

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 伊藤 諒

本論文は「Quantum mechanical electron transport driven by surface acoustic waves (表面弾性波に駆動された電子の量子的伝導)」と題して、GaAs半導体中の量子回路において表面弾性波によって駆動される電子の量子力学的な振る舞いを調べた研究の成果をまとめたものである。

最近、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造の二次元電子系を加工して形成される量子回路を伝搬する電子を用いた量子光学的な実験が注目を集めるようになった。このような実験は「量子電子光学実験」とも呼ばれ、電子波の位相測定、多彩な単一電子源、フェルミ統計の検証実験などが実現されている。中でも、空乏化した量子回路中で、表面弾性波によって動く量子ドットに電子を1個単位で閉じ込めて行う量子電子光学実験は、伝搬する単一電子を周囲から孤立させて制御するというユニークなものである。しかし、表面弾性波を用いた実験は技術的な難易度が高く、伝搬する電子の量子操作はほとんど実現していない。

本学位研究は、表面弾性波によって駆動される電子の量子力学的な挙動の多くを初めて明らかにしたものである。まず、2本の空乏化した伝送チャネル(量子細線)を並列に並べたトンネル結合チャネルにおいて、表面弾性波に駆動される電子が、チャネル間を量子力学的に振動する「コヒーレント振動」の様子を初めて観測した。実験結果は、電子が動く量子ドット中の多数の準位を占有するため単純ではないが、数値計算の結果と良い整合性が得られている。干渉の可視度(電流のうちの干渉による振動成分を全電流で割ったもの)が低いという問題があるが、これはデコヒーレンスによるものではなく、結合チャネルに入る前に、電子が動く量子ドット中の基底状態に落ちていないことが要因であると結論している。また、詳細はまだ完全に理解されていないが、動く量子ドットからこぼれ落ちてホットエレクトロンとして伝導する電子による干渉と思われる実験結果を得ている。本研究では、スピンを対象とした実験も行っている。動く量子ドット中の2電子を別のチャネルへと分離させる電子対分離を実現し、これを利用したスピンの非局所量子もつれの検証実験を提案している。

論文は6章から成り、第1章では表面弾性波を用いた量子電子光学実験を紹介し、本学位研究の動機と概要を説明している。第2章では、GaAs/AlGaAsヘテロ構造の二次元電子系における表面弾性波による電気伝導に関して、本研究の背景となる技術や知識を説明している。第3章以下が本学位論文研究の成果に当たる内容となっている。

第3章では、表面弾性波に駆動される電子のトンネル結合チャネルにおける「コヒーレント振動」に関する研究成果を紹介している。まず、実験で使用されたデバイスのポテンシャル形状の計算を基に、電子状態の時間発展の数値シミュレーションを行い、実験で予想される電流信号を示している。続いて実験結果を示し、数値計算との整合性を基にチャネル間の

コヒーレント振動を実証している。また、干渉の可視度の低さについて、干渉信号の温度依存性の測定結果を示し、デコヒーレンスによるものではなく、結合チャネルに入る前に電子が動く量子ドット中の基底状態に落ちていないことが要因であるとの推測を行っている。

続く第4章では、前章の内容を引き継ぎ、結合チャネル部分まで導入された動く量子ドット中の軌道の占有度を調べた実験結果を紹介している。実験では、動く量子ドットが通るチャネルの横に電極が取り付けられた構造を用い、電極へのトンネル確率が軌道準位に依存することを利用して進行方向と垂直な方向の軌道自由度の占有について調べている。トンネル電流に関する実験結果をWKB近似を基にしたフィッティング関数で解析することにより、実際に電子が多数の軌道状態を占有している様子を明らかにしている。この結果は、前章における干渉の可視度の低さの要因を直接示すものとなっている。

第5章では、第3章と類似のデバイスで観測された可視度の高いトンネル振動の実験結果を紹介している。この振動が現れるかどうかは、トンネル結合チャネルの導入部分におけるポテンシャル変化の大きさに依存しており、動く量子ドットに閉じ込められた電子が、トンネル結合領域で量子ドットの束縛を逃れてホットエレクトロンとして伝導、干渉した可能性を議論している。

第6章では、表面弾性波を用いた量子電子光学実験の応用例の一つとして、スピンの非局所量子もつれ状態の生成と検証の実験を提案している。ここでは、まず2電子を表面弾性波によって動く量子ドットの基底状態（スピン一重項）へと導入する新しい初期化方法が提案され、続いて電子対の分離、各電子スピンの操作、スピン状態の測定によって量子もつれの検証を行うとしている。そのうち最も重要である、動く量子ドット中の2電子を別のチャネルへと分離させる電子対分離については、実験の結果が示されている。約87%という高い効率での電子対分離が報告されている。

以上の研究成果は、表面弾性波を利用した量子電子光学実験のブレイクスルーであり、同実験の有用性を初めて実証した独創性と学術的価値が高いものである。表面弾性波による量子電子光学実験の有利な点は、単一電子源と単一電子検出の手法が既に高い精度で確立していること、伝送される単一スピンの操作が実現していることである。本研究の技術開発によって、表面弾性波によって伝導する電子の軌道やスピン、あるいはそれによって定義される電子の飛行量子ビットを、デコヒーレンスの影響を受けずに高い精度で制御できる可能性が初めて示されたことは、物理工学分野の大きな進展である。

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。