

令和 7 年 6 月 12 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03738

研究課題名（和文）大面積位置検出型ガンマ線マイクロカロリメータの開発

研究課題名（英文）Development of a Large-Area Position-Sensitive Gamma-Ray Microcalorimeter

研究代表者

伊豫本 直子（Iyomoto, Naoko）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：40508173

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ガンマ線のエネルギーと入射位置を高精度で測定可能な位置検出型TES型マイクロカロリメータ（PoST）を、ビスマスおよび鉛をガンマ線の吸収体として開発した。吸収体の大型化に対応するためメンブレン構造を改良し、Co-60やCs-137を用いた冷却実験により性能を評価した。多重散乱や雑音の影響を考慮した出力波形シミュレーションを実施し、長さ20 mmのPoSTにおいて0.4 mmの位置分解能が得られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、位置検出型TESマイクロカロリメータの製作と動作実証、さらに多重散乱や雑音の影響を考慮したシミュレーションの両面から、数100 keVからMeV領域のガンマ線に対する高精度な位置・エネルギー測定が可能であることを明らかにした。これは将来的なコンプトンカメラ開発や放射線医療、原子力分野への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed position-sensitive transition-edge sensor (TES) microcalorimeters (PoSTs) for gamma-rays. To accommodate larger absorbers, We improved the membrane structure to support large absorbers and verified the operation using Co-60 and Cs-137 sources. We performed simulations considering multiple scattering and noise to demonstrate that a position resolution of 0.4 mm can be achieved with a 20 mm-long PoST.

研究分野：放射線計測

キーワード：放射線 分光 超伝導 極低温 マイクロカロリメータ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロカロリメータは放射線のエネルギーを温度上昇として測定する熱計測型の放射線検出器であり、図1のように放射線を吸収して熱に変換する吸収体、温度測定のための温度計、測定後の熱を熱浴へ排出するとともに吸収体と温度計を物理的に支える役目を持つ薄膜であるメンブレンからなる。マイクロカロリメータは優れた分光性能(エネルギー分解能)を持ち、特に温度計として超伝導体の超伝導と常伝導の転移端を利用する Transition-Edge Sensor (TES) 型では、原理的には半導体検出器などの電荷計測型の放射線検出器に比べて 1~2 桁優れた分光性能が期待できる。本研究ではエネルギー計測に加えて吸収体への放射線入射位置を計測できる位置検出型の TES 型マイクロカロリメータ (Position-Sensitive TES: PoST) を、数百 keV から数 MeV のガンマ線の計測用に開発する。このエネルギー帯域のガンマ線用の吸収体は、原子番号が大きく比熱が小さい物質として鉛またはビスマスが候補となる。図2左に PoST の概念図を示す。細長い吸収体の両端に TES 温度計を取り付け、2 つの温度計の出力(図2右)を比較することで放射線の入射位置を推定する。図1のような単ピクセル型を多数並べて入射位置を測定する方式に比べて、読み出し配線の本数を大幅に削減できる。

図1 単ピクセルの TES 型マイクロカロリメータの概念図

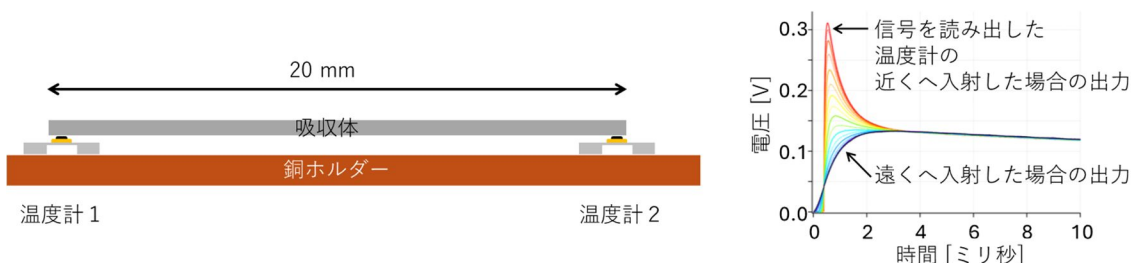


図2 左：1次元の位置検出型の TES 型マイクロカロリメータの概念図。右：出力の測定結果。

研究開始当初は、TES 温度計素子を取り付けるホルダー(銅)と熱膨張率が近いビスマスを吸収体として使用した PoST では両端の TES 温度計からの信号読み出しに成功していたが、銅の2倍程度の熱膨張率を持つ鉛を使用した PoST では2つの TES 温度計素子の一方または両方のメンブレンが破損して両端読み出しができていなかった。また、このエネルギー帯域でのガンマ線の相互作用はコンプトン散乱が主であるので、吸収体大きい PoST では検出されたガンマ線の多くは多重散乱されたものである。すなわち吸収体中の複数の位置でエネルギーを付与している。この場合、TES 温度計の出力は複数の異なる信号波形の和となるため入射位置測定の精度が低下する可能性があるが、研究開始当初はその影響を見積もることができていなかった。

2. 研究の目的

コンプトン散乱が支配的であるエネルギー帯域でのガンマ線測定では、入射位置測定とエネルギー測定を同時に行うことでガンマ線の飛来方向を推定でき撮像が可能となる。本研究では将来的にコンプトンカメラに使用することを目的として、ビスマスと鉛のそれぞれについて PoST を開発する。すでに1次元 PoST (図2左)での両端読み出しに成功していたビスマス吸収体では、より大面積の吸収体を読み出せる2次元 PoST を製作し動作の実証実験を行うことを目的とする。一方、鉛は熱収縮による破損の問題があるものの、位置校正の際に大きな利点がある。通常の鉛には放射性同位体である Pb-210 が含まれ、その孫核種の Po-210 が 5.3 MeV のアルファ線を放射する。Pb-210 は鉛吸収体中に一様に分布しているため、これを利用して出力と吸収体への入射位置の関係を高精度で決められる。また鉛とビスマスの比熱は 100 mK 程度まではほぼ同様だが、20 mK 程度まで冷却すると鉛の比熱はビスマスの比熱より1桁小さくなるので、吸収体の大型化の際に重要である。

3. 研究の方法

微細加工技術を使用して TES 温度計素子(温度計、メンブレン、熱浴)を製作し、それに吸収体を取り付けることでマイクロカロリメータを製作した。無冷媒希釈冷凍機を使用してマイクロカロリメータを 0.1 K 程度の極低温に冷却して、熱的特性や電気的特性を測定し、Co-60(エネルギー 1.17 MeV、1.33 MeV)や Cs-137(エネルギー 662 keV)からのガンマ線を照射して性能評価した。

放射線挙動計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)によって、

吸収体へ入射したガンマ線がエネルギー付与した位置と付与エネルギーの値を求められる。そこで、PHITS で得られた各付与位置において有限差分法（マイクロカロリメータでの熱の流れを記述する微分方程式と読み出し回路での電氣的な挙動を記述する微分方程式を連立して解く手法）により信号波形をシミュレートし、それらを付与エネルギーの比で足し合わせ、さらに雑音をシミュレートして加算することで、TES 温度計の出力を模擬した。このような模擬出力を多数作成し、各々について入射位置の推定を行い、推定位置の分布の半値幅を位置分解能とした。有限差分法による信号波形のシミュレーションはマイクロカロリメータの開発において広く行われているが、多重散乱の影響や雑音を考慮したシミュレーションは本研究が世界初である。

4. 研究成果

(1) ビスマスを吸収体とした位置検出型素子の開発

2次元 PoST の重量を支えることは既存の TES 温度計素子のメンブレンの厚み（ $5\ \mu\text{m}$ ）では難しいため、厚みが $10\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ のメンブレンを持つ TES 温度計素子をそれぞれ製作し、TES 温度計から熱浴への熱伝導度への厚みの影響を調べた。メンブレンの厚みが $1\ \mu\text{m}$ 程度の素子では熱浴への熱伝導度が TES 温度計から熱浴までの距離に依存しないことが知られているが、厚いメンブレンの場合は距離への依存性があることがわかった。

図3左のように厚さ $40\ \mu\text{m}$ のメンブレンの TES 温度計素子を $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ のビスマス吸収体の四隅に取り付けて2次元の位置検出型 TES 型マイクロカロリメータを製作して冷却し、Co-60 からの $1.17\ \text{MeV}$ と $1.33\ \text{MeV}$ のガンマ線を照射して信号を取得した。

(2) 鉛を吸収体とした位置検出型素子の開発

図3中央と右のように $20\ \text{mm} \times 1\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$ の鉛を折り曲げた1次元 PoST を開発した。この PoST では2つの温度計素子同士の距離が短いいため熱収縮による破損を防いで冷却でき、Co-60 からのガンマ線と Po-210 からの $5.3\ \text{MeV}$ のアルファ線からの信号を取得して、位置を推定できることを確認した。なお、これらの素子は1次元 PoST の構造を持つが、吸収体を折り曲げて配置することで実質的に2次元領域を覆っており、擬似的な2次元位置検出を実現している。

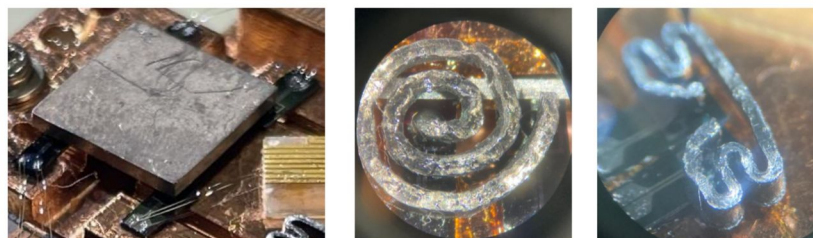


図3 左：ビスマス吸収体の2次元 PoST。中央：鉛吸収体の1次元 PoST、右：鉛吸収体の1次元 PoST

(3) 多重散乱を雑音を考慮したシミュレータの開発

3. に記載したシミュレータによる、長さ $20\ \text{mm}$ の1次元 PoST での $662\ \text{keV}$ と $1.33\ \text{MeV}$ でのシミュレーション結果を図4に示す。低エネルギーでは雑音の影響が、高エネルギーでは多重散乱の影響がそれぞれ主である。雑音の大きさは入射ガンマ線のエネルギーによらないため信号雑音比は低エネルギーほど悪く、一方で多重散乱の影響は高エネルギーほど大きいことから、妥当な結果である。またガンマ線入射位置が吸収体の端に近いほど信号波形の位置依存性が大きいことから、両端の方が位置分解能が優れているという結果も妥当である。長さ $20\ \text{mm}$ の吸収体において $0.4\ \text{mm}$ 程度の位置分解能が実現可能であることが明らかになった。これは吸収体の体積あたりの配線の削減という目的に対して十分な性能である。

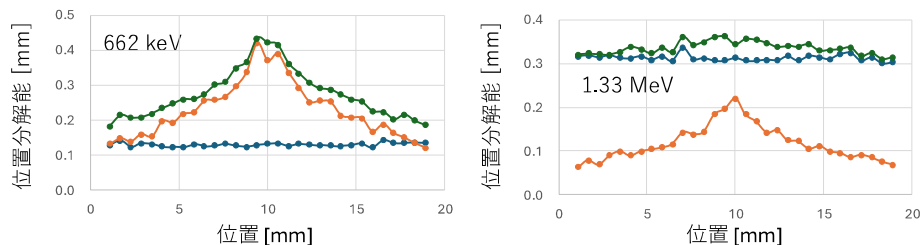


図4 1次元 PoST の吸収体の各位置での位置分解能のシミュレーション結果。左： $662\ \text{keV}$ 。右： $1.33\ \text{MeV}$ 。赤：雑音のみ考慮、青：多重散乱のみ考慮、緑：雑音と多重散乱を考慮。

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 0件）

1. 著者名 Tsuruta Tetsuya, Iyomoto Naoko, Nakamura Yunosuke, Kawaguchi Shotaro, Nakano Keisuke, Mori Shohei, Matsuda Shunsuke, Matsumi Yusuke, Yamasaki Noriko, Hayashi Tasuku	4. 巻 -
2. 論文標題 Two-Dimensional Position-Sensitive Transition-Edge Sensor Microcalorimeters for Gamma Rays	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3263135	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 Mori Shohei, Nishida Y., Iyomoto N., Yagi Y., Konno R., Hayashi T., Tanaka K., Yamasaki N. Y., Mitsuda K., Sato R., Saito M., Homma T.	4. 巻 209
2. 論文標題 Simulation of TES X-ray Microcalorimeters Designed for 14.4 keV Solar Axion Search	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 518~524
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-022-02902-w	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 Tsuruta Tetsuya, Hamamura Yukino, Iyomoto Naoko, Nakamura Yunosuke, Kawaguchi Shotaro, Hayashi Tasuku, Yagi Yuta, Yamasaki Noriko, Mitsuda Kazuhisa	4. 巻 209
2. 論文標題 Thermal Conductance of Thick-Membrane TES Microcalorimeters for Several-MeV Gamma Rays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 449~456
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-022-02776-y	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 仲野 圭祐, 伊予本 直子, 執行 信寛, 鶴田 哲也, 森 匠平, 松田 隼輔, 松見 勇輔, 前畑 京介, 山崎 典子, 林 佑, 八木 雄大, 田中 圭太, 宮川 陸太, 満田 和久
2. 発表標題 ガンマ線位置検出型TES型マイクロカロリメータの位置検出性能の評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田 隼輔, 伊豫本 直子, 鶴田 哲也, 仲野 圭佑, 森 匠平, 山崎 典子, 林 佑, 八木 雄太, 田中 圭太, 宮川 陸大, 満田 和久, 前畑 京介
2. 発表標題 ガンマ線用TES型マイクロカロリメータの熱リンクにおける熱伝導の研究
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森 匠平, 伊豫本 直子, 鶴田 哲也, 仲野 圭祐, 松田 隼輔, 松見 勇輔, 山崎 典子, 林 佑, 八木 雄大, 田中 圭太, 宮川 陸大, 太田 瞭, 満田 和久, 本間 敬之, 齋藤 美紀子, 吉田 奈央
2. 発表標題 有限要素法を用いた太陽アクシオン用TES型マイクロカロリメータの電熱シミュレーション
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoko Iyomoto, Shotaro Kawaguchi, Yuunosuke Nakamura, Tetsuya Tsuruta
2. 発表標題 Simulations of Two-dimensional Position-Sensitive Transition-Edge-Sensor Microcalorimeters for Gamma Rays
3. 学会等名 The Applied Superconductivity Conference 2022 (ASC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoko Iyomoto, Yoshiki Nishida, Tetsuya Tsuruta, Yukino Hamamura, Shoutaro Kawaguchi, Yuunosuke Nakamura, Tasuku Hayashi, Yuta Yagi, Noriko Yamasaki, Kazuhisa Mitsuda, Keisuke Maehata
2. 発表標題 Gamma-Ray Position-Sensitive Transition-Edge-Sensor Microcalorimeters With a Bismuth Absorber
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	Yoshiki Nishida, Naoko Iyomoto, Tetsuya Tsuruta, Yukino Hamamura, Shoutaro Kawaguchi, Yuunosuke Nakamura, Shohei. Mori, Shunsuke. Matsuda, Keisuke. Nakano, Keisuke Maehata
2. 発表標題	Finite-Element Simulation of Transition-Edge Sensor Microcalorimeters for Gamma rays
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	Tetsuya Tsuruta, Yukino Hamamura, Naoko Iyomoto, Yuunosuke Nakamura, Shoutaro Kawaguchi, Tasuku Hayashi, Yuta Yagi, Noriko Yamasaki, Kazuhisa Mitsuda
2. 発表標題	Development of Transition Edge Sensor Microcalorimeter for Several-MeV Gamma Rays
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	河口 昌太郎, 伊豫本 直子, 鶴田 哲也, 中村 悠之介, 仲野 圭祐, 松田 隼輔, 森 匠平, 西田 佳樹, 濱村 雪乃, 前畑 京介
2. 発表標題	ガンマ線検出用二次元位置検出型TES 型マイクロカロリメータのシミュレータの開発
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	中村 悠之介, 伊豫本 直子, 鶴田 哲也, 河口 昌太郎, 森 匠平, 仲野 圭祐, 松田 隼輔, 前畑 京介, 山崎 典子, 林 佑, 八木 雄大, 田中 圭太, 宮川 陸太, 満田 和久
2. 発表標題	ガンマ線検出用TES 型マイクロカロリメータの電氣的・熱的特性の評価
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

〔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
---------	---------