学位論文題名

半導体ヘテロ接合における二次元電子系の電子輸送理論

学位論文内容の要旨

近年、二次元電子系の研究対象として、また微細加工により微小な構造を作製できる系として半導体ヘテロ接合が注目されている。本研究は特に $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs ヘテロ接合における二次元電子系の電子輸送の理論的研究というテーマで、マクロスコピックな系とメゾスコピックな系という2つの異なった領域での電子に対する散乱メカニズムの特性を明らかにすることを目的として行われたものである。本論文は全6章から構成される。以下に各章の内容を概説する。

1章は序論に当てられ、本研究の目的が述べられる。すなわち、まずマクロスコピックな系における電子の散乱メカニズムとして、特に電子・音響フォノン散乱を取り上げ、変形ポテンシャル結合の特質を電子移動度、電子エネルギー損失率、熱電能といった量の実験データを理論と比較することにより明らかにする。最近の微細加工技術の進歩は電子の非弾性散乱長よりも短い系を作ることが可能にしたが、このような系はメゾスコピック系と呼ばれ、新しい輸送領域として注目を集めている。メゾスコピック系の中にも2つの輸送領域があり、1つは不純物などにより電子が頻りに散乱を受ける拡散領域、もう1つは電子が散乱を受けずに弾道的に運動するバリスティック領域である。本研究ではバリスティック領域における熱電能のふるまいを明らかにすることを目的とする。

2章では $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs ヘテロ接合における電子移動度及び電子エネルギー損失率の解析から変形ポテンシャル定数 D の値を求める。二次元電子ガスは GaAs 層側にあり、 D の値はバルク GaAs のものと同じと考えられるが、これまでの研究の多くはバルク GaAs の $7 \sim 8\text{eV}$ よりかなり大きな $11 \sim 16\text{eV}$ という値を主張している。この導出は、イオン化不純物散乱の寄与は温度依存性をもたないという仮定に基づいて、低温における移動度の温度依存性の解析から行われていた。しかし、電子系が強く縮退していない限りこの仮定は成り立たない。一方、低温での電子エネルギー損失率も調べられ始めている。エネルギー損失率にはイオン化不純物散乱のような弾性散乱は関与しないので精度良く D の値を

得ることができると期待される。解析結果には用いた電子包絡関数やスクリーニング因子の取り扱い方が影響する。そこで包絡関数としては従来用いられていた関数を拡張した、より現実的な関数を用いた。スクリーニング因子の取り扱い方に関しては、短距離型の相互作用である変形ポテンシャル結合に対するスクリーニング因子の妥当性を実験データとの比較から判断するという立場をとった。比較の結果、スクリーニング因子は長距離相互作用であるピエゾエレクトリック結合に対しては必要だが、短距離相互作用である変形ポテンシャル結合に対しては不適當でむしろ入れない方が良いことがわかった。この取り扱いをすると結合定数はバルク GaAs のものと同じになり、バルクとヘテロ接合の間で結合定数に違いはないという結論に達した。

3章では熱電効果を議論の対象とし、特に熱電能を取り上げる。熱電能には電子拡散による寄与とフォノン・ドラッグによる寄与があるが、低温では後者が支配的である。このため低温での熱電能は電子・音響フォノン相互作用のふるまいを調べるのに適した量である。この章では2章と同様の観点からフォノン・ドラッグ熱電能の解析を行った。解析にはフォノン・ドラッグ熱電能に対する Cantrell と Butcher のモデルを用い、温度依存性及び電子濃度依存性に関して実験データとの比較検討を行った。その結果、電子・音響フォノン相互作用結合定数とスクリーニング因子の取り扱い方に関して2章と同様の結論が得られた。

4章ではまずメゾスコピック系で発見された興味深いいくつかの現象を簡単にレビューする。拡散領域では普遍的コンダクタンスゆらぎと Aharonov-Bohm 効果を、バリスティック領域では十字型細線でのホール効果の消失と負の曲がり抵抗を実験データを中心に説明する。次にメゾスコピック系の電子輸送を議論する際に大変有用な多端子系の Landauer-Büttiker 公式を Büttiker の議論に基づいて導出し、さらにその公式を温度差がある場合に拡張する。Landauer 公式あるいは Landauer-Büttiker 公式を線形応答理論から導き出す試みは 80 年代の初めから行われている。本論文ではこれらの導出を温度差がある場合に拡張する。温度差があるときの電流及び熱流を線形応答理論から導出する場合には、温度勾配を直接摂動項に取り込むことができないために電気伝導度を求めるときとは別の困難が存在する。ここでは温度勾配を重力場に置き換えて導出する Luttinger の方法を採用した。得られた結果は Büttiker 流の導出法で求めたものと同じである。最後にポイントコンタクトにおけるコンダクタンスの量子化を議論する。この現象はポイントコンタクトのくびれ幅を変えていくと、くびれを通る電子のコンダクタンスが $2e^2/h$ を単位として変化するというものである。本章では次章との関連から断熱近似と WKB 法を用いた理論について詳しく説明し、量子

化されたコンダクタンスに対する補正項を議論する。

5章ではポイントコンタクトにおける熱電能のふるまいを議論する。バリストティック電子に対する熱電能はまず理論的に調べられ、この結果、くびれ幅の関数として振動し、そのピーク値が試料や温度によらない値に量子化されることが予想された。その後、この予想をほぼ確認したと思われる実験が行われた。測定方法は細線の両側面に異なった2つのポイントコンタクトを介して二次元電子系をつなげ、細線中の電子系のみを加熱して生じた各ポイントコンタクトの熱起電力の差を細線の横電圧として測定するというものであり、理論計算で用いたモデルに比べ複雑な3つの二次元電子領域から構成された系になっている。そこで、この系に合うモデルを考え、横電圧の原因である各二次元領域の化学ポテンシャルのふるまいを調べた。その結果、従来の計算では見逃されていた化学ポテンシャルの振動を見いだした。実験では2つのポイントコンタクトのうち一方のくびれ幅を固定し、もう一方のくびれ幅を変えているため、従来は1つの二次元領域の化学ポテンシャルのみが振動し、それが横電圧の振動の原因と考えられていたが、今回3つの領域すべてにおいて化学ポテンシャルが振動している状況が明らかになった。

さらに、測定された熱電能のピーク値が予想された量子化値より常に小さい事実を説明するために、これまでの理論をコンダクタンスと同様の補正項を考慮して検討し直した。得られた結果はこれまでの理論的予想とは異なり、現実の系ではピーク値は必ず量子化値より小さくなり、さらにくびれの形状や系の温度にも依存する量であることを示した。この事実はこれまでの実験データの解釈に対して大きな見直しを迫るものである。

6章は全体のまとめに当てられる。

最後に、本研究では半導体ヘテロ接合における電子・音響フォノン相互作用の特質を明らかにするとともに、バリストティック領域における熱電能に関して全く新しい知見を得た。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 徳 田 直 樹
副 査 教 授 佐 久 間 哲 郎
副 査 教 授 中 山 恒 義

学 位 論 文 題 名

半導体ヘテロ接合における二次元電子系の電子輸送理論

本論文はヘテロ接合における二次元電子系に関して、マクロスコピックな系とメゾスコピックな系という2つの異なった領域での電子輸送現象のメカニズムとその特性を理論的に明らかにすることを目的として行われたものである。本論文は全6章から構成される。以下に各章の内容を概説する。

1章は序論に当てられ、本研究の目的が述べられる。まずマクロスコピックな系における電子の重要な散乱メカニズムである電子・音響フォノン相互作用の性質を電子移動度、電子エネルギー損失率、熱電能といった量の実験データを理論と比較することにより明らかにする。最近の微細加工技術の進歩により作られたメゾスコピック系は、新しい輸送領域として注目を集めている。本研究では電子が散乱を受けずに運動するバリスティック領域における熱電能のふるまいを明らかにする。

2章ではAlGaAs/GaAsヘテロ接合における電子移動度及び電子エネルギー損失率の解析から電子・フォノン結合定数及び結合の型とスクリーニング因子の関係を議論する。電子・フォノン相互作用に関するこれまでの研究の多くはイオン化不純物散乱の寄与は温度依存性をもたないという事実に基づいて、低温における移動度の温度依存性の解析から行われていた。これに対し、エネルギー損失率にはイオン化不純物散乱のような弾性散乱は関与しないので精度良く結合定数の値を得ることができる。解析の結果、スクリーニング因子は長距離相互作用であるビエゾエレクトリック結合に対しては必要だが、短距離相互作用である変形ポテンシャル結合に対しては不適當で入れるべきではないことがわかった。このような取り扱いをすると結合定数はバルクGaAsのものと同じになり、バルクとヘテロ接合の間で結合定数に違いはないという結論を得た。

3章では熱電効果を議論の対象とし、特に熱電能を取り上げる。熱電能には電子拡散による寄与とフォノン・ドラッグによる寄与があるが、低温では後者が支配的である。このため低温での熱電能は電子・音響フォノン相互作用のふるまいを調べるのに適した量である。この章では2章と同様の観点からフォノン・ドラッグ熱電能の解析を行った。解析にはフォノン・ドラッグ熱電能に対するCantrellとButcherのモデルを用い、温度依存性及び電子濃度依存性に関して実験データとの比較検討を行った。その結果、電子・音響フォノン相互作用結合定数とスクリーニング因

子の取り扱い方に関して2章と同様の結論が得られた。

4章ではメソスコピック系の電子輸送を議論する際に大変有用な多端子系のLanda uer-Buettiker公式を温度差がある場合に対して線形応答理論から求めた。温度差があるときの電流及び熱流を線形応答理論から導出するには、温度勾配を直接摂動項に取り込むことができないために電気伝導度を求めるときとは別の困難が存在するが、得られた結果はBuettiker流の導出法で求めたものと一致した。最後にポイントコンタクトにおけるコンダクタンスの量子化の理論を中心に議論する。

5章ではポイントコンタクトにおける熱電能のふるまいを議論する。バリスティック電子に対する熱電能はまず理論的に調べられ、くびれ幅の関数として振動し、そのピーク値が試料や温度によらない値に量子化されることが予想された。その後この予想をほぼ確認したと思われる実験が行われたが、その解釈に関しては検討の余地が残されていた。そこで、この実験に対し詳しい理論解析を行ったところ、従来の計算では見逃されていた化学ポテンシャルの振動を見いだした。さらに、測定された熱電能のピーク値が予想された量子化値より常に小さい事実を説明するために、これまでの理論を補正項を考慮して検討し直した。得られた結果は、現実の系ではピーク値は必ず量子化値より小さくなり、さらにくびれの形状や系の温度にも依存する量であることを示した。この事実はこれまでの実験データの解釈に対して大きな見直しを迫るものである。

6章は全体のまとめに当てられる。

これを要するに、著者は、半導体ヘテロ接合における電子・音響フォノン相互作用の特質を明らかにするとともに、バリスティック領域における熱電能に関して新しい知見を与えており、物性工学及び応用物理学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。