

論文の内容の要旨

論文題目：Quantum Hall Effect in GaAs/AlGaAs Semiconductor Superlattice

(GaAs/AlGaAs 半導体超格子における量子ホール効果)

氏名：川村 稔

強磁場における GaAs/AlGaAs 半導体ヘテロ界面 2 次元電子系の振る舞いは量子ホール効果をはじめとして多くの興味深い物理を提供してきた。最近では、2 層量子ホール系や多層量子ホール系など、層間結合のある擬 2 次元電子系において展開される現象が興味を集めている。2 次元電子系は強磁場下で量子ホール効果を示すが、2 次元性は量子ホール効果を起こすために必要な条件の 1 つと考えられてきた。本研究では、2 次元面に対して垂直方向への運動の自由度を新たに加えた時に、量子ホール効果状態はどのような振る舞いをするかという問題をとりあげる。

乱れた系における電子の局在効果はアンダーソン局在として知られている。局在状態の性質を特徴づける局在長 $\xi(E)$ は、移動度端 E_c に近づくにつれて、 $\xi(E) \sim |E - E_c|^{-\mu}$ に従って発散的に増大する。ここで μ はアンダーソン転移の臨界指数である。一般に移動度端近傍の臨界領域における系の振る舞いは次元性や系の基本的な対称性のみによって決まり、不純物ポテンシャルの詳細には依存しない。

強磁場中の 2 次元電子系の状態密度は離散的なランダウ準位から成り立っている。それぞれのランダウ準位は不純物ポテンシャルのために有限の幅をもつ。幅を持ったランダウ準位のうち、準位中央の移動度端に存在する非局在状態を除いては、その他の状態はすべて局在している。擬 2 次元系である半導体超格子では、ランダウ準位中央に 3 次的に広

がった非局在状態のバンドが存在する。このため半導体超格子の磁場中におけるアンダーソン転移の振る舞いは、完全な2次元系のそれとは異なることが期待される。磁場を掃引することにより、フェルミ準位における状態は、局在-非局在-局在と変化する。フェルミ準位での状態の変化は量子ホールプラトー間遷移、または量子ホール状態-ホール絶縁体転移として抵抗の磁場依存性、温度依存性などに現れる。このような転移は2次元系では実験的にも理論的にもよく調べられており、臨界指数の逆数が $1/\mu = \kappa = 0.45$ となることが知られている。一方、擬2次元系における磁場中のアンダーソン転移は概らによる数値計算に基づいた研究が報告されている。臨界指数は2次元系の場合とは異なり、 $1/\mu = \kappa = 0.74$ となることが指摘されている。

一方、半導体超格子における量子ホール効果は、最近のカイラル表面状態の理論的な研究に関連して新たな関心を集めている。量子ホール状態では、フェルミ準位において2次元電子内部（バルク）状態は全て局在しており、試料の縁の部分の端状態のみがホール電流を運ぶという描像をとることができる。カイラル表面状態というのは、この端状態が層間結合することによって、超格子試料の側面に形成される2次元電子系である。端状態には一方向しか電流を運べないという性質（カイラル性）があるため、この表面状態では量子干渉による局在効果が抑制されると考えられている。この結果カイラル表面状態は、電気伝導度が量子伝導度よりも小さいにも関わらず、温度に対して変化しない伝導度をもった金属的な状態であることが期待される。また、カイラル表面状態に垂直な磁場を印加したときの磁気抵抗は、古典的な正の磁気抵抗を示すことが予想されている。このような温度依存性をもたない金属的伝導を示すカイラル表面状態の存在は Druist らの実験によって実証されている。

本研究では、(1) 半導体超格子の量子ホール状態-ホール絶縁体転移を実験的に調べ、擬2次元系の磁場中におけるアンダーソン転移の次元性の影響を実験的に明らかにすること、(2) 半導体超格子の量子ホール効果に特徴的なカイラル表面状態の電子輸送特性を調べ、この特異な2次元系の性質を明らかにすること、を目的として実験をおこなった。

GaAs/AlGaAs 半導体超格子試料を分子線エピタキシーによって作製した。超格子部分は GaAs 層 (10 nm) + AlGaAs 層 (15 nm) を 100 層積層したものである。面内伝導測定用試料と面間伝導測定用試料の2種類の超格子試料を作製した。面内伝導測定用試料は標準的なホールバー形状に加工した。一方、垂直伝導測定用試料は断面積が $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 、 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 、 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 、 $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ の4種類をメサエッチングによって作製した。測定には超伝導マグネットと希釈冷凍機を用いた。500 mK から 30 mK の低温において、18 T までの磁場中での電気抵抗の測定をおこなった。

(1) 図1の挿入図は面内抵抗 R_{xx} のいくつかの異なる温度における磁場依存性である。15.8 T 付近ですべての曲線が一点で交わっている。この磁場よりも低磁場側では、温度を下

げると R_{xx} が小さくなる量子ホール状態、高磁場側では、温度を下げるに従い抵抗が増大する絶縁体状態である。

図1に温度スケーリング解析の結果を示す。上側の曲線が高磁場側、下側の曲線が低磁場側に対応する。横軸として $|B-B_c|/T^\kappa$ をとることによって、いくつかの異なる磁場における R_{xx} の温度依存性のデータを、図1のように1つの曲線上に集約することができる。スケーリング解析の結果から、この転移の臨界指数の逆数は $\kappa = 0.30 \pm 0.05$ と求められる。超格子の実験から求められた臨界指数は、完全な2次元電子系での転移の実験で得られた値に近く、擬2次元系で理論的に予想された値とは異なっている。この相違の理由として、本研究で用いた試料では層間の結合が小さかったことが挙げられる。2次元系と3次元系との次元性による臨界領域での違いを実験的に明らかにするためには、より大きな層間結合をもった超格子試料での実験を行う必要がある。

(2) 面内伝導が量子ホール効果を示す磁場領域において、面間電気伝導度は急激に減少する。この磁場領域における面間伝導度は、200 mK 以上の高温側では試料の断面積に比例し、電流は試料内部のバルク状態を流れる。一方、100 mK 以下の低温では面間電気伝導度は試料の周長に比例する。この結果は低温での電気伝導度が表面状態によって支配されていることを示すものである。前者はバルクでの局在状態間のホッピング伝導の寄与が大きい温度域、後者はホッピング伝導の寄与がカイラル表面状態の伝導度よりも小さくなり、カイラル表面状態による伝導が支配的になる温度域、と解釈される。表面状態による伝導が支配的な低温域では、面間伝導度は温度に対してほぼ一定で、「金属的」ではあるが、その電気伝導率は e^2/h よりもはるかに小さい。例えば、 $\nu=2$ については $0.003 e^2/h$ 程度である。また、電流がバルク状態を流れる 200 mK 以上の高温域では、面内伝導度と面間伝導度が同じような温度依存性を示す。このことから面間、面内の両方で電気伝導の機構が同一であることが期待できる。そのような電気伝導の機構として、局在状態間のホッピング伝導の可能性が示唆される。

量子ホール状態の面間伝導において、顕著な非線形伝導が観測された。図2は面間伝導の微分伝導度の電圧依存性を異なる大きさの3つの試料について測定した結果である。縦軸はそれぞれ、試料の断面積（左軸）で規格化した電気伝導率と周長（右軸）で規格化した電気伝導率を示している。微分伝導度は、高電圧域では断面積でスケール（バルク伝導）するのに対し、低電圧域では試料の周長でスケール（表面伝導）する。この電圧による、バルク伝導から表面伝導への移行は、温度依存性の場合と同様にして次のように解釈される。電圧によって活性化されているバルクのホッピング伝導度は、電圧の低下とともに減少し、やがて表面伝導度よりも小さな値をとる。ここでバルク伝導領域から表面伝導領域への移行が生じる。高電圧側のバルク伝導領域の非線形性は、局在状態間のホッピング伝導の活性化エネルギーが電圧によって実効的に小さくなる効果で説明される。一方、バルク伝導から表面伝導への移行領域よりも十分低電圧側の表面伝導領域においても非線形伝

導が観測されている。表面状態は、温度依存性のない「金属的」な状態であるにも関わらず、電流電圧特性は非線形である。この低電圧側の非線形性に関しては、これまでのところ十分な解釈は得られていない。

われわれはまた、磁場中で試料を傾けることによって層間伝導に対する平行磁場の効果を調べた。磁場を傾けると、量子ホール効果状態における面間抵抗が増大する。カイラル表面状態に対する垂直磁場（超格子に対しては平行磁場）の効果について、理論的には古典的な正の磁気抵抗が予想されているが、観測された面間抵抗の増大は、この古典的な正の磁気抵抗効果だけでは説明できない。面間抵抗を増大させる別の機構として、平行磁場によって層間結合の強さが減少する効果が挙げられる。実際に平行磁場が弱い領域での実験結果は、この機構から導かれる表式と一致しており、一見、この機構で説明が付きそうである。しかし、この表式は並進対称性を有するバルク状態の層間の飛び移りに対して与えられたものであり、これを端電流間の飛び移りに拡張するには、さらに検討が必要である。

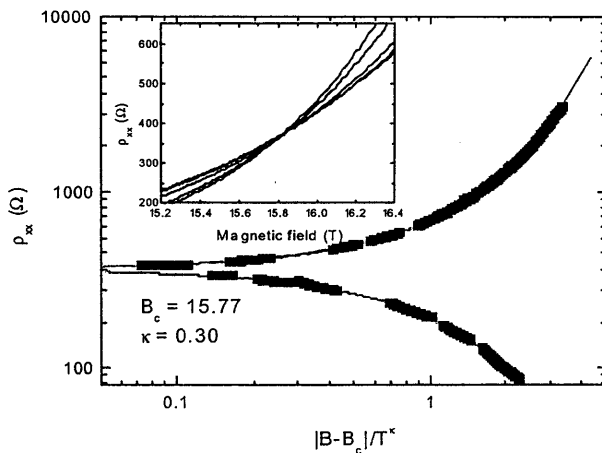


図1：スケーリング解析の結果。
挿入図は転移点近傍での R_{xx} の磁場依存性。

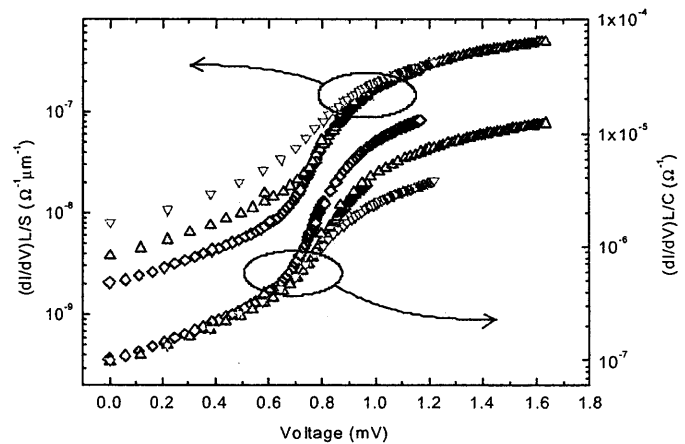


図2：微分伝導度の電圧依存性。縦軸はそれぞれ試料の周長と断面積でスケールしている。