

(論文内容の要旨)

メゾスコピック系とは電子のコヒーレンス長、フェルミ波長などの電子系を特徴づける長さが素子の大きさと同程度の系であり、そこでは電子の粒子性と波動性を反映した特徴的な量子輸送現象が現れる。メゾスコピック系において電子を精密に制御することで、革新的な量子情報技術を実現しようという試みが世界中で活発になされている。本研究はメゾスコピック系における量子輸送現象を“雑音測定”によって調べ、電気伝導度測定では得られない電子の微視的情報を得ることを目的としたものである。

ショット雑音は試料に電流を流したときに生じる代表的な非平衡雑音であり、試料における電子の散乱によって引き起こされる。ショット雑音はメゾスコピック素子における電子のダイナミクスを調べるためのツールとして、近年になって大きな注目を集めるようになってきている。しかしながら極低温における高感度のショット雑音測定は非常に新しい技術であり、通常の電気伝導度測定と比較して技術的に困難が伴うため、メゾスコピック素子でショット雑音の測定に成功したという報告は世界的に少ない。そこで本研究では雑音測定系の開発に取り組み、極低温環境（100 mK 程度）において高い測定感度（ $\sim 10^{-29} \text{ A}^2/\text{Hz}$ 程度）を有する雑音測定手法を確立した。この測定系を用いて最も基本的なメゾスコピック素子である量子ポイントコンタクト (QPC) の雑音特性を調べたところ、測定結果は理論とよく一致し、この測定系が十分に信頼性の高いものであることが確かめられた。

ところで、2つのメゾスコピック素子が静電的に結合した系において、ショット雑音が素子間における量子相関の原因となる場合や、一方の素子で生じるショット雑音が他方の素子中での電子のデコヒーレンスの原因となる場合があることが知られている。本研究では後者の擾乱としてのショット雑音に注目し、2つの QPC が互いに結合した系において、一方の QPC で生じるショット雑音が他方の QPC に影響を与える様子を、雑音測定によって直接的に評価した。結合型 QPC において一方の QPC でショット雑音が生じると、他方の QPC においても雑音の増大が観測された。これは雑音源の QPC のショット雑音が検出器の QPC に伝播し電磁場環境を乱す程度を、雑音の増大として定量的に評価できることを示す結果である。この実験では、雑音源である QPC のショット雑音の高周波成分が QPC 間のキャパシタンス成分を介して検出器である QPC に伝わり、その周辺の 2 次元電子系に吸収されることによって、その電子温度（熱雑音）を増大させている。これは雑音源で生じた高周波のショット雑音が一種の“熱”として検出器に伝わり、その熱雑音を増大させたと考えてよいということを示す。すなわち、メゾスコピック系においてショット雑音源は局所的な“熱源”とみなすことができ、またショット雑音を受け取る側の QPC は局所的な“熱量計”とみなすことができる。以上のように、本研究ではショット雑音が周辺に対して与える擾乱を、“雑音温度”として定量的に定義し、測定することができるということを示した。

(論文審査の結果の要旨)

半導体メゾスコピック系は量子力学の実験的検証・制御を行うための理想的な系であり、そこでの量子輸送現象は大きな注目を集めている。本論文は半導体メゾスコピック系に対する輸送現象測定に“雑音測定”という新しい輸送現象測定手法を提案し、その有用性を実験的に検証したものである。メゾスコピック系における量子雑音は量子効果によって古典系では見られない特徴を示すものであり、量子雑音の測定は通常の時間平均した測定では得られない情報を取り出すためのツールとして、近年、大きな注目を集めるようになってきているものである。

半導体メゾスコピック系における輸送現象は、一般にそのエネルギースケールが小さいため、それを実験的に研究するためには極低温における精密な電気測定が必要である。従って、その量子雑音を測定するためには低温技術と雑音測定技術を組み合わせる必要があること、またエネルギースケールの小さな現象を検出できるほど十分に雑音測定の精度と感度が高いことなどが必要であり、技術的な困難が大きく、これまでに十分に測定手法が確立されていたとはいえなかった。本論文の研究は、これらの技術的課題を希釈冷凍機中に自作のLC共振回路、および増幅回路を実装することで解決し、世界有数の測定精度を持つ雑音測定系の確立に成功している。またこの雑音測定の手法を実際のメゾスコピックデバイスに対して適用し、その測定された雑音が理論や過去の実験と良く一致することも確認しており、その信頼性の検証も十分になされている。

さらに本論文では、2つのメゾスコピック系が静電的に結合した系に対して上記の雑音測定を行い、静電的な結合がデバイス間の雑音に相関をもたらすことを確認している。メゾスコピックデバイスの結合系は、電子系における新しい量子力学的相関を検証するために最適な系であるとして、近年大きな注目を集めている。本研究で検証された雑音相関は、このような結合系におけるメゾスコピックデバイス間に生じるエネルギーの流れを定量的に評価したものであり、基礎研究として非常に重要であるだけでなく、基板上に局所的に配置された超高精度の“熱源”および“熱量計”を提案したものとして応用的観点でも高く評価される。またこの結果は、このような結合系に対しても本研究で開発された雑音測定手法が非常に有効な手法であることを実証している。これは、結合型メゾスコピック系における量子輸送現象という新しい分野を切り開くための第一歩として位置づけられる。

以上のように、本研究の成果は学術的、技術的に大きな意味を持っており、量子輸送現象の研究分野に多大な貢献をしたものである。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行なった結果、合格と認めた。