磁石の最適設計、5-7章で量子ゲートの実装と高速化の結果がまとめられている。

第4章では、微小磁石の設計指針として、作製時に予想される量子ドットとの位置ズレに対する許容度の確保、量子ゲートの高速化に必要な、外部磁場に平行、垂直方向の漏れ磁場不均一性の増大をあげ、磁場シミュレーションに基いて最適な微小磁石の形状と配置を提案、実現したことが説明されている。量子ゲートの高速化を達成するための前提を与える重要な章である。

第5章では、微小磁石を備えた2重量子ドットを用いて電子スピン共鳴とラビ振動の実験を行い、設計通り、大きな不均一磁場が得られていること、スピン共鳴のために照射するマイクロ波強度とともにラビ振動が高速化し、世界最高速の127MHzとゲート忠実度が達成されたことが述べられている。また、マイクロ波の強度に対してラビ振動の周波数が急速に飽和する現象が見られ、閉じ込めポテンシャルの非調和性の影響が議論されている。

第6章では、スピン π 回転時間と核スピン相互作用時間の比が、従来の実験では同程度以下であったのに対して、今回10倍程度になったこと、そのことに由来して、ラビ振動の

位相シフトの消失、指数関数型の減衰、離調-駆動時間面内でラビ信号のシェブロンパターンが観測されたことが示されている。これらはいずれも核スピン相互作用が無視できる領域になったことを裏付けるもので、ラビ振動の高速化により初めて観測された現象といえる。この結果は本研究の大きな成果であり、今後スピン量子ビットの研究に有用な知見と技術を提供している。

第7章では、磁場の不均一性を利用して位相ゲートを提案、実現したことが述べられている。外部磁場と平行な方向の漏れ磁場成分が異なる2点間で電子をパルス的に行き来させることで、状態ベクトルに相対位相を付加するという独自のアイデアに基づいて、従来に比べて倍以上の高速化（50 MHz）が達成されている。また、ゲート電圧を変化させて電子位置を変えたときにスピン共鳴ピーク位置が変化する様子を観測し、これにより位相ゲートを与える磁場の不均一性の存在が確認されている。微小磁石法の有用性を示す重要な結果といえる。

第8章では、2重量子ドットの次の展開として、3量子ビット化を目指して、3重量子ドットを作製し、各ドットに1個の電子を含む電荷状態が制御性良く実現できたことが述べられている。

第9章は、本研究の結論であり、結果の要約と今後の3ビット化実現へ向けた展望が述べられている。

以上述べたように、本研究は、微小磁石の形状と配置を最適化することにより、量子ドットの電子スピン共鳴を増大することに成功し、これによって世界最高速のラビ振動を達成し、また従来問題とされていた核スピン環境の影響の抑制を実現している。さらに、微小磁石による漏れ磁場の不均一性を利用するという独自の方法で最高速の位相ゲートを実現している。これらの研究は信頼性、独自性ともに高く、様々な工夫が盛り込まれている。その成果は、スピン量子計算の物理と技術、量子固体物理、ナノ科学の進展に大きな寄与をしており、物理工学への貢献が大きい。

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。