

論文の内容の要旨

論文題目 Photocurrent and magneto-optical responses of topological insulators
(トポロジカル絶縁体における光電流及び磁気光学応答)

氏名 岡田 健

背景と目的

トポロジカル絶縁体は、伝導バンドと価電子バンドの間のエネルギー領域に、表面に束縛された特異な金属状態を備える。この表面電子状態は、ギャップの閉じた線形ディラック分散とスピン運動量ロック（スピンの向きが運動量に対して一意に定まる性質）によって特徴付けられる。これらの特異な性質を反映して、学術的側面では量子異常ホール効果のような新奇な量子現象が、また応用的側面では高効率なスピン電荷変換機能などが観測されており、大きな注目を集めている。一方で、これらの静的な外場に対する応答と比較して、光に対する表面電子状態の応答は未だ十分に開拓されているとは言い難い。そこで本博士論文では、スピン偏極光電流と磁気光学効果という二つの光学現象に焦点を当てて、それぞれ最大化と量子化を狙うことで、トポロジカル絶縁体の表面ディラック電子状態に特徴的な光応答を開拓することを目的とした。

1. トポロジカル絶縁体におけるフェルミ準位制御を通じた円偏光ガルバニック効果の最適化

一般に、空間反転対称性の破れに伴うスピン軌道相互作用は、エネルギーバンドにスピン分裂、即ちスピン運動量ロックを生み出す。円偏光ガルバニック効果とは、このような系に円偏光を照射した際に、角運動量の選択則に由来してスピン偏極した光電流が流れる現象を指し、半導体の量子井戸を中心によく研究がなされてきた。

他方、同じくスピン運動量ロックを備えるトポロジカル絶縁体の表面ディラック電子状態では、特徴的なエネルギーバンドに由来して、半導体量子井戸を凌駕する高い性能指数の円偏光ガルバニック効果が期待される。これまでのところ、トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 において円偏光ガルバニック効果が観測されているが、余剰なバルクキャリアが存在するため更なる最適化の

余地が残されている。そこで本研究では、組成によるフェルミ準位制御が可能な $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 薄膜に着目して、フェルミ準位と円偏光ガルバニック効果の大きさの関係を明らかにし、室温で円偏光ガルバニック効果を最大化することを目指した。

輸送特性と光電流をフェルミ準位の位置に対して広範かつ系統的に調べたところ、フェルミ準位がバンドギャップの中に位置し、表面キャリアのみが伝導に寄与するときに、円偏光ガルバニック効果は顕著に増大することがわかった。これは、フェルミ準位近傍の励起キャリアがバルク状態に散乱されることが抑制されるためと考えられる。さらに、円偏光ガルバニック効果の生成効率に関しては、 Bi_2Se_3 に関する先行研究を上回り、半導体量子井戸と同程度であることがわかった。

2. 量子異常ホール状態における量子化磁気光学効果の観測

トポロジカル絶縁体に表面と垂直な方向を向く磁化を導入すると、交換相互作用を通じて、表面ディラック電子状態の線形分散の交差点に質量ギャップが誘起される。このとき、量子異常ホール効果と呼ばれる、無磁場下でホール伝導度が量子化値 e^2/h を示す現象が現れ、 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 薄膜に磁性元素 Crなどを添加した系で観測が報告されている。他方、光学応答に目を移すと、量子化されたホール伝導度に由来して、光の偏光回転が微細構造定数 ($\alpha = 2\pi e^2/hc \sim 1/137$) によって定められた普遍的な値を取ることが予測されている。このような量子化磁気光学効果の観測には、質量ギャップを十分に下回る低エネルギーの光によるプローブが欠かせない。そこで本研究では、量子異常ホール効果を示す $\text{Cr}_y(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_{2-y}\text{Te}_3$ 薄膜に対してテラヘルツ磁気光学測定を行うことで、量子化磁気光学効果の観測を目指した。

まず、輸送測定の結果から、光学測定で到達可能な最低温 1.5 K で、量子異常ホール効果が現れることを確認した。次に、同じく最低温で磁気光学測定を行ったところ、テラヘルツ領域 (1–8 meV) においてほぼフラットなファラデー及びカー回転角のスペクトルが得られた。また、円偏光に依存した吸収を表す楕円率スペクトルはほぼ零に等しいことがわかった。このことから、質量ギャップは測定周波数領域よりも十分に高いエネルギー領域に存在することが示唆される。また、ファラデー回転角とカー回転角は輸送測定から予想される値とよく一致しており、量子異常ホール効果に対応した量子化磁気光学効果を観測することに成功した。さらに、量子化極限では、ファラデー回転角とカー回転角の間に、基板や膜の誘電率、厚みと言った系の詳細に依らず、微細構造定数のみを含む普遍的な関係式が成り立つことを確認した。

結論

本論文では、トポロジカル絶縁体のスピン偏極光電流の最適化と磁気光学効果の量子化を観測することで、これまで十分に探索されてこなかった表面ディラック電子状態の光応答を、機能的、及び基礎物理学的側面の両方から開拓した。本研究を足がかりに、光スピントランスファートルクやトポロジカル電気磁気効果、光誘起量子ホール効果といったトポロジカル絶縁体特有の新しい光学現象の開拓が加速することが期待される。