

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 上田 健人

本論文は「Superconducting transport phenomena in ballistic nanowire Josephson junctions (弾道的ナノ細線ジョセフソン接合における超伝導輸送現象)」と題して、Al-InAs細線-Al接合の超伝導特性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。

典型的なトポロジカル粒子であるマヨラナ粒子は、高い誤り耐性をもつ量子計算を可能にする。s波超伝導体とスピン軌道相互作用の強いナノ細線の接合は、同粒子を生成できる最も現実的な系であり、磁場を印加してトポロジカル遷移を起こすと接合端にマヨラナ束縛状態が出現する。しかし、磁場印加は超伝導を不安定化することから、クーパー対分離の現象を利用して無磁場化する方法が提案されている。超伝導体に並列二重細線を接合した系では、各細線にクーパー対が分離する。この分離エネルギーを利用することで、無磁場でトポロジカル状態を作ることができる。しかし、二重ナノ細線に対する超伝導接合の研究はまだ始まったばかりの状況にあった。本学位研究では、このような背景のもと、弾道的な二重ナノ細線ジョセフソン接合の作製技術開発から着手して、二本の細線へのクーパー対分離に初めて成功し、さらに同分離効率をゲート電圧により制御して最大化することにより無磁場でマヨラナ粒子を発現させる状況が作れることを確認した。次に、マヨラナ粒子の検証実験として、交流ジョセフソン効果のシャピロステップ測定に取り組んだ。しかし、弾道的ナノ細線での実験例がなく、また通常とは異なる振る舞いが予測されることから、基盤実験として弾道的な単一ナノ細線の実験を行い、その結果半整数のシャピロステップを観測し、これが弾道的ジョセフソン接合に特有の電流一位関係で説明できることを明らかにした。マヨラナ粒子の検出には至っていないが、弾道的ナノ細線における交流ジョセフソン効果の物理、また同検証実験で前提とすべき重要な知見を提供している。

論文は7章からなり、第1章では研究の背景と動機、ナノ細線-超伝導体接合におけるマヨラナ粒子の物理を説明した後、弾道的な二重ナノ細線のジョセフソン接合によるクーパー対分離の観測とその電氣的制御、弾道的なナノ細線のジョセフソン接合における特異なシャピロステップの観測という本研究の主たる成果の概要と意義がまとめられている。

第2章では、本研究に関連する理論的背景と先行研究をまとめており、常伝導体-超伝導体接合におけるアンドレーエフ反射と二重量子ドットのクーパー対分離、ジョセフソン接合のアンドレーエフ束縛状態と交流ジョセフソン効果などの現象を説明した後、マヨラナ粒子の物理と研究状況、そして二重ナノ細線の超伝導接合におけるマヨラナ粒子の理論が紹介されている。

第3章では、ナノ細線の電気伝導に関する従来の報告をまとめており、弾道的なナノ細線の電気伝導、ナノ細線ジョセフソン接合の超伝導電流、そして、ナノ細線-超伝導体接合を

用いたマヨラナ束縛状態の観測例が紹介されている。

第4章では、本研究で用いた弾道的ナノ細線ジョセフソン接合の試料作製を説明しており、ナノ細線の選別から超伝導電極の形成、微小なゲート電極の形成にいたるプロセスが詳しく述べられている。

第5、6章では、本学位研究の中心的な成果が書かれている。第5章では、二重 InAs ナノ細線のジョセフソン接合を用いて、まず常伝導条件において各細線の弾道的電気伝導とゲート電圧による伝搬モード数の可変性を確認した後、超伝導条件において超伝導電流を観測し、ゲート電圧や磁場を利用してクーパー対分離の寄与を識別できることが述べられている。さらに、ゲート電圧で伝搬モード数を変えると、各細線のモードが単一のとき分離効率が最大になり、このとき無磁場でのマヨラナ粒子生成の条件が満たされることを確認している。これらの結果は、安定なマヨラナ粒子生成の実現性を示唆するもので、当該分野に大きいインパクトを与えている。

第6章では、マヨラナ粒子検出実験の基盤技術として、弾道的な単一 InAs ナノ細線ジョセフソン接合のシャピロステップの観測を説明している。通常と異なり、半整数のシャピロステップを観測したこと、その温度依存性、超伝導接合界面の透過率依存性などの測定結果を理論計算と比較することにより、すべての実験結果は弾道的ナノ細線に特有の電流一位相関係を考えて矛盾なく説明できることを述べている。これらは、弾道的ナノ細線における交流ジョセフソン効果を初めて実験により実証したものであり、また、ナノ細線のジョセフソン接合を用いたマヨラナ粒子の観測実験で注意すべき重要な知見を与えている。

第7章では本学位研究で得られた成果と、それを踏まえて、マヨラナ粒子の生成と検出に向けて行うべき今後の研究展開をまとめている。

以上述べたように、本研究は、無磁場でのナノ細線-超伝導体接合によるマヨラナ粒子の観測を最終目標として、生成条件の可否の解明と検出技術の開発を目指して行われたもので、弾道的な二重 InAs ナノ細線ジョセフソン接合の実現、高効率なクーパー対分離の実現と無磁場でのマヨラナ粒子生成条件を満たすことの確認、弾道的ナノ細線ジョセフソン接合における半整数シャピロステップの観測と弾道的接合に特有の電流一位相関係を仮定した理論計算による解析など、ナノ細線ジョセフソン接合の基礎物理に関して重要な成果をあげており、またトポロジカル超伝導体の研究にも有用な知見を提供している。これらの結果は注意深い試料作製、超伝導電流測定と理論解析に基づいて得られたものであり、意義・独自性ともに高い。本研究は、半導体ナノ構造の超伝導体接合の物性、トポロジカル粒子生成の基礎物理と技術の進展に大きな寄与をしており、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。