

# 論文審査の結果の要旨

氏名 金民祐

二次元に閉じ込められた電子系は、三次元に広がった電子系とは異なる物性を示すことから、半導体人工構造や二次元結晶を中心に研究されてきた。特に薄膜を用いた二次元超伝導と高移動度半導体を用いた二次元電子ガスは、いずれも二次元電子物性の代表的な研究対象であるが、両者を同時に観測できる系は非常に限られている。この意味で、低温で高移動度を示し、極低温で超伝導転移を起こす  $\text{SrTiO}_3$  を用いた二次元構造は理想的な系である。しかし、二次元超伝導と二次元電子ガスの電子状態の詳細を同時に研究するには、不純物の低減やキャリア密度の精密制御が要求され、いずれも薄膜作製技術の向上が不可欠となる。

本論文では、このような背景のもと、 $\text{SrTiO}_3$  において、デルタドープ構造と呼ばれる数原子層のドープされた半導体伝導層を絶縁体層で挟んだ構造をパルスレーザー堆積法によって作製し、低温における電子輸送特性からその二次元超伝導特性と二次元電子ガスの挙動を研究した結果が記されている。デルタドープ構造では、その伝導層の厚さとドープ量を制御することで、伝導電子が閉じ込められる領域を二次元から三次元へと変化させることができる。この点が、他の二次元電子系との大きな違いである。

本論文は7章からなる。第1章には、序論として、研究の背景と目的、論文の概要、及び、論文の構成が述べられている。

第2章には、試料作製、極低温に試料を冷却する希釈冷凍機の概要、精密な電気輸送特性を行うための測定手法が述べられている。

第3章では、デルタドープ構造の品質をこれまでよりも向上させるために行った内容が記されている。ドープ量を系統的に変化させたデルタドープ構造においてキャリア密度を二桁に渡って変調することに成功し、従来の移動度を上回る最高移動度  $10,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を実現した。さらに、電子を閉じ込める伝導層内のポテンシャルが低ドープ領域で弱まることを明らかとした。

第4章では、高移動度を有する試料が低温で示すシュブニコフドハース振動を詳細に解析することで、二次元と三次元の  $\text{SrTiO}_3$  伝導帯の電子構造を明らかにした結果が記されている。伝導層が比較的厚い三次元構造では、軽いバンド、重いバンド、スピン軌道分裂したバンドに相当する三つのバンドをシュブニコフドハース振動から抽出し、電子状態計算と比較した。伝導層を薄くして次元性を低下させたところ、シュブニコフドハース振動に明瞭なう

ねりを観測し、二次元構造では伝導帯が量子化されたサブバンドが形成されることを示した。

第5章では、デルタドープ構造の超伝導特性について記されている。系の次元性の低下に伴い、ギンズブルクランダウコヒーレンス長が減少することを観測した。二次元構造においては、パウリ・リミットを大きく超える臨界磁場が観測され、系に強いスピン軌道相互作用が内在している可能性を示した。さらに、走査型 SQUID 顕微鏡を用いた実空間観察より超伝導相が二次元平面内に均一に生成していることを確認した。測定された超伝導電子密度は常伝導電子密度から予測される値とは隔たりを示し、伝導帯の重いバンドの伝導・超伝導への寄与の違いが重要であることを明らかとした。

第6章では、デルタドープ構造におけるスピン軌道相互作用の及ぼす影響について記されている。伝導層のキャリア密度を変化させることで、低温において弱局在現象を観測した。求められたスピン軌道散乱時間は、二次元超伝導相から示唆された値とよい一致を示し、スピン軌道相互作用が  $\text{SrTiO}_3$  の伝導に大きく関わっていることを見出した。

第7章では、本研究の総括が述べられている。

なお、第3章と第6章については、C. Bell (SLAC)、疋田育之 (SLAC)、H. Y. Hwang (Stanford 大学) 各氏との共同研究、第4章については、C. Bell (SLAC)、小塚裕介 (東京大学)、疋田育之 (SLAC)、H. Y. Hwang (Stanford 大学) 各氏との共同研究、第5章については、C. Bell (SLAC)、小塚裕介 (東京大学)、疋田育之 (SLAC)、H. Y. Hwang (Stanford 大学)、J. A. Bert (Stanford 大学)、B. Kalinsky (Stanford 大学)、K. Moler (Stanford 大学) 各氏との共同研究であるが、いずれも論文提出者が主体となって研究を遂行したもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

以上から、本論文は、 $\text{SrTiO}_3$  における二次元量子現象を明らかにし、酸化物薄膜量子構造の電子物性の開拓に大きく貢献するものである。したがって、博士 (科学) の学位を授与できると認める。