

論文の内容の要旨

論文題目 Detection and control of electron spin states in multiple quantum dots (多重量子ドットにおける電子スピン状態の検出および操作)

氏名 伊藤 匠

近年、量子シミュレーションや計算に量子力学を利用するシステムが登場し、それと共に量子情報処理への社会的関心が日々高まっている。これらのシステムにおいて量子情報素子に用いられているのは超電導回路を用いたシステムであり、このシステムにおいては量子ビットの操作に必要となる1ビット・2ビット操作や読み出し、初期化などの諸条件が達成され、量子情報素子としての応用が可能となっている。その他の系として光学系を用いたものやイオントラップを用いたシステムでも諸条件量子情報素子としての応用が研究されている。

その中で我々が研究に取り組む半導体量子ドットは、電子を0次元的に閉じ込めた人工的な系であり、ドット中またはドット間での電子の相互作用が観測される。半導体量子ドットは、各ドットのエネルギー準位やドット間のトンネル結合を電氣的に制御できることから、電子スピンを用いた量子情報素子としての応用が期待されている。半導体量子ドットを用いた量子情報素子の特徴としては、まず固体系においては比較的長い数ミリ秒程度の情報保持時間を持っていることが挙げられる。次に、半導体微細加工技術の援用によって他の系と比較しても系の小型化・集積化が可能である点が挙げられる。系の拡張性および集積化は量子情報素子としての応用において重要であるとともに、多様な電子相関現象の観測が期待され、典型的なフェルミ-ハバード模型としての応用も検討・研究されている。

半導体量子ドット中に閉じ込められた電子スピンを用いた量子情報処理については様々な異なるスピン状態を用いて研究が進められている。特に、本研究で注目する1電子スピンを1量子ビットとして操作するスピン量子ビットにおいては、ユニバーサルゲート操作を構築する1ビット操作及び2ビット相関操作がそれぞれ電子スピン共鳴及び量子ドット間の交換相互作用を用いることで実現され、状態の初期化や読み出しについても様々な手法が確立されている。

実用的な量子情報素子としての応用を目指した場合、一つの目標とされるのは5量

量子ビット系である。量子情報処理では、ビット反転や位相誤りといった誤りが生じるためそれらを訂正する量子誤り訂正が必要とされる。3量子ビット系では1つの情報を持つ量子ビットに対して2つの余剰ビットを組み合わせることで上記2種類の誤りの内片方の補正が可能である。対して、上記の2種類の誤りを同時に補正するには最低でも5つの量子ビットが必要になることが理論研究によって明らかになっている。スピン量子ビットにおいては各量子ドットに閉じ込められた1電子スピンを1量子ビットとして扱うことから、5量子ビット系および五重量子ドットの形成が目指されている。

このような背景を踏まえて半導体多重量子ドットの分野では、操作手法の確立・改善に並行して、半導体量子ドット及びそれを用いたスピン量子ビット系の拡張が行われてきた。複数の量子ドットがトンネル結合した多重量子ドット系の作成においては、これまでに二重、三重、四重量子ドットの試料が作成され、互いに結合した多重量子ドットの形成及び内部の電荷状態の操作が実証されている。しかし過去の研究から単純に系を拡張するだけでは問題が生じ、技術的な改善が必要となることが判明している。一つは多重量子ドット内部の電荷状態の測定に関する問題であり、これまで用いられてきた多重量子ドット近傍に配置された量子ポイントコンタクトや単一電子トランジスタを用いた電荷計は、その近傍の2~3の量子ドットに関して電荷の移動を十分な感度で検出できていた。しかし四重以上の系においては、電荷計の感度が対象となる量子ドットとの距離に反比例することから、単一の電荷計では感度が不十分な箇所が生まれることが分かった。もう一つの問題は電荷状態の操作手法に関してある。多重量子ドットはいくつものゲート電極によって電気的にエネルギー準位や結合の操作が可能となっているが、各ゲート電極及び各量子ドット間に存在する静電容量的な結合によってその操作に混線が起り、多重量子ドットの調整や形成に関して困難になることがわかってきた。量子ドット中の電荷状態の操作は量子ビットとしての操作においても重要であり、不可欠な要素である。

本研究ではこれらの問題を解決すべく、試料形状と操作手法に改良を加えて五重量子ドットの形成に取り組み、その有用性について検証を行った。この構造では3つの量子ドットにつき一つの電荷計を設置するという単位構造を持ち、各単位構造を三重量子ドットとして操作・調整することで、操作の簡略化及び三重量子ドットでの操作手法の応用を可能にしている。作成した五重量子ドットの場合は線形配列した5つの量子ドットを中央の量子ドットを共有した2つの三重量子ドットに分割し、操作を行う。また電荷計を左右に1つずつ合計2つ設置し、その同時測定によって五重量子ドット全体の電荷遷移を検出し、五重量子ドットの電荷状態分布を計測した。また電荷状態の独立な操作手法として、複数の電圧を操作することで各パラメータを独立に操作するバーチャルゲート法に取り組み、そのパラメータ推定の自動化に取り組んだ。

また形成された多重量子ドットのスピン量子ビット化に向けた方向性として、これ

までに二重・三重量子ドットにおいて基本操作の実証が行われ、それらを用いた量子アルゴリズムの実証が行われてきた。これらを踏まえ本研究では四重量子ビットの量子ビットとしての応用を踏まえて、各ドットにおける単一スピン操作の実証に取り組んだ。スピン量子ビットにおける単一スピン操作には電子スピン共鳴 (Electron Spin Resonance : ESR) が用いられているが、それを実現する手法の一つとして微小磁石 ESR 法を今回は用いている。この手法では ESR を印加する交流磁場を、微小磁石が形成した局所磁場と交流電場を組み合わせることで実効的に印加する。この手法の利点として、交流電流などを用いないためジュール熱による雑音を避けられること、また微小磁石の形状によって手法の改善が可能であることが挙げられる。これまでに多重量子ドットにおける単一スピン操作に着目した微小磁石形状が考案され、それを用いて 100MHz 以上の 1 ビットスピン高速操作が実現され、三重量子ドットなどにおいても単一スピン操作が実証されている。しかし四重量子ドットにおいての微小磁石 ESR 法の有用性は明らかではなく、その有用性を確かめる意味でも同形状の微小磁石を備えた四重量子ドット試料を用いて実験を行い、最大で 5MHz の Rabi 振動を各ドットの電子において観測した。また微小磁石 ESR の共鳴条件から各量子ドットの形成位置や g 因子の推定を行い、1 ビット操作の更なる改善などについて検証を行った。また、四重量子ドットの 4 電子状態におけるスピン状態について数値計算による解析を行い、フェルミ・ハバード模型としての応用に関して検討を行った。その際、量子ドット間のトンネル結合の変化による基底状態の変化が起きることが予測され、その状態の変化を検出する手法について実際の四重量子ドットを用いて検証を行った。