

論文内容の要旨

論文題目 トポロジカル絶縁体の原子ステップが輸送特性に与える影響
(Influence of Atomic Steps on Transport Property of Topological Insulators)

氏名 福居直哉

トポロジカル絶縁体はスピン偏極したディラックコーンを持つため、物理的に興味深いのみならずスピントロニクスデバイスへの応用が期待される物質である。運動量に対して垂直な向きにスピンが向く性質があるため、スピンの向きを変えない不純物に対して運動量を変える散乱がされにくいという性質があると考えられている。この性質は STS を利用した数 nm オーダーのミクロスコピックなスケールでは検証が多くなされている。その一方で、 μm 以上のマクロスコピックなスケールでこの性質が電気伝導の観点から見出されるか否かは検証がなされていなかった。

そこで本研究の目的は、トポロジカル絶縁体表面の 1 原子ステップという散乱体によってトポロジカル絶縁体の電気伝導特性がどのような影響を受けるかを検証することにある。この目的を達成するため、本論文では微傾斜 Si(111)基板の上にトポロジカル絶縁体である Bi_2Te_3 または Bi_2Se_3 を蒸着し、その抵抗率を正方 4 探針法で測定した。さらに、同様の測定を Pb でドーピングされた Bi_2Te_3 に対して行い、フェルミ準位を変調することによる 1 原子ステップの影響の変化を調べた。Bi の単一バイレイヤー(Bi-1BL)を蒸着することによる、1 原子ステップの影響の変化も調べた。

実際の測定では、期待された通りステップ垂直方向のほうが平行方向よりも高い抵抗率が得られた(図 1)。このことから、ステップ垂直方向の抵抗率は薄膜そのものによる抵抗率

に加え、ステップの抵抗も同時に測定されているといえる。また、ステップ抵抗の温度依存性も測定され、温度に依存しないことからステップなどの散乱ポテンシャルによるものであることが明らかとなった(図 2)。本論文では様々な膜厚で異方性を測定し、その膜厚依存性から表面のトポロジカル状態の寄与を見積もった。

バルクの電気伝導に対する寄与は膜厚のおよそ 3 乗で表されるべき乗則に従っていた(図 3)。表面の寄与は膜厚に依存せず一定であると仮定してその差からステップ抵抗を導き、さらに透過率を求めた。その結果、ステップの透過率は Bi_2Te_3 で 0.05, Bi_2Se_3 で 0.5 であることが判明した。これらの値は、もっとも単純な形のトポロジカル表面状態を仮定した透過率よりも Bi_2Te_3 では大きく、 Bi_2Se_3 ではやや下回る結果である。他の系と比較すると、 Bi_2Se_3 に関してはトリビアルな系である $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Ag}$ の透過率 0.3 よりも大きく、 Bi_2Te_3 では小さい。本論文では、この差をフェルミ面の歪み(ワーピング)によるものと解釈した。つまり Bi_2Te_3 ではフェルミ面が大きく歪み、そのために散乱が起こるパスが歪んでいない状態よりも多くなっている。 Bi_2Se_3 ではフェルミ面の歪みが小さく、単純なトポロジカル表面状態が仮定するよりもやや下回る程度になっていると推測された。トポロジカル絶縁体は後方散乱が抑えられるため、トリビアルな系と比べて不純物による散乱に強いといわれているが、系によってはトリビアルな系よりもステップの散乱を受けてステップ透過率を落とすことが判明した。また、この結果はフェルミ面のワーピングの度合いが異なる系の間の電気伝導特性の違いを明らかにした初めての例である。

先述の Bi_2Te_3 試料ではフェルミ準位にバルク状態が表面状態と共存し、バルク伝導の寄与を差し引かねば表面伝導度が求められなかった。しかし、 Bi_2Te_3 は適切な量の Pb をドーピングすることで、フェルミエネルギーをバンドギャップ内に位置させることができる。このとき、フェルミ面にはトポロジカル表面状態のみが存在し、電気伝導は表面状態のみが関与することとなる。本論文では実際に Bi_2Te_3 に Pb をドーピングした微傾斜薄膜を作製し、その電気抵抗異方性を測定することで、バルク状態がフェルミ準位にないトポロジカル表面状態のステップ透過率を求めた。その結果、ステップ透過率は 0.5 前後で、バルク状態を含む Bi_2Te_3 表面状態の値と比べて透過率が大きいことが判明した。Pb ドーピングによってフェルミエネルギーだけが変化しているという仮定の下では、この事実はバルク状態が共存していると表面状態からバルク状態への後方散乱が許されること、および、フェルミエネルギーが下がるとフェルミ面の歪みが減少し、後方散乱が増加することから定性的に説明された。この測定によって、トポロジカル表面状態のステップ透過率はフェルミ準位の位置による影響を受けることが明らかとなった。

Bi_2Te_3 や Bi_2Se_3 の上に Bi-1BL を蒸着することにより、トポロジカル表面状態の存在を保ったまま別の電子状態が形成される。ここまでの結果で、ステップの透過特性は電子状態に依存することが判明しているため、Bi-1BL 蒸着によるステップ透過特性の変化が期待

される。また、Bi-1BLは2次元トポロジカル絶縁体であると予測され、その場合はステップのエッジ部分に新たな伝導チャンネルが生じる可能性がある。測定の結果、Bi/Bi₂Te₃、Bi/Bi₂Se₃ともにそれぞれBi₂Te₃、Bi₂Se₃よりもステップをよく透過することが判明した。Bi-1BLによるエッジ伝導は最大に見積もって $1.7 \times 10^{10} \Omega^{-1} \text{cm}$ で平均自由行程に直すと20 nm程度であった。Bi/Bi₂Te₃ (3QL)とBi/Bi₂Te₃ (1QL)の2次元抵抗温度依存性を測定したところ、低温ではステップ垂直方向の抵抗率のみが温度低下に伴って抵抗率が上昇する現象が見出された。以上から、Bi-1BLの蒸着によって電子状態が変更を受けることに対応して、ステップ透過率も変化することが判明した。

以上の結果から、トポロジカル絶縁体表面の原子ステップは、有限のステップ透過率によってステップ抵抗を生み出すという形で電気伝導特性に影響を与えることが明らかとなった。しかし、フェルミ面ワーピング効果がないトポロジカル物質やフェルミ面にバルク状態がないトポロジカル物質では、後方散乱の抑制のためステップにおけるキャリアの透過率は高いといえる。ミクロスコピックなスケールで確認されている散乱特性と、マクロスコピックな電気伝導現象が対応していることを示す結果となった。原子の蒸着で表面の電子状態を変えると、ステップで電子が感じるポテンシャル障壁も変化し、Bi-1BLの蒸着の場合には透過率が上昇することも示された。これらの成果から、ステップの透過特性がトポロジカル絶縁体表面電子状態の性質を反映するパラメータの一つであるといえる。

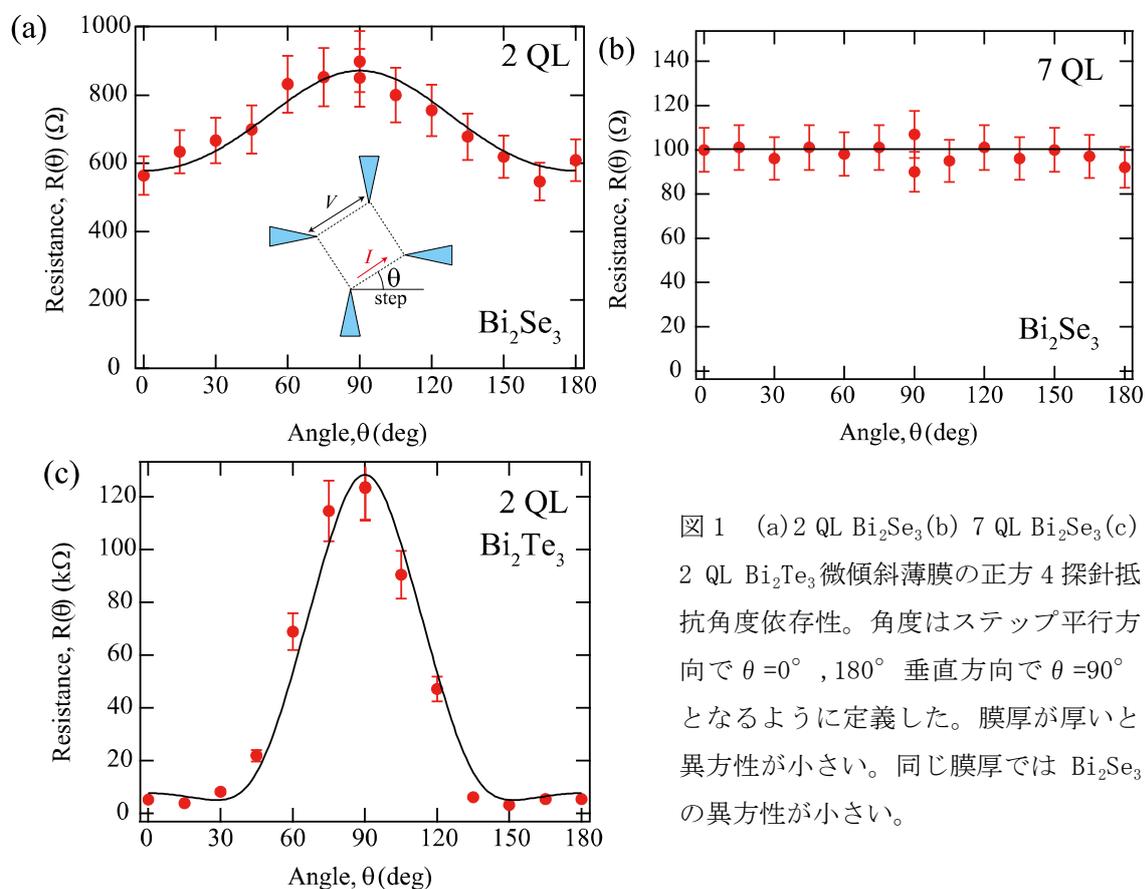


図1 (a) 2 QL Bi₂Se₃ (b) 7 QL Bi₂Se₃ (c) 2 QL Bi₂Te₃ 微傾斜薄膜の正方4探針抵抗角度依存性。角度はステップ平行方向で $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ 垂直方向で $\theta = 90^\circ$ となるように定義した。膜厚が厚いと異方性が小さい。同じ膜厚では Bi₂Se₃ の異方性が小さい。

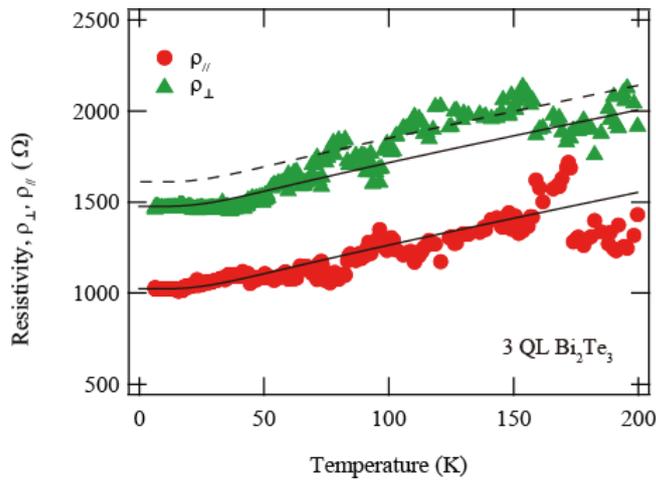


図2 微傾斜 Bi_2Te_3 の 3 QL 薄膜 2 次元抵抗率温度依存性。実線は Bloch-Grüneisen の式によるフィッティング。赤の円はステップ平行方向、緑色の三角形はステップ垂直方向の値を示す。

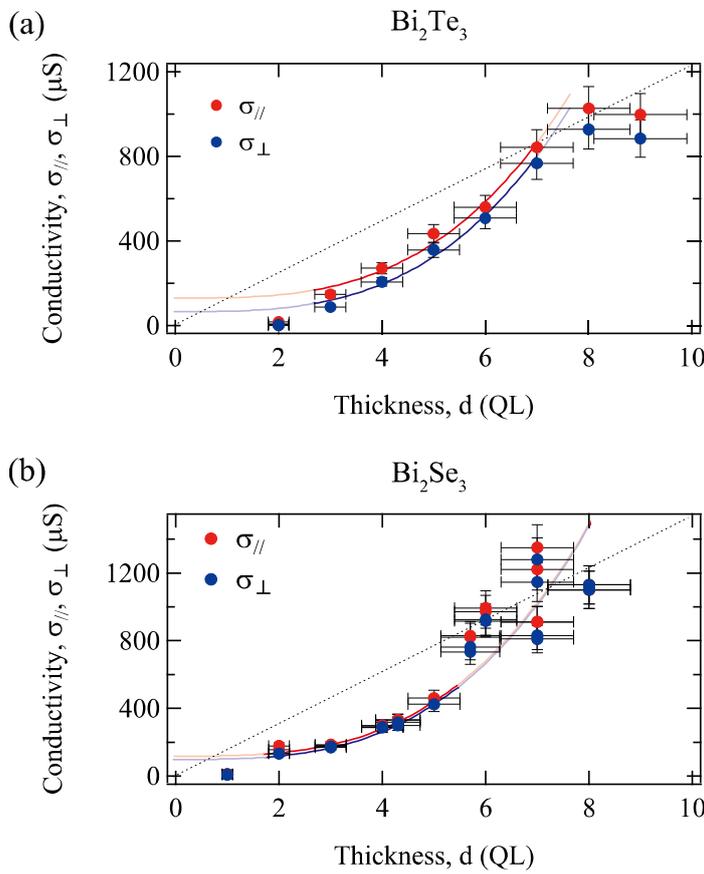


図3 (a)微傾斜 Bi_2Te_3 (b)微傾斜 Bi_2Se_3 の 2 次元電気伝導度膜厚依存性。測定温度は室温。赤色はステップ平行、青色はステップ垂直方向の値を表す。実線は膜厚 3 次の曲線、点線は膜厚 1 次の直線によるフィッティング。