

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 高田 真太郎

本論文は「量子干渉計における電子のコヒーレント制御と位相測定」と題し、GaAs/AlGaAsヘテロ構造を用いて作製した2経路干渉計と飛行量子ビットの制御、及びこれを用いた量子ドットの伝播位相の精密測定、そして表面弾性波で駆動される飛行量子ビットについ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。

論文は7章から成っている。

第1章では、初めに半導体ヘテロ構造における量子干渉系を用いた位相測定に関する意義と歴史的背景、及び半導体量子情報処理に関する取り組みを概観し、現状の課題を明確にしている。続いて、その課題を踏まえて真の2経路干渉計を実現することの意義を述べ、具体的な課題設定を行っている。

第2章では、本論文の内容を説明するために必要な理論的背景、特に量子細線、トンネル結合した量子細線、量子干渉系、量子ドットの電気伝導について説明した後、主題である量子ドットの伝播位相や表面弾性波による電子輸送について紹介している。

第3章から7章までが本論文の中心で、研究の成果が説明されている。

第3章では、アハロノフボームリング（ABリング）とトンネル結合量子細線を組み合わせた量子干渉系において真の2経路干渉を実現した実験について説明している。結合細線におけるトンネル結合が強い場合には、ABリングを複数回周回する経路の寄与によって電気伝導が“位相剛性”と呼ばれる制約を受け、各経路における伝播位相の変調が測定に掛からない。一方で、トンネル結合が弱い場合には、ABリングを周回する経路による寄与を抑えて2経路干渉を実現できる。これは、合計電流が干渉によって変動しない、2つの出力端子における逆位相の電流振動の観測によって証明されている。また、ABリングの一方の経路における伝播位相をゲート電圧によって変調すると、それに応じて観測される干渉の位相が期待通りに変調されることが確認されている。この2経路干渉の実現は、次章以下で説明される実験を可能にした意義のあるものである。

第4章では、2経路干渉計を伝播する電子がどちらの経路に存在するかによって飛行量子ビットを定義し、一量子ビット操作を実現した実験を説明している。トンネル結合の強さとABリングの各経路における伝播位相をゲート電圧によって制御することによって、任意の一量子ビット操作が可能であることが示されている。また、コヒーレンス長が大きく、設計自由度が高くて集積しやすいことから、その有望性について議論している。

第5章では、2経路干渉計を用いた近藤位相シフトの観測実験を説明している。まず、温度 $T$ が近藤温度 $T_K$ に比べて小さい場合には、近藤効果に寄与する軌道に対応する2つのクーロンピークを跨ぐ位相変化が各々 $\pi/2$ となることが示されている。この結果は、近藤基底状態がスピン一重項であることの直接的な証明である。また、 $T > T_K$ では各クーロンピークを

跨ぐ位相変化が $\pi/2$ を超え、近藤効果がない場合の位相変化 $\pi$ に近づく。一方、2つのクーロンピークの間（近藤谷）でゲート電圧の関数として生じる位相変化の $\pi/2$ のプラトーは、 $T \sim T_K$ において最もはっきりと見られる。これは、局在準位と近藤共鳴準位の混成によって説明される。また、 $T > T_K$ での位相の変化は近藤谷の中心に対して非対称となるが、これは隣り合う準位の軌道のパリティの関係によるものである。これらの実験結果は、数値繰り込み群による計算結果とも良く対応しており、位相測定が高精密で行われたことを示している。この章で示された結果は、近藤効果の本質とされる位相シフトの問題を初めて実験的に明らかにしたものである。

第6章には、電子数の比較的多い量子ドットにおける伝播位相の測定結果が示されている。電子が量子ドット内の単一準位を伝導する場合には、隣り合うクーロンピークの間で位相が $\pi$ 跳ぶかどうかは、軌道のパリティ関係によって決定される。本章では、量子ドット内の準位間隔よりもリードとの結合の方がわずかに強く、電子が量子ドット中の複数の準位を同時に伝導する場合の位相の振る舞いについて実験結果が示されている。クーロンピーク間で位相が必ず $\pi$ 跳ぶという“ユニバーサルな”振る舞いが報告された先行研究とは対照的に、軌道のパリティを反映して、位相が跳ぶ場合と跳ばない場合の両方が観測されている。位相の跳びと軌道のパリティとの関係を精密な測定によって正確に評価した例はこれまでなく、量子ドットを介した散乱問題の理解を助ける重要な結果である。

第7章では、空乏化したトンネル結合量子細線において表面弾性波を用いて飛行量子ビットを駆動し、その状態を制御する実験を説明している。トンネル結合の大きさを制御することによって出力電流が振動する様子は、細線間のコヒーレント振動と解釈されている。現状では干渉の可視度が40%に留まっているが、後方散乱や電子間相互作用によるデコヒーレンスが抑制されることを根拠に、その将来性が議論されている。この飛行量子ビットが高忠実度で制御できるようになれば、量子電子光学実験という新たな研究分野の開拓へと展開できる。

以上述べたように、本研究は、独自に開発した2経路干渉計を用いてコヒーレントに伝導する電子の波動関数の位相を高精度で抽出し、飛行量子ビットの制御、近藤位相の観測と解明、量子ドットの伝播位相の精密な測定を実現したものである。研究成果は、位相を通じて散乱問題の多くを明らかにしただけでなく、伝播する電子を用いた量子光学的な実験という新たな分野の開拓や、それを用いた量子情報処理の研究に大きく寄与するもので、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。