

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 馬場翔二

超伝導体と半導体ナノ構造の接合デバイスの開発によって、従来のアンドレーフ反射、近接効果の研究分野にクーパ対分離、マヨラナフェルミオンなどの新しいテーマが登場してきた。とくに量子ドット、ナノ細線などの接合系では電子状態を電氣的に制御できることから、もつれ電子対源、トポロジカル量子計算といった量子情報への応用も期待されている。一方で、同接合系の物理にはまだ不明な点が多い。馬場君の学位研究では、このような背景を問題意識として、クーパ対分離電子のスピンの相関、分離効率の要因とトンネル過程などの解明がテーマとして取りあげられた。その結果、並列二重ドットジョセフソン接合を用いたクーパ対分離電子のスピンの相関の実証、並列ナノ細線の電子状態の電圧制御、並列ナノ細線-超伝導体接合におけるナノ細線近接効果に関係付けられるクーパ対分離の観測など、いずれも世界初となる充実した成果が得られた。

本論文は「Transport characteristics of superconductor-InAs dot/nanowire junctions」と題して、超伝導体と並列InAs二重ドット、並列InAs二重細線の接合系の電気伝導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、英語で執筆されている。

論文は8章からなり、第1章では、研究の背景と課題の章で超伝導体-常伝導体接合におけるアンドレーフ反射、クーパ対分離の研究状況、本研究の対象とする並列2重量子ドットと超伝導体接合の特徴と研究の狙い、最後に本論文の構成がまとめられている。

第2章では、単一、二重量子ドットの電子状態と電気伝導、及びクーロン相互作用に関して一般的な理論と実験例を紹介している。

第3章では、超伝導体-半導体ナノ構造の接合デバイスの物理、とくに交差アンドレーフ反射とクーパ対分離の概念、及びクーパ対分離効率の理論を実験例と比較して説明している。最後に、超伝導体とスピン軌道相互作用の強いナノ細線の接合で生成される、マヨラナフェルミオン、パラフェルミオンの提案と実験が紹介されている。

第4-7章では本研究の中心的成果が書かれており、4、5章ではクーパ対分離電子のスピンの相関の観測、6章では二重細線の電子状態制御、7章では超伝導電極下部のナノ細線領域を介したクーパ対分離トンネルの観測の結果がまとめられている。

第4章では、Al超伝導体-二重ドットのジョセフソン接合においてクーパ対分離トンネルによる超伝導電流を観測し、これが分離電子対のスピン1重項の保存を意味することを説明している。実験では、2つのドットの静電ポテンシャルを独立に電圧制御し、両ドットが同時に共鳴している場合にのみ分離トンネルによる超伝導スイッチング電流の増大が観測されている。クーパ対が分離した電子対のスピンの相関は従来不明であったが、この実験で初めて検証された。

第5章では、前章のAlにかわりNbを超伝導体電極に用いた実験を説明している。Nbの大

きいギャップを反映して、大きいスイッチング電流、高い臨界磁場が観測されている。クーパ対分離トンネルによる超伝導電流の生成は前章ほど明瞭ではないが、定性的には同様な結果が得られている。Nbは材料的に数10ナノメートル以下の微細な構造を作ることが難しいことが知られており、本章の成果はNb超伝導体-ナノ構造ジョセフソン接合の発展を促す有意義な成果といえる。

第6章では、並列二重ナノ細線の2端子常伝導特性を調べ、二つの細線の電子状態の独立な電圧制御が可能であること、隣接した細線間の容量結合を反映する特性が見られることを述べている。二重ナノ細線の実験は前例がほとんどなく、本章の結果は、その電子状態制御の知見として、また第7章の実験の前提として重要である。

第7章では、二重細線の片側に共通のAl超伝導体の電極、反対側に個々の細線に独立な常伝導体の電極をもつ接合デバイスを作製し、Al電極の端、Al電極下の細線部分の2つの経路を介した電気伝導を観測したこと、後者の経路で二重細線への効率的なクーパ対分離を観測したことを述べている。このクーパ対分離効率の議論において、Al電極直下にある細線の近接超伝導領域を介することで、効率の良いクーパ対分離トンネルが起こることが指摘されている。近接超伝導領域の交差アンドレーフ反射の寄与を裏付ける初めての実験であり、超伝導-ナノ構造接合の分野に大きい波及効果を与えるものと期待される。

第8章は、本研究の結論であり、結果の要約と並列二重InAs細線、並列二重InAsドットと超伝導体の接合におけるクーパ対分離を中心として、研究の成果と今後の方針がまとめられている。

以上述べたように、本研究は、並列二重InAs細線、並列二重InAsドットと超伝導体の接合デバイスを新たに開発し、クーパ対分離電子のスピンの実験検証、並列二重細線の電子状態の制御、近接超伝導領域を介した効率の良いクーパ対分離の観測など、超伝導体-半導体ナノ構造接合の技術と物理の分野において優れた成果をあげている。これらの研究は独自性が高く、また実験手法には様々な工夫が盛り込まれている。アンドレーフ反射、交差アンドレーフ反射の制御技術と物理、ナノ構造の量子物理、非可換粒子の生成技術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。