

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20352

研究課題名（和文）ファンデルワールス層状超伝導体における新奇超伝導輸送現象の開拓

研究課題名（英文）Exploration of novel superconducting transport phenomena in Van der Waals superconductors

研究代表者

板橋 勇輝（Itahashi, Yuki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：70966407

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）：研究開始時に掲げたミスフィット層状超伝導体(PbSe)_{1.14}(NbSe₂)₃における整流応答を観測することはできなかった。しかしながら、電気抵抗測定を高磁場下で行った結果、非従来型超伝導相を示唆するようなアノマリーが見られた。さらに、TDO測定と呼ばれるバルク測定を行うことで、電気抵抗測定では得ることのできなかったゼロ抵抗領域での相転移を示すようなアノマリーの確認にも成功した。現在この結果について論文執筆中である。今後は(PbSe)_{1.14}(NbSe₂)₃における磁束の運動の検証や、(PbSe)_{1.14}(NbSe₂)、(PbSe)_{1.14}(NbSe₂)₂への拡張といった展開が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は消費電力の少ない超伝導エレクトロニクスに向けた超伝導ダイオード素子実現を目指し、超伝導ダイオード効果を示す物質系の開拓及び微視的機構の解明を目標としてきたが、今回副次的に非従来型超伝導相の発見に至った。このような非従来型超伝導がどのような系で見られるか、どのような起源を持つのかといった特性の解明につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：We could not observe the rectification effect in the misfit layered superconductor (PbSe)_{1.14}(NbSe₂)₃, which was proposed at the beginning of the research project. However, electrical resistance measurements under high magnetic fields revealed anomalies implying an unconventional superconducting phase. Furthermore, by performing bulk measurement, which is called TDO measurement, we also succeeded in confirming an anomaly that indicates a phase transition inside the zero resistance state, which could not be obtained by electrical resistance measurements. I am currently writing a paper on this result. In the future, we hope to verify the magnetic flux motion in (PbSe)_{1.14}(NbSe₂)₃, and expanding the measurement to (PbSe)_{1.14}(NbSe₂) and (PbSe)_{1.14}(NbSe₂)₂.

研究分野：ファンデルワールス層状超伝導体

キーワード：超伝導 ファンデルワールス物質 超伝導ダイオード効果 FFL0相

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、ファンデルワールス層状超伝導体を舞台に、その特徴的な特徴である積層自由度や可塑性を活かして、電流に対する 2 次の非線形応答である非相反電荷輸送現象や超伝導ダイオード特性といった新奇超伝導輸送現象の開拓に取り組む。近年、異なる層状物質を積層させる、あるいは応力を加えることによって、系の対称性(空間反転対称性の破れの有無や極性構造の発現)を制御するという対称性制御が可能であるということが実証されてきており、それをファンデルワールス層状超伝導体に適用し、整流特性の新原理や新たな機能性の発見が期待される。

2. 研究の目的

空間反転対称性の破れた結晶においては、印加電圧の正負によって電気伝導性が異なるという整流特性が期待される。この整流性は結晶の対称性に起因する現象であるため、原理的に超伝導相への拡張が可能であり、超伝導ダイオード素子実現へ向けた重要な知見となりうる。超伝導状態での整流特性は近年盛んに研究されているもののその例は未だに寡少であり、超伝導ダイオード実現へ向けた物質系の拡張や、新原理の提案が望まれる。本研究では、ファンデルワールス結晶の最大の特徴である積層自由度を利用した整流特性の実現を目指す。

3. 研究の方法

ミスフィット層状超伝導体 (PbSe)_{1.14}(NbSe₂)₃ において、機械的剥離によってマイクロサイズのデバイスを作製し、電気抵抗測定を行った。測定は PPMS 及び東京大学物性研小濱研究室所有のパルス磁場印加可能なクライオスタットで行った。また、TDO 測定は数百マイクロメートルオーダーの大きさのバルクサンプルで行った。

4. 研究成果

・整流応答

今回の測定では整流応答を観測することはできなかった。これは単一ドメインが実現していない可能性を示唆しており、よりデバイスサイズを小さくする乃至はフレークを薄くすることによって単一ドメインを実現することで、空間反転対称性の破れを反映した整流応答が期待される。

・超伝導相図

面内磁場を印加した際の臨界磁場は低温で PPMS の 9 T を凌駕していたため、東京大学物性研小濱研究室の協力のもと、パルス磁場を印加しての B-T 相図の作製を試みた。その結果、面内臨界磁場に新奇超伝導相への転移を示すアノマリーが見られた(図 1)。また、詳細な角度依存性を測定した結果、これも非従来型超伝導相の発現を示唆するアノマリーを示した。ゼロ抵抗領域内に非従来超伝導相への相転移が存在するか確かめるために、トンネルダイオードオシレータ測定(TDO 測定)を用いた。コイルの上にバルクサンプルを載せ、LC 回路の共振周波数の変化 F からコイルのインダクタンスの変化を読み取る。コイルのインダクタンスの変化は超伝導試料の AC 磁化率や磁場侵入長等の変化を表しており、超伝導状態の変化を敏感に観測できる測定手法となっている。その結果、臨界磁場に対応するシグナルとそれよりも低磁場領域に、ゼロ抵抗領域内の相転移に相当する異常(B_2)が見られた(図 2)。また、磁束格子の融解とみられる別のアノマリー B_1 も見られたが、これについてはさらなる検証が俟たれる。この非従来型超伝導相は面内磁場によって誘起される軌道 FFLO 相ではないかと考えており、理論グループと議論中である。現在この結果について第一著者として論文を執筆中である。

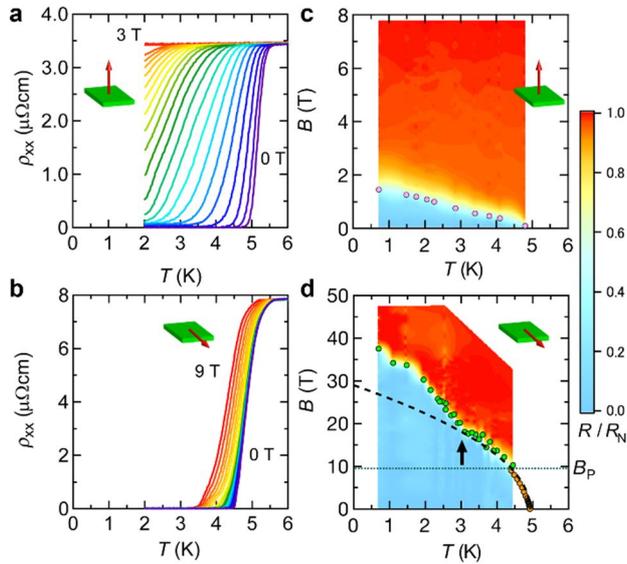


図 1 PbSe_{1.14}(NbSe₂)₃ における抵抗の磁場依存性 a, 面直磁場下での縦抵抗率の温度依存性。磁場 B は、0 から 2 T までは 0.1 T ステップで、2.5 から 3 T までは 0.5 T ステップで変化している。b, 面内磁場下での縦抵抗率の温度依存性。 B は、0 から 2 T まで 0.2 T ステップで、2.5 から 3 T まで 0.5 T ステップで、4 から 8 T まで 1 T ステップで変化している。c, d, 面直 (c) および面内 (d) 方向の臨界磁場の温度依存性。ピンクと黄緑色の円は、ノーマル抵抗で規格化した抵抗 $R/R_N = 0.5$ で定義される臨界磁場 (B_{c2}) である。図 d の黒矢印はキンの位置を示しており、非従来型超伝導状態の存在を示唆している。カラーマッピングは R/R_N の大きさを示している。

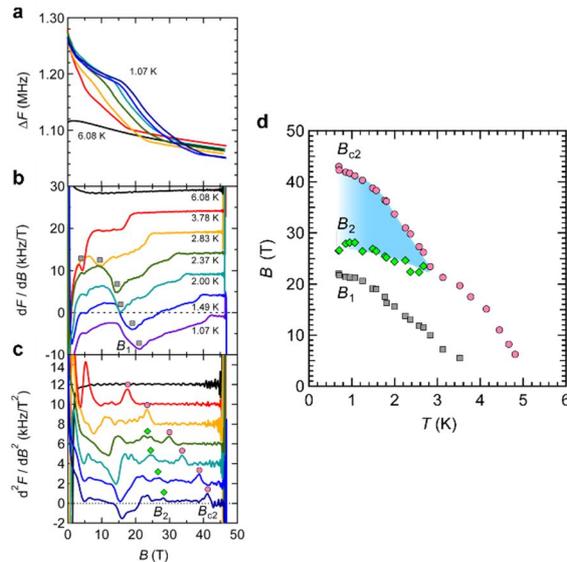


図 2 PbSe_{1.14}(NbSe₂)₃ における TDO シグナル a, $T = 1.07$ K (紫)、1.49 K (青)、2.00 K (ターコイズ)、2.37 K (緑)、2.83 K (オレンジ)、3.78 K (赤)、および 6.08 K (黒) における F の磁場依存性。b, dF/dB の B 依存性。各曲線は 5 kHz/T ずつシフトしている。灰色の四角は B_1 を示している。c, d^2F/dB^2 の B 依存性。各曲線は 2 kHz/T² ずつシフトしている。ピンクの丸と薄緑色の菱形は、それぞれ B_{c2} と B_2 を示している。d, TDO 測定から決定された PbSe_{1.14}(NbSe₂)₃ の B - T 超伝導相図。ピンクの丸、薄緑色の菱形、灰色の四角は、それぞれ上部臨界磁場 B_{c2} 、BCS 状態と非従来型超伝導相の間の境界 B_2 、ジョセフソンバルテックスの融解磁場 B_1 を示す。水色の領域は非従来型超伝導相を示している。

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 M. Heyl, K. Adachi, Y. M. Itahashi, Y. Nakagawa, Y. Kasahara, E. J. W. List-Kratochvil, Y. Kato, and Y. Iwasa	4. 巻 13
2. 論文標題 Vortex dynamics in the two-dimensional BCS-BEC crossover	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 6989
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-022-34756-x	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 Itahashi Yuki M., Nohara Yamato, Ideue Toshiya, Akiba Tomoki, Takahashi Hidefumi, Ishiwata Shintaro, Iwasa Yoshihiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Low-temperature phase transition in polar semimetal MoTe2 probed by nonreciprocal transport	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L022022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.5.L022022	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 Aoki Shunta, Dong Yu, Wang Ziqian, Huang Xiang S.W., Itahashi Yuki M., Ogawa Naoki, Ideue Toshiya, Iwasa Yoshihiro	4. 巻 36
2. 論文標題 Giant Modulation of the Second Harmonic Generation by Magnetoelectricity in Two Dimensional Multiferroic CuCrP2S6	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 202312781
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adma.202312781	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11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yuki Itahashi
2. 発表標題 Nonlinear transport and low temperature phase transition in polar semimetal MoTe2
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Itahashi
2. 発表標題 Nonreciprocal transport and lower temperature phase transition in polar semimetal MoTe ₂
3. 学会等名 The 11th International Workshop on 2D Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Itahashi
2. 発表標題 Second-order nonlinear transport under time reversal symmetry in trigonal superconductor PbTaSe ₂
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene & 2D Materials Research 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 板橋 勇輝
2. 発表標題 歪み印加PbTaSe ₂ における無磁場下超伝導ダイオード効果
3. 学会等名 第29回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Itahashi
2. 発表標題 Superconducting phase diagram in NbSe ₂ -based misfit layered superconductor
3. 学会等名 第15回低温センター研究交流会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuki Itahashi
2. 発表標題 Superconducting phase diagram in misfit-layered superconductor
3. 学会等名 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 板橋 勇輝
2. 発表標題 ミスフィット層状超伝導体 $\text{PbSe}_{1.14}(\text{NbSe}_2)_3$ における超伝導相図
3. 学会等名 日本物理学会2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 板橋 勇輝
2. 発表標題 NbSe ₂ 系ミスフィット層状超伝導体における超伝導相図
3. 学会等名 第29回 渦糸物理ワークショップ (2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Itahashi
2. 発表標題 Superconducting diode effect in strain-controlled trigonal superconductor PbTaSe_2
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuki Itahashi
2. 発表標題 Unconventional superconducting phase in NbSe ₂ -based misfit layered superconductor
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 板橋 勇輝
2. 発表標題 3回対称超伝導体PbTaSe ₂ における歪み誘起超伝導ダイオード効果
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
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