

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25871133

研究課題名(和文)トポロジカル絶縁体と強磁性体接合界面による新奇量子相開拓

研究課題名(英文) Exploring new quantum phases in the interface between topological insulator and ferromagnet

研究代表者

高橋 圭 (Kei, Takahashi)

独立行政法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・上級研究員

研究者番号：90469932

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル絶縁体薄膜(Bi,Sb)₂Te₃を用いて、基板との界面に埋まったディラック状態の検証、Crドーブした(Bi,Sb)₂Te₃薄膜の量子化異常ホール効果について研究を行った。通常の半導体InPを基板に用い基板との共鳴トンネル電流が磁場で振動することを発見し、その振動が界面のランダウ準位に起因していることを見出した。Crドーブ(Bi,Sb)₂Te₃薄膜の製膜し、量子化異常ホール効果の観察に成功した。量子化伝導を解析することで量子化異常ホール効果が通常の量子ホール効果と本質的に変わらないことを見出し、上部と下部表面状態を変えることでランダウ準位のフィリングを変化させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Buried Dirac electron between topological insulator (Bi,Sb)₂Te₃ and conventional semiconductor InP was investigated and Quantum anomalous Hall effect was observed in Cr-doped (Bi,Sb)₂Te₃ film. We found that the resonance tunneling current is oscillated corresponding to the Landau levels that exist at the interface induced by applied magnetic field. Ferromagnetic Cr-doped (Bi,Sb)₂Te₃ films were fabricated. At low temperatures, quantum anomalous Hall effect was clearly observed. By plotting parametric plot of conductance for various gate voltages, the quantized properties were found to be regarded as the same property with conventional quantum Hall effect under a magnetic field. In addition, we controlled the top and bottom surface states to change the Landau filling factor in the bilayer composed of non-doped and Cr-doped (Bi,Sb)₂Te₃.

研究分野：薄膜物性実験

キーワード：トポロジカル絶縁体 量子化異常ホール効果

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究申請当初、トポロジカル絶縁体は既に注目を集めていた。この物質は結晶内部は絶縁体であるが、表面だけに電気が流れるという、これまでの絶縁体、半導体、金属という分類には当てはまらない新しいカテゴリーの物質である。トポロジカル絶縁体の表面電子は、質量ゼロの相対論的粒子「ディラック電子」と呼ばれる状態を形成する。この表面状態の性質は量子ホール効果の条件を満たしているため、この表面状態に強磁性の性質を付加できれば無磁場での量子ホール効果(量子化異常ホール効果)が実現すると予想され世界中で競争が始まっていた。

(2) 本申請研究開始直前に、精華大学とスタンフォード大学のグループの共同研究で、トポロジカル絶縁体(Bi,Sb)₂Te₃にCrをドーピングした薄膜において量子化異常ホール効果を実験的に初めて観察した報告があった。申請計画では、トポロジカル絶縁体と強磁性体の界面で量子化異常ホール効果を発現させる計画であったが、方針を転換してCrドーピング(Bi,Sb)₂Te₃を製膜して量子化異常ホール効果の研究を進めることにした。

2. 研究の目的

(1) トポロジカル絶縁体薄膜の表面ディラック状態の研究は薄膜表面の状態のスペクトロとスコーピーに限られていた。本申請課題の界面研究には表面だけでなく接合界面の状態が重要である。そこで、薄膜の表面ではなく基板との界面に注目した。(Bi,Sb)₂Te₃薄膜を半導体の基板 InP(111)基板に製膜してBi/Sb比を変えることによってフェルミエネルギーとディラック中性点の相対位置を変化させた薄膜と通常のバンド半導体であるInPとのトンネル接合のトンネル特性を測定することによって基板との界面にディラック表面状態の存在を調べる。

(2) 研究開始直前に他のグループから報告のあったCrドーピング(Bi,Sb)₂Te₃薄膜の量子化ホール効果を再現し、量子化過程を詳細に調べることで、トポロジカル絶縁体の表面ディラック状態と強磁性スピンの量子化に与える影響を解明する。さらに、界面状態をより理解するために、(Bi,Sb)₂Te₃とCrドーピング(Bi,Sb)₂Te₃薄膜の二層膜を製膜し量子伝導測定によりトポロジカル絶縁体と強磁性トポロジカル絶縁体との界面状態を調べ、量子化ホール効果を用いたデバイス応用への基礎を固める。

3. 研究の方法

(1) トポロジカル絶縁体(Bi,Sb)₂Te₃と

半導体 InP(111)界面に埋まるディラック表面状態を調べた。膜厚 70nm の(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃薄膜を成長温度、成長レートを最適化し製膜し、薄膜表面と基板裏面にTi/Au電極を蒸着した後、フォトリソグラフィーにより200nm角に薄膜をエッチングして薄膜と基板の界面のトンネル特性を測定した。図1(a)にデバイスの概略図、図1(b)に界面接合のバンドダイヤグラムを示した。バイアス電圧を変化させトンネル電流を測定することによって界面の電子状態を共鳴トンネル効果によって検知することを期待した。

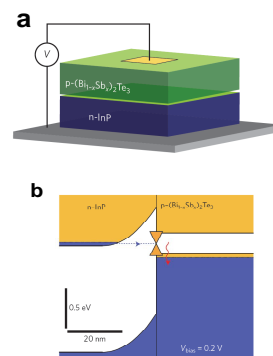


図1:(a)トンネル接合デバイスの概略図。(b)InPと(Bi,Sb)₂Te₃のバンドダイヤグラム。

(2) 強磁性トポロジカル絶縁体Crドーピング(Bi,Sb)₂Te₃薄膜の量子化異常ホール効果を観察するために、Cr_x(Bi_{1-y}Sb_y)₂Te₃薄膜をInP(111)基板に製膜し、薄膜表面にゲート絶縁体膜Al₂O₃を製膜しトップゲート構造でゲート電圧を印加しフェルミレベルの精密制御を行った。図2にフォトリソグラフィーで作製したホールバー形状の電界効果デバイ

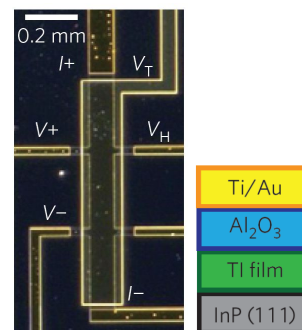


図2:量子化異常ホール効果測定用電界効果ホールデバイスの光学顕微鏡写真。断面の概略図。

スと断面の概略図を示した。

磁場を印加し、磁化反転したときの縦磁気抵抗とホール抵抗を測定することで量子化を調べた。強磁性転移によってできるディラックコーンのギャップ内にゲート電圧を変化させることでフェルミエネルギーを移動させることで異常ホール効果を量子化させることを狙った。

4. 研究成果

(1) トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sbx})_2\text{Te}_3$ ($x=0.9-1.0$) 薄膜とバンド半導体 $\text{InP}(111)$ の接合の成長に成功した。10 K でのトンネル電流を電圧、磁場に対して調べた。トンネル電流の電圧微分にバンドに対する特徴的な構造が観察され、磁場印加に伴い電圧に対して振動することが分かった(図3)。極大値と極小値をそれぞれ赤三角、白三角で示した。この電圧値を磁場に対してプロットしたところ、磁場の平方根に比例することが分かった。これはディラック電子からなるランダウ準位に特徴的な振る舞いであり、トンネル電子が界面に存在するディラック状態を通過していることを示している。磁場に対する極大値をとる電圧の変化からフェルミ速度を求めると、これまで光電子分光測定で報告された値にほぼ等しいことが分かった。したがって、これまでに数多く報告されていたトポロジカル絶縁体表面のディラック状態が基板との界面でも維持されていることが分かった。これは、将来トポロジカル絶縁体をデバイスに組み込むにあたって非常に重要な結果である。

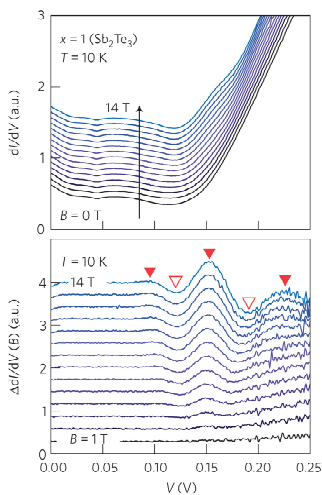


図3：(上) 様々な磁場に対する $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{InP}(111)$ 接合のトンネル電流の電圧微分の電圧依存性。(下) ゼロ磁場でのトンネル電流電圧微分からの差。

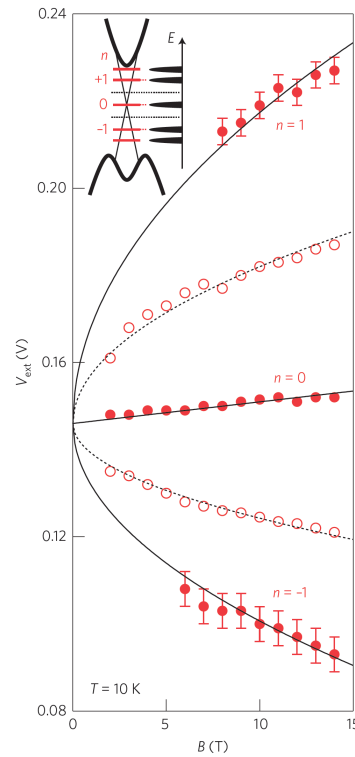


図4：磁場に対するバイアスの極値。赤丸：極大値、白丸：極小値。ランダウ準位+1,-1のピークが $B^{1/2}$ にのっている事が分かる。インセットに磁場中におけるランダウ準位のバンド分散を示した。

(2) 強磁性トポロジカル絶縁体薄膜の成長に成功し、量子化異常ホール効果の観察に成功した。これまでの研究で確立した Bi/Sb 比によるフェルミエネルギー制御によりディラック中性点に調節する方法を、 $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sby})_{2-x}\text{Te}_3$ 薄膜でも応用して中性点に近づけた。図5に $x=0.22, y=0.8$ 高温から 2 K までの縦磁気抵抗とホール抵抗の結果を示した。40 K 以下で強磁性転移に伴い大きな異常ホール効果が観察され、負の磁気抵抗も発現することが分かった。強磁性転移するとディラック状態にギャップが開く。このギャップの中心にフェルミ準位を正確にシフトさせることで量子化することが期待できる。図2に示したトップゲート構造で x と y の変化では困難なフェルミ準位の精密制御を行った。中性点でのゲートバイアスで希釈冷凍機で極低温 50 mK での振る舞いを測定した。図6に縦磁気抵抗とホール抵抗の磁場依存性を示した。磁化反転に対応してホール抵抗が、を示し、縦磁気抵抗が 14 T で $0.03h/e^2$ まで下がることが分かった。低磁場での縦抵抗がゼロに到達しないのは試料の不均一性に起因していると考えられる。様々なゲート

電圧、温度で同様の測定を行い、量子化の振る舞いを詳細に調べた。縦抵抗とホール抵抗

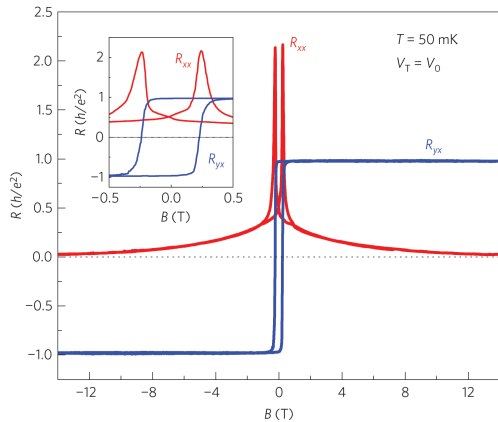


図5：50 mKでのホール抵抗と縦抵抗の磁場依存性。異常ホール効果が量子化しているのが分かる。

から伝導度 σ_{xx} とホール伝導度 σ_{xy} を算出しパラメトリックプロットすることで量子化が解析できる。図6に様々なゲート電圧における温度変化でのプロットを示した。黒線は時間反転対称性が破れた二次元電子の一般化された繰り込み群から導いた曲線である。この強磁性トポロジカル絶縁体で実現した量子化ホール効果が基本的に磁場中の量子ホール効果と同じ振る舞いを示し、両ホール効果が本質的に変わらないことを見いだした。トポロジカル絶縁体の量子化異常ホール効果が無磁場中の非散逸流として応用する点から重要な理解を進めたと言える。

(3) 強磁性トポロジカル絶縁体界面の理解をさらに進めるために、図6に示すCrノドープの $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 薄膜と強磁性のCrドープ $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 薄膜の二層構造を製膜して特性を評価した。これまでの研究からCrドープ膜の表面は強磁性によるギャップが開いて、ノドープ膜と基板の界面にはディラック状態が実現し磁場によってランダウ準位が形成されると期待される。これはトポロジカル絶縁体薄膜の2つの表面が異なるものを人工的に作って調べた初めての例である。図7にディラック中性点近くの2つのy組成のホール伝導度と伝導度の磁場依存性を示した。ホールドープ側 $y=0.88$ では $n=1$ 、電子ドープ側 $y=0.86$ では $n=0$ 状態が強磁場下で実現することが分かった。これは、二層膜のCrドープ側の表面とノドープ側と基板との界面のディラック状態のポテンシャルエネルギーが異なる事に起因していると結論づけた。このようにトポロジカル絶縁体

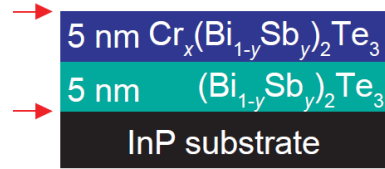


図6：強磁性トポロジカル絶縁体とトポロジカル絶縁体の二層膜構造

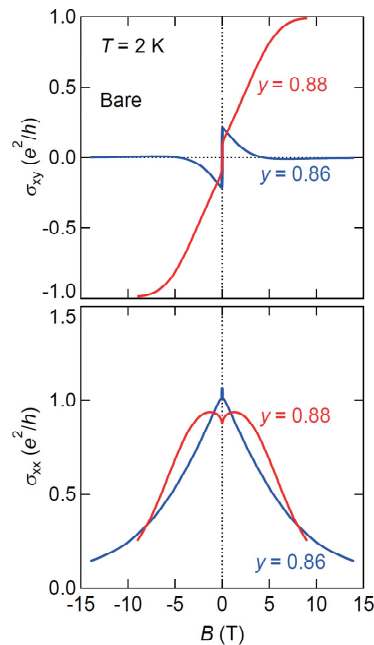


図7：ホールドープ側と電子ドープ側の組成をもつ二層膜のホール伝導度と縦伝導度の磁場依存性。

のディラック状態の量子化、強磁性トポロジカル絶縁体の量子化異常ホール効果の理解に大きな進展があった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

J. G. Checkelsky, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, Y. Kozuka, J. Falson, M. Kawasaki and Y. Tokura, "Trajectory of the anomalous Hall effect towards the quantized state in a ferromagnetic topological insulator" Nature Phys. 査読有 10 731 (2014). DOI: 10.1038/NPHYS3053

R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. Kikutake, J. G. Checkelsky, K. S. Takahashi, M. Kawasaki and Y. Tokura, "Dirac electron states formed at the heterointerface between a topological insulator and a conventional semiconductor" Nature Mater. 査読有 13

〔学会発表〕(計2件)

吉見龍太郎 ($\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$) $_2\text{Te}_3$ における電界効果デバイスの作製と両極性伝導
日本物理学会 2014年9月7日 中部大学
(春日井市)

R. Yoshimi, Resonant tunneling via Dirac electron states in a topological insulator/semiconductor junction, APS March meeting 2014 2014年3月3日
Denver (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 圭 (TAKAHASHI, Kei)
独立行政法人理化学研究所・創発物性科学
研究センター・上級研究員
研究者番号: 90469932