

論文の内容の要旨

論文題目 量子ドット埋め込みヘテロ構造チャンネル
における2次元電子とその伝導特性

氏名 川津 琢也

1. 研究の背景

近年、分子線エピタキシー法や有機金属気相成長法などの薄膜成長技術はめざましい発展を遂げ、原子層オーダーで制御可能な平坦性の高い薄膜を形成できるようになった。これらの技術を用いると、2種類以上の物質を原子層単位で交互に積み重ねることにより、超格子構造や量子井戸構造をはじめとするさまざまな半導体2次元構造を形成することが可能となる。また、最近では、これらの技術をもとに、2次元系をさらに低次元化し、電子や正孔を1次元（量子細線）や0次元（量子ドット）に閉じ込める試みが盛んに行われている。この低次元化は、レーザーをはじめとする半導体デバイスの性能の向上とともにメモリ素子や光検出器などの新機能素子への発展が期待されている。例えば、メモリ素子では、1997年に、量子ドットを2次元チャンネル近傍に埋め込み、ドット中の電子の有無を制御する77Kで動作可能なメモリ素子が試作検討されている。また、2000年には、積層した量子ドットを埋め込むことにより、室温で動作可能なメモリ素子が報告されている。一方、光検出素子では、1997年に、バンド間の光励起でドット内の電子を消去し正孔を捕獲する蓄積型の光検出器が考案されている。また、1999年には、2次元電子チャンネルの近傍のInAsドット内の電子を中赤外光で消去するタイプの赤外検出器が検討されている。2000年には、InAs量子ドットを埋め込んだ幅 $2\mu\text{m}$ ×ゲート長 $4\mu\text{m}$ のFETを用いて、単一光子検出が可能であることが報告されている。

これらのメモリや赤外検出器では、量子ドットと2次元チャンネルが共存する構造であるため、量子ドットが2次元チャンネルにどのような影響を及ぼすかを定量評価する必要がある。そこで、本研究では、量子ドットが近傍に埋め込まれた2次元電子の電気伝導特性を

さまざまな手法により測定し、実験と理論との比較から、量子ドットが2次元電子に与える影響を解明することを試みた。

2. 本論文の構成

本論文は7つの章より構成される。第1章は序論であり、研究の背景および目的について述べる。第2章では、第3章および第4章で必要となる量子ドットによる2次元電子の弾性散乱理論の定式化を行う。第3章、第4章では、InAlAs アンチドットおよびInGaAs ドットを埋め込んだn-AlGaAs/GaAs ヘテロ接合チャネルの移動度を調べ、理論との比較から、量子ドットによる2次元電子の弾性散乱過程を検討する。第5章では、局在効果に起因した負の磁気抵抗とその解析から、InGaAs ドットによる2次元電子の非弾性散乱過程を調べる。第6章では、InGaAs ドットを埋め込んだHEMT 試料の磁場キャパシタンスを測定し、理論との比較から、量子ホール状態における2次元電子のエッジステートやバルク領域の電気伝導度を議論する。第7章では、本研究で得られた結果をまとめるとともに、エレクトロニクスとの関連について簡単に述べる。

3. 量子ドットによる2次元電子散乱の理論(第2章)

量子ドットは、その近傍の2次元電子に対し、さまざまな散乱ポテンシャルを生ずる。母材に埋め込まれた量子ドットは、それらの伝導帯のバンド不連続性によりポテンシャルを形成する。また、荷電した量子ドットはクーロンポテンシャルを引き起こす。

第2章では、これらのポテンシャルをモデル化し、理論的側面から、2次元電子の弾性的な散乱を検討した。その結果、クーロンポテンシャルでは、高角度散乱に比べて低角度散乱が非常に大きいのに対し、バンド不連続性によるポテンシャルは、どの散乱角度にも同程度に寄与することが示された。また、高密度のドットが形成するバンド不連続性によるポテンシャルでは、低密度のそれと比べると、散乱への寄与の角度依存性が大きいことが明らかとなった。これらの振る舞いは、古典散乱時間と量子散乱時間の比 τ_c/τ_q に強く反映され、散乱ポテンシャルを特定する上で、 τ_c/τ_q の測定が非常に有効であることがわかった。

4. 自己形成 InAlAs アンチドット埋め込みヘテロ接合チャネルにおける電子散乱(第3章)

Al 組成の高い InAlAs ドットを GaAs 中に埋め込むと、ドットは電子を排除するアンチドットのように振舞う。このようなアンチドットでは、電子を捕獲しないため、伝導帯のバンド不連続性によるポテンシャルのみが2次元電子の弾性散乱を引き起こす。

第3章では、InAlAs アンチドットを埋め込んだn-AlGaAs/GaAs ヘテロ接合チャネルの移動度を計測し、実験と理論の比較から、バンド不連続性によるポテンシャルが引き起こす弾性散乱の特性について検討した。その結果、Al 組成が低く、比較的ドット密度の低い試料のホール移動度は、個々のドットに対して散乱ポテンシャルを考え、それらを足し合わ

せることにより説明出来ることがわかった。一方、Al 組成が高く、ドットの密度の高い試料では、ドットを全体として扱う必要があり、そのホール移動度は界面凹凸散乱の理論で説明する出来ることが明らかとなった。

4. 自己形成 InGaAs ドット埋め込みヘテロ接合チャンネルにおける電子散乱(第4章)

InGaAs ドットを GaAs 中に埋め込むと、ドットは電子を捕獲し荷電される。よって、InGaAs ドットに起因する散乱ポテンシャルは、(a)バンド不連続性によるポテンシャルと(b)占有電子からのクーロンポテンシャルの2つが考えられる。

第4章では、実験と理論の比較から、(a)および(b)のポテンシャルが引き起こす弾性散乱の特性について検討した。自己形成 InGaAs ドットを埋め込んだ n-AlGaAs/GaAs ヘテロ構造の試料を作製し、ホール測定および SdH 振動の観測から、ホール移動度 μ_c と量子移動度 μ_q をドットに捕らえられた電子数 N_{0D} の関数として調べた。その結果、 N_{0D} が増えるにしたがって、 μ_c および μ_c / μ_q が増加することがわかった。また、この実験結果を説明するためには、引力的な(a)と斥力的な(b)のポテンシャルの打ち消し合いを考慮する必要があることが示された。

5. InGaAs ドット埋め込みヘテロ接合チャンネルにおける負の磁気抵抗効果と電子の局在(第5章)

量子ドットのような局在準位は、さまざまな過程により2次元電子の非弾性散乱を引き起こす。非弾性散乱は、局在効果と密接な関係があり、低温での2次元電子の電気伝導に大きな影響を与える。

第5章では、InGaAs ドットを埋め込んだ n-AlGaAs/GaAs ヘテロ接合チャンネルの負の磁気抵抗を調べ、ドットが引き起こす非弾性散乱時間 τ_{in} を求めた。その結果、InGaAs ドットの埋め込まれた試料では、電子波同士の量子干渉を阻害する非弾性散乱の頻度 $1/\tau_{in}$ が増し、局在効果が弱められることが明らかとなった。また、占有電子数 P_{oc} の関数として非弾性散乱時間 τ_{in} の計測を行った結果、 P_{oc} が大きくなるにつれて $1/\tau_{in}$ が増加することが示された。このことから、ドットに捕らえられた電子が2次元電子の非弾性散乱を促進することが判明した。

6. InGaAs ドット埋め込みヘテロ接合チャンネルにおける磁場キャパシタンス(第6章)

2次元電子に強磁場を印加するとランダウ準位が形成される。この時、フェルミエネルギーがランダウ準位の間にある量子ホール状態では、2次元電子は局在し、バルク領域の電気伝導度 σ_{xx} は非常に小さな値となる。

第6章では、量子ドットが量子ホール状態にある2次元電子に与える影響を、磁場キャパシタンスの方法により検討した。InGaAs ドットを埋め込んだ n-AlGaAs/GaAs ヘテロ接合チャンネルのキャパシタンスを磁場中で調べ、抵抗板モデルとの比較を行った。その結果、

量子ドットは、ホッピングサイトとなるポテンシャルを形成し、バルク領域の電気伝導度 σ_{xx} の AC 成分を増加させる効果があることが示された。

また、本研究では、磁場キャパシタンスから、バルク領域の電気伝導度 σ_{xx} の AC 成分を調べる方法を確立した。磁場キャパシタンスのロス成分を抵抗板モデルと比較することにより、 σ_{xx} の周波数依存性が求められることを示した。

7. 結言

本研究では、量子ドットが近傍に埋め込まれた 2 次元電子系を詳細に調べ、さまざまな電子物性を明らかにした。3 章、4 章では、移動度を調べ、量子ドットによる弾性散乱過程を明らかにした。ここで得られた知見は、量子ドットを利用したメモリ素子や赤外検出器など次世代のナノ構造のデバイスの設計や動作解析において有用な知見を提供したものと考えられる。

また、5 章では、負の磁気抵抗から量子ドットによる非弾性散乱過程を調べた。これは、量子情報処理デバイスなど、量子干渉を利用したデバイスの設計や動作限界の解明などに有用な情報を与える。また、6 章では、磁場キャパシタンス測定から、ドットによる量子ホール効果への影響を調べた。ここで得られた情報は、量子ホール効果を用いた標準抵抗など各種素子への利用の際に有用な知見を提供するものと考えられる。

近年の技術発展にともなって、より高度なデバイスが考案され、さらなる物性情報が必要とされるようになってきている。たとえば、量子ドットのスピンを利用したデバイスでは、スピン散乱の知見が必要とされる。また、配列した量子ドットを使ったデバイスでは、周期性を反映した影響がその電子物性に現れる。これらの現象の解明や制御法の確立には、さらなる研究が必要であり、本研究での成果を基盤とした今後の研究の重要課題となろう。