

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 金井 康

本論文は「Sidegate control of superconducting transport and spin-orbit interaction in InAs self-assembled quantum dots (サイドゲートを用いた自己形成 InAs 量子ドットにおける超伝導輸送とスピン軌道相互作用の制御)」と題し、InAs 量子ドットを介した超伝導効果と近藤効果の競合、およびスピン軌道相互作用の電圧制御に関し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、量子ドットを超伝導金属電極で挟んだ量子ドットジョセフソン接合と量子ドットのスピン軌道相互作用に関する研究の歴史的背景と意義を述べた後、ゲート電圧でドットの内部状態を変調することにより超伝導効果と近藤効果の競合、スピン軌道相互作用を制御するという研究主題の着想を説明し、これを踏まえて研究の具体的な課題設定を行っている。

第2章では、本論文の背景にある理論と従来の実験を紹介している。InAsドットの性質と量子ドットの電気伝導の簡潔な説明に続いて、量子ドットジョセフソン接合、近藤効果、スピン軌道相互作用を本論文の研究内容に即して説明している。

第3章では、アルミニウム金属電極とInAs量子ドットから成る量子ドットジョセフソン接合の試料と電気伝導測定の原理について述べている。とくにサイドゲートを用いて量子ドットの閉じ込めポテンシャルが異方的に変調できることを電子波動関数の計算で示し、これを基に量子ドットの内部パラメータ（電極・ドット間のトンネル結合の大きさ、エネルギー準位、波動関数の対称性）が電圧で可変であることを予想している。

第4―7章は本論文の中心的な章で、前の2章では超伝導効果と近藤効果の競合、後の2章ではスピン軌道相互作用とg因子の研究成果を述べている。

第4章では、まず磁場下の常伝導測定で観測した単一電子トンネル伝導のピーク（クーロンピーク）の幅とサイドゲート電圧の関係から、第3章の予想通り、電荷状態を保持したままゲート電圧をパラメータとしてトンネル結合の大きさが変えられること、これを利用してスピン1/2の近藤効果の特性温度（近藤温度）が変えられることを実証している。次に零磁場で超伝導効果、具体的には超伝導閾値電流とアンドレーフ反射を測定し、近藤温度と超伝導ギャップの比の値1.1を境にして、大きい側では超伝導効果の増大、小さい側では急激な減少を観測している。この違いは、奇数個の電子を持つドットのジョセフソン接合が通常は $\pi$ 接合であるが、近藤効果が強い場合には0接合に遷移することを示唆しており、本論文では、このことを別途作成した量子ドットスクイッドの量子干渉測定により直接確認している。超伝導-近藤効果の競合に関しては、過去にナノチューブの実験があるが、これは異なる試料、異なる電荷状態で測定した実験データを集めたもので、信頼性が不足していた。同一の試料、電荷状態で実験を行ったのは本研究が初めてであり、超伝導効果と近

藤効果という、固体電子系で代表的な二つのスピン相関の競合の物理の研究に信頼すべき実験を提供している。

第5章では、サイドゲートを使ってスピン3重項、3重項-1重項の縮退、1重項の間の状態遷移を実現し、これに伴って3重項状態から3-1重項縮退に近づくと近藤温度の増大、縮退点を超えて1重項状態になると急激な近藤効果の消失を常伝導測定で観測している。一方超伝導測定では、1重項状態では第4章と同様な0接合の超伝導効果、近藤効果が強い3-1重項縮退近傍ではそれを上回る超伝導効果、3重項状態により近づいて近藤温度が下がると超伝導効果の消失を観測している。このような1-3重項縮退から3重項状態へ向かう場合の変化は、超伝導ギャップと近藤温度の比で見れば、スピン1/2の近藤効果で見られた0から $\pi$ 接合への遷移に類似しているが、境となる比の値は0.68と小さいことが新たな知見として指摘されている。なお、第4、5章の結果は電子数の奇偶性に依らず、超伝導-近藤効果の競合が普遍的な現象であることを意味している。

第6章では、まず強磁場下で起こる近藤効果を利用してスピン軌道相互作用エネルギーを定量的に求める方法を提案、実験実証したことを述べている。強磁場下での近藤効果は、軌道が異なりスピンの反平行の2つの状態が縮退することに由来するが、スピン軌道相互作用が存在すると縮退はスピン軌道相互作用のエネルギー分だけ僅かに解ける。本実験は、このエネルギーを近藤ピークの分裂として観測したものでスピン軌道相互作用エネルギーの高精度の測定法といえる。さらに、同エネルギーはサイドゲートで変調できることを観測し、これがゲート電圧による波動関数分布の変調に因ることを議論している。

第7章では、クーロンピークの磁場依存性がゼーマン分離を反映することを利用してg因子を求め、続いてこのg因子が異方的であり、サイドゲート電圧で可変であることを確認している。ここでは、g因子に対するサイドゲートの影響として、第6章と同様に波動関数分布の変化を議論している。最後に観測したg因子の特性を利用してgテンソル変調による高性能のスピン量子ビットが実現できることを提案している。

第8章は、本研究の結論であり、結果の要約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、InAs自己形成ドットの内部状態を変調する方法としてサイドゲート電極法を開発し、これにより超伝導効果と近藤効果の競合現象、スピン軌道相互作用の大きさと異方性を系統的に制御することに成功したもので、実験手法、得られた知見ともに固体物理、ナノ科学の進展に大きな寄与があったと評価できる。また、これらの研究成果は、半導体量子ドットをジョセフソン接合エレクトロニクス、量子情報を含めたスピントロニクスへ応用する技術の基礎となるものであり、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。