

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 : 茂木 将孝

量子ホール効果におけるカイラルエッジ流を始めとして、量子化現象は近年の固体物理学における重要な研究課題である。物質に内在したトポロジーによって端状態、表面状態が生じ、これらがもたらす伝導現象は本質的に非散逸であることから、新奇な量子化現象の開拓が基礎、応用の両面から大きな関心を集めている。特に磁性トポロジカル絶縁体は、物質内部はエネルギーギャップの開いた絶縁状態である一方、表面には質量をもった単一のワイル粒子で特徴づけられる特殊な状態を有し、スピン状態の幾何学的効果がもたらすベリー位相誘起の量子化現象の新たな舞台となっている。これまでに、磁性不純物を添加したトポロジカル絶縁体薄膜において、ゼロ磁場の量子ホール効果である量子異常ホール効果の実証され、これを用いた更なる物性開拓が求められていた。しかしながら、試料作製の困難さにより実現温度が非常に低く(100 mK 以下)、応用研究が妨げられていた状況にあった。本論文では、磁性トポロジカル絶縁体薄膜のヘテロ構造化に焦点を当てることで、この状況を打開し、単一ワイル粒子由来の新奇な量子化現象の開拓および、電気輸送、磁気光学効果によるその検証を多角的に行っている。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章では本研究の背景として、トポロジカル絶縁体における非自明な電磁場応答の理論的背景とこれまでの実験研究の進展状況を述べており、第2章では本研究で用いた実験手法について記述している。

第3章では、磁性不純物添加(Bi,Sb)₂Te₃ 薄膜に磁性不純物を変調ドーピングすることで量子異常ホール状態を高温化させる手法について述べている。通常、磁性不純物 Cr をトポロジカル絶縁体試料全体に添加することで発現する量子異常ホール状態であるが、磁性不純物の非均一性が観測温度を制限していることが課題として挙げられている。そこで、試料表面付近に磁性元素を集中させることで、表面状態との交換相互作用を強めながら均一性を上げていくことを目的とし、磁気変調ドーピングを適用することで、実際に量子異常ホール状態の2 K までの高温化に成功した。温度依存性を詳細に調べることで、観測温度の高温化は磁気ギャップの増大に起因することを明らかにしている。

第4章では、非磁性トポロジカル絶縁体に強磁性絶縁体を接合させることで生ずる磁気近接効果について調べている。効率的な磁気近接効果実現のために、(Bi,Sb)₂Te₃ と同じく Te ベースのファンデアワールス強磁性体である Cr₂Ge₂Te₆、Cr₂Si₂Te₆ を選択し、分子線エピタキシー法によって一貫したヘテロ接合を行った。偏極中性子反射率法、透過型電子顕微鏡、エネルギー分散型 X 線分析を用いること

で、磁性元素の拡散の少ない清浄なヘテロ界面ができていることを多角的に示した。輸送測定では、先行研究と比較しながら巨大な磁気ギャップ生成によって量子異常ホール効果の兆候を観測した。その上、界面でのスピン軌道ロックングを利用した電流誘起磁化反転に成功しており、今後の新たな量子状態の電氣的制御機能開拓が期待される。

第5章では、量子異常ホール効果からのトポロジカル相転移について広く調べている。ひとつには、外部磁場による磁化方向の回転を利用することで磁気ギャップと上下表面状態の混成ギャップの競争を起こし、量子異常ホール絶縁体/通常の絶縁体の相転移を起こせることを示した。もうひとつには、ヘテロ構造における磁化の内部自由度を用いることで、磁化が全て外向きもしくは内向きに配向した状態を作り出すことで新しい絶縁体状態を発見した。これは量子化電気磁気効果の発現が期待されるアクシオン絶縁体状態が生成されたことと矛盾なく説明される。また、量子異常ホール状態とアクシオン絶縁体状態を互いに転移する際、10万倍の抵抗変化を伴う、カイラルエッジ状態のオン・オフが生じていることを示している。

第六章では、Crを上面のみに添加した半磁性トポロジカル絶縁体において、半整数量子化電気磁気応答を時間領域テラヘルツ分光、電気輸送を用いて詳細に調べている。上面のみがホール伝導の寄与となることで、量子異常ホール状態での量子化回転との比較の上で、半整数に量子化された磁気光学ファラデー回転、カー回転を観測した。また、この半整数量子化が電気輸送によっても観測できることを示し、二層モデルにおける電流分配の解析を行うことでこの伝導現象の理解に至った。この結果は1980年代より量子場理論において盛んに議論されていた単一ワイル粒子の量子パリティ異常を、固体中で実証した結果である。

第七章では、本研究で得られた成果についての総括を記述している。

以上をまとめると本論文では、トポロジカル絶縁体のヘテロ構造化を開拓することで、表面ワイル電子の特異な電気磁気応答を自在に制御し、トポロジカル量子状態の安定化および新規な量子化現象の観測に成功した。今回得られた成果は、今後の更なる機能性開拓や素子応用に向けた基礎原理となり、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。