

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14398

研究課題名（和文）マヨラナ粒子を利用した、長いコヒーレンス時間を持つ量子ビットの開発

研究課題名（英文）Development of Majorana-based quantum devices

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：物質中に形成されるマヨラナ準粒子状態は、エラーの起こりづらい量子計算への応用が期待されている。本研究では、物質中にマヨラナ準粒子状態を実現して、これを検出、操作するためのプラットフォームとしての、トポロジカル絶縁体と超伝導体からなるジョセフソン接合に着目し、素子の作製と、マヨラナ準粒子状態検出の前提となるジョセフソン効果の測定に取り組んだ。さらに、マヨラナ準粒子状態を含む素子中の電子状態を検出するための手法として、平板トンネル分光による電子状態評価にも取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子情報処理は次世代の超高速情報処理技術として注目されている。そこで使われる量子ビットのエラーをいかに小さくできるかが、実用化に向けた1つの鍵になる。最近新たな手法として注目されているマヨラナ準粒子状態を用いた量子情報処理は、このエラーを飛躍的に小さくできる可能性を秘めているが、素子の作製法や評価法が先行する別の手法より未熟であった。本課題で実施した研究により、物質中のマヨラナ準粒子状態を利用した、エラーの小さな量子ビットの実現に向けた研究が前進するものと期待している。

研究成果の概要（英文）：This work focuses on topological Josephson junctions made of a topological insulator with superconducting electrodes. Such a device is believed to host Majorana quantum states, and manipulating these states realizes fault-tolerant quantum computing. Here we realized a Josephson junction consisting of a topological insulator and superconducting electrodes and developed a method for characterizing Majorana quantum states by means of planar tunneling spectroscopy.

研究分野：物性物理学

キーワード：ジョセフソン接合 トポロジカル絶縁体 平板トンネル分光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子計算に用いられる量子ビットにおいて、位相がそろったコヒーレントな状態から、ランダムな状態へと緩和していくデコヒーレンスが計算結果の信頼性を低下させる主要因となっている。半導体電子スピン量子ビットや超伝導量子ビットでは、電場、磁場揺らぎ等でデコヒーレンスが引き起こされ、エラー補正用の多くの量子ビットを新たに付与する必要があり、大規模量子計算実現のためのボトルネックになっていた。

一方、トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合に形成されると考えられる、マヨラナ準粒子状態を量子ビットに適用した場合、マヨラナ準粒子状態は電荷を持たず、磁場との直接的相互作用もないため、電場と磁場が揺らいでも安定に量子計算が行えると期待でき、最近の理論的研究では、1 ms を超えるコヒーレンス時間が実現可能である事が示されている(C. Knapp *et al.*, *Phys. Rev. B* **97**, 125404 (2018))。実際にはこのコヒーレンス時間は接合素子の様々な要因に依存すると考えられ、その検証を行うことが重要である。

2. 研究の目的

上記背景を踏まえて、本研究では、トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合に形成される、マヨラナ準粒子状態のコヒーレンス時間を系統的に検証するための素子開発と測定技術の構築に取り組む。マヨラナ準粒子状態はトポロジカル絶縁体表面の金属状態に形成されるが、バルクキャリアの存在はコヒーレンス時間に影響を及ぼすと考えられ、考慮する必要がある。本研究では、特にこのバルクキャリアがトポロジカル絶縁体 / 超伝導体の接合素子特性に及ぼす効果に着目する。

物質中のマヨラナ準粒子状態を検出する方法として、平板トンネル分光による電子状態測定は強力な評価手法である。しかし、これまで平板トンネル分光の対象は、一部の物質に限られており、今回は、トンネル分光によるマヨラナ準粒子状態評価のための基盤技術構築として、単結晶薄膜の平板トンネル分光測定を行う。但し、対象としてはトポロジカル絶縁体ではなく、近年、物質中のマヨラナ準粒子状態実現のための新たな候補物質として注目されている、ディラック / ワイル半金属に着目する。

これらの実験を通して、物質中マヨラナ準粒子状態の系統的検証に向けた基盤技術を構築し、長いコヒーレンス時間を持つ量子ビットとしてのポテンシャルを検証することを目指す。

3. 研究の方法

(1) トポロジカル絶縁体薄膜の作製とバルクキャリア密度制御

トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合の作製には、トポロジカル絶縁体の単結晶薄膜が必要である。本研究では、代表的なトポロジカル絶縁体であり、多くの物性が既に明らかになっている Bi_2Se_3 を対象物質として選択する。単結晶薄膜の作製は分子線エピタキシー (MBE) 法、又は単結晶試料の劈開により行う。X 線回折による結晶性の評価と電気輸送測定による物性評価を行う。

(2) トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合の作製と特性評価

トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合を用いて、物質中にマヨラナ準粒子状態の形成するためには、超伝導電極 / トポロジカル絶縁体 / 超伝導電極のジョセフソン接合とよばれる構造を作製することが必要である。この時、超伝導電極の間隔は、トポロジカル絶縁体に注入された超伝導のコヒーレンス長より短い必要があり、典型的には数百 nm 程度である。このような微細な構造を作製するために、電子線リソグラフィを活用してジョセフソン接合の作製を行う。作製した接合の特性評価は、接合を介した電気輸送特性測定により行う。

(3) 平板トンネル分光による電子状態評価

トポロジカル絶縁体と超伝導体からなる接合に対して、接合部分にトンネル分光を行うと、マヨラナゼロモードとよばれる状態に起因したゼロエネルギーピークが観測されると考えられる。本研究では、マヨラナゼロモード観測のための基盤技術構築として、同様のスペクトル形状の観測が期待できるフラットバンドの観測を試みる。対象物質としてはカゴメ格子に起因するフラットバンドの存在が示唆される、反強磁性カゴメ金属 FeSn に着目する。 FeSn 自体はスピン縮退したディラック半金属だが、空間、又は時間反転対称性を破ることにより、ワイル半金属となる。

4. 研究成果

(1) MBE 法を用いてトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 薄膜の作製を行った。基板としては、 Bi_2Se_3 と格子定数が近く、Fe をドーピングすることにより絶縁化した $\text{InP}(111)$ 単結晶基板を用いた。X 線回折測定から、明瞭な Bi_2Se_3 (006) ピークが観測されたことから、エピタキシャル薄膜が得られてい

ることを確認した。原子力間力顕微鏡による Bi_2Se_3 薄膜表面の平坦性測定では、二乗平均平方根粗さが 0.8 nm であり、接合素子作製に適した原子層レベルで平坦な表面が得られている。

Bi_2Se_3 薄膜のバルクキャリア密度制御は、過去に Sb をドーブした Bi_2Se_3 薄膜で報告されている (Y. Satake *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter.* **30**, 085501 (2018).)。単に $(\text{Sb}_x\text{Bi}_{1-x})_2\text{Se}_3$ を $\text{InP}(111)$ 基板上に成長すると、直方晶の Sb_2Se_3 が相分離してしまうために、菱面体晶の $(\text{Sb}_x\text{Bi}_{1-x})_2\text{Se}_3$ を安定化できない。そこで前記の報告を参考に、 Bi_2Se_3 バッファー層上に $(\text{Sb}_x\text{Bi}_{1-x})_2\text{Se}_3$ の作製を行うことで、菱面体晶の安定化を試みた。X 線回折測定から、直方晶の Sb_2Se_3 に起因するピークは観測されず、菱面体晶 $(\text{Sb}_x\text{Bi}_{1-x})_2\text{Se}_3$ (006) ピークのみ観測されたことから、 $(\text{Sb}_x\text{Bi}_{1-x})_2\text{Se}_3$ の作製に成功した。作製した薄膜の電気輸送特性からは、 p 型から n 型まで広い範囲にわたって、バルクキャリア密度の制御が可能であることが確かめられた。

研究代表者の所属機関移動に伴い、バルク単結晶からの劈開により Bi_2Se_3 薄膜を作製することも試みた。転写法を用いて、 Si/SiO_2 基板上に厚さ 30 ~ 40nm の Bi_2Se_3 を作製した。電子線リソグラフィにより、劈開した剥片上にホールバーを作製し、電気抵抗測定を行ったところ、バルクキャリア密度が大きいこと判明したため、以下では MBE 法で作製した Bi_2Se_3 薄膜の実験結果について報告する。

(2) Bi_2Se_3 単結晶薄膜と超伝導体 Nb からなるジョセフソン接合を電子線リソグラフィとスパッタリング法により作製し、温度 1.8 K まで試料を冷却して、接合を介した電気抵抗の測定を行った (図 1)。温度 7 K 付近から徐々に電気抵抗の減少が見られ、超伝導電極間距離を 300 nm から 150 nm まで変化させていくと、温度 1.8 K での残留抵抗の値が系統的に小さくなるのがわかる。特に、電極間距離 150 nm の試料では、残留抵抗の値がほぼ 0 となり、ジョセフソン効果の観測に成功したと言える。この接合の臨界電流を電気抵抗のバイアス電流依存性から求めると、17.2 μA となった。 Bi_2Se_3 中に注入された超伝導秩序のエネルギースケール $I_c R_N$ は 118 μeV と求められる。この値は、これまで Bi_2Se_3 と Nb のジョセフソン接合で報告されている値より、数倍大きな値である。Sb ドープでバルクキャリア密度制御した薄膜上にも素子を作製してジョセフソン効果の観測を試みたが、温度 1.8 K 以上ではジョセフソン効果が観測できなかった。今後、極低温まで冷却して検証する必要がある。

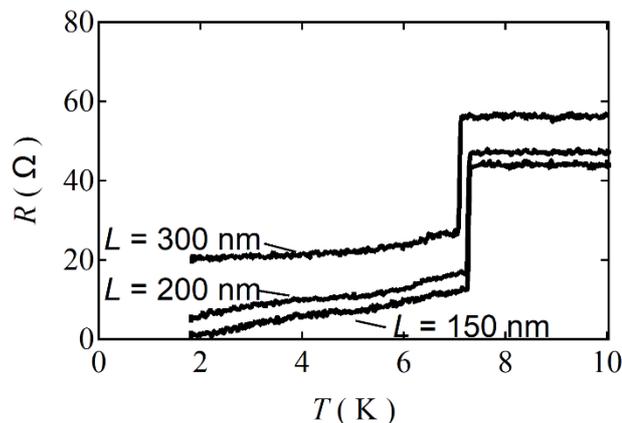


図 1: 接合を介した電気抵抗の温度依存性。

(3) 平板トンネル分光測定用のトンネル接合素子は、MBE 法を用いて半導体 Nb:SrTiO₃ 基板上にエピタキシャルな FeSn(001) 薄膜の成長を行うことで作製した (H. Inoue *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 072403 (2019).)。Nb:SrTiO₃ 基板と金属的な FeSn 薄膜の界面に形成されるショットキー障壁がトンネル障壁として働くことで、トンネル分光スペクトルの測定が可能になる。バイアス電圧を系統的に変化させながら接合の微分コンダクタンスを測定したところ、温度 200 K 以下でエネルギー -180 meV 付近にピークが発達していく様子が観測された。第一原理計算で求めたバンド構造との比較から、このピークが FeSn に形成されたフラットバンドに起因することを明らかにした (M. Han and H. Inoue *et al.*, *Nat. Commun.* **12**, 5345 (2021). Equal contribution.)。マヨラナ準粒子状態のトンネル分光による評価のための技術基盤構築に貢献する結果である。当初予想していなかった結果として、観測されたフラットバンドは、基板との界面での反転対称性の破れに起因する、2次元に閉じ込められたユニークなフラットバンドであることが明らかになった。これは当初想定していた、FeSn のカゴメ格子に由来するバルクフラットバンドとは起源が異なる。FeSn のバルク単結晶は反転対称性と時間反転対称性に守られたディラック半金属だが、FeSn 薄膜の基板との界面においては、対称性の破れたワイル半金属相が出現する可能性がある。ワイル半金属の表面の金属状態は、マヨラナ準粒子状態実現のための舞台になると考えられ、マヨラナ準粒子状態探索にはこうした薄膜界面も対象になると考えられる。

マヨラナ準粒子状態評価のためのデバイス作製基盤技術と測定技術構築を目指した実験を実施した。以上の成果により、コヒーレンス時間の長い物質中マヨラナ準粒子状態実現に向けた研究が前進するものと期待している。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Minyong Han, Hisashi Inoue, Shiang Fang, Caolan John, Linda Ye, Mun K. Chan, David Graf, Takehito Suzuki, Madhav Prasad Ghimire, Won Joon Cho, Efthimios Kaxiras, Joseph G. Checkelsky	4. 巻 12
2. 論文標題 Evidence of two-dimensional flat band at the surface of antiferromagnetic kagome metal FeSn	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5345
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-25705-1	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 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Minyong Han, Hisashi Inoue, Shiang Fang, Caolan John, Linda Ye, Mun K. Chan, David E Graf, Takehito Suzuki, Madhav Prasad Ghimire, Won Joon Cho, Efthimios Kaxiras, Joseph Checkelsky
2. 発表標題 Planar Schottky tunneling spectroscopy of antiferromagnetic kagome metal FeSn
3. 学会等名 APS March Meeting 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 悠, Minyong Han, Shiang Fang, Caolan John, Linda Ye, Mun K. Chan, David Graf, 鈴木健士, Madhav Prasad Ghimire, Won Joon Cho, Efthimios Kaxiras, Joseph G. Checkelsky
2. 発表標題 Tunneling spectroscopy of thin film antiferromagnetic kagome metal
3. 学会等名 令和3年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上 悠, Minyong Han, Shiang Fang, Caolan John, Linda Ye, Mun K. Chan, David Graf, 鈴木健士, Madhav Prasad Ghimire, Won Joon Cho, Efthimios Kaxiras, Joseph G. Checkelsky
2. 発表標題 カゴメ金属ヘテロ構造に形成される二次元フラットバンドの観測
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minyong Han, Caolan John, Madhav Prasad Ghimire, Shiang Fang, Manuel Richter, Hisashi Inoue, Efthimios Kaxiras, Joseph G. Checkelsky
2. 発表標題 Chemical doping studies on thin film antiferromagnetic kagome metal FeSn
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------