

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)	氏名	吉 村 幸 徳
学位授与の要件	学位規則第4条第①・2項該当		
論 文 題 目			
Theoretical study on the surface states of topological insulators (トポロジカル絶縁体の表面状態に関する理論的研究)			
論文審査担当者			
主 査	教 授	高 根 美 武	
審査委員	教 授	角 屋 豊	
審査委員	教 授	嶋 原 浩	
審査委員	助 教	井 村 健一郎	
〔論文審査の要旨〕			
<p>トポロジカル絶縁体 (TI) とはトポロジカル指数によって特徴づけられる非自明なバンド絶縁体であり、試料表面にのみ金属的な状態を持つ。この表面状態はトポロジカルに保護されており、不純物等の影響に対して頑強である。そこでは電子のスピンと運動量の向きが互いに強く相関しているため、スピンを反転させなければ運動量も反転しない。その結果、非磁性不純物による 180° の後方散乱が禁止されるため、電気伝導度は不純物の影響をあまり受けない。TI のこのような特徴を利用した超低消費電力デバイスの実現が期待されている。</p> <p>TI の表面状態は理想的にはギャップレスであるが、ナノスケールの厚さを持つ薄膜状の試料では、表と裏の表面状態が混成することによってエネルギーギャップが開き得る。本研究の重要な成果の一つは、このような有限サイズ効果の振る舞いを明らかにしたことである。また、トポロジカルな性質は空間次元に強く依存する。本論文の著者は、これまで理解が不十分であった二次元系におけるトポロジカル相を分類し特徴付ける方法を確立した。これは、超格子のような空間的非一様性を持つ系に対しても適用できる。さらに、二次元的な TI を積層したときに生じる二次元から三次元へのトポロジカル相のクロスオーバーについても検討し、その振る舞いを明らかにした。TI は表面状態の不純物に対する応答の違いによって、強いトポロジカル絶縁体 (STI) と弱いトポロジカル絶縁体 (WTI) に分類される。「強い」および「弱い」の示すところは不純物に対する頑強性であるが、両者では表面状態の現れ方も異なる。STI において表面状態は等方的に現れるが、WTI は異方的な表面状態を持つ。著者は、異方的な WTI 表面にナノスケール構造を微細加工することによって、一次元的な完全伝導チャンネルを生成できることも示した。</p> <p>本論文の構成は以下の通りであり、著者自身の成果は3 - 5章にまとめられている。 1章は研究の背景と本論文の概要について手短かに記述している。</p>			

2章では、本論文の基盤となる、TIに対する有効ハミルトニアン、トポロジカル指数、有限サイズ効果について説明している。

3章では、二次元系に焦点を絞り、空間的な異方性や非一様性がトポロジカルな性質に与える影響が考察されている。TIの標準的なモデルであるWilson-Diracモデルに異方性あるいは非一様性を導入し、その影響により二次元でも異方的な表面状態を持つWTIが存在し得ることを明らかにした。また、弱いトポロジカル相を通常の絶縁体相と区別する処方箋として、多様体へのマッピングを用いる方法、およびWilsonループに沿ったBerry位相を用いる方法を提案した。これらによって、弱い相のトポロジカルな分類が可能であることを明らかにした。

4章では、薄膜状のTIを擬二次元系とみなして Z_2 と呼ばれるトポロジカル指数を計算し、その結果に基づいてトポロジカル相を分類する試みについて述べている。Wilson-Diracモデルの枠内で積層数 N とバンドギャップの大きさを表すパラメータ m_0 の関数として Z_2 指数を計算し、トポロジカル相図を明らかにした。また、 Z_2 指数と同様に N と m_0 の関数として電気伝導度を計算し、その結果に基づいて相図を作成した。それらの相図より、積層数を増やすと二次元的なSTIの振る舞いから三次元的なSTI、WTIあるいは通常の絶縁体へのクロスオーバーが起こり得ることを明らかにした。

5章では、三次元のWTIの表面にナノスケールの立体構造を微細加工することによって、トポロジカルに保護された完全伝導チャンネルを発現させる方法について述べている。STIとは異なり、WTIは不純物に対して弱いとみなされていたが、トポロジカルな性質と有限サイズ効果を組み合わせれば、完全伝導チャンネルが生成できることを明らかにした。WTIの表面に完全伝導なナノ回路を構成できる可能性を示した意義は大きい。

上記の通り、本論文の著者はTIの表面状態に関して、空間的な異方性や非一様性の影響、次元間でのトポロジカル相のクロスオーバー、有限サイズ効果および不純物に対する応答など様々な切り口から理論的に研究し、その特徴的な振る舞いを明らかにした。これらの知見はTIに関する理解を深めるうえで有意義であり、今後の実験的研究の進展を促すと期待される。また、トポロジカルな性質の制御法や表面状態を利用した完全伝導チャンネルの創出といった工学的応用への足掛かりを築くことにも成功した。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（工学）の学位を授与される十分な資格があるものと認められる。

備考 審査の要旨は、1,500字程度とする。