

論文審査の結果の要旨

氏名 川村 稔

2次元電子系は強磁場で量子ホール効果を示す。量子ホール状態は離散的なランダウ準位からなるバルク状態と系の端に局在した端状態により特徴づけられる。この論文では、超薄膜結晶成長技術である分子線エピタキシー法を用いて GaAs/AlGaAs ヘテロ構造超格子を作製し、量子ホール状態におけるバルク状態の局在に対する層間結合の効果と、端状態を介した層垂直方向の電気伝導現象について実験的に研究した。

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幅 Γ をもつ。幅を持ったランダウ準位の中で、準位中央付近に存在する非局在状態を除いて、すべての状態は局在している。この非局在状態のエネルギーを E_c とすると、エネルギー E での局在長は $\xi(E) \propto |E - E_c|^{-\mu}$ ($\mu \approx 2.4$) のように発散することが数値計算により示されている。このとき抵抗は $\rho_{xx}(B, T) = \rho_{xx}(|B - B_c|/T^\kappa)$ のように振る舞うことが期待される。ここで、 B は磁場、 B_c はフェルミ準位が非局在状態 E_c と交差する磁場、 T は温度である。また、臨界指数 κ は動的臨界指数 z を用いて $\kappa = 1/z\mu$ と表される。このような抵抗の磁場依存性や温度依存性は実験的によく調べられており、 $1/\kappa \sim 0.45$, $z \sim 1$ となることが知られている。

2次元電子系を平行に並べた超格子構造を作ると、層垂直方向の結合により2次元から3次元系へと変化する。このような系での磁場中のアンダーソン転移については大槻らによる数値計算に基づいた研究が報告されている。それによれば、層垂直方向のバンド幅がゼロでなくなると、2次元の場合1点のみで存在した非局在状態が各ランダウバンドの中でゼロではない幅をもち、その幅はバンド幅とともに増大する。また、局在状態と非局在状態の境界である移動度端付近での臨界指数 μ もバンド幅とともに変化する。

この研究の目的の一つはこの局在効果の次元による違いを実験的に明らかにすることである。そのために分子線エピタキシーを用いて GaAs/AlGaAs 半導体超格子試料をいくつか作製した。量子ホール効果を観測するための試料は磁場強度に対応した電子濃度や高い移動度など強い制約を受ける。試行錯誤を繰り返した結果、最適な試料一つを作製することに成功した。その試料は、厚さ 10 nm の GaAs 層と厚さ 15 nm の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 層 ($x = 0.15$) を 100 層交互に積層したものである。この系の層垂直方向のバンド幅は 0.12 meV と見積もられる。標準的なホールバー形状に加工し、測定には超伝導磁石と希釈冷凍機を用い、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。

その結果は、数値計算による理論的予言とは異なり、非局在状態の幅が広がらないことを示した。さらに抵抗の温度と磁場依存性に対するスケーリング解析の結果、臨界指数は $\kappa^{-1} = 0.30 \pm 0.05$ と求められた。この臨界指数は、 $z=1$ と仮定すると完全な2次元電子系で得られた値に近く、超格子で理論的に予想された値とは異なっている。残念ながら理論と実験の不一致の原因は不明のままである。

量子ホール状態では、フェルミ準位でのバルク状態は全て局在しているが、試料の縁の部分には縁に沿って一方向にのみ運動する端状態が存在する。この端状態が層間結合すると、超格子試料の側面に沿って層内方向に一方向にのみ運動し、層間方向に1次元運動を行う2次元のカイラル表面状態が形成される。このカイラル表面状態には局在効果が存在しない。実際、この状態が温度に依存しない金属的伝導を示すことが以前に Dmist らの実験によって実証されている。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が、それを示した実験結果はまだ報告されていない。

この研究では前述の GaAs/AlGaAs 超格子を用いて、垂直伝導測定用に断面積が $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, $200 \times 200 \mu\text{m}^2$, $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ の4種類の試料をメサエッチングによって作製した。面内伝導が量子ホール効果を示す磁場領域において、面間電気伝導度は温度の減少とともに急激に減少し、100 mK 以下の低温で温度に依らない一定値になる。垂直伝導度は、高温側では試料の断面積に比例し、低温で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カイラル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。

垂直伝導は顕著な非線形伝導を示す。微分伝導度は高電圧域では断面積でスケールし、低電圧域では試料の周長でスケールする。高電圧域での非線形性はバルク状態のホッピング伝導度によるものと理解されるが、低電圧域で観測されるカイラル表面の示す非線形性の原因は理解されていない。

さらに、磁場中で試料を傾けることによって平行磁場を加える実験を行い、カイラル表面状態の垂直抵抗が増大することを示した。磁気抵抗の詳細な解析により、この正の磁気抵抗は理論的に予想されていた効果ではなく、むしろ平行磁場による層間結合の減少によることを明らかにした。理論的に予言されている効果が現れない理由は不明である。

以上、この論文では、GaAs/AlGaAs 超格子を作製し、量子ホール領域における層平行方向及び層垂直方向の電気伝導の詳細な測定を行い、バルク状態の局在効果に対する層間結合の効果、強磁場特有の端状態からなるカイラル表面状態の垂直伝導とその磁気抵抗効果を実験的に明らかにした。得られた実験結果は新しく重要な理論的課題を豊富に

提供している。このように、本論文は博士(理学)の学位論文としてふさわしい内容をもつものとして審査員全員が合格と判定した。

なお、本論文の主たる業績は、家泰弘教授、勝本信吾助教授らとの共著の形ですでに公表され、また公表予定であるが、実際の実験の遂行や結果の解析などにおいて学位申請者の寄与が重要であると認められた。