

氏名	田口 真彦
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博甲第 7654 号
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	Theory of quantum phase manipulation in semiconducting and superconducting nanostructures (半導体および超伝導体ナノ構造における量子位相操作の理論)

主査	筑波大学教授	博士(学術) 都倉康弘
副査	筑波大学教授	博士(理学) 岡田晋
副査	筑波大学教授	工学博士 初貝安弘
副査	筑波大学教授	工学博士 大野裕三
副査	産総研主任研究員	博士(工学) 川畑史郎

論 文 の 要 旨

半導体や超伝導ナノ構造では電子やクーパー対の波動関数の性質がアハラノフ・ボーム効果、ジョセフソン接合における超伝導電流等に顕在化する。これらの現象を引き起こす波動関数の位相はハイゼンベルグの不確定性関係により電荷と相補的な関係にある。従来ゲート電圧を用いた電荷制御により微細構造中の波動関数の位相を制御する研究が活発に行われて来た。本論文では逆に位相を時間的あるいは空間的に操作することにより、電荷を制御する可能性に着目した。半導体や超伝導ナノ構造において位相操作とその影響について理論的に明らかにする事が本論文の目的である。

(1) 量子ドット系におけるトンネル位相に着目した量子断熱ポンプ

量子断熱ポンプとは、制御パラメーターのいくつかを断熱的かつ周期的に変調することにより、バイアスゼロでも電子が電極間で輸送される現象である。本研究では量子ドット系の制御パラメーターの1つとして量子位相を選び、2つのモデル (a) 直列二重量子ドット、(b) リング状三重量子ドット、において量子断熱ポンプを解析した。もう1つ系のパラメーターは量子ドットの量子準位のエネルギーに選び、散乱行列による方法でポンプ電荷の解析的な表式を得た。位相ではない系のパラメーターを変調させた従来研究では、一周あたり誘起される電荷量は有限値に留まっていたことと対照的に、本モデルによるポンプ電荷は変調させる位相の振り幅と共に大き

くできる、ということを明らかにした。また、3つの量子ドットからなる系ではポンプ電荷が位相（磁束）の振幅の関数として段階的に変化するところを見いだした。

(2) 一次元超伝導システムにおける量子位相操作

ジョセフソン効果は荷電エネルギーとジョセフソンエネルギーで特徴付けられる。最近ジョセフソン効果に双対な量子位相滑り(QPS)現象が電流標準などの応用面からも注目されている。QPSでは均一な超伝導細線ループなどによる大きな外部インダクタンスで電荷揺らぎを抑える手法が取られる。不確定性関係から電荷の揺らぎが押さえられると、位相の揺らぎが支配的になり、これがジョセフソンエネルギーの繰り込みを引き起こすことが示された。本研究では、この結果を拡張し不均一な超伝導細線ループの効果を調べた。ループの誘電率 ϵ と断面積 S を空間的に（波数 k と相対振幅 l で）周期変調させることにより、ループの内部自由度の微分方程式を得た。摂動論とWKB近似を適用領域に注意し組み合わせることにより解析した結果、ジョセフソンエネルギーの繰り込みは均一な場合と異なる事を明らかにした。同様な解析を位相滑りの速度に関しても均一な超伝導ループとの違いを示した。

審 査 の 要 旨

[批評]

本論文は半導体及び超伝導体微細構造において、外部から時間的・空間的に位相を制御する事により断熱電荷ポンプや量子位相滑りの様な電荷特性が制御できることを理論的に明らかにしたものである。断熱ポンプの研究では、位相変調により大きなポンプ電荷や階段状の特性が得られる事を初めて示した。また超伝導接合に接続された超伝導細線ループを空間的に変調させることにより、ジョセフソンエネルギー、量子位相滑りレートを見積もった結果は全く新しいものであり、この系の基礎物性が構造制御により操作可能である事を示した点で学術的価値が高い。以上の点から、本論文は博士（理学）に相当するものである。

[最終試験結果]

平成 28年 2月 15日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

[結論]

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。