

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 武田健太

半導体量子ドット中の電子スピンを用いた量子技術の研究は、従来 GaAs 系の量子ドットを用いて行われてきた。しかし、同系では Ga、As がもつ核スピンのためにコヒーレンスが乱れるという問題が深刻化しており、ここ数年、核スピンを持たない Si 系の量子ドットで置き換えようという研究が活発化している。一方、Si 系には、従来から電荷雑音が大きく、またバレー縮退がスピン操作に影響する、といった問題が指摘されていた。また、GaAs 系に比べると、量子ビット化の開発も遅れていて、まだ 1 ビットの実現に留まっていた。武田君の学位研究は、このような背景のもとにスタートしたもので、独自の工夫による安定な量子ドットの実現、スピン-バレー混合の影響の観測、世界最高速の Rabi 振動と 2 ビット化の達成など、充実した成果が得られている。

本論文は「Experimental investigation of spin qubits in Si/SiGe double quantum dots」と題して、Si 量子ドットの電子スピンを用いた量子ビットの実現へ向け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、GaAs 系、Si 系の量子ドットを用いたスピン量子ビットについて紹介した後、Si/SiGe 量子ドットの電荷雑音の抑制、電子スピン共鳴におけるバレー問題の解明、スピン量子ビットの実現、という本研究のシナリオが説明されている。

第 2 章は、量子ドットとスピン量子ビットの理論背景と研究状況を紹介している。単一、二重量子ドットの電気伝導特性、電子状態、電荷計とスピンプロケードを用いたスピンの検出、スピン量子ビットの操作と位相緩和問題、Si 量子ドットにおけるバレー縮退の影響などを丁寧に説明している。

第 3、4 章では、Si/SiGe 量子ドットの電荷雑音の評価と解消策の開発が述べられている。2次元電子ガスの面内を金属ゲートで閉じ込めて作られる量子ドットや量子ポイントコンタクトでは、電荷捕獲と放出の繰り返しによる低周波雑音が発生することが知られているが、Si/SiGe 系ではこの問題がとくに大きい。本研究では、上部全面電極を使って 2次元電子ガスの狭窄部分の電子密度を減らすことにより雑音を低減できること（3 章）、イオン化不純物無添加の Si/SiGe を用いて 2次元電子ガスをゲート電圧で誘起する方法で、さらに 1 桁近い改善ができること、その結果、電氣的に安定な少数電子を含む二重量子ドットが実現できたこと（4 章）が詳細に述べられている。以上は、本研究で開発した作製技術が、安定なスピン量子ビットを実現するうえで有用なものであることをよく裏付けている。

第 5、6 章では本研究の中心的成果が書かれており、5 章では電子スピン共鳴法によるスピン-1/2 のコヒーレント操作とバレーの影響、6 章ではスピン量子ビットの実現と性能評価の結果がまとめられている。

第5章では、微小磁石を備えた二重量子ドットを用いて、外部磁場とマイクロ波電場の印加により、2個のドットで独立な電子スピン共鳴ができること、その共鳴線と共存して、マイクロ波周波数のみに依存するバレー共鳴線が現れ、両共鳴線にスピン-バレー混合による反交差が生じることが示されている。とくに、スピン-バレー混合に関しては、2種類の初期状態準備の実験によって詳しく調べられている。第一は、零バイアスでスピン1重項(各ドットに電子1個)を選択的に初期化する実験で、スピン-バレー混合は同一のドットの電子に対してのみ起こることが実証されており、これを基に、バレー分裂の大きさが2つのドットで異なることが明らかにされている。このことは単一電子トンネル分光の磁場依存性の実験結果からも裏付けられている。他方は、有限バイアス下で複数の1, 3重項を初期化する実験で、1本のスピン共鳴線とこれと反交差する2本の周波数に依らない共鳴線が観測されている。この2本はいずれも同一のドットのバレー共鳴に因ると考えられるが、何故2本なのかという理由は分かっていない。また、スピン共鳴線が反交差の近傍を離れると見えなくなる、といった興味深い現象も観測されている。いずれも、スピン、バレーが共存する系特有の現象と考えられ、今後議論を呼びそうな話題といえる。

第6章では、前章のスピン共鳴の結果に基づいて、また、新しい初期化と単一ショット読み出しを工夫することにより、量子ビット化の実現を意味するRabi振動を達成したことが報告されている。Si/SiGeドット系で初めて2個のスピン量子ビットを実現し、さらに、従来を1桁近く上回る世界最高速度のラビ振動が実現されている。スピン量子ビットの分野に大きい波及効果を与える成果といえる。また、Ramsey干渉による位相緩和時間の決定、Hahn echoによるデコヒーレンス時間の下限値の推定など、量子ビットの性能の定量評価が注意深くなされている。

第7章は、本研究の結論であり、結果の要約と2ビットを用いた量子回路の構築、同位体制御のSiを用いた、より安定なスピン量子ビットの実現など、具体的な方針が述べられている。

以上述べたように、本研究は、雑音の小さい安定なSi/SiGe量子ドットを開発し、この二重量子ドットを用いて、2ドットのスピン共鳴を達成するとともに、スピン-バレー混合に関する新たな知見を得ている。さらに、同スピン共鳴を利用して、世界最高速のラビ振動と2スピン量子ビット化を達成している。これらの研究は信頼性、独自性ともに高く、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、量子固体物理、ナノ科学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。