

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04610

研究課題名(和文)超小型・高分解能な超伝導転移端センサの開発

研究課題名(英文)Developments of Ultra-Compact and High-Resolution Transition-Edge Sensors

研究代表者

服部 香里 (HATTORI, Kaori)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：10624843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：超高感度、高波長分解能かつ可視光、近赤外域で一気にスペクトルイメージングを行うための超伝導検出器の研究を行う。超伝導転移端センサ(TEs)は、超高感度で可視光、近赤外域の単一光子を一個ずつ分光して検出可能という、既存の検出器にない大きな特徴がある。一方、波長分解能向上についてはまだ開発途上である(近赤外で100 nm、可視光で50 nm)。これを解決するために、本研究では(1)超伝導転移温度を下げることによる分解能向上の取り組み波長分解能向上 (2)1 μmのサイズの小型TEsの試作 (3)TEs上の狭い領域に集光できるデバイスの開発を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した超伝導転移端センサ(TEs)は、微弱光バイオイメージングへの応用が期待されている。センサを極低温まで冷却しノイズや暗係数を抑えることで、サンプルからの微弱光を感度良く捉えることができる。これはサンプルの自家蛍光を捕らえたり、より弱い光を照射してサンプルを観察することで、より自然な状態での観察を可能とする。また、可視光と近赤外という広い波長域を一気に捉えることで、今まで見えなかったものが見える可能性がある。このように、TEsを用いたバイオイメージングには高いポテンシャルがあるが、波長分解能が十分ではないのが課題であった。本研究はこれを解決するための重要なステップとなった。

研究成果の概要(英文)：We have developed superconducting detectors towards ultra-high sensitivity and high wavelength resolution spectral imaging in the visible and near-infrared regions. The superconducting transition edge sensor (TES) has a unique feature that existing detectors lack: ultra-high sensitivity and the ability to spectrally resolve and detect individual photons in the visible and near-infrared regions. On the other hand, the improvement of wavelength resolution is still under development (100 nm in the near-infrared and 50 nm in the visible light). To address this issue, this study focused on (1) improving wavelength resolution by lowering the superconducting transition temperature, (2) prototyping compact TESs with a size of 1 μm, and (3) developing devices capable of focusing light onto a narrow region of the TES.

研究分野：超伝導

キーワード：単一光子検出器 超伝導検出器 微弱光イメージング フラットレンズ 超伝導転移端センサ

1. 研究開始当初の背景

極低温で動作する超伝導転移端センサ (Transition Edge Sensor: TES) は、近赤外から可視光まで幅広い波長に感度があり、高い検出効率(近赤外で > 98%)で単一光子を分光しながら計測できる唯一の検出器である。TES は、究極の低雑音性を実現し、通常の検出器ではノイズに埋もれてしまうような微弱光を高感度で捉えることができる。さらに TES による今まで不可能だった可視光・近赤外域という広帯域での同時イメージングに成功した。これにより、微弱な自家蛍光など、今まで見えなかったものを広帯域で観察可能となり、バイオイメージングへ大きな変革をもたらすことが期待されている。

一方、高い波長分解能実現に向けては課題が多く残っている。現在、TES の波長分解能は可視光(550 nm における値)では 50 nm 程度、近赤外(1,000 nm)では 100 nm 程度である。バイオサンプルの自家蛍光などのスペクトルを詳細に取得しながらイメージングを行うには、さらなる波長分解能向上が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、超伝導検出器の波長分解能の限界を明らかにすることを目標とする。そのために、まずは波長分解能を制限している要因を見つけ出す。そして、それを解決できる新規デバイスの考案・試作・評価を行う。

3. 研究の方法

波長分解能向上のためには、(1) TES の超伝導転移温度 T_c を下げて熱雑音低下を図る (2) TES の面積を小さくして熱容量を減らし、光子が TES 内で吸収されたときの温度上昇を大きくして、得られる信号を大きくする、という二つの方法がある。本研究では (1)、(2) ともに取り組む。(1) の超伝導転移温度 T_c は、TES の超伝導薄膜の厚さによってコントロールする。これまでの T_c は、300 mK 程度だったものを、100 mK 程度まで下げる。これにより、波長分解能は理論的には 1/3 程度向上することが見込まれる。(2) については、これまでは最も小型のもので 5 μm 角であったものを 1 μm 角まで小さくする。これにより、波長分解能は理論的には 1/5 程度向上することが見込まれる。

平行して、小型センサに高効率で集光するデバイスを開発する。本研究では、レンズをファイバに取り付けるのではなく、図 1、2 のように、TES 上にレンズを形成する。TES とレンズは微細加工技術を用いて一気に作成すれば、常に中心位置が合っている状態を実現できる。したがって、ファイバが位置ずれを起こしても、図 2 のように集光することができる。なお、TES は必ずしもビームウェストにある必要はなく、ビームサイズが TES のサイズ以下になるような場所に設置すればよい。

フラットレンズについては、まず高効率で集光できるフラットレンズのデザインを決定する。図 2 のように、TES は検出効率を向上させるために、反射防止膜・TES・ミラーによって光キャビティ構造を取っている。ここに二次元メタマテリアル構造を載せたときの挙動について、Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法を用いてシミュレーションをし、構造の最適化を行う。

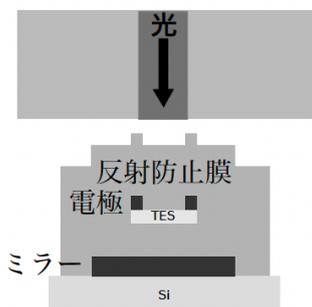


図 1: これまでのファイバ結合型 TES センサ(断面図)。

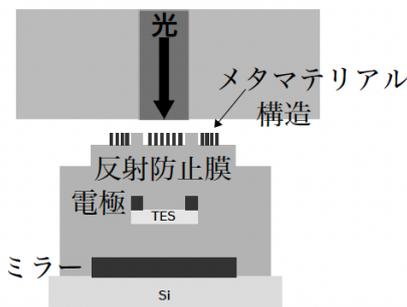


図 2: 新規に開発するフラットレンズ搭載型 TES センサ(断面図)。二次元メタマテリアル構造をセンサ上部に形成。

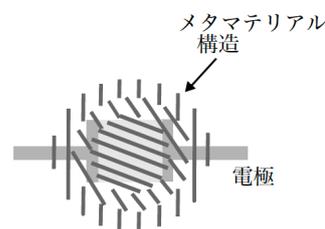


図 3: 新規に開発するフラットレンズ搭載型 TES センサ(上面図)。

4. 研究成果

(1) 低い T_c による高エネルギー分解能化

TES のサイズはそのまま (8 μm 角) で、超伝導転移温度 (T_c) を従来の 300 mK から 115 mK まで下

げること、世界最高レベルのエネルギー分解能向上(67 meV)を実現した [1]。100 meV 未満の分解能を実現したのは、本研究が世界初である。一方で、このエネルギー分解能は、 T_c から予想されるエネルギー分解能 40 meV よりも優位に悪いことがわかった。この原因を究明するため、この検出器の電流ノイズを詳細に測定した。その結果、検出器由来の既知の電流ノイズに加え、未知のノイズの寄与が既知のノイズと同等程度あることがわかった。未知のノイズを特定し削減しない限り、 T_c を下げたり、TES を小型化したりしたとしても、40 meV 以上のエネルギー分解能は実現不可能であることも明らかになった。

(2) TES の小型化

TES を小型化した際の応答を探るために、図 5 のような Ti/Au 二層膜からなる 1 mm 角の TES を試作した [2]。超伝導転移温度は 500 mK 程度であった。このデバイスにパルスレーザーを照射し、単一光子信号に対する応答を見たところ、図 6 のように複数の立ち上がり時定数の持つ信号が得られた。これは、TES の応答に場所依存性があることを示唆する。照射した光子は TES 上で吸収されるが、その場所によって得られる波形が変わっている可能性がある。このような状況では、通常使用している信号処理が適用できない。通常は、信号波形は一定であり波高値のみが変化しているという仮定で解析を行う(最適フィルタ)。これにより、高いエネルギー分解能を実現している。しかし、複数の波形が混在している状況下では、この解析手法は使用できない。そこで、図 7 のように信号の面積でスペクトルを作成した。しかし、面積によるスペクトル取得では、TES 本来の性能を十分引き出せず、高いエネルギー分解能実現は難しいことがわかった。このように、TES の小型化によって直ちにエネルギー分解能が向上するわけではないことが判明した。

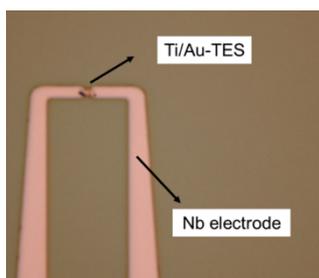


図 5: 1 μm 角の小型 TES。

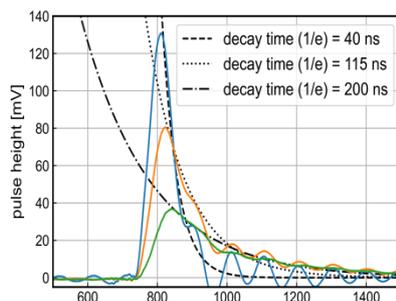


図 6: 得られた波形。

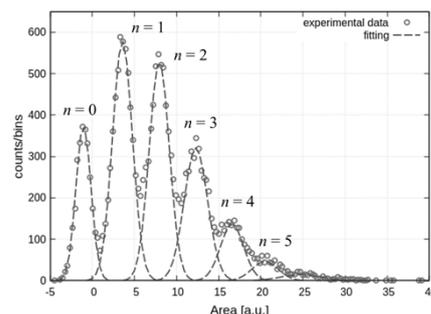


図 7: パルスレーザー (1550 nm, 0.8 eV) に対する応答。

(3) TES への入射光の集光

4-(1)で、未知のノイズ源があることを特定し、4-(2)で TES において応答の非一様性があることを明らかにした。これらの結果から、TES の色々な部分に光が当たることにより、TES の応答にばらつきが生じてエネルギー分解能が劣化するのではないかと推察される。そこで、狭い範囲に光を照射可能なデバイスについて設計とシミュレーションを行った。

(4) フラットレンズ

そのようなデバイスの一つとして、フラットレンズをシミュレーションで検討した。まず高効率で集光できるフラットレンズのデザインを探索した。図 2 のように、TES は検出効率を向上さ

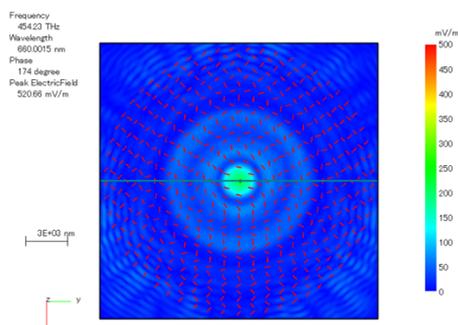


図 8: フラットレンズに 660 nm の光源を照射した際の電場分布(正面図)。

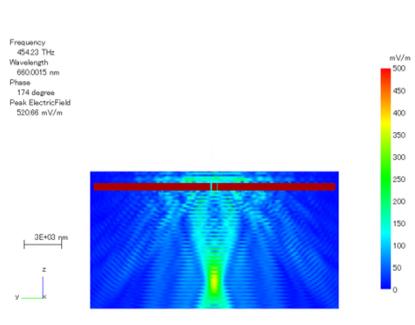


図 9: フラットレンズに 660 nm の光源を照射した際の電場分布(断面図)。

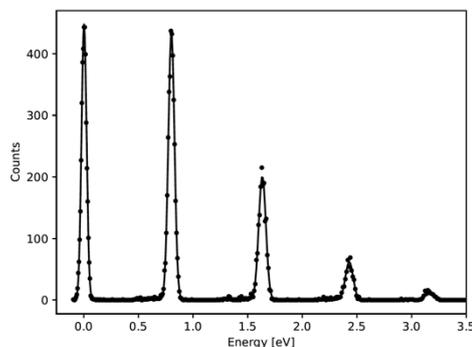


図 4: パルスレーザー(1550 nm, 0.8 eV)に対する応答。エネルギー分解能 67 meV(FWHM)を達成 [1]。

せるために、反射防止膜 TES ミラーによって光キャビティ構造を取っている。ここに二次元メタマテリアル構造を載せたときの挙動について、Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法を用いてシミュレーションをおこなった。使用したソフトウェアはPoyntingである。計算結果の一例を図 8, 9 に示す。二次元メタマテリアル構造によって、入射光が TES の中心に集光できていることがわかる。しかし、それ以外の領域にも光が照射されてしまう。これらの領域の電場は小さいが、面積が大きく、このような漏れ光の寄与は無視できないことがわかった。また、ファイバーが位置ずれすると、このような漏れ光の割合が顕著に増加することもわかった。このように、メタマテリアル構造では集光の性能が十分ではないと結論づけられた。

(5) アパーチャー付 TES

確実に TES の中心のみに光が入射する状態で性能評価を行い、エネルギー分解能を評価することが、TES のエネルギー分解能劣化の原因を探るためには重要となる。そこで、4-(4) よりもよく確実な手法として、図 10 のようなアパーチャーを TES 上に置くデザインを提案した。アパーチャーは TES と同様にリソグラフィ技術で作成することで、非常に高いアライメント精度を得られる。本研究の最終年度(2023 年度)に、このような TES の設計を終え、産総研クリーンルーム Qufab で製作に着手した。新型コロナおよび Qufab における大幅な装置入れ替えによる遅延で、本研究期間中にデバイス作成を完了できなかったが、2024 年度中には試作を完了し評価を終える予定である。

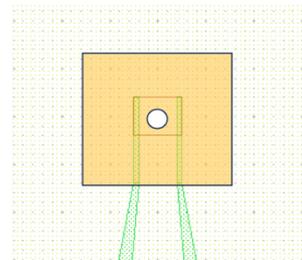


図 10: アパーチャー付 TES。

<引用文献>

- [1] K. Hattori, T. Konno, Y. Miura, S. Takasu, D. Fukuda, “An optical transition-edge sensor with high energy resolution”, Super. Sci. Tech., **35** 095002 (2022).
- [2] Y. Miura, S. Takasu, K. Hattori, D. Fukuda, “Development of transition-edge sensor with high counting rate”, LTD19, poster presentation, July 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 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hattori Kaori, Konno Toshio, Miura Yoshitaka, Takasu Sachiko, Fukuda Daiji	4. 巻 35
2. 論文標題 An optical transition-edge sensor with high energy resolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 095002 ~ 095002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ac7e7b	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 Niwa Kazuki, Hattori Kaori, Fukuda Daiji	4. 巻 9
2. 論文標題 Few-Photon Spectral Confocal Microscopy for Cell Imaging Using Superconducting Transition Edge Sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 789709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbioe.2021.789709	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 Hayakawa Ryota, Fukuda Daiji, Hattori Kaori, Hirayama Fuminori, Kikuchi Takahiro, Kohjiro Satoshi, Sato Akira, Yamamori Hirotake	4. 巻 -
2. 論文標題 Demonstration of Simultaneous Optical Transition-Edge Sensors Readout Using Microwave SQUID Multiplexer with 5 MHz Flux Ramp Modulation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-024-03080-7	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 3件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Kaori Hattori, Toshio Konno, Yoshitaka Miura, Sachiko Takasu, Daiji Fukuda
2. 発表標題 An optical transition-edge sensor with high energy resolution
3. 学会等名 Single Photon Workshop 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部香里
2. 発表標題 可視光・近赤外用超伝導転移端センサの開発
3. 学会等名 応用物理学会 超伝導分科会 第 65 回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤晶大、服部香里、鷹巣幸子、福田大治
2. 発表標題 Ti/Au 二層薄膜を用いた超伝導転移端センサにおけるジッタ解析
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 Kaori Hattori, Toshio Konno, Sachiko Takasu, Daiji Fukuda
2. 発表標題 Thermodynamic noise in optical transition-edge sensors
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaori Hattori, Toshio Konno, Yoshitaka Miura, Sachiko Takasu, Daiji Fukuda
2. 発表標題 Optical transition edge sensors: Wavelength dependence of system detection efficiency
3. 学会等名 ESW2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部 香里, 今野 俊生, 鷹巢 幸子, 三浦 義隆, 福田 大治
2. 発表標題 超伝導転移端センサにおける電流ノイズ特性の評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaori Hattori, Toshio Konno, Nobuhiko Nomura, Chigusa Okano, Sachiko Takasu, Yutaka Yawata, Daiji Fukuda
2. 発表標題 Microscope spectroscopy using an optical transition-edge sensor
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (ASC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦 義隆, 鷹巢 幸子, 服部 香里, 福田 大治
2. 発表標題 高計数率超伝導転移端センサの開発
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 2021年

1. 発表者名 K. Hattori, T. Konno, Y. Miura, S. Takasu and D. Fukuda
2. 発表標題 An optical transition-edge sensor with high energy resolution
3. 学会等名 LTD20 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Kato, K. Hattori, S. Takasu and D. Fukuda
2. 発表標題 Jitter Analysis for Ti/Au Transition-Edge Sensor
3. 学会等名 LTD20 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Hayakawa and K. Hattori et al.
2. 発表標題 Demonstration of a Fast Modulated Microwave SQUID Multiplexer Readout of Optical Transition Edge Sensors
3. 学会等名 LTD20 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Hattori
2. 発表標題 An optical transition-edge sensor with high energy resolution
3. 学会等名 JSPS二国間セミナー (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤 晶大、服部 香里 et al.
2. 発表標題 量子計算に向けた超伝導転移端センサの光子数分解能の評価
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Y. Miura, S. Takasu, K. Hattori, D. Fukuda
2. 発表標題 Development of transition-edge sensor with high counting rate
3. 学会等名 LTD19 (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------