

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名： 岡田 健

固体の示す多様な物性に、電子状態やスピン配置のトポロジーが本質的な役割を果たすことが、昨今の凝縮系物理学の進展によって明らかにされつつある。トポロジカル絶縁体は、運動量空間の非自明なトポロジーによって特徴づけられる物質で、その特異な表面電子状態のために大きな注目を集めている。トポロジカル絶縁体の表面電子状態は、零質量の線形ディラック分散とスピン運動量ロッキング（スピンの向きが運動量に対して一意に定まる性質）を備える。表面電子状態特有のスピン運動量ロッキングを反映して、従来型の金属積層膜を上回る極めて高い効率のスピン流-電流変換を発揮することがわかってきた。さらに、磁化の存在によって線形ディラック分散交差点に質量ギャップが開くことにより、零磁場下でホール抵抗が量子化値を示す量子異常ホール効果が観測されるなど、既存の2次元電子系とは一線を画す量子伝導現象が発見されている。しかしながら、表面電子状態の磁気応答については未開拓な領域が数多く残されている。それに対して本博士論文では、トポロジカル絶縁体の光電流効果と磁気光学効果という二つの光学現象に着目し、高品質な薄膜を用いることで表面電子状態に固有の光応答を観測することに成功している。前者については、フェルミ準位の精密な制御を通して、スピン運動量ロッキングに由来した円偏光誘起の光電流（円偏光ガルバニック電流）を最適化し、後者では量子異常ホール効果の発現に伴った偏光回転の量子化を観測している。本論文は五章から構成されており、以下にその概要を述べる。

第一章では、本研究の背景としてトポロジカル絶縁体の導入を行い、第三、四章と密接な関わりのあるスピン流-電流変換と量子異常ホール効果の先行研究を紹介している。

第二章では、本研究で用いた実験手法について記述している。

第三章では、組成によるフェルミ準位制御が可能なトポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$  薄膜を対象として、円偏光ガルバニック電流のフェルミ準位依存性を精査している。フェルミ準位がバンドギャップの中に位置する組成で、円偏光ガルバニック電流が顕著に増大することを見出した。増大の起源として、光励起された表面電子のバルクバンドへの散乱が抑制されることを指摘している。加えて裏面入射の実験から、下面の表面電子状態の寄与は上面の表面電子状態よりも小さいことを言及している。また、既存の2次元電子系と比較すると、易動度は大きく下回るにも関わらず、同程度の大きさの光電流が得られており、表面電子状態の傑出した光電流特性が示唆されている。

第四章では、量子異常ホール効果を示す磁性トポロジカル絶縁体  $\text{Cr}_y(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_{2-y}\text{Te}_3$  薄膜に対して、テラヘルツ領域の磁気光学効果を調べている。最低温 1.5 K において零磁場下でファラデー効果とカー効果を観測しており、回転角スペクトルは平坦、楕円率スペクトルはほぼ零に等しいことが明らかにされている。即ち、測定周波数領域が質量ギャップ内であることを示唆しており、量子化磁気光学効果の観測に必要な低周波数領域が担保されている。ファラデー回転角とカー回転角の値は、輸送測定で観測された量子化ホール伝導度から予測される値とおよそ一致している。また、理論予測の通り、2つの回転角は、微細構造定数によって規定された普遍的な関係式を高い精度で満たすことが示されている。以上を踏まえて、零磁場下での量子化磁気光学効果が初めて観測されたことを実証した。

第五章では、本研究で得られた成果について総括し、展望を述べている。

以上をまとめると、本論文では零バイアス電場での高効率光電流と無磁場での量子化磁気光学効果の実証を通して、スピン運動量ロッキングや量子異常ホール効果といったトポロジカル絶縁体の表面電子

状態固有の性質に由来した光学現象を見出した。本論文で得られた成果は、トポロジカル絶縁体の表面電子状態が、電場やスピン注入などの静的外場のみならず、光に対しても傑出して優れた興味深い応答を示すことを先駆けて実証するものである。今後、トポロジカル絶縁体や類似物質として大きな注目を集めるワイル半金属を舞台として、新奇光学現象の開拓が一層進展することが期待される。

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。