

審査の結果の要旨

氏名 近藤 裕佑

量子ドット中の電子スピンは周囲にある無数の核スピンと超微細相互作用する。この両スピンは寿命が何桁も異なるため、相互作用のダイナミクスは難解な問題となっている。また、同ダイナミクスに関連して生じる核偏極の揺らぎは、電子スピンを量子情報の単位として用いるときに環境雑音として働くことが指摘されている。一方、2重量子ドットでは、2電子状態がスピン3重項のとき、パウリ効果によって電子のドット間移動が禁止される「スピン閉塞」が起こる。この3重項をスピン1重項と縮退させると、電子スピンと核スピンの1対1のフリップ-フロップ相互作用のレートが共鳴的に増大し、動的核偏極の増大を誘起することが知られている。

本論文は「縦型二重量子ドットにおける電子スピン-核スピン相互作用に関する研究」と題し、前記の共鳴励起を利用して核偏極のダイナミクスを解明することを目的として行われた。その中で、共鳴パルスの繰り返しによる強制核偏極、及び、繰り返しパルス励起後の核偏極の時間発展を測定するという独自の手法により核偏極ダイナミクスを特徴付ける現象を見出し、その結果を新しい数理モデルにより再現した、また同数理モデルに基づいて核スピン揺らぎの抑制法を提案し、核偏極のカオス的振る舞いの出現を予言したという結果について、論文提出者が行った研究がまとめられている。

論文は6章から成っている。第1章は研究の背景と目的の章で、GaAs系量子井戸、量子ドットにおいて観測されている、電子スピン-核スピン相互作用を介した動的核偏極、核スピンの揺らぎで誘起される電子スピンのデコヒーレンスなどを説明した後、本論文では、核スピンの動的偏極を定量的に評価し、それに適合する数理モデルを提案し、さらに、同モデルを基に核スピン揺らぎの抑制法を提案するという、研究のシナリオが記述されている。

第2章では、量子ドットの核スピン偏極について、従来の実験結果、及び動的核偏極の電氣的測定法が紹介された後、本研究の前提となっている、縦型二重量子ドットの報告（パウリ-スピンスロウダウン、そのリーク電流のヒステリシスとゆっくりした時間的振動、NMR法による核スピン偏極のコヒーレント制御など）、及び本研究で開発したポンプアンドプローブ法による核偏極のパルス励起と高分解での時間応答の測定法が説明されている。

第3章は、本論文の2つの中心的な成果の一つをまとめたもので、双方向核偏極を強制的に励起したときに発現する動的核偏極と数理モデルによる解析が述べられている。スピン閉塞領域には、互いに逆向きに核スピンを偏極させる

2つの共鳴点がある．この2点をパルス的に繰り返し入れ替えるという手法を用いて核偏極のダイナミクスを調べた結果、競合による急峻な偏極領域の遷移が起こる、また同遷移の終状態は偏極の初期値に対して確率的に変わるという現象を観測したこと、この様子が離散力学系の時間発展を記述するロジスティックモデルでよく記述できること、また同モデルに基づいて核スピン揺らぎの抑制法を提案し、また核偏極のカオス的領域への遷移を予測したことが説明されている．

第4章は、第2の成果である核スピン偏極の時間発展の解明に関して、ポンプアンドプローブ法を用いた実験結果をまとめたもので、片方の核スピン偏極動作点をパルス的に励起したとき、核偏極の時間発展がパルス励起の回数について閾値をもち、またパルス幅に関してマイクロ秒程度の小さい非周期の振動が現れることを初めて観測したことが述べられている．前者は3章の数理モデルで再現できるが、後者の説明には第5章で述べる新たなモデルを導入する必要があることが指摘されている．

第5章は、第4章の非周期振動を再現するための数理モデルを提案している章で、第3章とは異なる自励振動型の数理モデルが必要になることから、一定の遅延時間の後に系にフィードバックがかかるという、遅延微分方程式を導入することで実験結果が説明できること、この遅延時間は核スピンと電子スピンの相互作用時間、ドットの電子が入れ替わる時間などが相当すると考えられることが説明されている．また、過去に報告されている、スピントロニックドット電流の振動の磁場強度依存性や偏極ピーク形状の非対称性についても同様なモデルで定性的に説明できることが指摘されている．

第6章は、本研究における成果のまとめと今後の展望が述べられている．

以上述べたように、本研究は、縦型二重量子ドットにおいて、単一電子スピンとの超微細相互作用を介して核偏極を共鳴的にパルス励起するという独自の手法を用いて、核偏極ダイナミクスを定量評価し、その結果を新しい数理モデルで説明するとともに、核スピン揺らぎの抑制法を提案し、またカオス的核偏極の発現を予言したもので、研究の独自性、新規性ともに高い．得られた結果は、固体物理、スピントロニクス科学、スピン量子情報の進展に大きな寄与があったと評価できる．とくに電子スピンとの相互作用を介した核偏極のダイナミクスの物理と制御という新しい話題と問題を提起しており、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．