

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	Amit Kumar
学位授与の要件	学位規則第 4 条第①・2 項該当		
論文題目			
Angle-resolved Photoemission Spectroscopy Study of Many-body Effects on 3D Topological Insulator Bi_2Te_3 (角度分解光電子分光法による 3 次元トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 の多体効果の研究)			
論文審査担当者			
主 査	教 授	島 田 賢 也 (放射光科学研究センター)	
審査委員	教 授	黒 岩 芳 弘	
審査委員	教 授	生天目 博 文 (放射光科学研究センター)	
〔論文審査の要旨〕			
<p>本学位論文では、典型的な三次元トポロジカル絶縁体である Bi_2Te_3 について、10 ミクロン程度に微小集光した紫外線レーザーを用いた高分解能角度分解光電子分光 (ARPES) により、バンド構造の温度依存性を詳細に解明し、電子-格子相互作用の始状態電子エネルギー依存性について初めて定量的に評価している。</p> <p>本学位論文の構成は、以下の通りである。まず第 1 章ではトポロジカル絶縁体の発見にいたるまで研究の歴史や基礎的事項をまとめ、第 2 章では結晶成長、試料の評価、ARPES の原理について記述している。第 3 章では ARPES を用いた電子-格子相互作用の自己エネルギーの評価に関する理論的基礎づけを展開し、Bi_2Se_3 や Bi_2Te_3 の電子-格子相互作用に関連して行われた実験および理論計算をレビューしている。ARPES の先行研究では、電子-格子相互作用の結合定数の値が 0 (弱結合) から 3 (強結合) まで、定性的にも大きく異なる値が報告されており、また温度に依存してトポロジカル表面準位のエネルギーがシフトすることが報告されているが、その起源は明らかになっていなかった。スラブ模型を用いた第一原理バンド計算によれば、Bi_2Te_3 の電子-格子結合定数はたかだか 0.1 程度 (弱結合) であり、その大きさは始状態電子エネルギーに依存し、またそのエネルギー依存性と電子状態密度とが相関することが示されている。しかし実験的にはバンド構造の温度依存性や電子-格子相互作用の始状態電子エネルギー依存性に関する系統的な研究はなされていない状況であった。そこで本学位論文では、これまでに明らかにされていないトポロジカル表面準位およびバルクバンドの温度依存性の解明、電子-格子相互作用の結合定数の始状態電子エネルギー依存性の解明を研究の目的としている。第 4 章では、Bi_2Se_3 に比較して研究例が少ない Bi_2Te_3 に着目し、微小集光した紫外線レーザーを励起光源とする高分解能角度分解光電子分光による精密な実験結果とその考察を記述している。バルクの価電子帯および伝導帯の温度依存性を見るために、本研究ではフェルミ準位近傍に伝導帯が存在する n 型試料を用いている。まず低温 (17 K) でトポロジカル表面準位のバンド分散を精密に調べたところ、電子-格子相互作用に由来するバンド分散の折れ曲がり構造は明瞭に観測されなかった。このことは電子-格子相互作用の結合定数がかなり弱いことを示している。温度</p>			

を室温まで上げていくと、ディラック点およびバルクの価電子帯が高エネルギー側にシフトしていくことが明らかになった。一方、フェルミ準位近傍のバルクの伝導帯のエネルギーシフト量は、価電子帯に比較して小さいため、昇温に伴ってバンドギャップが減少する。またトポロジカル表面準位の群速度および価電子帯とディラック点のエネルギー差も昇温に伴い減少する。この結果はバルクおよびトポロジカル表面準位の温度依存性はリジッドバンドシフトではなく、バンド構造が変化することを示している。価電子帯と伝導帯のエネルギー差の温度依存性と電子-格子相互作用に由来する自己エネルギーの虚部の温度依存性は相関しており、バンド構造の温度依存性が電子-格子相互作用に由来することを示唆している。一方、こうしたバンド構造の変調にも関わらず、ディラック点におけるエネルギー縮退は解けず、トポロジカルに保護されていることが明らかとなった。次にディラック点を基準に始状態電子エネルギーを指定し、ARPES スペクトルの線幅の温度依存性を精密に計測することにより、電子-格子相互作用の結合定数を決定している。その結果は、ディラック点からエネルギーが上がると結合定数の値は 0.13 から減少し、100 meV のところで 0.02 程度の極小値をとる。そこからフェルミ準位に向けてゆるやかに上昇して 0.05 程度になる。この振る舞いは、準粒子寿命を与える自己エネルギーの虚部と相関している。理論研究によれば、電子-格子相互作用の行列要素のエネルギー依存性は比較的弱く、その始状態電子エネルギー依存性は概ね散乱チャンネル数を与える状態密度に比例する。本研究では、自己エネルギーの虚部が極小となる 100 meV で価電子帯の状態密度が極小となっており、結合定数が極小となることと整合する。さらに自己エネルギーの虚部がディラック点から測って 230 meV のところで極大値をとるが、これはトポロジカル表面準位の状態密度が極大となることと一致している。すなわちディラック点から測って 100 meV からフェルミ準位までのエネルギー範囲において、散乱チャンネルは主にトポロジカル表面準位内に制限されることを示している。これらの実験結果はスラブ模型を用いた第一原理バンド計算の結果と定量的にも良く一致しており、電子-格子相互作用の結合定数の始状態電子エネルギー依存性を初めて明らかにしたものである。第 5 章では本研究の結論をまとめている。

電子-格子相互作用は有限温度において準粒子の寿命、準粒子の平均自由行程、バンドギャップに強く影響を与える。このため本研究で得られた知見は電気伝導度、電子移動度、熱電特性を解明するうえで重要である。さらに温度変化によるトポロジカル相転移、金属原子をドーピングしたときに生じるネマティック超伝導の研究においても電子-格子相互作用が果たす役割について有益な知見を与えるものと期待できる。

申請者は試料の評価、実験、解析、論文執筆に一貫して主体的に取り組んだ。今回得られた研究結果は申請者の粘り強く、緻密な実験およびデータ解析無くしては得られないものである。トポロジカル絶縁体の表面準位における電子-格子相互作用の結合定数の始状態電子エネルギー依存性を初めて定量的に評価し、それが自己エネルギーの虚部あるいは散乱チャンネル数と相関していることを実験的に解明したことは高く評価できる。本研究手法は他の物質にも適用できる一般的な手法であることから物性物理学へのインパクトも大きい。

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

公表論文

Amit Kumar, Shiv Kumar, Yudai Miyai, Kenya Shimada: Temperature-dependent band modification and energy dependence of the electron-phonon interaction in the topological surface state on Bi_2Te_3 , accepted to Physical Review B Letter.

参考論文

Shailja Sharma, Shiv Kumar, Amit Kumar, Kenya Shimada, C.S. Yadav: Electronic transport studies of Ag-doped Bi_2Se_3 topological insulator, accepted to Journal of Applied Physics.