

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K23415

研究課題名（和文）トポロジカル絶縁体／超伝導体接合に形成されるマヨラナ粒子の検出と制御

研究課題名（英文）Detection and control of Majorana zero modes in topological insulator / superconductor heterojunctions

研究代表者

井上 悠（Inoue, Hisashi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：90843342

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：物質中に、電荷ゼロの粒子であるマヨラナ粒子として説明される状態を形成し、その特異な性質を明らかにしようとする試みが行われている。本研究では、この状態の実験的な形成を可能にする、トポロジカル絶縁体への超伝導近接効果に着目し、高品質なトポロジカル絶縁体薄膜の作製に取り組んだ。さらに、物質中のマヨラナ粒子の実験的な検出を行う試みとして、ジョセフソン接合の作製技術の開発と、微細素子の高精度な測定技術の構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
高品質なトポロジカル絶縁体薄膜と、トポロジカルジョセフソン素子等、微細素子の作製・評価技術の構築に関する実験を実施した。以上の成果により、物質中のマヨラナ粒子の観測と制御に向けた研究が前進するものと期待する。

研究成果の概要（英文）：Some material systems are believed to host Majorana zero modes - quantum charge-neutral states with their properties unexplored. Here we develop a Josephson junction with high-quality topological insulator thin films, aiming to observe the signature of Majorana zero modes and control their mysterious quantum states. We succeeded in precisely fabricating sub-micron-sized junctions and performing highly accurate measurements of these devices.

研究分野：物性物理

キーワード：トポロジカル絶縁体 ジョセフソン接合

1. 研究開始当初の背景

マヨラナ粒子は、電子でも正孔でもない、電荷ゼロの粒子である。近年、このマヨラナ粒子として説明される状態が、物質中で形成可能なことが理論的に予測され、実験的な検証が行われている。マヨラナ粒子が従う特殊な量子統計をうまく利用することで、エラーが起こりづらい量子演算が行えるようになると考えられており、情報処理応用の観点からも関心が高まっている。しかしながら、物質中のマヨラナ粒子に関する研究は、現状ではトンネル分光や熱輸送現象など限定的であり、検出と制御を両立可能な手法での研究は報告されていない。その理由は、通常、物理対象の検出や制御には、電場などの外場とその対象との相互作用を通じた変化を読み取る必要があるが、マヨラナ粒子は電荷を持たず、変化の検出や制御が困難なためである。

2. 研究の目的

上記背景を踏まえて、本研究では、物質中のマヨラナ粒子の検出や制御に有望な系として、トポロジカル絶縁体薄膜と超伝導体のジョセフソン接合に着目する。トポロジカル絶縁体が2つの超伝導体に挟まれたジョセフソン接合とよばれる微細な素子を作製すると、超伝導近接効果によって超伝導体からトポロジカル絶縁体に超伝導相関が誘起され、トポロジカル絶縁体薄膜の表面に p 波超伝導状態と類似した超伝導状態が形成される。この超伝導状態の位相をうまく制御することで、物質中のマヨラナ粒子が形成されると考えられる。ターゲット物質として特にトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 に焦点を当て、トポロジカルジョセフソン接合素子の動作のために十分な品質のエピタキシャル薄膜の作製技術を確立する。さらに、キャリアドープに対するマヨラナ粒子の安定性を理解することを目的として、トポロジカル絶縁体に化学ドープを行って、キャリア密度の制御を行う手法を確立することも行う。

トポロジカル絶縁体薄膜でマヨラナ粒子の観測や制御を行うためには、まず微弱な電圧を制御して、ジョセフソン効果に従ってジョセフソン接合を流れる電流を精密に測定することが必要である。本研究では、そうした素子の作製技術と精密な電気測定技術の構築にも取り組む。

3. 研究の方法

(1)分子線エピタキシー法によるトポロジカル絶縁体薄膜の作製と評価

トポロジカル絶縁体表面の金属状態は、結晶の並進対称性で保護されているため、トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合に現れる特異な状態を形成するためには、結晶性の高いエピタキシャルな薄膜を作製する必要がある。さらには接合界面でのクーパーペアの散乱を抑制するために、接合界面の清浄性にも注意する必要がある。そこで、本研究では分子線エピタキシー法を用いて、半導体基板上に高品質なトポロジカル絶縁体の単結晶薄膜の作製を行う。作製した薄膜は、電気測定と X 線回折測定、原子間力顕微鏡で評価する。

(2)トポロジカルジョセフソン接合素子の作製と精密電気測定技術の構築

物質中のマヨラナ粒子は、トポロジカル絶縁体と2つの位相を制御した超伝導体を接合して、ジョセフソン接合を作製した時に、トポロジカル絶縁体の部分に形成されると考えられる。この時、超伝導相関が保持されなくてはならないので、2つの超伝導体電極の間隔を、超伝導コヒーレンス長程度まで近づけなければならない。典型的なジョセフソン接合の超伝導電極間距離は数百ナノメートルのオーダーである。これを実現するために、本研究では加速電圧 130 kV の電子線描画装置を用いたリソグラフィ技術を駆使して微細な素子の作製を行う。作製した素子の構造は、走査電子顕微鏡と、エネルギー分散型 X 線分析マッピングで評価する。

トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合には、ジョセフソン効果によって数 μ から数十 μA の電流が流れる。この電流は、超伝導電極間に印可する電圧によって変化するが、その電圧スケールはトポロジカル絶縁体中に形成される超伝導ギャップの大きさ、 $\sim 100 \mu\text{V}$ 程度である。上記のようなジョセフソン接合で、物質中のマヨラナ粒子を検出するには、まず、この電圧を精密に制御してジョセフソン電流を測定することが必要である。そこで、本研究では微細素子を対象にして、 μV の単位で電圧を精密に制御して電流測定を行う手法を開発する。

4. 研究成果

(1)六方晶系のトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 を対象に、高品質薄膜の作製を試みた。 Bi_2Se_3 は、格子定数の近い III-V 族半導体である $\text{InP}(111)$ 単結晶基板上にエピタキシャル成長が可能なが報告されている。 InP 結晶に鉄を化学ドープすると、絶縁体的な性質を示すことが知られている。

今回はこの性質を利用して、鉄をドーブした InP 単結晶基板を用いることで、 Bi_2Se_3 のみの電気伝導性の選択的な評価が可能になるようにした。基板の熱処理条件、成長温度、分子線のフラックス比を系統的に変化させることで、 Bi_2Se_3 単結晶薄膜の成長条件の探索を行った。特に、これまで報告されていた成長条件をそのまま採用すると、 Bi_2Se_3 の薄膜中に巨視的な析出物を生じることが明らかになった。今回、この析出物が、InP 基板の熱処理中に生じる In の微細結晶であることを明らかにし、基板熱処理の温度を下げることで析出物の発生を抑えることが可能になった。こうして作製した Bi_2Se_3 単結晶薄膜は、表面粗さが 0.65 nm と原子層レベルで平坦な薄膜表面を有し、X 線回折測定においても回折プリンジが観測されたことから、良好な結晶性を有する薄膜の作製ができていることを確認した。作製した薄膜の電気輸送特性を評価したところ、温度 2 K でシート電子密度 $1.9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ (薄膜厚さ 53 nm)、移動度 $1245 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ が得られ、これはトポロジカルジョセフソン接合素子の動作のために十分な値といえる。

トポロジカル絶縁体では、バルク部分の電子伝導に加えて、表面に二次元的な電気伝導を生じる。したがって、トポロジカル絶縁体上に超伝導接合を作製すると、表面とバルク部分の双方に超伝導近接効果が生じると考えられる。トポロジカルジョセフソン接合において、バルク部分の電気伝導性がジョセフソン効果に与える影響に関する理解は限定的である。そこで本研究では、トポロジカルジョセフソン接合素子において、バルク部分のキャリアの存在がジョセフソン効果に与える影響を検証することを目的に、Sb 化学ドーブでトポロジカル絶縁体のバルクキャリア密度の制御を行った (図 1)。Bi/Sb のフラックス比を精密に制御することで *n*-type (シート電子密度 $0.49 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、薄膜厚さ 20 nm) から *p*-type (シート正孔密度 $0.20 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、薄膜厚さ 20 nm) まで再現性良く制御が可能であることを実証した。

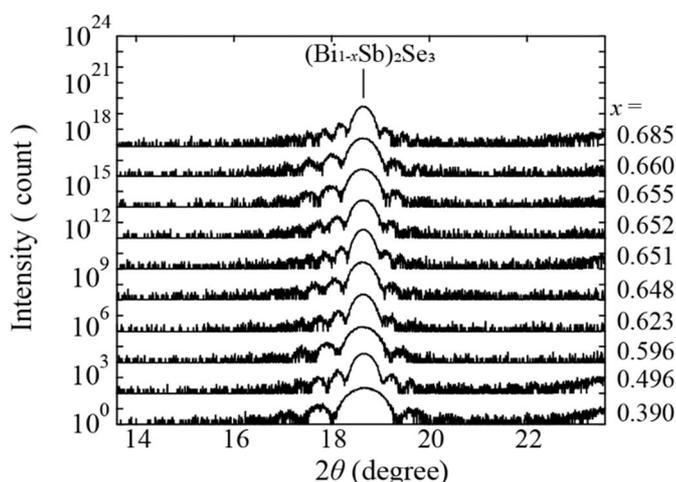


図 1 鉄ドーブ InP(111)基板上的の Sb ドーブ Bi_2Se_3 薄膜の X 線回折パターン。

(2)トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 と、超伝導転移温度 9.25 K の超伝導体 Nb を接合して、微細なジョセフソン接合の作製を試みた。Nb 電極の作製法として広く用いられているスパッタリング法を採用し、リフトオフ法により超伝導電極を作製した。微細な構造をリフトオフ法により作製するためには、レジストの断面プロファイルの形状に注意する必要がある。今回は、複数の感光性の異なるレジストを積層して、楔形の断面プロファイルとすることで、リフトオフの歩留まりを向上させることに成功した。作製した素子の構造の電子顕微鏡像から、ほぼ設計通りの電極間距離が得られていることが確認できた (図 2)。さらに、エネルギー分散型 X 線分析マッピングからも、2 つの超伝導電極が接触することなく作製出来ていることが確かめられた。

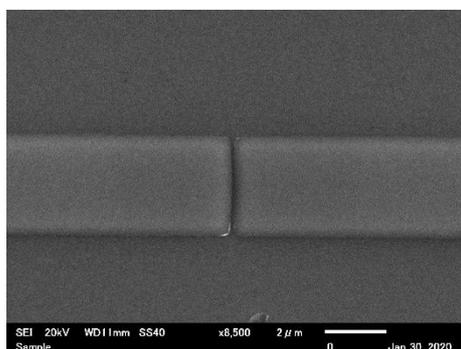


図 2 作製したジョセフソン接合素子の走査型電子顕微鏡像。

ジョセフソン接合などの微細な構造を有する素子では、静電気やグラウンドループなどによって容易に素子が損傷し、あるいは過剰な電流の流入によって素子の電子温度が上昇するので、ジョセフソン効果等の素子由来の信号の測定には細心の注意を払う必要がある。さらに、トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合が形成されることで、トポロジカル絶縁体部分に形成される超伝導ギャップは $100 \mu\text{V}$ 程度であり、ノイズレベルを μV 程度まで抑える必要がある。今回は、安定性の高い電圧源と、高分解能のデジタルロックインアンプを組み合わせることで、数 μV のレベルまでノイズを抑制しつつ、高精度な測定環境を構築した。その結果、温度 1.8 K で、ジョセフソン効果の観測に成功した。この時、臨界電流は $17.2 \mu\text{A}$ 、超伝導ギャップの大きさ $I_c R_N$ は $118 \mu\text{V}$ であった。

プロジェクト構想時に想定していなかった成果として、本プロジェクトで構築した高精度な測定方法を、高い伝導性を持つデラフォサイト型酸化物 PdCoO_2 の微細ホールバー素子に適用することで、電子波動関数の干渉に由来する量子輸送現象の観測に成功した(T. Harada, P. Bredol, H. Inoue, S. Ito, J. Mannhart, A. Tsukazaki, *Physical Review B* 103, 045123 (2021).)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takahashi K., Shioagai J., Inoue H., Ito S., Kimura S., Awaji S., Tsukazaki A.	4. 巻 10
2. 論文標題 Single-domain formation of SrMnBi2 films on polar LaAlO3 substrate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 105216 ~ 105216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0021771	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Harada T., Bredol P., Inoue H., Ito S., Mannhart J., Tsukazaki A.	4. 巻 103
2. 論文標題 Determination of the phase coherence length of PdCoO2 nanostructures by conductance fluctuation analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045123 ~ 045123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.045123	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 該当する

1. 著者名 Zheng Dingheng, Shioagai Junichi, Inoue Hisashi, Souma Seigo, Sato Takafumi, Tsukazaki Atsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Two-dimensional growth of conductive ultra-thin Sn films on insulating substrate with an Fe buffer layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 061103 ~ 061103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0009012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 塩貝 純一、高橋 翔、井上 悠、伊藤 俊、木村 尚次郎、淡路 智、塚崎 敦
2. 発表標題 LaAlO3(100)基板の極性表面を利用したSrMnBi2薄膜の単一ドメイン成長
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 翔, 塩貝 純一, 井上 悠, 塚崎 敦
2. 発表標題 分子線エビタキシー法によるSrMnBi ₂ 薄膜の高品質化と伝導特性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020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			
米国	マサチューセッツ工科大学			
ドイツ	マックス・プランク研究所			