

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 : 吉見 龍太郎

近年、固体の電子状態・スピン状態に対してトポロジーの概念を用いることで物性現象を記述・理解する動きが高まっている。系の端に金属的な伝導状態を有するトポロジカル絶縁体は、幾何学的位相によって固体に発現する量子状態として理論的・実験的に注目を集めている。特に三次元トポロジカル絶縁体における二次元ディラック状態において強磁性が発現すれば、バンド縮退点近傍で発散する幾何学的位相由来の有効磁場により、ゼロ磁場で二次元系が量子化する「量子異常ホール効果」が発現することが提唱・観測されており、更なる研究が期待されている。また同様の線形バンド分散を持つグラフェンと異なり、トポロジカル絶縁体では薄膜上部・下部にディラック状態がそれぞれ存在するが、このような実空間的な自由度を持つ系における量子輸送の理解はまだ途上段階にある。本論文ではトポロジカル絶縁体の量子輸送現象について、積層薄膜・接合素子を用いた系統的研究を行っている。その結果、量子ホール効果・量子異常ホール効果の観測と、それらの発現機構として実空間的自由度を持つディラック状態という物理描像の立証に成功している。本論文は7章から構成されており、以下にその概要を述べる。

第1章・第2章では、本研究の背景、すなわちトポロジカル絶縁体と表面ディラック状態における量子輸送現象について先行研究を含む研究背景と、実験手法についてそれぞれ述べている。

第3章ではトポロジカル絶縁体と固体界面に生じるディラック状態についてトンネル分光法を用いて詳細に調べている。p型トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ とn型InP基板とのp-n接合においてI-V測定を行い、トンネル伝導度の磁場依存性から固体界面におけるディラック状態を初めて観測している。また、組成依存性からフェルミ速度やディラック点のエネルギーというバンドパラメータを明らかにし、角度分解光電子分光法によって観測される表面分散とよく一致することを示している。固体界面におけるバンドが表面と同等であることにより、後に続く積層薄膜・接合素子の設計の妥当性が示された。

第4章では、 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 薄膜試料における量子ホール効果について述べている。組成制御と電界効果素子によりフェルミ準位をディラック点近傍に制御した試料で、磁場下でp,n両極性の量子ホール効果を観測することに成功している。また、電荷中性点近傍でホール伝導度に生じる $\sigma_{xy}=0$ のプラトーについて、その起源を調べている。磁場・ゲート依存性やバッファ層を有する積層試料との比較により、 $\sigma_{xy}=0$ の量子ホール状態が薄膜上部・下部の2つのディラック状態における量子化であるという描像の提唱、立証を行っている。

第5章では、 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 薄膜に磁性不純物Crを添加することで強磁性秩序を発現させ、ディラック状態のバンド交差点に自発的なギャップを開き量子異常ホール効果の観測に成功している。また、磁区におけるエッジ状態の検出から、量子異常ホール状態が磁化に由来することを明らかにしている。更に、縦伝導度・ホール伝導度のスケールリング則から、磁化・磁場による量子ホール状態が時間反転対称性の破れた基底状態として等価な状態である可能性を示している。

第 6 章では、非磁性トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ と磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Cr}_y(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_{2-y}\text{Te}_3$ の二層膜における量子ホール効果について述べている。二層膜系では正常ホール効果と異常ホール効果双方が大きな応答を示し、両者の和による量子化を初めて観測している。更に、単層膜における量子ホール効果・量子異常ホール効果よりも 1 桁高い温度で(500mK)で量子化が観測されることを見出した。量子ホール状態における抵抗の温度依存性を解析することで、量子化を妨げる要因が Cr の添加によるバルク領域もしくは基板との界面近傍における結晶欠陥や不純物などの乱れの効果である可能性を指摘している。

第 7 章では、本研究によって得られた成果について総括を行っている。

以上をまとめると本論文では、トンネル分光による界面状態の探索や磁性ドーピング・積層構造を用いた輸送特性の系統的研究を行い、トポロジカル絶縁体における量子輸送現象について次のような重要な知見を得ている。トポロジカル絶縁体の表面伝導には、薄膜上部・下部に存在する 2 つのディラック状態の自由度が存在すること、強磁性と外部磁場由来で生じる量子ホール状態は同じ対称性の基底状態を持ち得るということ、更に、積層薄膜を用いて界面近傍を避けた局所的な磁性不純物のドーピングが、量子ホール状態の安定化に有効であること、などである。以上の知見は、トポロジカル絶縁体の素子開発を行う上での設計指針となり、今後積層自由度・物質自由度を更に広げた研究が期待される。

今回得られた成果は、物性科学・物理工学の発展に大きく寄与すると期待され、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。