

論文審査の結果の要旨

氏名 福居 直哉

本論文は、超高真空中で 3 次元トポロジカル絶縁体薄膜の電気伝導を測定し、薄膜表面に存在する原子サイズのステップ構造が金属的な表面状態の電気伝導に与える影響を調べたものである。トポロジカル絶縁体の表面状態は波数ベクトルに垂直方向にスピン偏極しているために、電子の後方散乱が抑制されている。そのため、表面ステップによる後方散乱確率が通常の表面状態と比べて小さいと予想できる。そこで、シリコンの微傾斜面を基板として用いて一方向にステップ密度の高いトポロジカル絶縁体薄膜試料を準備し、その電気伝導度の異方性の解析結果から、ステップによる表面電子散乱の影響を明らかにしている。その結果、ヘリカルにスピン偏極した表面バンドがフェルミ面をよぎっている試料において、ステップにおける高い電子透過率が結論された。

本論文は 7 つの章から構成されている。第 1 章では本研究の背景として、トポロジカル絶縁体の表面電子状態が概観されたのち、これまで行われてきたスピン偏極した電子の散乱に関するミクロな実験研究を紹介している。これに対して、本研究にて、この問題をマクロな電気伝導測定から調べることの意義と、そのために用いる研究手法が簡単に紹介された後、研究目的が述べられている。第 2 章では、本研究の実験手法である独立駆動 4 端子測定法を詳述している。この装置を用いることによって、異方的な電気伝導度の温度依存性を測定することができた。第 3 章では、電気伝導の基礎的事項およびトポロジカル絶縁体のこれまでの研究成果の詳細が述べられている。第 4 章から 6 章までに、本論文の主要な成果が述べられている。第 4 章は、典型的な 3 次元トポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 および Bi_2Te_3 薄膜における研究成果である。これらの薄膜の電気伝導には、表面電子状態とバルク電子状態の両方からの寄与がある。本研究では、膜厚の異なる複数の試料の室温での電気伝導度を測定することにより、表面電気伝導の寄与を抽出した。これにより、両方の試料においてステップに起因する表面電子散乱が存在することがわかった。第 5 章では、 Bi_2Te_3 に Pb をドーピングした薄膜試料において、ドーピング量に応じたステップに起因する表面状態電子の散乱の研究が報告さ

れている。この系では Pb 原子はアクセプターとして働き、ドーピング量を増やすにつれて薄膜のバルク伝導帯内にあったフェルミレベルがバルクバンドギャップ方向に移動し、薄膜のバルク状態は金属から絶縁体へと変化することが知られている。電気伝導度の異方性をすべてステップよる表面電子散乱によるものとみなすことにより、表面電子のステップの透過率を求めている。その結果、バルク絶縁体試料での表面原子ステップの透過率は 0.36-0.5 であり、バルク金属試料でのその値 0.05 と比較して大きいことがわかった。そのためトポロジカル絶縁体表面状態のステップでの高い透過率がマクロな測定で初めて明らかにされたといえる。第 6 章では、2 原子層の Bi を蒸着した Bi_2Se_3 および Bi_2Te_3 薄膜におけるステップよる表面電子散乱の研究成果が報告されている。これらの系では、Bi 薄膜が 2 次元トポロジカル絶縁体である可能性が指摘され、さらに、 Bi_2Te_3 の上では Bi 薄膜のステップエッジに局在した 1 次元状態が報告されている。ここでも第 4 章同様、室温での電気伝導度の異方性の膜厚依存性を解析し、表面電気伝導の寄与を抽出した。この解析から、ステップ透過率が Bi_2Te_3 では 0.25、 Bi_2Se_3 ではほぼ 1 と評価できることが示された。どちらの値も Bi 蒸着前の対応した試料での値と比べて大きく、ステップでの後方散乱が抑制されていることが明らかとなった。第 7 章は本論文のまとめであり、本論文で明らかにされた結果とその意義および今後の研究の展望が述べられている。最後に付録として、トポロジカル絶縁体の理論がまとめられている。

以上のように、論文提出者は、微傾斜基板上の系統的な試料作製とマクロな電気伝導異方性の測定により、3 次元トポロジカル絶縁体表面電子状態の原子ステップにおける散乱を実験的に研究した。その結果、後方散乱抑制効果によるマクロ電気伝導の試料依存性を明らかにした。特に、バルク絶縁体試料でのステップでの高い透過率の観測は、特筆に値する。これらの研究成果は世界的にも初めてのものであり、トポロジカル絶縁体表面電子状態の今後の研究に極めて有用な情報を提供している。本研究の物性物理学としての価値と独創性は十分にあると認められる。したがって、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認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文は、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験を遂行し結果を解析したもので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。