

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00867

研究課題名(和文)トポロジカルジョセフソン接合におけるアンドレーエフ及びマヨラナ状態の研究

研究課題名(英文) Andreev and Majorana bound states studied in topological Josephson junction

研究代表者

石橋 幸治 (Ishibashi, Koji)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員

研究者番号：30211048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、InAsのような半導体ナノワイヤと、単層のものが2次元トポロジカル絶縁体として知られているWTe₂を用いて1次元ジョセフソン接合の形成を目的とした。この場合、正常金属領域には、トリビアルな場合にはアンドレーエフ束縛状態、トポロジカル転移を起こすとマヨラナ束縛状態が形成されることが予想されている。ジョセフソン接合を含む超伝導体ループとマイクロ波回路共振器を別々の基板に作製してそれらを張り付ける汎用性の高いフリップチップ法を開発し、実際にナノワイヤ試料でアンドレーエフ束縛状態を計測した。WTe₂においては、まず多層のものを利用してジョセフソン接合デバイスの作製プロセスを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は長期的にはトポロジカル超伝導体に発現するマヨラナ量子状態の観測を目指した研究である。マヨラナ量子状態はトポロジカル量子ビットとして用いることができ、コヒーレンスに優れていることが理論的に指摘されているため、量子コンピュータの性能向上に有効である。マヨラナ量子状態ははまだ発見されていないが、量子ビット応用に適したデバイス構造である半導体ナノワイヤや2次元トポロジカル絶縁体においてそれが観測されることの意義は大きい。本研究では、ジョセフソン接合に形成される束縛状態に着目し、それを実際に測定する汎用的な技術を開発した。本方法はマヨラナ量子状態が現れると期待される系に応用が可能である。

研究成果の概要(英文)：The goal of the project is to realize Josephson junctions with a InAs nanowires and monolayer WTe₂ that is confirmed to be a 2-dimensional topological insulator. In the trivial condition, the Andreev bound states are formed while in the topological conditions, the Majorana bound states are predicted to be formed. Energy spectrum of the bound states have a 2 π ai periodicity for the former case, but they are predicted to have a 4 π ai periodicity for the latter case.

In the project, we have developed techniques to fabricate InAs Josephson junctions with a hard gap (clean and sharp interfaces). We have developed the unique flip chip technique to realize couplings between the Josephson junction and the microwave circuit resonator, and could measure the energy spectrum of the Andreev bound state as a function of the phase.

We started with a multilayer WTe₂ as the material is hard to handle. We have succeed in forming the Josephson junction with it.

研究分野：ナノデバイス工学

キーワード：アンドレーエフ束縛状態 マヨラナ束縛状態 半導体ナノワイヤ 2次元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

近年物性物理学の分野では電子状態のトポロジに関連した物性が注目されており、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体に関する研究が盛んである。特に、トポロジカル超伝導体はそこに出現が予想されているマヨラナ粒子(マヨラナゼロモード: MZM)が、コヒーレンスに優れたトポロジカル量子ビット、すなわちトポロジカル量子コンピューティングの Building Block となるため、基礎物性のみならず応用上の観点からも注目されている。それ自身がトポロジカル超伝導体となる物質は実験的に見つかってはいないが、大きなスピン軌道相互作用を持つ半導体ナノワイア、あるいは、トポロジカル絶縁体とアルミニウムのような“普通”の(s波)超伝導体接触させることにより、トポロジカル超伝導を設計“Engineer”することができる。これが理論的に示されて以来、急速に実験的研究が加速している。しかし、MZM からなる量子ビットやそれを用いたトポロジカル量子コンピュータに関する理論的提案や研究は多数なされているにもかかわらず、これらの系で実験的に MZM を観測したといえる報告は世界的にも存在しない。

マヨラナゼロモードに関する実験的研究としては、これまでスピン軌道相互作用が強い InAs や InSb のような半導体ナノワイアに超伝導を誘起した試料の電気伝導測定に観測されるコンダクタンスのピーク(ゼロバイアスアノマリー: ZBA)に着目した研究が盛んにおこなわれてきた。しかし、その起源として MZM とはかかわりのないトリビアルな原因(例えばナノワイア中の欠陥や不純物など)の可能性を排除できないため、ZBA の観測では MZM の確定的な実験結果ということはいえないという状況である。また、トポロジカル絶縁体を用いた系では、量子ビットへの応用展開上重要な 2次元トポロジカル絶縁体(2DTI)への超伝導の誘起が必要である。しかし、3次元トポロジカル絶縁体物質は多数知られているものの、2DTI であることが実験的にも明確に知られている物質は、HgTe 薄膜(量子井戸)と2次元物質である単層 WTe₂ だけである。これらの物質は空気中ですぐに劣化するため試料作製が極めて困難であることから、世界的にも実験が順調に進んでいるとは言えない状況である。

2. 研究の目的

上記に述べた半導体ナノワイアや2次元トポロジカル絶縁体を通常の s 波超伝導体と接触させることにより1次元トポロジカル超伝導チャンネルを生成する提案は、マヨラナゼロモードが出現する数理的な Kitaev モデル(1次元スピンレス p 波超伝導)を、実際の物質で実現するための具体的な提案といえる。しかし、これらのトポロジカル超伝導状態が実現するためには、磁場や化学ポテンシャルを外部パラメータとした場合に、トリビアルな状態からトポロジカルな状態への転移を実現する必要がある。これはいまだ実現されていない。

そこで、本研究ではこのトポロジカル転移を見るための試料構造として、半導体ナノワイアやトポロジカル絶縁体を正常金属(N)とした場合に、そこにアルミニウムのような s 波超伝導金属(S)をつけることによって形成される SNS ジョセフソン接合に注目する。この場合、SN 界面では電子がホールとして反射されるアンドレーエフ反射が起こるため、N 領域には通常アンドレーエフ束縛状態が形成される。N 領域がパラメータの変化によってトポロジカル転移するとマヨラナ束縛状態が形成される。これらの束縛状態を介して流れる超伝導電流(ジョセフソン電流)に現れるトポロジカル転移を観測することが目的である。

3. 研究の方法

SNS ジョセフソン接合の N 領域に1次元的な束縛状態を形成するために、半導体ナノワイアの擬1次元的なチャンネルと2次元トポロジカル絶縁体(2DTI)であることが知られている2次元物質である単層 WTe₂に着目した。2DTI では試料の周囲にスピンと運動量がロックした1次元的なヘリカルエッジチャンネルが形成される。これらのチャンネルに形成される束縛状態は、束縛エネルギーの位相依存性で特徴づけられる(エネルギーを位相で微分すると超伝導電流となるため電流・位相関係もエネルギーの位相依存性で決まる)。理論によるとエネルギーの位相依存性は、トリビアルな場合(アンドレーエフ束縛状態の場合)はよく知られた通常の 2π の周期を示すが、トポロジカルな場合は 4π の周期を示すことが指摘されている。これまで半導体ナノワイアを用いてジョセフソン接合を作製し、その周期を調べるために AC ジョセフソン効果の測定を行ってきたが、十分にパラメータ領域をスキャンできておらず、トポロジカル転移に起因する 4π 周期を示す結果は得られていない。

本研究では、半導体ナノワイアにおいては、トポロジカル転移を生じるのに重要とされる急峻な超伝導体・ナノワイア界面を実現するために、(独)ユーリッヒ研究所の T. Schaeplers 教授のグループと共同研究を行う。先方では、分子線エピタキシーを用いて InAs ナノワイアを成長し、さらに真空を破ることなく超伝導金属アルミニウムを堆積する技術を有する。このナノワイアからジョセフソン接合デバイスを作成し、ジョセフソン接合の基本的な性質を調べる。

WTe₂においては、空気中で容易に劣化することもあり、これまでデバイスプロセスがほとんど行われていない。そこで、扱いが比較的容易な多層 WTe₂ においてプロセス技術を確立し、ジョ

セフソン接合デバイスの作製を試みる。同時に、それを通して蓄積されたノウハウをもとに単層 WTe_2 を用いたジョセフソン接合デバイスの作製を目指す。

本研究では、AC ジョセフソン効果の測定に加えて、束縛状態のエネルギースペクトルそのものを測定する手法を開発し、半導体ナノワイヤや WTe_2 に形成される束縛状態の位相依存性を調べる。

4. 研究成果

(1) 半導体ナノワイヤジョセフソン接合の作製[1]

ユーリッヒ研究所で作製された InAs ナノワイヤの写真を図 1(a)に示す。交差した 2 本ナノワイヤのうち 1 本をマスクとして用い、真空を破ることなくアルミニウムを堆積することによりジョセフソン接合を形成する。超伝導電極間の距離はナノワイヤの直径と同程度の 100nm 程度（以下）である。成長したナノワイヤを用いて理研においてデバイス構造を作製する（図 1(b)）。あらかじめ形成したゲート電極の上にナノワイヤをマイクロマニピュレータを用いて移動させる。そして電極としての超伝導金属をスパッタ蒸着する。デバイス作製に際して重要なことは、半導体ナノワイヤと超伝導体の界面を清浄に保つことである。そのため、本研究では真空を破ることなくナノワイヤに超伝導金属を堆積している（図 1(a)）。これにより、界面の超伝導ギャップ内に界面準位がないハードギャップを形成できると期待される。

半導体ナノワイヤは接合直下のゲートに負の電圧を印可することにより伝導チャンネルをピンチオフすることができる（図 2(a)）。同図(b)にはいくつかのゲート電圧における電流電圧特性を示す。図からわかるように、電流バイアス測定において電圧が生じない電流（超伝導電流）が流れていることがわかる。ゲート電圧を負にかけていくと超伝導電流は減少するが、残念ながら興味がある単一チャンネルが実現した状態での超伝導電流が流れているかどうかは判定できない。図 2(c)には電圧バイアスでの電流電圧特性と微分コンダクタンスの電圧依存性を示す。急激に電流が立ち上がる電圧は超伝導ギャップ (2Δ) に対応する。その立ち上がりがシャープであることから、ハードギャップが形成されているといえる。

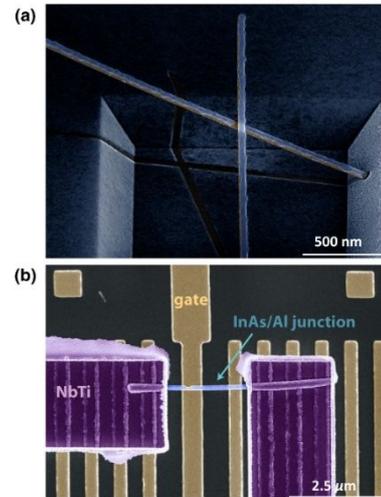


図 1 : (a)交差して MBE 成長した半導体ナノワイヤに金属を蒸着した様子 (b) 成長したナノワイヤを用いて作製したジョセフソン接合デバイス[1]

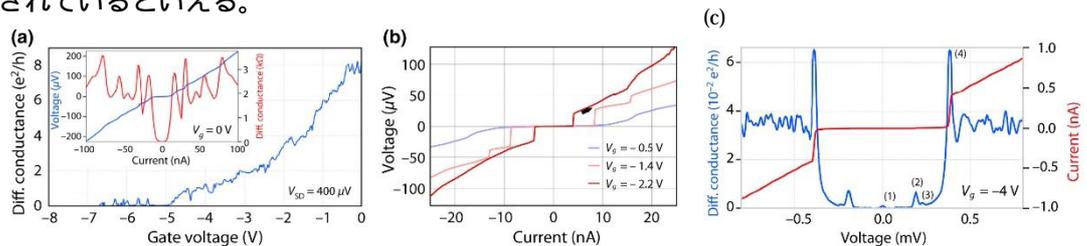


図 2 : (a) 微分コンダクタンスのゲート電圧依存性（挿入図：ゲート電圧を印可していない時の電流電圧特性と微分コンダクタンス）(b) いくつかのゲート電圧における電流電圧特性 (c) ゲート電圧が 4V の場合の電流電圧特性（電圧バイアス）と微分コンダクタンス（(1) 超伝導電流、(2)(3) サブギャップ構造 (4) 超伝導ギャップエッジ）[1]

(2) 半導体ナノワイヤジョセフソン接合に形成される束縛準位の分光測定技術の開発[2]

超伝導体と正常金属（今の場合は半導体ナノワイヤや 2 次元物質 WTe_2 ）の界面では、電子がホールとして反射されるアンドレーエフ反射が起こる。SNS ジョセフソン接合では、超伝導体・正常金属界面が 2 つ存在するので、その間で繰り返し反射される電子（ホール）がアンドレーエフ束縛状態を形成する。N 領域にトポロジカル転移が生じると、この束縛状態はマユラナ束縛状態を形成する。そこで、N 領域に形成される束縛状態を実際

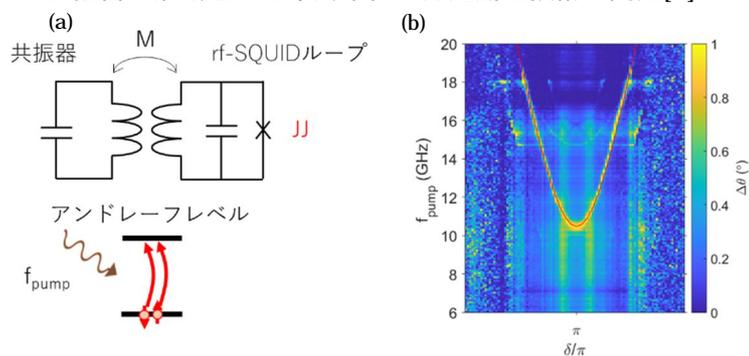


図 3 : (a) 共振器とジョセフソン接合との誘導的結合を利用したエネルギースペクトル測定法の等価回路図 (b) フリップチップ補正によって作製した試料において、ポンプローブ法によって測定したアンドレーエフ束縛状態エネルギーの位相依存性

に分光測定することができればトポロジカル転移に関する重要な情報を得ることができる。アンドレーエフ束縛状態の位相依存性は 2π の周期を有し、位相が π のところでチャンネルの散乱に起因するギャップを持つ。これに対し、マヨラナ束縛状態は位相が π のところでギャップが生じないことが大きな特徴である。すなわちゼロエネルギーの束縛状態(マヨラナゼロモード)が実現する。これに対応して、束縛エネルギーの位相依存性は 4π の周期をもつ。本研究では、束縛エネルギーを実際に測定することを目指す。

エネルギースペクトルの測定方法として、超伝導量子ビットで用いられている Dispersive readout の方法を用いる。その原理を図3(a)に示す。測定するデバイス

(ジョセフソン接合)を含む超伝導ループ(rf-SQUID)をマイクロ波共振器と相互インダクタンス M で誘導的に結合させる。SNS ジョセフソン接合は束縛状態を含むので、量子的な結合が実現している場合には、束縛状態の状態(励起状態または基底状態)によって結合系の共振周波数が変化するというものである。束縛状態の遷移エネルギーと共振器自身の共振周波数が近い場合には、共振周波数近くの周波数での共振特性を測定する(Single Tone 法)。より広い遷移エネルギー帯でのスペクトルを測定する場合には、束縛状態を励起する(ポンプ)周波数を変えながら、共振周波数に近いプローブの透過(または反射)特性を測定する(ポンププローブ法あるいは Two Tone 法。ここではポンプ光、プローブ光ともに連続光を用いている)。ポンプ光によって束縛状態が励起されるかされないかによって、プローブ光の透過(反射)特性が変わる。このことを利用して束縛状態のエネルギースペクトルを得る。図3(b)には、ポンププローブ法を用いて測定したアンドレーエフ束縛状態の位相差依存性を示す。位相差は rf-SQUID に鎖交する磁束によって変えることができる。位相が π のところでギャップを持つ典型的なアンドレーエフ束縛状態が観測されている。

本研究で作製するジョセフソン接合は、材料にバリエーションがあり、作製するデバイスに十分な再現性が見込めないという困難がある。そこで、本研究では、共振器とデバイスを含む rf-SQUID をそれぞれ別基板に作製し、それらに向かい合わせて張り合わせるにより結合を実現するフリップチップ法を開発した。この手法は、様々な物質からなるジョセフソン接合へ適用が可能である。フリップチップ法で実現した試料の模式図を図4に示す。

図5にはポンププローブ法で測定したエネルギースペクトルのゲート電圧依存性を示す。エネルギースペクトルは複雑なふるまいを示すが、基本的には、アンドレーエフ束縛状態は、ナノワイヤ中の量子準位との関係で決まると考えられ、それがゲート電圧によって変化することを反映しているものと考えられる。しかも、ナノワイヤには単一のモードではなく複数のモードが形成されていると考えられ、アンドレーエフ束縛状態もいくつかの励起状態が関係していると考えられるので、そのことが複雑なふるまいをもたらしていると思われる。興味深い点は、共振器自身の周波数(点線)と束縛状態のエネルギーが交差する様子(図5(b))である。図は交差前後での位相の変化を示しているが、準位反発を示す変化が観測されている。

(3) 多層 WTe_2 薄膜を用いたジョセフソン接合の形成[3]

WTe_2 は単層のものは2次元トポロジカル絶縁体であると実験的にも考えられている。しかし、この物質は空気中で容易に劣化してしまうために、単層のものは扱いが非常に困難である。また、コンタクトの取り方や材料に関しても十分な蓄積がない。そこで、まず扱いやすい多層 WTe_2 を用いて単層へ向けたプロセス開発を行った。

図6(a)には WTe_2 の構造(各層が van der Waals 力で2次元的に積層した構造)を示し、(b)

Flip-chip Design

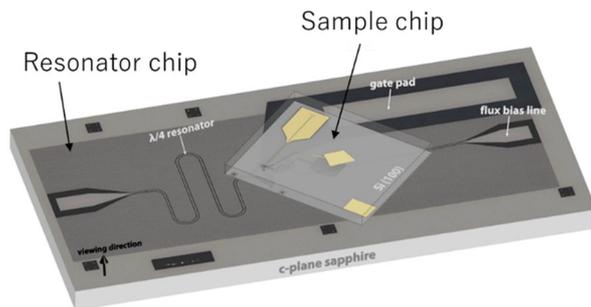


図4: マイクロ波回路共振器とジョセフソン接合デバイスの結合を実現するフリップチップ法の模式図 [2]

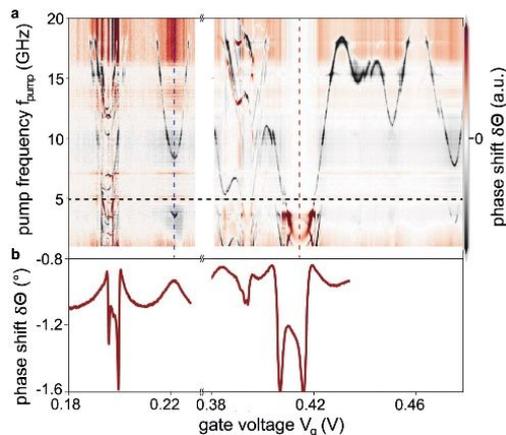


図5: (a) ポンププローブ法で測定したエネルギースペクトルのゲート電圧依存性(共振位置をプローブ光の位相の変化で計測) (b) 共振器周波数と束縛エネルギーが交差する付近での位相変化 [2]

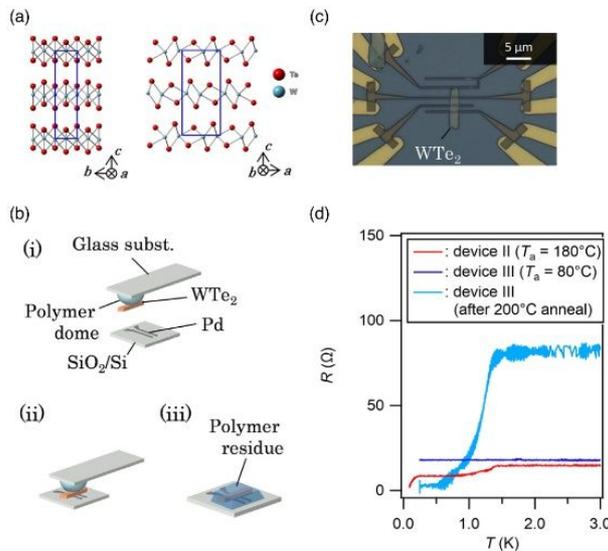


図6：多層 WTe₂ ジョセフソン接合試料の作製方法 (a) 2次元性を示す積層構造 (b) スタックトランスファー法によるスタック作製後基板上へ移送する方法 (c) 作製した試料の光学顕微鏡写真 (d) 異なる温度でアニールした試料の抵抗の温度依存性[3]

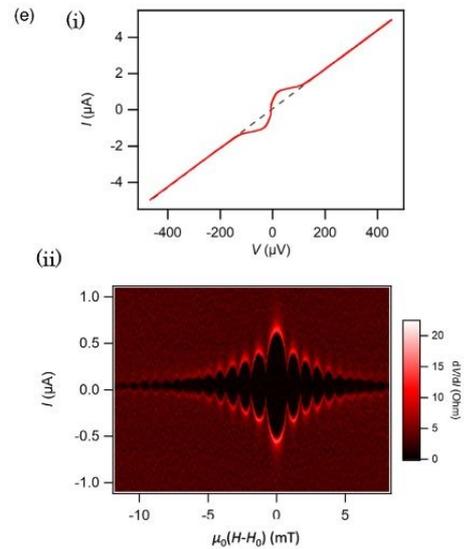


図7：(a) 3端子素子法で測定した作製した試料の電流電圧特性 (b) 超伝導電流の磁場依存性[3]

には試料作製方法を示す。材料の2次元性を利用して、グラフェン試料作製において標準的に用いられているスコッチテープ法を用いて薄膜を剥離し、いったん別基板上に転写したのち、同図(b)に示すように所望の破片薄膜をスタンプ移送する。それを、あらかじめ作製した電極パターンの上に張り付ける。完成した試料の一例を図6(c)に示す。ここでの最大の発見は、Pdを電極金属として用いた場合、200 °C程度に熱するとその部分が超伝導電極となることである。図6(d)にその様子を示す。電極間隔を1.5ミクロン程度に設定した試料ではアニール後に、一定の温度以下で抵抗がゼロとなっている。これは、電極間にジョセフソン接合が形成されたことを示している。実際、その電流電圧特性と超伝導電流の磁場依存性を、それぞれ図7(a),(b)に示す。3端子法で測定しているために接触抵抗を完全に取り去ることができず、ゼロ電圧で直列抵抗成分がのっているが、超伝導電流(ジョセフソン電流)が流れている。また、磁場依存性はジョセフソン接合に特有のFraunhoferパターンのような干渉パターンが観測されている。しかし、超伝導電流がゼロに落ちないなど、電流分布が一樣な場合の典型的なFraunhofer干渉パターンからのずれがみられる。干渉パターンから電流分布を解析する手法が提案されているが、厳密に電流分布を求めることは困難であると考えている。電流分布がWTe₂薄膜の中で不均一であることは確かであるが、それが多層の場合に形成が予想されているHingeチャンネルのような物理的な要因ではなく、プロセスにより生成された不均一性や材料そのものの不均一性によるものと考えている。

WTe₂や電極金属のPdはもともとこの温度では超伝導体ではないが(ただし、単層WTe₂はゲート電圧を印可することによって超伝導転移することが報告されている)PdとWTe₂界面の透過電子顕微鏡(TEM)観察で分かったことは、アニールによってPdがWTe₂に拡散し、Teとの化合物(PdTe, PdTe₂)が生成されているということである。これらの物質はこの温度で超伝導体である。したがって、アニールによりPdが電極間のWTe₂層へ拡散し、適当なギャップ間隔のジョセフソン接合が形成されたものと思われる。このことは、単層WTe₂を用いたジョセフソン接合形成へも応用が可能な超伝導電極形成技術となりうる。

参考文献

- [1] Patrick Zellekens, et al., Phys. Rev. Applied **14**, 054019 (2020)
- [2] Patrick Zellekens, et al., Communications Physics, **5**, 267 (2022)
- [3] Manabu Ohtomo, et al, Appl. Phys. Express **15**, 075003 (5 pages) (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Zellekens Patrick, Deacon Russell, Perla Pujitha, Fonseka H. Aruni, Morstedt Timm, Hindmarsh Steven A., Bennemann Benjamin, Lentz Florian, Lepsa Mihail I., Sanchez Ana M., Grutzmacher Detlev, Ishibashi Koji, Schapers Thomas	4. 巻 14
2. 論文標題 Hard-Gap Spectroscopy in a Self-Defined Mesoscopic InAs/Al Nanowire Josephson Junction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 054019(13pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.14.054019	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 Takehige Yuusuke, Matsuo Sadashige, Deacon Russell S., Ueda Kento, Sato Yosuke, Zhao Yi-Fan, Zhou Lingjie, Chang Cui-Zu, Ishibashi Koji, Tarucha Seigo	4. 巻 101
2. 論文標題 Experimental study of ac Josephson effect in gate-tunable (Bi1-xSbx)2Te3 thin-film Josephson junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.115410	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 Perla Pujitha, Fonseka H. Aruni, Zellekens Patrick, Deacon Russell, Han Yisong, Kolzer Jonas, Morstedt Timm, Bennemann Benjamin, Espiari Abbas, Ishibashi Koji, Grutzmacher Detlev, Sanchez Ana M., Lepsa Mihail Ion, Schapers Thomas	4. 巻 3
2. 論文標題 Fully <i>in situ</i> Nb/InAs-nanowire Josephson junctions by selective-area growth and shadow evaporation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 1413 ~ 1421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0NA00999G	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

1. 著者名 Perla Pujitha, Faustmann Anton, Kolling Sebastian, Zellekens Patrick, Deacon Russell, Aruni Fonseka H., Kolzer Jonas, Sato Yuki, Sanchez Ana M., Moutanabbir Oussama, Ishibashi Koji, Grutzmacher Detlev, Lepsa Mihail Ion, Schapers Thomas	4. 巻 6
2. 論文標題 Te-doped selective-area grown InAs nanowires for superconducting hybrid devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 24602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.6.024602	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 Ohtomo Manabu, Deacon Russell S., Hosoda Masayuki, Fushimi Naoki, Hosoi Hirokazu, Randle Michael D., Ohfuchi Mari, Kawaguchi Kenichi, Ishibashi Koji, Sato Shintaro	4. 巻 15
2. 論文標題 Josephson junctions of Weyl semimetal WTe ₂ induced by spontaneous nucleation of PdTe superconductor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 075003 ~ 075003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac75a8	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 -

1. 著者名 Zellekens Patrick, Deacon Russell S., Perla Pujitha, Grutzmacher Detlev, Lepsa Mihail Ion, Schaeppers Thomas, Ishibashi Koji	4. 巻 5
2. 論文標題 Microwave spectroscopy of Andreev states in InAs nanowire-based hybrid junctions using a flip-chip layout	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-022-01035-6	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13件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Koji Ishibashi
2. 発表標題 Topological insulator/superconductor hybrid structures -Toward Majorana qubit-
3. 学会等名 International Symposium on Advanced Science and Technology, Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Patrick Zellekens, Russell S. Deacon, Steffen Scholor, Pujitha Perla, Patrick Liebisch, Benjamin Bennemann, Mihail Lepsa, Martin Weides, Koji Ishibashi, Detlev Grutzmacher and Thomas Schapers
2. 発表標題 Towards semiconductor-superconductor hybrid qubits based on InAs/Al coreshell nanowires
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week (CSW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshige, Sadashige Matsuo, Russell S. Deacon, Kento Ueda, Yosuke Sato, Yi-Fan Zhao, Ling Zhang, Cui-Zu Chang, Koji Ishibashi, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Observation of ac Josephson effect in gate tunable Josephson junction on topological insulator (Bi _{0.2} Sb _{0.8}) ₂ Te ₃ films
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week (CSW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Ishibashi
2. 発表標題 2019 RIKEN-NCHU Joint Symposium
3. 学会等名 Topological insulator-superconductor Josephson junction -Search for Majorana fermion- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Ishibashi
2. 発表標題 Towards topological qubits
3. 学会等名 2021 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 P. Zellekens, R.S. Deacon, P Perla, M. Lepsa, K. Ishibashi, D. Grutzmacher and T. Schapers
2. 発表標題 Microwave spectroscopy of Andreev states in InAs nanowire-based hybrid junctions
3. 学会等名 2022 Nanowires and Nanowire Growth Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石橋幸治
2. 発表標題 Josephson Junction with Topological Insulators - Towards Majorana qubits -
3. 学会等名 応用物理学会量子情報グループ研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋幸治
2. 発表標題 トポロジカル量子コンピューティングに向けて -材料・デバイスの立場から-
3. 学会等名 IEEE EDS 関西チャプタ 技術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋幸治
2. 発表標題 トポロジカル量子コンピューティング -マヨラナ粒子の探索と量子ビットへの応用-
3. 学会等名 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第49回薄膜・表面物理セミナー 「量子コンピュータの現状とハードウェア研究最前線」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Patrick Zellekens, Russell Deacon, Pujitha Perla, Mihail Lepsa, Detlev Gruetzmacher, Thomas Schaeppers, Koji Ishibashi
2. 発表標題 Microwave spectroscopy of Andreev states in mesoscopic InAs nanowire-based hybrid Josephson junctions
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 細田 雅之、ディーコン ラッセル、ランドル マイケル、岡崎 尚太、笹川 崇男、谷口 尚、渡邊 賢司、大伴 真名歩、河口 研一、土肥 義康、佐藤 信太郎、石橋 幸治、
2. 発表標題 ナノスケール単層WTe2デバイスの作製手法の検討
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Patrick Zellekens, Russell Deacon, Pujitha Perla, Mihail Lepsa, Detlev Gruetzmacher, Thomas Schaeppers, Koji Ishibashi
2. 発表標題 Flux-periodic supercurrent oscillations in GaAs/InAs/Al core/shell/halfshell nanowire Josephson junctions
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Randle Michael, Masayuki Hosoda, Russell, Deacon, Manabu Ohtomo, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Shota Okazaki, Takao Sasagawa, Kenichi Kawaguchi, Shintaro Sato, Koji Ishibashi
2. 発表標題 Gate Defined Josephson junctions in monolayer WTe2
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023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
研究協力者	ディーコン ラッセル (Deacon Russell)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	ゼレケンス パトリック (Zellekens Patrick)		
研究協力者	ランドル マイク (Randle Mike)		
研究協力者	細田 雅之 (Hosoda Masayuki)		
研究協力者	シェーパース トーマス (Schaeppers Thomas)		

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			
ドイツ	ユーリッヒ研究所			