審査の結果の要旨

氏　　名　　髙倉　樹

本論文は「量子計算の実現に向けた横型多重量子ドットにおける電子状態の観測と制御の研究」と題し，GaAs 系３重、４重量子ドットの作製、電荷計による電荷状態検出、スピン量子ビット化に必要となる微小磁石設計、3 量子ビット化に適した３重量子ドットの提案と実現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、単一量子ドット中の単一電子を用いたスピン量子ビットの研究の歴史と状況、3 ビットの量子誤り訂正の重要性などを紹介した後、多重量子ドットの電子状態制御とそれを用いた多量子ビット化のアプローチ、という研究のシナリオの説明と具体的な課題設定を行っている.

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重量子ドットの電気伝導特性、量子ポイントコンタクト電荷計を用いた電荷状態図の検出、２重量子ドットにおける２電子スピン状態とパウリ型スピン閉塞などの必要事項を丁寧に説明している。

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状況、とくに本研究で使用する微小磁石を用いた電子スピン共鳴法、量子ゲート操作に必要となるスピン交換結合とデコヒーレンスの問題について、理論をふまえながら詳細に書いてある。

第４-８章は本研究の成果をまとめた中心的な章で，第４，５章からなる前半では３重、４重量子ドットの設計、作製と電荷状態の観測、後半の第６－８章では多量子ビットの実装に向けた研究をまとめている.

第４章は表面ゲート電極によって２次元電子ガス中に閉じ込められた３重量子ドットの電荷状態制御に関する章で、シミュレーションを利用してゲート電極を設計し、最終的に２種類の電極配置の試料を作製したこと、その一つで各ドットに電子１個を含む理想的な（１，１，１）状態を実現したことを説明している．また、同測定では、各ドットに取り付けたゲートの電圧を適当に調整することにより、電荷状態図が敏感に変わる様子を観測し、理論予測と比較している。

第５章では４重量子ドットの作製と電荷状態制御、とくにドット間のトンネル結合の強さ、位置を適当に変えることで、４つのドットが強結合した単一ドット、２組の２重ドット、単一ドットと３重ドットの組み合わせ、４重ドットが自在に形成できることを確認している．これは同デバイスが従来に比べて高い制御性を持つことを示す。なお４重ドットの電荷状態は初の報告例である.

また、３重ドットの実験では、両側のドットの共鳴トンネル結合の強さが、中央のドットのエネルギー位置が共鳴に近いか否かに大きく依存することを見出し、これがモデル計算と良く合うことを指摘している．やはり制御性の良い３重ドットで初めてできた実験と言える．

第６章では、量子ポイントコンタクト電荷計の電荷状態に対する感度を定量的に議論している．電荷計の感度はドットの数が増えるほど低下するが、このことは、今まで議論されたことはなかった．ここでは、遮蔽型クーロンポテンシャルと距離に依存する容量結合を考慮したモデル化を用いて、３重、４重量子ドットの実験結果がよく再現できることを示している．

第７章では、一次元的な多量子ビット化が楔型の間隙を持つ微小磁石対で実現可能であることを磁石からの漏れ磁場のシミュレーションを用いて確認している．具体的に互いに０．１ミクロン程度離れたドットから成る多重ドットを仮定すると、同磁石によって２５までの多ビット化に対応できることを提案している．さらに、特定の結晶方位にドットを並べることにより、スピン軌道相互作用による局所磁場と磁石による漏れ磁場の両方を効果的に取り入れられることを指摘している．大変現実的なデバイス提案と言える．

第８章では、初期化、読み出しなどに適した３量子ビットデバイスとして、各ドットにオーミック電極をトンネル接合した3重量子ドット構造を提案、実現したことを述べている．前章までの議論を集約して行った実験の章といえる．各ドットに１個の電子を有する３重ドットにおいて、中央のドットと各両端のドットのトンネル結合で作られる２組の２重ドットが同時にスピン閉塞になる条件が存在し、これを利用して３量子ビット化が可能になることが指摘されている．まだ３量子ビット化の実験に成功してはいないが、世界初の３量子ビット化の成功につながる結果が得られている．

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，新しい３、4 重量子ドットの提案と作製、多ビットの実装の要素技術、そして３ビット化に適した３重量子ドットの提案と実現を通して量子計算の大規模化に必要とされる多量子ビット化への技術指針を示し、同時に、関連する物理を議論したもので、量子情報処理、量子物理のいずれにも大きな貢献をしていると評価できる．また、これらの研究成果は，量子ドットのトンネル結合、スピン効果をスピントロニクスや量子情報に広く利用する技術の基礎を提供するものであり，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．