

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18755

研究課題名(和文)従来にない対称性を有する新奇ホール効果「トポロジカルプレーナーホール効果」の探求

研究課題名(英文)A quest of a novel Hall effect, topological planar Hall effect

研究代表者

白石 誠司 (Shiraishi, Masashi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：30397682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル絶縁体/絶縁体/強磁性体からなる3層構造において、強磁性金属からの磁場によって誘起される、従来になり対称性をもつ「トポロジカルプレーナーホール効果」の計測を目指した研究を遂行したが、絶縁性に重心を置きすぎると磁性の作用が弱まり、逆に十分な磁場がトポロジカル絶縁体に印加できるように重心を おくと絶縁性が弱まる、という互いにトレードオフの関係にあることが研究期間中に明らかになった。

一方、トポロジカル絶縁体のトポロジカル性、特にスピン偏極観測とスピン偏極生成をオンサーガーの相反定理を満たす形で室温まで観測できたことはトポロジカル絶縁体物性の発展に重要であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル物性は21世紀に勃興した最先端の物理学領域であるだけでなく、従来の物性物理学だけでなく、高エネルギー物理学・位相幾何学なども包括する新しい学術領域である。この新学術領域の地平を、トポロジカルなスピン変換をオンサーガーの相反定理を満たす形で計測することで広げることができたことは極めて意義深い。

研究成果の概要(英文)：A study for a quest of a novel Hall effect, the topological planar Hall effect, has been carried out by fabricating topological insulator(TI)/normal insulator(I)/ferromagnet(FM) trilayer systems. However, a trade-off effect was found by the study, i.e. strong normal insulator kills the coupling of the TI and the FM and weak normal insulator kills topological states of TIs due to the magnetic field from the FM. So, it was not easy to observe the effect successfully in the research time period.

Meanwhile, it is quite significant that topological spin conversion with Onsager reciprocity up to room temperature was successfully achieved.

研究分野：固体物理

キーワード：トポロジカル絶縁体 プレーナーホール効果 強磁性体

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体(TI)は表面が金属相、バルクが半導体相となる固体の新しい相である。その存在は2005年に Kane らによって理論的に予言されたが、2007年に HgTe が、2008年に BiSb がそれぞれ2次元、3次元 TI であることが実験的に確認されて以来、爆発的に研究が行われている物性物理で最もホットな材料の1つと言える。その理由の1つに、TIにおける表面金属相が線型な交差バンド構造を持っている、即ち固体中で相対論効果が顕著となるディラック電子系になっていること、更に各線型バンドのスピンの縮退が解け、100%スピン偏極した状態になっていることが挙げられる。ディラック電子系で特徴的な効果が Klein によって予言された”Klein tunneling (Klein paradox)”であるが、これはディラック電子系におけるトンネル効果において、反射波が入射波より大きくなるなどの特徴を有する。この効果は同じディラック電子系である TI でも発現すると予想されているが、実験的な観測例はない。

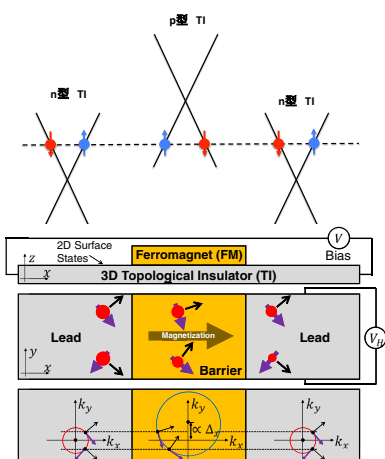
2. 研究の目的

本提案の目的は、本年のノーベル物理学賞とも関連が深く、現在最も大きな関心を集める材料の1つであるトポロジカル絶縁体(TI)を用い、TI 中での Klein tunneling の実現を通じて新奇なホール効果である「トポロジカルプレーナーホール効果」を発見することにある。

トポロジカル絶縁体(TI)は表面が金属相、バルクが半導体相となる固体の新しい相であり、特に金属相はディラック電子系が実現される2本の線型バンドがフェルミ準位で交差する構造を持つ(3次元的にバンド構造を描けば、ディラックコーンと呼ばれる円錐型バンド構造を持つ)。更にそれぞれの線型バンドではスピン縮退が解けているため100%スピン偏極しており(左図)運動量が決まると自動的にスピン方向が固定される「スピン=運動量ロッキング」が生じスピン偏極が生じる。このようなユニークなバンド構造から、TIはスピントロニクスやディラック電子系物性物理領域において極めて重要な材料となっている。このようなバンド構造をもつ材料に特徴的に発現する効果に”Klein tunneling”がある。高エネルギー物理では観測が困難とされているが、ディラック電子系を有する固体であるグラフェンでは2009年に実験的に観測された。この効果はディラック電子系である TI で発現すると予想されているが、実験的な観測例はなく、TI という現在最も注目される材料系における同効果の観測は強く期待されている。更にこの”Klein tunneling”の実現によって発現すると理論的に予想されている新奇ホール効果が「トポロジカルプレーナーホール効果」である。ホール効果はいわば旧くて新しい効果であり、特に最近10年でスピントロニクス領域におけるスピンホール効果、熱ホール効果、更に強磁性 TI で発現する量子異常ホール効果など、次々と新しいホール効果が発見されそのファミリーが増え続けているが、これらの効果では全て磁化(磁場印加)方向と電流方向の双方に垂直な方向にホール電圧が発生する。一方本提案で発見を目指す新奇ホール効果は全く異なる対称性を有し、その発見は従来のホール効果理解を根本的に変更することを求めるものになり、極めて意義深い。

トポロジカル絶縁体(TI)は表面が金属相、バルクが半導体相となる固体の新しい相であり、特に金属相はディラック電子系が実現される2本の線型バンドがフェルミ準位で交差する構造を持つ(3次元的にバンド構造を描けば、ディラックコーンと呼ばれる円錐型バンド構造を持つ)。更にそれぞれの線型バンドではスピン縮退が解けているため100%スピン偏極しており(左図)運動量が決まると自動的にスピン方向が固定される「スピン=運動量ロッキング」が生じスピン偏極が生じる。このようなユニークなバンド構造から、TIはスピントロニクスやディラック電子系物性物理領域において極めて重要な材料となっている。このようなバンド構造をもつ材料に特徴的に発現する効果に”Klein tunneling”がある。高エネルギー物理では観測が困難とされているが、ディラック電子系を有する固体であるグラフェンでは2009年に実験的に観測された。この効果はディラック電子系である TI で発現すると予想されているが、実験的な観測例はなく、TI という現在最も注目される材料系における同効果の観測は強く期待されている。更にこの”Klein tunneling”の実現によって発現すると理論的に予想されている新奇ホール効果が「トポロジカルプレーナーホール効果」である。ホール効果はいわば旧くて新しい効果であり、特に最近10年でスピントロニクス領域におけるスピンホール効果、熱ホール効果、更に強磁性 TI で発現する量子異常ホール効果など、次々と新しいホール効果が発見されそのファミリーが増え続けているが、これらの効果では全て磁化(磁場印加)方向と電流方向の双方に垂直な方向にホール電圧が発生する。一方本提案で発見を目指す新奇ホール効果は全く異なる対称性を有し、その発見は従来のホール効果理解を根本的に変更することを求めるものになり、極めて意義深い。

3. 研究の方法



研究の遂行には安定なバルク絶縁性、即ち TI 内部の半導体相から熱励起されるキャリアが少なくディラック電子系にアクセス可能な TI が必要であり、バルク絶縁性3次元 TI である BiSbTeSe (BSTS) を用いて実験を遂行した。本提案で目指した素子構造と新奇ホール効果発現メカニズムの概要を左図に示す。3次元 TI 上の一部に強磁性体(FM)を配置し、更にゲート電圧印加などで FM 直下の TI のフェルミ面を、FM が配置されていない部分の TI とは逆極性を持つように調整して資料の長手方向に電流を流す。FM の磁化方向は電流に平行にする(垂直ではなく平行であることは極めて重要である)。これが”Klein tunneling”が発現するバンド配置であり、これを実現することが新奇ホール効果発現のために必要な1番目の条件である。2番目の条件は、FM 直下の TI に、FM からの磁気近接効果により磁化が弱く誘起されることである。左下図で FM 直下の部分のフェルミ円中心が $+k_y$ 方向に

ずれているのは、磁気近接効果による磁化が、TI の持つ強く Rashba 効果により有効電場に変換される、固体中の相対論効果による。この状態で TI の両端で電流を流すと、スピン＝運動量ロッキングによりスピン方向が固定された電子の運動が生じる(左下図の左側の TI のフェルミ円上に電子の運動を示す。スピン方向は左下から 2 番目の図との対応に留意)。この電子が FM 直下の p 型領域に侵入すると、キャリアは電子からホールに切り替わる。ここで、(+k)方向の運動量を持つホールは(-k)方向の運動量を持つ電子の運動と等価であるために、バンド図上は左下図に示すようにフェルミ円の左下に移動することになる。この時、スピンは保存されることから逆に運動量の方向が一意に決定され、図に示すように素子上、電流の流れる方向に垂直方向に電子が偏ることが生じる。その偏りをホール電圧  $V_H$  として計測できれば、「トポロジカルプレーナーホール効果」が発見できたと結論できる。以上が本効果の発現機構と測定機構の概略である。

#### 4. 研究成果

1 年目：本提案で目指すトポロジカルプレーナーホール効果の観測のためには強磁性体/トンネル絶縁体/トポロジカル絶縁体の三層構造が必要である。この構造において、強磁性体からの漏洩磁場がトポロジカル絶縁体のもつトポロジを破壊しないために、良質なトンネル絶縁体が必要であることが理論的考察により明らかとなった。そこで代表者の有する MBE 装置を用いて、良質なトンネル絶縁膜の成長を開始したが、初期の段階で MBE 装置にリークが見つかり、その修理とメンテナンス、MBE の再立ち上げに予想以上の時間がかかり(リーク源の特定と修理に時間がかかってしまった)、当該デバイスの作製には至っていない。

そこで、MBE の修理中にトポロジカルプレーナーホール効果観測の際に重畳する可能性のあるトポロジカルなスピン変換機能を定量的に精査することを行い、All-electric なトポロジカルスピン変換をナノデバイス作製を通じて実現し、更にその現象にオンサーガー相反性があることも確認することができた。従来、トポロジカル絶縁体のスピン変換はスピン⇒電荷、電荷⇒スピンと片方のパスの変換しか 1 つの素子で実現できなかったが、本研究による現象に確かに相反性のあることを確認することができ、基礎物性物理学の面で大きな進歩を実現することができた。

2 年目：MBE が稼働し、絶縁膜の成長を開始することができた。絶縁層としては MgO を用いて研究を推進したが、強磁性層とトポロジカル絶縁体の直接ヘテロ接合では強磁性層からの磁性によってトポロジカル状態が壊れる一方で、強磁性層からの磁化によって本提案で狙うホール効果を発現するためのトポロジカル絶縁体のバンドがシフトすることが必要であるために、最適な薄さの絶縁膜が必要である。2 年目では fine tuning を成功させるに至らず、狙ったホール効果を観測するには至らなかった。

一方で、この絶縁膜は並行的にすすめているトポロジカル状態の電気計測及びトポロジカルスピン偏極のセンシングのための技術開発においてはトポロジカル絶縁体表面の酸化を防ぐ意味で非常に重要であることが徐々に解明されてきた。トポロジカルスピン偏極・センシングそのものはこれまで 150K 程度で失活していたトポロジカル性(これはバルクからの熱励起キャリアの寄与によるものなのでトポロジカルギャップを十分に大きくできない現状では不可避である)を室温でもセンシングすることに成功し、トポロジカル性を有する材料で汎用的に用いられる手法であることを証明でき、さらに結晶トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体への発展も可能な手法であることを明らかにできた。

3 年目：トポロジカル性を壊さない程度の弱結合で、かつホール効果を誘起するために十分な磁場をトポロジカル絶縁体に作用させるような最適な強磁性体/絶縁体/トポロジカル絶縁体の接合系を実現することに非常に苦労した。ポイントは絶縁体の薄さと絶縁性であるが、絶縁性に重心を置きすぎると磁性の作用が弱まり、逆に十分な磁場がトポロジカル絶縁体に印加できるほうに重心をおくと絶縁性が弱まる、という互いにトレードオフの関係にあることが明らかになった。そのため、現状の技術で明瞭なトポロジカルプレーナーホール効果を明確に発現させることは容易ではないことが明らかになった。

一方、本研究のバイプロダクトとして、トポロジカル絶縁体のトポロジカル性を室温まで観測することについては再現性も含めて検証することができ、現在論文を投稿中である。特にスピン偏極観測とスピン偏極生成をオンサーガーの相反定理を満たす形で室温まで観測できたことはトポロジカル絶縁体物性の発展に重要であると考えられる。

(実験データについては現在論文投稿中のため報告書には記載しない)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Yuichiro Ando and Masashi Shiraiishi
2. 発表標題 Spin-charge interconversion in topological surface states
3. 学会等名 日本磁気学会第42回学術講演会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白石誠司
2. 発表標題 異種材料結合系におけるスピン輸送とスピン変換
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考