

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 樋田啓

量子情報処理を行う素子等への応用を目指して 2 準位系と電磁場の相互作用についての研究が近年活発に行われており、2012 年のノーベル物理学賞の対象になるなど注目を集めている。このような相互作用の研究は、天然原子を共振器中に閉じ込めた Cavity QED の実験により行われてきており、近年では超伝導量子ビットと同一チップ上に構成した超伝導共振器を使った Circuit QED の研究も急速に進展している。このような結合系を現実的に応用可能な量子デバイスに発展させるためには大規模化が必須であり、既存のプロセス技術が応用可能な半導体系に拡張することが極めて重要である。半導体で実現でき、かつ制御性の高い 2 準位系の代表例は半導体量子ドットであり、電荷自由度・スピン自由度を用いた量子ビットの研究が活発に行われている。量子ドットと共振器の結合はこれまでに理論的提案が行われているが、実験的な検証の例はほとんどなく発展途上の領域といえる。また、半導体量子ドットの典型的なエネルギースケールはマイクロ波領域であり、超伝導量子ビット、ダイヤモンド中窒素空孔中心等と同程度である。これらの量子ビットと超伝導共振器の結合はこれまでに報告されており、量子ドットと超伝導共振器を結合することで異なる量子ビットを組み合わせたハイブリッド量子系の実現も可能になる。

本論文は半導体量子ドットと超伝導共振器の結合を目標として、両者を静電的に結合させた試料の伝導特性やマイクロ波透過スペクトルを測定し、両者の結合と系のデコヒーレンスについての研究を報告している。

第 1 章は、2 準位系と電磁場の相互作用についてこれまでに行われてきた研究の概説である。また、半導体量子ドットへの拡張についての理論的提案について概説している。

第 2 章は、本研究で量子ビットとして用いる半導体 2 重量子ドットの電気伝導特性、電荷自由度を使った量子ビットとしての性質が記述されている。

第 3 章は、半導体量子ドットと超伝導共振器を結合した際に得られる実験結果についての理論的考察である。ここでは、半導体量子ドットと超伝導共振器を組み合わせた系が量子光学の分野で頻繁に用いられる Jaynes-Cummings ハミルトニアンで記述できることが示されている。さらに、量子ドットと超伝導共振器の間の結合の大きさは、量子ドット周りの静電容量から見積もることが可能であり、量子ドット単体の実験結果から 34MHz の結合が予想されることが記述されている。

第 4 章は、試料の測定方法についての記述である。本研究で用いられる測定系は極低温を実現するための冷却系、量子ドットの微小電流測定系、超伝導共振器のマイクロ波透過

測定系に分けることができる。量子ドットと超伝導共振器の測定系は本論文の提出者が構築したものであり、熱雑音を含むノイズの除去や安定した測定を行うために必要な注意点等が詳細に記述されている。

第5章は、超伝導共振器の作製方法、実験結果および考察についての記述である。本研究で用いる超伝導共振器は、GaAs/AlGaAs ヘテロ接合基板上に作製し、量子ドットと結合を行うための構造が加わるため、これまでに報告されている超伝導共振器に比べて損失が大きくなることが明らかにされた。GaAs には結晶の反転対称性がないため圧電性があり、超伝導共振器に蓄えられた電氣的エネルギーが圧電効果を通じて結晶の振動エネルギーとして逃げてしまうことにより損失が増大することが記述されている。この結果は、化合物半導体基板上に低損失の超伝導共振器を作製するには圧電定数の少ないものを選ぶ必要があるという指針を与えるものである。また、超伝導共振器の設計するには圧電効果を避けるために表面弾性波の波長を考慮する必要があることも明らかにされた。さらに、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造基板では、結晶成長を行った層に含まれる不純物によりマイクロ波吸収が起こり、損失が増大することも記述されている。これまでに、超伝導薄膜中の不純物によるマイクロ波吸収は報告されていたが、同様の現象が半導体基板中の不純物によっても引き起こされることが明らかにされた。

第6章は、半導体量子ドット-超伝導共振器結合系の作製方法、実験結果とその解析結果、および考察についての記述である。超伝導共振器にマイクロ波を入力しながら量子ドットの伝導特性を測定することでフォトンアシストトンネルを観測している。また、半導体量子ドットの特性は通常電気伝導によって測定されるが、量子ドットの電荷状態によって超伝導共振器の透過特性に変化が現れることが報告されている。これらの効果は回路モデルによって解析され、量子ドットが超伝導共振器と結合していることを明らかにされた。さらに、半導体量子ドットと超伝導共振器の結合の効果により、共振器のマイクロ波透過スペクトルに反交差が現れることが報告されている。これは、第3章で導出した Jaynes-Cummings ハミルトニアンから予想される量子的な効果である。実験で得られた反交差を理論式でフィットすることで 30MHz という超伝導量子ビットで報告されているものと同等の大きさの結合が得られることを明らかにされた。さらに、反交差の形状の温度依存性を測定し、その結果のマスター方程式を用いた数値計算による解析結果が報告されている。この解析結果から量子ドットのデコヒーレンスが系のコヒーレンスを破壊する主な原因であり、2準位系と電磁場が強く結合した量子系に特異な効果を発現させるためには量子ドットのコヒーレンス時間を延ばすことが必須であると考察されている。また、2重量子ドット単体を量子ビットとして動作させる場合との動作点の違いから、量子ドットのデコヒーレンスを減らすために改善すべき点についての考察が行われている。

第7章は本論文のまとめの記述である。第5章、第6章で得られた結果と総括がまとめられている。さらに、本研究で得られた成果を踏まえて、デコヒーレンスが小さく量子的な効果が顕著に現れる試料を作製するための指針を示されている。

以上をまとめると、量子ドットと超伝導共振器が結合した際に現れる反交差を観測し、超伝導共振器に結合可能な量子ビットの種類を拡大すること本論文は成功している。結合を得るために用いたゲート電極による静電結合という方法は、GaAs 以外の材料を用いた量子ドットでも一般的に利用できるものであり、他の材料を用いた量子ドットへの波及効果が大きい。さらに、超伝導共振器単体および結合デバイスの実験結果の考察から、他の材料を用いた量子ビットを用いた実験を行う場合の材料選定や試料設計の指針も示されている。従って、本論文が固体量子ビット、特に半導体量子ドットを用いた量子情報処理デバイスの開発に果たした役割は大きく評価できる内容である。

なお、本論文における研究成果は、本学大学院総合文化研究科の小宮山進氏（現本学名誉教授）、中島峻氏（現本学大学院工学系研究科）との共同研究であるが、論文の提出者が主体となって遂行したもので、論文提出者の寄与が十分であると判断できる。

したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。