

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K13988

研究課題名（和文）磁性トポロジカル絶縁体薄膜における新規量子輸送現象の探索

研究課題名（英文）Exploring exotic quantum transport phenomena in magnetic topological insulator thin films

研究代表者

佐藤 雄貴（Sato, Yuki）

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：90909219

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：異なる物質同士を隣接させるとお互いの電子状態が混ざり合い、特異な物性を生じることがある。このような電子状態の観察や制御は次世代の演算素子としての応用への期待からも精力的に研究がなされている。本研究では電子状態がトポロジカルな性質で特徴づけられる磁性トポロジカル絶縁体とトポロジカル超伝導体を積層させたデバイスの合成に成功した。またこのデバイスにおける電気特性を調べることで、このデバイスにマヨラナ粒子が出現するための理論制約が満たされていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

薄膜合成技術を駆使することにより、物質の電子状態の制御とトポロジカル超伝導体の候補物質の合成を実証した。特に強磁性と超伝導を共存したトポロジカルなカイラル超伝導体を合成に成功した。本研究成果は今後マヨラナ粒子の検出や制御を行うための良好な物質基盤の構築へと貢献したと考えられる。

研究成果の概要（英文）：When different materials are placed adjacent to each other, their electronic states can be hybridized, leading to exotic quantum phenomena. The observation and control of such electronic states are being actively researched towards possible applications in next-generation memory and computational devices. In this study, we successfully synthesized a device by layering a magnetic topological insulator and a topological superconductor, both characterized by topological properties of their electronic states. By investigating the electrical properties of this device, we revealed that the theoretical conditions for the emergence of Majorana particles in this device are satisfied.

研究分野：物性物理

キーワード：トポロジカル物性 超伝導 薄膜 量子輸送

1. 研究開始当初の背景

物質の電子状態が非自明なトポロジによって特徴づけられるトポロジカル物質の研究は、現代物性物理学の中心的な研究分野の一つである。特にトポロジカル超伝導体はその表面や端状態としてマヨラナ粒子が出現することが理論的に予想されており、外部摂動に強いとされるトポロジカル量子計算への応用への機運も後押しして精力的な研究がなされてきた。トポロジカル超伝導体の候補物質は数が少なく、また応用的観点からもウェハー規模の素子の合成が求められるがこれを満たす物質はさらに限られる。一方別のアプローチとして、トポロジカル絶縁体の表面状態に超伝導近接効果を導入することでトポロジカル超伝導体を人口的に創出できることが理論提案されている。このアプローチでは二つの物質を積層することで実現が可能であるが、これまでに行われたほとんどの研究ではトポロジカル絶縁体上に超伝導膜をスパッタ蒸着させたものに限られ、良好な結晶性を有する界面は報告されていなかった。

これらの問題を解決するためには分子線エピタキシー (MBE) 法を活用する必要がある。この薄膜合成の技術を用いることで、原子レベルで平坦な界面を得ることが出来ることに加えて、ウェハー規模の素子を合成することも可能である。さらに積層する各層の物質の化学組成やストレイン、膜厚など種々のパラメーターを高度に制御が可能であり、トポロジカル超伝導体を人工的に設計することが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では MBE 法を用いて原子レベルで平坦なエピタキシャル界面をもつトポロジカル絶縁体と超伝導体のヘテロ構造を作製し、トポロジカル超伝導体の物質基盤を構築することを目的とする。またトポロジカル絶縁体に磁性元素をドーブした磁性トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合系を作製し、時間反転対称性の破れたカイラルなトポロジカル超伝導体の合成を行う。さらに得られた薄膜のデバイスの輸送特性を評価することでトポロジカル超伝導体にユニークな特性の観測を目指す。

3. 研究の方法

磁性トポロジカル絶縁体としては Cr 元素をドーブした $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ (CBST) が確立されている。この物質は MBE 法によって合成が可能であり、かつ化学組成を制御することによって磁気ギャップやフェルミ準位を高度に制御することが可能である。フェルミ準位が磁気ギャップ中に位置するとき量子異常ホール効果が表れることが知られており、これに超伝導近接効果を与えることでカイラルマヨラナエッジモードの出現が理論的に予測されている。CBST とのエピタキシャル界面を成長させる上で好ましい超伝導体としては $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ (FST) が挙げられる。この物質は鉄カルコゲンシートから成る擬 2 次元的な電子構造を有し、母物質の FeTe と Bi_2Te_3 の間で良好なエピタキシャル界面を作ることが可能であると報告されている。本研究ではこの FT/BT 積層系を拡張させ、CBST/FST ヘテロ構造を有したデバイスを作製し、その輸送特性を評価する。特にカイラルマヨラナエッジモードが出現すると期待される電子状態を実現するために FST の超伝導転移温度の最適化および CBST が量子異常ホール効果を発現するための化学組成を探索する。

4. 研究成果

まず FST の単結晶薄膜の合成を行った。さまざまな基板上に蒸着を行ったところ、CdTe 基板上において面内の配向が非常に良好な薄膜試料を得ることに成功した。さらに蒸着後 Te 雰囲気下で室温まで降温することで、超伝導転移温度 T_c が優位に増大することが分かった。最適化した成長条件で得られた超伝導相図 (T_c - x) は単一のドームを有しており、最適置換量 $x = 0.1$ で $T_c \sim 12$ K が得られた (文献 1, 図 1)。最適 T_c はバルク結晶と比べてほとんど同じかわずかに低い。一方で組成 x に対する振る舞いは二つの超伝導ドームをもつバルクとは大きく異なる。このことは基板との相互作用によってバルクとは異なる電子状態が実現していることを示唆している。薄膜が基板から受ける影響としてはストレインの他に構造不安定性の抑制が考えられる。例えば母物質の FeTe では $T_c \sim 65$ K で正方晶から単斜晶への構造相転移を生じるが、薄膜試料においてはこれに起因した輸送係数への異常が大きく抑制されていることが明らかになった。実際に FST 薄膜の結晶構造を加速器 X 線散乱実験によって低温まで測定したところ、エピタキシャル成長している薄膜でのみ構造相転移が大きく抑制されている構造的証拠を得た (論文準備中)。このことは基板と試料の相互作用を通じて物質の構造的不安定性を制御することが出来ることを意味している。

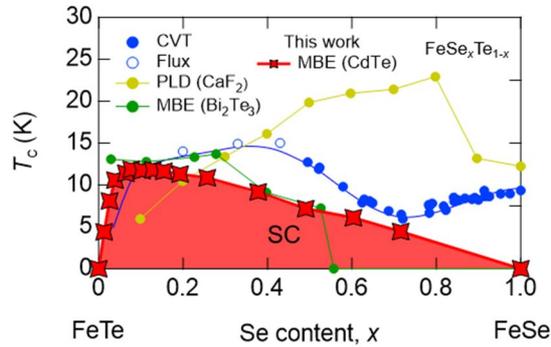


図 1 : FST の超伝導相図。赤が本研究で得られたデータ (文献 1)。

更に FST 薄膜の超伝導状態の性質を詳細に調べるため、パルス高磁場施設において上部臨界磁場 H_{c2} の測定を幅広い組成 x について行った。 H_{c2} は FeSe に近い組成では典型的な擬 2 次元的な振る舞い (面直磁場に対して軌道対破壊効果が、面内磁場に対してパウリ対破壊効果が支配的) が観測された。一方 x を減らしていき FeTe に近い組成になると、面直磁場に対して軌道対破壊効果の影響がほとんど観測されず、いずれの磁場印加方向においてもパウリ対破壊効果による影響が支配的になることを明らかにした。このことは FeTe に近い組成の FST において強結合超伝導が実現していることを示唆しており、更に低温高磁場下で FFLO 状態といった非自明な超伝導相が現れることが期待される (論文準備中)。

次にカイラルトポロジカル超伝導体を合成するために、最適 T_c を有する FST ($x = 0.1$) の上に CBST を蒸着させたデバイス CBST/FST を作製した。断面 STEM 像において原子レベルで平坦な界面が生成されていることを確認した。さらに EDX による元素マッピングを行ったところ、各元素は各レイヤー内で均一に分布しており、元素の拡散は有意に見られないことが分かった (文献, 図 2)。

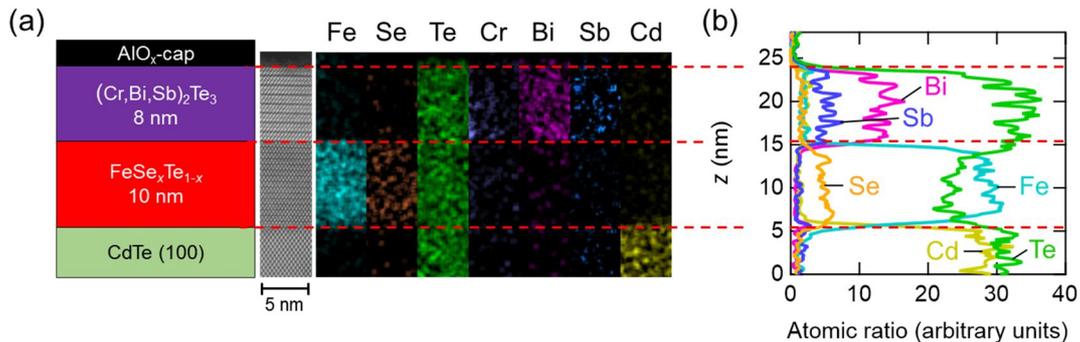


図 2 : CBST/FST ヘテロ構造。(a) 試料の模式図と断面 TEM、EDX 像。
(b) EDX から算出した各元素比の高さ方向に対するプロファイル (文献 1)。

次に CBST/FST ヘテロ構造について Cr, Bi, Sb の比を制御し、異常量子ホール効果が報告されている組成に近いデバイスを合成した。デバイスの電気輸送特性を低温まで評価したところ、低温で大きな異常量子ホール効果が観測された。ゼロ磁場の内装値を温度に対してプロットすると、キュリー温度 $T_{Curie} \sim 60$ K 以下から異常ホール伝導度が発達し、10 K では量子化値 e^2/h の 0.8 倍程度まで増大している (文献 1, 図 3)。なお 10 K 以下ではデバイスが超伝導へと転移するため、異常ホール効果を測定することは出来ない。得られた温度に対する異常ホール伝導度の発達曲線は、異常量子ホール効果が観測されている CBST と比べて遜色なく、例えば 0.1 K といった十分低温までホール効果の測定を行うことが出来ればホール伝導度の量子化が観測されると期待される。CBST が FST という金属的な物質上に蒸着されているにも関わらずホール伝導度が量子化に近い値をとっていることは驚くべきことであり、CBST のカイラルエッジ状態が FST の電子状態と干渉することなくロバストに存在することを示唆している。また超伝導層と異常ホール絶縁体層を独立に制御することにより、高い T_c と大きな異常ホール伝導度を単一デバイスで両立させることに成功した点は MBE の強みが発揮された点と言える。このような超伝導と量子異常ホール絶縁体の接合はカイラルマヨラナエッジモードが出現するための理論的要請を満たすものであり、今後マヨラナ粒子の検出検証を進める上で良好な物質基盤を提供したものと考える。

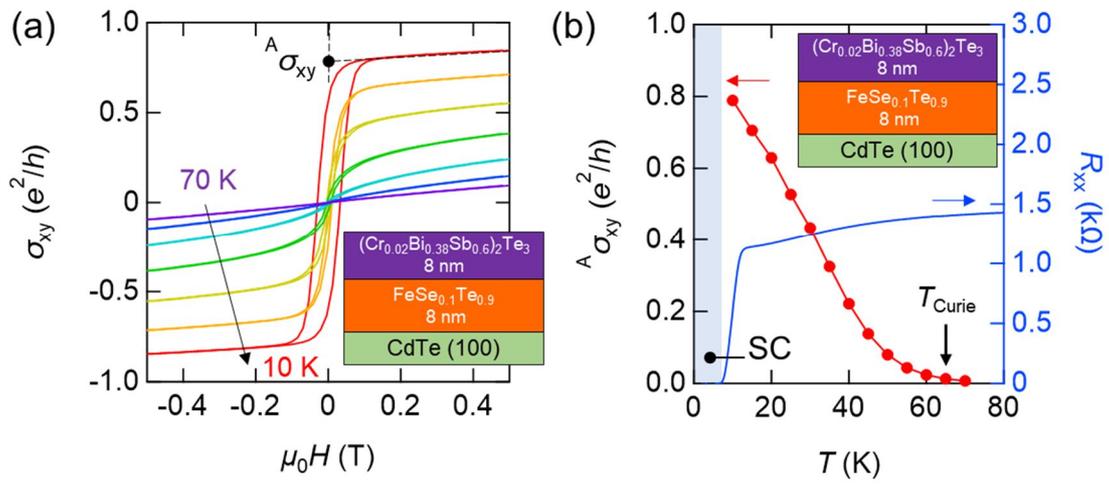


図 3 : CBST/FST ヘテロ構造の輸送特性。(a) ホール伝導度の磁場依存性。
 (b) 異常ホール伝導度と電気抵抗の温度依存性 (文献 1)。

文献 1 : Y. Sato *et al.*, Phys. Rev. Material **8**, L041801 (2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuki Sato, Soma Nagahama, Ilya Belopolski, Ryutaro Yoshimi, Minoru Kawamura, Atsushi Tsukazaki, Naoya Kanazawa, Kei S. Takahashi, Masashi Kawasaki, and Yoshinori Tokura	4. 巻 8
2. 論文標題 Molecular beam epitaxy of superconducting FeSexTe1-x thin films interfaced with magnetic topological insulators	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 L041801
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.8.L041801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yuki Sato
2. 発表標題 Non-reciprocity as a probe of exotic quantum many-body states in iron-based superconductors
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤雄貴
2. 発表標題 MBE成長させた FeSexTe1-x薄膜の上部臨界磁場測定
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Sato
2. 発表標題 FeSexTe1-x thin films as a platform for exploring exotic superconducting states
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuki Sato
2. 発表標題 FeSexTe1-x thin films as a platform for exploring exotic superconducting states
3. 学会等名 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------