

令和元年6月10日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06275

研究課題名(和文) 多バンド超伝導体において生成するトポロジカルソリトンの観測

研究課題名(英文) Observation of topological solitons in multiband superconductors

研究代表者

西尾 太一郎 (Nishio, Taichiro)

東京理科大学・理学部第二部物理学科・准教授

研究者番号：40370449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、複数の量子位相をもつ多バンド超伝導体において、理論的に示唆されてきた新しいタイプのトポロジカルソリトンの存在を実験的に検証し、トポロジカルソリトンを新しい情報伝達手段とするための基礎研究を行うことである。初年度において、人工的な多バンド超伝導体の作製に成功し、それを基にしてソリトン発生回路の設計およびその作製を行った。次年度および最終年度において、ソリトンの直接観測および発生条件などの特定に成功し、世界に先駆けてトポロジカルソリトンの実在について報告することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、世界に先駆けてトポロジカルソリトンの実在について報告することができた。本研究は、物理分野の創出という意味でも学術的に大変重要な研究であると考えられる。観測に成功したトポロジカルソリトンは、量子情報伝達的手段として利用できるだけでなく、電磁場と相互作用をしないので、これを量子コンピュータなどに応用したときにデコヒーレンス問題を解決することができるなど大いなる可能性を秘めている。今後の研究の進展が待たれる。

研究成果の概要(英文)： In this study, we attempted to observe topological solitons excited in multi-band superconductors which have been calculated in theory and to apply topological solitons to quantum information transmission devices. In the early stage, we fabricated soliton devices made from the multi-band superconductor Nb/AlO/Nb. In the next and final stages, we succeeded in observing topological solitons and conducting research for quantum information transmissions. We were able to make a first report of the emergence of topological solitons in multi-band superconductors in the world.

研究分野：超伝導

キーワード：トポロジカルソリトン 多バンド超伝導体 量子位相 磁束量子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、トポロジカル量子現象の研究が目覚ましい勢いで進展している。背景には量子位相をコントロールするという人類の大きな目標がある。量子位相を扱うのに最も良い方法の1つは超伝導体を用いることである。量子位相をコントロールできれば、量子現象を自由自在に操るとい人類の究極の目標に一步近づくことになる。多バンド超伝導体は、複数のバンドにおいて電子がバンド内電子対を形成し、それぞれのバンドで独立に量子位相をもつため、内部に複数の量子位相を有するユニークな物質である。最も注目されるのが、2 バンド間の位相差が2 変化する位相差ソリトンの生成である。2つのバンド間の相互作用が十分弱いとき、2つのバンドの位相は独立性が保たれるが、基底状態においては相互作用のため2つの位相が揃った状態になる。この状態において超伝導電子対密度に大きな変化を与えた場合、位相差が2 となるような非線形波つまりソリトンが生成される。この新しいタイプのトポロジカルソリトンは、情報伝達的手段として利用できるだけでなく、電磁場と相互作用をしないので、これを量子コンピュータなどに応用したときにデコヒーレンス問題を解決することができるなど大いなる可能性を秘めている。このように理論的に存在が明らかにされたトポロジカルソリトンであるが、実験による検証が十分に行われていない。近年、申請者は、銅酸化物超伝導体を用いて位相差ソリトン生成の兆候をとらえることに成功した。本研究では、別の手法でこの結果を検証し、ソリトンの存在を確実なものにする。また、これを基にしてトポロジカルソリトンを新しい情報伝達手段とするためのデバイス開発を行う。

2. 研究の目的

銅酸化物などのバルク超伝導体は、バンド間相互作用が比較的大きく、多バンド効果の存在を明確にすることが容易ではない。そこで、本研究課題では、まず、バンド間相互作用の制御が可能である人工的な多バンド超伝導薄膜を作製し、複数の量子位相が存在する系を構築する。その薄膜を使用してトポロジカルソリトンを検出し、その存在を確実なものとする。さらにその応用研究を開始する。

3. 研究の方法

本研究課題は3年計画である。次の3つの研究を順に行った。

1) 人工的な2バンド超伝導薄膜 Nb/AIO/Nb の作製

まず、人工的な2バンド超伝導体として Nb/AIO/Nb 薄膜を作製する。Nb/AIO/Nb 構造(超伝導ジャンクション)は、超伝導量子干渉計などにおいてすでに使われている。申請者はこの構造を人工的な多バンド超伝導体として研究に使用する。本研究で作製する Nb/AIO/Nb 薄膜とこれまで使用されてきた超伝導ジャンクションの違いは、Nb 膜の厚さである。Nb の膜厚はコヒーレンス長程度(20 nm)である。AIO 膜の厚さによってバンド間の相互作用が調節できる。厚さを5 nm から20 nm まで変化させて Nb/AIO/Nb 薄膜を作製した。

2) トポロジカルソリトンを発生させるための回路の作製

トポロジカルソリトンを発生および観測するための回路を設計し、実際に作製した。Nb/AIO/Nb 膜上に幅5 μm 、長さ20 μm のチャンネルおよび電流を流すための電極などをリソグラフィにより作製した。

3) トポロジカルソリトンの観測実験

購入した DC-SQUID 素子を用いて、トポロジカルソリトンの観測を行った。回路にトポロジカルソリトンが発生した場合、チャンネル上の磁束量子の磁束量が分数値になる。DC-SQUID 素子で磁束を直接観測し、磁束量を測定した。

4. 研究成果

1) 人工的な2バンド超伝導薄膜 Nb/AIO/Nb の作製

初年度に、人工的な2バンド超伝導体である Nb/AIO/Nb 薄膜の設計と作製を行った(図1)。薄膜は産業技術総合研究所・イノベーションプラットフォームにおいて作製された。Nb 薄膜の厚さは20 nm に設定し、AIO 膜の厚さは5 nm から20 nm まで変化させた。膜厚、超伝導転移温度、ジョセフソン接合などがチェックされ(図2)、当初予定されていた条件を満たす、

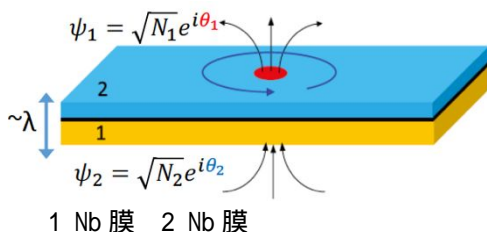


図1 Nb/AIO/Nb 薄膜の模式図

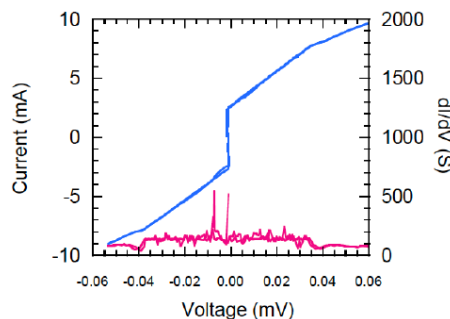


図2 試料の電流-電圧特性

ジョセフソン相互作用の非常に小さいNb/AIO/Nb 薄膜を作製することができた。

2) トポロジカルソリトンを発生させるための回路の作製

Nb/AIO/Nb 膜上に幅 5 μm 、長さ 20 μm のチャンネルおよび電流を流すための電極などをリソグラフィによって作製することに成功した。ここで電流は超伝導電子対密度に変化を与えるためのものである。

電極などの配置は図 3 に示されたとおりである。電流は Nb の層間および層内に流すことができる。層間の電流-電圧特性は図 2 に示されたとおりである。臨界電流は 100

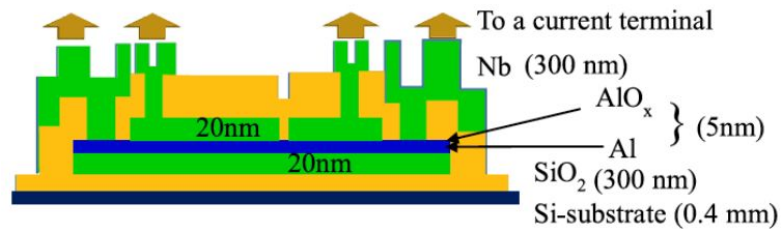


図 3 トポロジカルソリトンを観測するための回路

A/cm^2 程度で通常のジョセフソン接合より

およそ 10 倍小さい。作製した Nb/AIO/Nb 薄膜は、2 バンド超伝導体の研究において今後、標準的な試料となることが考えられる。

3) トポロジカルソリトンの観測実験

DC-SQUID 素子を用いて、トポロジカルソリトンの観測を行った。まず、電流を流さない状態で測定をしてみたところ、図 4 に示されたとおり、通常磁束量子の磁束量は Φ_0 ($\Phi_0 = 2.06 \times 10^6 \text{ nT} \cdot \mu\text{m}^2$) であるが、磁束量が $0.5 \Phi_0$ である磁束量子が観測された (図 4 の $\Phi_{\text{fractional}}$ がそれに相当する)。この $0.5 \Phi_0$ の磁束量子の場所にソリトンが存在していると考えられる。この結果より、電流を流さない状態でも定常的にソリトンは存在しており、しかも様々な場所にピンされていることが考えられる。この実験により、トポロジカルソリトンの存在を確実なものとする

ことができた。また、電極などを付けていない試料においては、 $0.5 \Phi_0$ の磁束が見られないこともわかり、ソリトンの発生条件の特定などにおいて大変重要なデータを得ることができた。この成果は、論文としてまとめられ、世界に先駆けて発表された。論文は 90 日間のダウンロード数がトップになるなど、世界的にインパクトを与えることができ、多バンド超伝導の研究の活性化につながった。今後は、観測されたソリトンを、情報伝達の手段として応用するなどの研究に取り組む予定である。

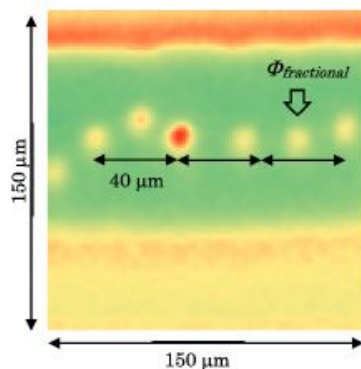


図 4 磁束の直接観測 (電極あり)

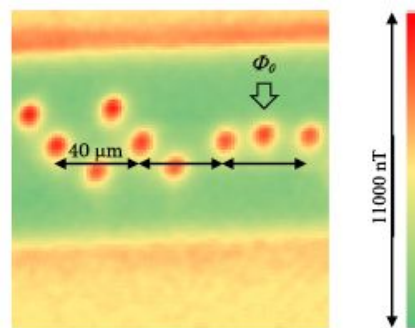


図 5 磁束の直接観測 (電極なし)

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

Y. Tanaka, H. Yamamori, T. Yanagisawa, T. Nishio, S. Arisawa, Abnormal Meissner state in a superconducting bilayer, Physica C 551, 2018, 41-47 査読あり

Y. Tanaka, H. Yamamori, T. Yanagisawa, T. Nishio, S. Arisawa, Experimental formation of a fractional vortex in a superconducting bi-layer, Physica C 548, 2018, 41-49 査読あり

Y. Tanaka, H. Yamamori, T. Yanagisawa, T. Nishio, S. Arisawa, An conventional vortex state in a superconducting bilayer where one layer has a hole, Solid State Communications 277, 2018, 39-44 査読あり

Y. Tanaka, H. Yamamori, T. Yanagisawa, T. Nishio, S. Arisawa, Voltage-less alternating current (AC) Josephson effect in two-band superconductors, Physica C 538, 2017, 6-11 査読あり

Y. Tanaka, H. Yamamori, T. Yanagisawa, T. Nishio, S. Arisawa, Decomposition of a unit quantum and isolation of a fractional quantum by an externally injected soliton in an ultra-thin superconducting bi-layer film, Physica C 538, 2017, 12-19 査読あり

〔学会発表〕(計 11 件)

西尾太一郎、有沢俊一、田中康資 他 二重層構造をもつ超伝導薄膜における分数量子磁束の観測 II、日本物理学会第 74 回年次大会 2019 年 3 月 14 日

山森弘毅、田中康資、有沢俊一、西尾太一郎、柳澤孝、人工多バンド超伝導体における分数量子磁束の観測、応用物理学会春季学術講演会 2019 年 3 月 10 日

有沢俊一、西尾太一郎、田中康資 他 走査 SQUID 顕微鏡を利用した材料開発と物性評価、NIMS 先端計測シンポジウム、2019 年 3 月 7 日

西尾太一郎 (招待講演) s 波超伝導体を用いた分数量子磁束の生成、駒場物性セミナー、東京大学駒場キャンパス、2019 年 1 月 16 日

T. Nishio, Y. Tanaka, S. Arisawa 他 Observation of Fractional Vortices in a Superconducting Double Layer, The 31st International Symposium on Superconductivity, つくば市・つくば国際会議場, 2018 年 12 月 12 日

Y. Tanaka, T. Nishio, S. Arisawa 他 Hybrid of Single and Double-Component Superconductors, The 31st International Symposium on Superconductivity, つくば市・つくば国際会議場 2018 年 12 月 12 日

西尾太一郎、有沢俊一、田中康資 他 二重層構造をもつ超伝導薄膜における分数量子磁束の観測、2018 年日本物理学会秋季大会、2018 年 9 月 9 日

T. Nishio, Y. Tanaka, S. Arisawa 他 Nucleation of Fractional Vortices in a Superconducting Bilayer, 12th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity, Beijing, China, 2018 年 8 月 19 日

西尾太一郎、有沢俊一、田中康資 他 二重層構造をもつ超伝導薄膜における分数量子磁束発生のシミュレーション、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 24 日

Y. Tanaka, T. Nishio, S. Arisawa 他 Partition of a quantum, TIA かけはし「分数量子磁束量子操作技術のための調査研究」成果検討会、2018 年 3 月 15 日

Y. Tanaka, T. Nishio, S. Arisawa 他 Quantum Decomposer、第 6 回 CRAVITY シンポジウム、2018 年 2 月 7 日

〔図書〕(計 1 件)

西尾太一郎 他, 裳華房, 超伝導磁束状態の物理, 2017, 3.4.4.項, 241-245

〔その他〕

ホームページ等

論文 がダウンロード数トップに選定された。

<https://www.tus.ac.jp/today/archive/20180606100.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：田中 康資

ローマ字氏名：Tanaka Yasumoto

所属研究機関名：産業技術総合研究所

部局名：電子光技術研究部門

職名：研究員

研究者番号(8桁): 70357440

研究分担者氏名：有沢 俊一
ローマ字氏名：Shunichi Arisawa
所属研究機関名：物質・材料研究機構
部局名：機能性材料研究拠点
職名：グループ長
研究者番号（8桁）：00354340

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。