

平成22年 6月 8日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20860030
 研究課題名（和文）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 gamma-ray microcalorimeters

研究代表者 伊豫本 直子
 (IYOMOTO NAOKO)
 東京大学・大学院工学系研究科・特任准教授
 研究者番号：40508173

研究成果の概要（和文）：数百 keV から 1 MeV 程度を対象とするガンマ線超伝導遷移端（TES）型マイクロカロリメータにおいて、ガンマ線吸収体内部でのガンマ線吸収位置の計測とそれによるエネルギー分解能の改善を実証する研究を行なった。位置敏感型マイクロカロリメータ用の冷却システムを設計・製作して、ガンマ線マイクロカロリメータの性能を評価した。厚さ 8 mm の鉛の吸収体を持つガンマ線位置敏感型マイクロカロリメータを製作した。

研究成果の概要（英文）：We are developing Transition-Edge Sensor (TES) microcalorimeters for gamma rays in the energy range from several hundreds keV upto 1 MeV or so. In order to avoid degradation of energy resolution due to position dependence within the thick gamma-ray absorber, we have applied the technique of Position-Sensitive TES (PoST) to the thickness direction of the absorber. We have developed a prototype gamma-ray PoST.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

研究分野：放射線応用

科研費の分科・細目：工学・原子力学

キーワード：(1)放射線、X線、粒子線 (2)分光 (3)超伝導材料・素子 (4)マイクロ・ナノデバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) 通常のエネルギー分散型の放射線計測器は電荷計測型、すなわち放射線光子のエネルギーに比例した数の電荷を生成してその数から放射線光子のエネルギーを測定する。この場合、電荷生成数の統計ゆらぎによってエ

ネルギー分解能が制限される。これに対してマイクロカロリメータは熱計測型、すなわち検出器に吸収された放射線光子のエネルギーを熱に変換してその熱による温度上昇を温度計で測定することでエネルギーを測定する放射線検出器であるため、エネルギー分散型検出器でありながら電荷計測型のよう

なエネルギー分解能の制限を受けない。特に超伝導体の超伝導常伝導転移端ではわずかな温度変化で抵抗が大きく変化することを温度計として利用する超伝導転移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor) 型では、原理的には従来の検出器より1~2桁優れたエネルギー分解能が得られる。実際に、申請者はX線 (0.5~10 keV) 用のTES型マイクロカロリメータ1ピクセルで1.8 eVの、13ピクセルでも平均2.7 eVのエネルギー分解能を達成しており、前者はエネルギー分散型検出器におけるチャンピオンデータである。マイクロカロリメータの検出面積の増大とイメージングを目的とした2次元アレイ化も始まっており、すでに申請者は8x8アレイにおいて、アレイ内部での温度分布の非一様性やピクセル間の熱的クロストークを実測・モデル化して、エネルギー分解能への影響を見積もっていた。

(2) 以上のようにマイクロカロリメータの開発はまず0.5~10 keV程度のX線を対象として始まったが、近年になって厚い放射線吸収体の使用により100 keV程度までの硬X線領域での研究が進み、1ピクセルで25 eVのエネルギー分解能が達成された。一方で数百keVから1 MeVを超える程度までの高エネルギーのガンマ線領域ではマイクロカロリメータの開発は遅れていた。その理由は、このエネルギー領域で十分な検出効率を得るにはX線用や硬X線用に比べて桁違いに厚い吸収体が必要であるが、厚い吸収体ではガンマ線が吸収体の表面近くで吸収された場合と吸収体の奥深くで吸収された場合では温度計まで熱が伝わるのに移動する距離が異なるせいで信号波形が異なってしまうためである。マイクロカロリメータの通常の信号処理では、すべての信号が同じ波形を持つことを仮定して共通のテンプレートですべての信号を処理するため、波形がばらついていると肝心のエネルギー分解能が劣化してしまう。

(3) 申請者の所属するグループでは、予備的な実験において鉛の吸収体とマイクロカロリメータを組み合わせることで世界で初めてマイクロカロリメータによるガンマ線測定を行い原理実証までは確認していたものの、吸収体の厚さは十分な検出効率を得られるものではなかった。

(4) いっぽうで申請者は、X線マイクロカロリメータにおいて、位置敏感型TES型マイクロカロリメータすなわちP o S T (Position Sensitive TES) の開発で成果を上げていた。通常のマイクロカロリメータは放射線吸収体1個と温度計1個を組み合わ

せた構造であり、位置検出能力は持たない。また、吸収体全体の温度が素早く一樣になるように熱伝導度が高い物質を使ってコンパクトな吸収体を使用する。これに対してP o S Tでは、細長い吸収体の両端に温度計を1個ずつ取り付ける。吸収体が細長いため、吸収体内部での熱伝導が悪く、(2)と同様に、温度計から読み出される信号波形は放射線吸収位置によって異なる。P o S Tはこの位置依存性を積極的に利用した検出器であり、両端の温度計からの信号波形を比較することで各イベントの放射線吸収位置を特定できる。同じ場所で吸収された放射線による信号は同じ波形を持つため、場所ごとの信号波形に応じたテンプレートを作成して信号処理を行えば、エネルギー分散型の劣化は起きない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、X線用のP o S Tが検出面上での位置すなわち横方向の位置を計測したのに対して、P o S Tの原理をガンマ線マイクロカロリメータの吸収体の厚さ方向すなわち縦方向に適用することで位置検出能力を持たせ、それによってエネルギー分解能の劣化を回避するという原理の実証を目的とする。

(2) マイクロカロリメータのエネルギー分解能はさまざまなパラメータで決まるが、本研究では位置検出とそれによるエネルギー分解能の改善の実証に特化して開発するため、吸収体を市販の素材から切り出すことと吸収体と温度計との接着を主な開発項目とする。数百keVから1 MeV程度を対象とするTES型ガンマ線マイクロカロリメータで現実的なガンマ線吸収効率を得るには、鉛の吸収体で5~10 mm程度の厚さが必要である。

(3) (2) で述べた理由により、基本的には温度計は既存のX線マイクロカロリメータでの設計を流用して製作する。ただし、ガンマ線吸収体と温度計を組み合わせた性能評価の結果をもとに必要と判断した場合には温度計の設計にも修正を加え、ガンマ線P o S Tに適した温度計の開発を試みることも目的とする。特に温度計と熱浴の間の熱伝導度は比較的手軽に変更できるパラメータでありながら、性能への影響が大きく興味深いパラメータである。

3. 研究の方法

(1) マイクロカロリメータは、図1に示すように、吸収体、温度計、サーマルリンク、熱

浴からなる。吸収体に入射した放射線光子のエネルギーは熱に変わり、吸収体と温度計の温度を上昇させる。この温度上昇を温度計で測定する。熱はサーマルリンクを通してゆっくりと熱浴に逃げていくため、素子の温度は指数関数的に減少していき定常状態に戻る。

(2) 温度計は東京大学 武田先端知ビルVDE Cに既存のマイクロマシニング装置を使用して製作した。超伝導体であるイリジウムをスパッタ法によって窒化シリコン基板上に成膜して、反応性イオンエッチングで成形した。サーマルリンクは、ウェットエッチングでシリコン基板を裏側からエッチングして窒化膜のみを残すことで形成した。さらに後述のように、エッチング時間を調節してシリコン基板の一部を窒化膜とともに残すことでサーマルリンクの熱伝導度と強度をガンマ線P o S Tに適するように制御した。

(3) 吸収体は市販のバルクの素材を購入して、放電加工などにより切り出した。吸収体の材料はガンマ線検出効率が高い原子番号の大きい元素のうち、熱容量の小さい超伝導体や半金属から選択する。鉛（超伝導体）とビスマス（半金属）が候補であったが、第一候補の鉛を使用した。吸収体と温度計の接着は、極低温用の接着剤を使って、専用のジグを作成して行った。

(4) マイクロカロリメータは微小な温度変化を読み出す装置のため、動作には0.1 K程度の極低温が必要である。本研究では既存の断熱消磁冷凍機を使用してマイクロカロリメータを性能評価した。放射線のエネルギーによる温度計の抵抗変化は、定電圧バイアスで駆動することにより電流変化として検出し、電流変化の読み出しには超伝導量子干渉計（SQUID）を用いる。SQUID素子とそのエレクトロニクスは既存のものを使用した。

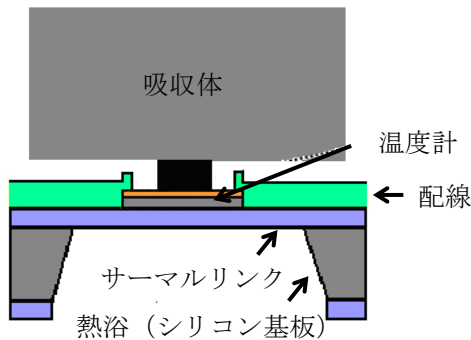


図1：マイクロカロリメータの構造 (断面図)

4. 研究成果

(1) 平成20年度は、既存の断熱消磁冷凍機への本研究用の検出器のマウント用のステージ、検出器の駆動と信号読み出しのための配線、SQUIDへの外部磁場の影響を防ぐための磁気シールドなどを設計・製作して冷却試験を行い、本研究のためのセットアップでSQUIDが正常に動作することを確認した。また、市販の鉛を1mm立方などの直方体に切り出した吸収体を温度計に接着して、ガンマ線マイクロカロリメータを製作した。

(2) 平成21年度は、まず(1)の検出器を断熱消磁冷凍機に組み込んで100mKまで冷却して性能評価を行った。マイクロカロリメータの温度計と吸収体が載るサーマルリンクは薄膜であり、P o S Tの吸収体は通常の吸収体に比べてサイズが大きいためその重量で薄膜を破壊しないよう、既存の温度計より薄膜の厚さを増やした設計が望ましい。そのような検出器においてCs-137からの662keVのガンマ線パルスを取得して、波形の位置依存性を測定した。

(3) さらに(2)の結果を元に、図2に示すように、厚さ約8mmの鉛吸収体を同様の厚い薄膜に接着してガンマ線P o S Tを製作した。将来的には吸収体の両端に温度計を接着したP o S Tの開発を目指しているが、波形弁別による位置検出とそれによるエネルギー分解能の改善の実証は、このような細長い吸収体の片側に1個の温度計を接着したP o S Tでも可能である。この検出器でも同様に冷却試験を行ったが、転移温度が50mK程度と設計値より低く、本研究で使用する断熱消磁冷凍機の冷却能力では動作させられなかった。同時期に製作した吸収体を接着しないタイプのマイクロカロリメータでも同様の問題が発生したため、この問題は吸収体の接着による劣化ではなく温度計自体の製作プロセスに問題があると考えられ、現在原因を調べている。

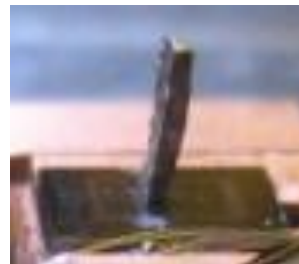


図2：ガンマ線P o S T

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

① "Development of high energy resolution gamma-ray detector"

Damayanthi, Takahashi, Iyomoto,

Minamikawa, Nishimura, Ohno

日本原子力学会「2009年春の年会」

2009年3月 東京工業大学

② 「ガンマ線超伝導遷移端センサの開発」

伊予本直子, Thushara Damayanthi, 大野雅

史, 南川康裕, 西村賢太郎, 高橋浩之

2010年度春季第57回応用物理学関係連合講演会

2010年3月 東海大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊豫本 直子 (20860030)

東京大学・大学院工学系研究科・特任准教授

研究者番号: 40508173