

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14675

研究課題名(和文) 微弱光イメージングを可能にする超伝導転移端センサ多素子読み出しの開発

研究課題名(英文) Multiplexing readout of transition edge sensors for faint optics

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・研究員

研究者番号：10624843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導検出器を用いた単一光子検出器を多素子化・アレイ化し、超高感度かつ分光可能な大型カメラを実現する多素子読み出しの研究を行った。本研究では、光子による信号の立ち上がりという高周波の信号をフィルタによって取り出す、新しい方式の読み出しを開発した。回路シミュレーションによって、LCRフィルタ(インダクター、抵抗、コンデンサからなるフィルタ)を用いることに決定した。フィルタを極低温(4K)で評価し、期待通りの性能が得られることを確認した。新規読み出し回路とセンサーの統合試験を行った。さらに、多素子読み出しに向けた基盤的な研究として、高周波読み出しに関わる研究も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極低温で動作する超伝導転移端センサは、分光可能かつ高い効率(近赤外で>98%)で単一光子を計測できる唯一の検出器である。この超伝導センサは、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。この研究は、TESを多素子化し、分光可能な大型カメラの実現を目指したものである。このような微弱光カメラによって、生体の発光など、これまで見るができなかった微弱光のバイオイメージングが可能となることが期待される。将来的には、創薬や医療への応用を目指し、大型カメラ実現に向けた基盤となる要素技術の研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed novel readout for an array of multiplexed transition edge sensors (TESs) featured by energy-resolving capability and high sensitivity to visible and near-infrared photons. Our goal is to multiplex TESs, build a high-sensitivity camera and apply it to biological imaging. We suggested two-dimensional readout consisting of high-pass filters which pass rising-edge signals and do not affect electro-thermal feedback (ETF). An LCR filter optimized to have a resonant frequency at several MHz was found to be suitable by SPICE simulations. We fabricated the filter, tested at 4 K and confirmed that it worked properly, and then integrated the readout and a TES. In the new readout, not only the filters but readout cables are also essential. We tested twisted cables that are widely used for cryogenic experiments and found that they were greatly affected by stray impedance. On the other hand, coaxial cables showed sufficient properties at several MHz.

研究分野：超伝導デバイス

キーワード：単一光子検出器 超伝導検出器 超伝導転移端センサ 多素子読み出し 微弱光イメージング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

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、分光可能かつ高い検出効率(近赤外で>98%)で単一光子を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。TES を多素子化し、分光可能な大型カメラを開発することによって、生体の発光など、これまで見ることができなかった微弱光のイメージングが可能となる。

一方、TES を多数読み出す方式が実現できていないことが大きな問題となっている。TES は極低温(0.1 K)に冷やす必要があるため、読み出し線からの熱流入を抑える必要がある。したがって、読み出し線の本数には制限がある。多素子化実現のためには、一本の信号線より多くの素子を読み出す必要がある。マイクロ波・X 線・ガンマ線検出用 TES は、時定数が遅く(1 ms 前後)、これに対応した多チャンネル同時読み出しは、日本・北米・ヨーロッパの多くのグループで精力的に開発が行なわれている。一方で、これらの検出器より 3 桁速い(<1 μ s)光検出用 TES に対応する読み出しは手付かずであった。

2. 研究の目的

超伝導検出器を用いた単一光子検出器を多素子化・アレイ化し、超高感度かつ分光可能な大型カメラを実現する多素子読み出しを開発する。超伝導転移端センサは応答が速いため多素子を読み出すのが困難であった。本研究では、この高速応答を逆手に取る。光子による信号の立ち上がりのみをフィルタによって取り出す、これまでにない方式の読み出しを開発する。この方式では、超伝導転移端センサでは不可能と考えられてきた二次元読み出し実現が期待される。従来型読み出しでは原理的に一本の信号線で 10 素子の読み出しが限界であると考えられていたのが、 N^2 素子を $2N$ 本のケーブルで読み出せるようになり、CCD のような大型カメラ実現への糸口となる。

3. 研究の方法

図 1 のように、TES の時定数(約 300 ns)より高い周波数を通す LCR フィルタで TES を二次元的に接続する。光子によって生成されるパルス信号の立ち上がり(約 20 ns)は、TES の時定数より十分速いため、フィルタを通過することが期待される。まずはこのようなフィルタを設計し、極低温での動作試験を行う。このフィルタは TES の電熱フィードバックに関わる遅い信号は通さないため、TES の安定性に影響を与えないことが期待される。TES との統合読み出し試験でこれを確認し、期待される信号が得られるか検証する。

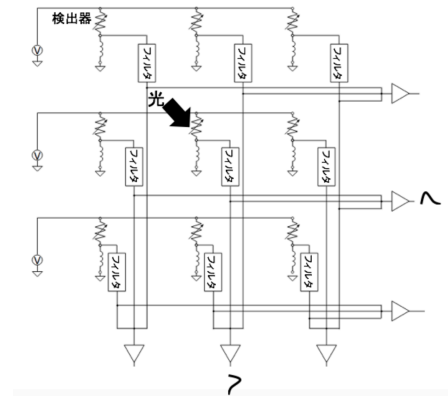


図 1 二次元読み出し

4. 研究成果

(1) 新規フィルタの開発

LCR フィルタのデザインを決定するために、図 1 のような回路の SPICE シミュレーションを行った。TES で得られる典型的な電気信号を入力し、十分な大きさの信号が得られ、なおかつ安定であるようにインダクタンス、静電容量、抵抗の値を決定した。シミュレーションの結果、最適なインダクタンスは数十 nH 程度となったため、PC ボード上の配線のデザインを工夫することで実現できることがわかった。また、静電容量に関しては市販の積層セラミックコンデンサ、抵抗も表面実装の抵抗で得られることがわかった。研究開始当初はインダクタンスは微細加工技術で作る予定だったが、フィルタの製作が大幅に簡便化された。図 2 に新規開発した LCR フィルタを示す。

次に、極低温で正常に動作する表面実装のコンデンサおよび抵抗の選定を行った。複数の市販品を液体窒素温度(4 K)まで冷却した。抵抗については、極低温において必要とされる抵抗値を示すものを選定した。コンデンサについては、極低温でも静電容量が大きく変化せず、誘電体による損失が大きくなるものを選定した。

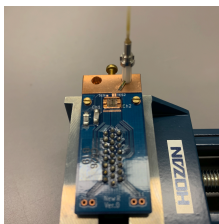


図 2 LCR フィルタと TES の統合試験

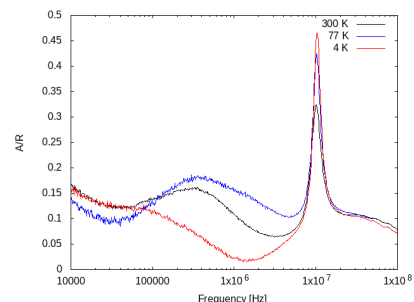


図 3 極低温における LCR フィルタの特性評価

次に、選定したコンデンサおよび抵抗、そして新規に設計したインダクタ(PCボード上に実現)を統合し、LCRフィルタとして動作するか極低温で試験を行った。結果、図3のように、10 MHzに信号の透過度のピークが見られ、TESの時定数(約300 ns)より高い周波数を通すフィルタを実現することに成功した。本研究では、TESと新規フィルタの統合試験を行うところまで目標としていた。しかし、冷凍機のトラブルおよび研究開始時には想定していなかった新たな課題が発生したため、研究期間中に統合試験を開始したものの、実際に信号を得るところまで到達できなかった。2020年度中に読み出し試験に取り組む予定である。さらに、9個のTESが1チップに配置されたTESアレイの製作および、既存の読み出しを用いた可視光信号の読み出しに成功した[1]。今後は、本研究で開発した新規読み出しにおいてもチャンネル数を増やしつつ、TESアレイとの統合試験を行っていく予定である。

一方、研究開始時に想定していなかった新たな課題に取り組むことで新しい知見が得られた。以下にそれを述べる。

(2) 可視光に対するTESの応答特性

本研究で開発した読み出しは、TESの時定数(約300 ns)より高い周波数をフィルタで取り出す。したがって、シミュレーションを行った結果、既存の読み出しも波高値が数十%程度減少することがわかった。したがって、十分な信号雑音比を確保するためには、エネルギーの大きい光子を用いて読み出しの評価を行う必要がある。TESは近赤外から可視域まで感度があるので、エネルギーの大きい可視光を用いて測定を行うことにした。

歴史的経緯からTESは量子情報通信への応用を目指して、近赤外に対する応答は詳細に調べられてきたが、可視光への応答が詳細に調べられた例はほぼなかった。そこで、これを確かめるために、既存の読み出しを用いて試験を行ったところ、予想外の結果を得た。

図4のように、単色光をTESに照射したところ、近赤外光では想定通りシングルピークが得られた(赤線)が、可視光では複数のピークが得られ、想定と異なる結果となった。入射光のエネルギー値だけでなく、低エネルギー領域にもピークが現れた(青線)。波長によっては、低エネルギー領域のイベントが主であった。このような現象は、読み出しを行う上で信号雑音比を悪化させてしまうだけでなく、可視光への応用全般に影響を及ぼしてしまう。

そこで、スーパーコンティニューム(SC)光を用いて、可視から近赤外域まで検出器応答を網羅的に調べた。低エネルギーイベントは、センサ内で吸収された光子エネルギーの一部がセンサ外に散逸してしまうことに起因すると推察した。これらの結果を論文にまとめた[2]。今後は、低エネルギーイベント除去のために、センサのデザインを研究する予定である。

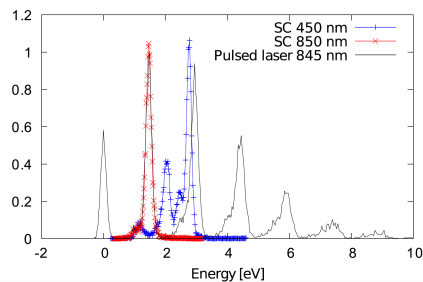
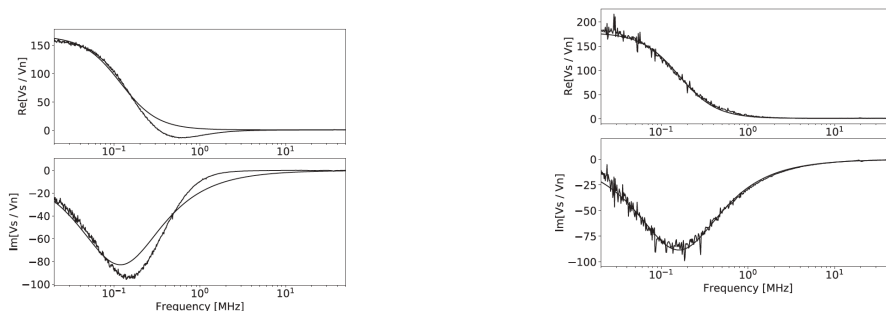


図4 入射光子の波長による検出器応答の違い。パルスレーザーとスーパーコンティニューム(SC)光で応答を比較。

(3) 極低温におけるMHz帯の読み出し

研究開始当時、極低温における超伝導センサの読み出しは1 MHz以下の低周波か、GHz帯を用いるのが一般的であった。一方、本研究では10 MHz帯という、極低温実験では一般的には使われていない周波数帯を用いる。これまで我々の用いてきた既存の読み出しは低周波に対応したものであり、MHz帯においてどのような応答をするか分からなかった。

既存の読み出しではツイストペア線およびPCボードからなるケーブルを用いるが、これが10 MHzの信号読み出しでも使用できるか明らかではなかった。そこで、高周波応答について試験を行ったところ、図5(a)のようにシンプルな回路モデルからのずれが見られた。このずれは高周波になるほど、読み出しケーブル上に起因する寄生インピーダンスの影響が大きくなるためだと考えられる。想定しうる寄生インピーダンスを考慮した回路モデルを構築し、実験結果と比較したが、実験値を説明し得るモデルは見つからなかった。そこで、ツイスト線の代わりに同軸ケ



(a) 既存のケーブル(ツイスト線とPCボード)

(b) 同軸ケーブル

図5 MHz帯におけるTESバイアス回路の応答関数。

ケーブルを導入したところ、図 5(b)のように、回路モデルと一致した。このことから、同軸ケーブルを用いると、未知の寄生インピーダンスを抑えることができることがわかった。これらの結果を論文にまとめた[3]。本研究で開発した読み出しも、高周波で未知の寄生インピーダンスの影響を大きく受けることが回路シミュレーションから示唆されているため、読み出しには同軸ケーブルを用いる必要があることがわかった。

<引用文献>

- [1] T. Konno, S. Takasu, K. Hattori, and D. Fukuda, “Development of an Optical Transition-Edge Sensor Array”, *J. Low Temp. Phys.*, **199**, 27 (2020).
- [2] K. Hattori, S. Inoue, R. Kobayashi, K. Niwa, T. Numata, and D. Fukuda, “Optical Transition-Edge Sensors: Dependence of System Detection Efficiency on Wavelength”, *IEEE Trans. Meas. Instr.*, **68**, 2253 (2019).
- [3] K. Hattori R. Kobayashi, S. Takasu, and D. Fukuda, “Complex impedance of a transition-edge sensor with sub- μ s time constant”, *AIP Advances*, 10, 035004 (2020).

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, Inoue Shuichiro, Kobayashi Ryo, Niwa Kazuki, Numata Takayuki, Fukuda Daiji	4. 巻 68
2. 論文標題 Optical Transition-Edge Sensors: Dependence of System Detection Efficiency on Wavelength	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 2253 ~ 2259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2018.2882217	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 Hattori K., Kobayashi R., Takasu S., Fukuda D.	4. 巻 10
2. 論文標題 Complex impedance of a transition-edge sensor with sub- μ s time constant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035004 - 035004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5127100	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6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kaori Hattori
2. 発表標題 Optical transition edge sensors: Wavelength dependence of system detection efficiency
3. 学会等名 CPEM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部香里
2. 発表標題 可視光用超伝導転移端センサの評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 服部香里
2. 発表標題 可視光用超伝導転移端センサの応答特性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部香里
2. 発表標題 可視光用超伝導転移端センサーの開発
3. 学会等名 計測システム研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kaori Hattori, Ryo Kobayashi, Sachiko Takasu and Daiji Fukuda
2. 発表標題 Complex impedance of optical transition-edge sensors with sub-microsecond response
3. 学会等名 Low Temperature Detector 18 (LTD18) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 服部香里、鷹巢 幸子、福田 大治
2. 発表標題 超伝導転移端センサにおける高周波信号読み出しの検討
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----