

論文審査の結果の要旨

氏名 辻 幸秀

極低温下で二次元電子系が示す Anderson 局在や量子ホール効果など特異な伝導現象は、固体物理学研究の中でも重要な位置を占めている。通常これらの研究には結晶界面の反転層にできる二次元電子系を利用するが、本研究では InAs(110)劈開面に金属原子を蒸着することで表面反転層に誘起される新しいタイプの二次元電子系を取り上げ、その伝導特性を測定するためのユニークな実験方法の確立と実際の測定に成功した。本論文は6章からなり、序論として研究背景が述べられた第1章に続いて、第2章で InAs の表面構造と二次元伝導、第3章で試料作成方法と実験装置、第4章で Ag 原子を表面蒸着したときの実験結果とその解釈、第5章はその他の原子を蒸着したときの実験結果と解釈がそれぞれ記述されており、最後に第6章で論文全体のまとめと今後の研究の展望が述べられている。

これまで InAs 表面の二次元電子系については、光電子分光や走査トンネル分光によって表面構造や表面準位あるいは表面フェルミ準位が調べられてきたが、最も基本的な伝導特性は測定されていなかった。これは表面部分だけの伝導を測定する適当な方法が確立していなかったためである。これに対して論文提出者は、極低温下 ($T \approx 4$ K) で超高真空が保たれた環境下で InAs 単結晶試料を劈開することで清浄な (110)面を準備し、フィラメント通電で種々の金属原子をその劈開面にその場蒸着することで二次元電子系を誘起することに成功した。適当な熱処理を施した試料側面には予め金電極がスパッタリングで取り付けられており、劈開によって最表面と電極の良好なコンタクトが取れるよう工夫されている。

論文提出者はこのユニークな実験方法を確立して、InAs(110)表面にAgを蒸着した系に対して電子濃度(N_s)と移動度(μ)を蒸着量の関数として詳しく調べた。その結果、0.01 ML (monolayer)以下の低蒸着量のとき N_s は θ とともに単調増加するが、0.02 ML付近を境に減少に転じることが分かった。 N_s の最大値から求めたフェルミ準位は他の測定結果とも良い一致を示す。一方、 μ は低蒸着量のときは同じように θ とともに単調増加するが、約 0.01 ML以上では一定値(≈ 3000 cm²/Vs)を示すことが判明した。こ

これらの実験事実を最近の密度汎関数法による計算結果等と比較することで、論文提出者は、低蒸着量域では1個の蒸着金属原子がイオン化して1個の電子を放出するというドナーモデルがよく成り立つことを示した。これに対して高蒸着量での振る舞いについては、すでにイオン化した蒸着原子のクーロンポテンシャルや蒸着原子のクラスター化などを考慮することで定性的に説明可能である。

Ag蒸着した試料については、中間的な蒸着量るとき高磁場中の伝導測定で Shubnikov-de Hass振動のビートパターンが観測された。これはRashba効果と呼ばれる反転層における閉じ込めポテンシャルの非対称性に起因するスピン軌道相互作用によってスピンスプリットオフバンドが形成されたことを示しており、先の密度汎関数計算とも良く一致する。さらに蒸着量が増えて(N_s が減って)シングルバンドとなった試料では、整数量子ホール効果($\nu=4$)の観測にも成功している。これらのことは、本研究で作成した電子系が N_s や μ をコントロール可能な真正の二次元電子系であることを明確に示している。Ag以外にGe原子を蒸着したときも整数量子ホール効果が観測されたが、この場合はCr原子のときも含めてAgとは違った N_s の蒸着量依存性が観測された(蒸着量を増やしても N_s は減少に転じない)。論文ではAgに比べてGeやCrがクラスター化しづらいという可能性が指摘されている。

この他、Rashba効果の寄与が等しくなるよう電子濃度を揃えたGeとAu原子を蒸着した試料を準備し、それらの磁気伝導を測定した。得られたデータをIordanskii, Lyada-Geller and Pikusによる弱反局在理論で解析した結果、Geの場合はスピン軌道相互作用のうちD'yakonov-Perel機構がElliot-Yafet機構よりも優勢であるが、Auの場合は後者も無視できない大きさをもつことが分かった。

以上のように、本研究は半導体表面二次元電子系の極低温・磁場中輸送現象を安定して測定する実験技術を確立し、量子ホール効果を含めて電子濃度や移動度などの諸性質を初めて明らかにしたものとして、その成果は高く評価できる。なお、本論文は岡本徹氏と望月敏光氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行、解析及び解釈を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。