

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360422

研究課題名(和文) 三次元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 3-d position-sensitive microcalorimeters for gamma rays

研究代表者

伊豫本 直子 (IYOMOTO, Naoko)

九州大学・工学(系)研究科(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)：ガンマ線検出用の超伝導転移端温度計(TES)型マイクロカロリメータを開発した。体積 0.5 mm x 1 mm x 1 mm のビスマス製の吸収体を温度計に接着して製作した素子で得られたエネルギー分解能は、信号雑音比からの推定値で3.2 keV、662 keVでの測定値で4.1 keVと設計値より1桁以上悪かった。設計値との差は熱浴であるシリコン基板に入射したガンマ線が熱的な雑音源となったためと考えられ、エネルギー分解能の向上には熱リンクの構造を改良する必要がある。位置検出型の素子も同様に製作したが、上述の雑音の影響と転移温度が高すぎたためとで信号の検出はできなかった。

研究成果の概要(英文)：We are developing Transition-Edge Sensor (TES) microcalorimeters for gamma-ray detection. We have fabricated a device with a bismuth absorber of a volume of 0.5 mm x 1 mm x 1 mm. The energy resolution of the device was 4.1 keV at 662 keV, while its baseline energy resolution was 3.2 keV. These resolutions are more than an order of magnitude worse than its design value. It was because the device suffered from thermal noise due to the gamma rays scattered by the silicon substrate. We also fabricated a position-sensitive TES microcalorimeter, but it was not possible to detect signals from the device because the device also suffered from the noise and because the transition temperature of the TESs was too high.

研究分野：放射線計測

キーワード：放射線 超伝導材料・素子 低温物性

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の模式図のように、放射線を検出するための吸収体、温度変化を測定するための温度計、熱浴、吸収体と温度計を熱浴へと接続する熱リンクからなる。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方式のTES (Transition-Edge Sensor) 型では、原理的には、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得られる。

研究開発当初、マイクロカロリメータはX線用ですでに優れた分光性能が報告されていた。一方で申請者らはガンマ線マイクロカロリメータを製作・性能評価していたが、信号雑音比から推測される分光性能に比べて662keVのガンマ線に対して実測した分光性能は1桁以上悪いという状況だった。

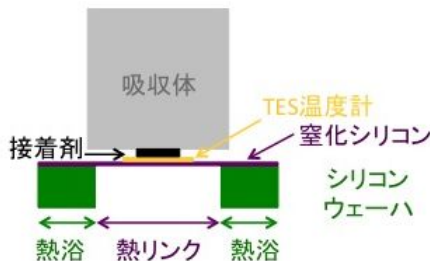


図1 マイクロカロリメータの模式図

2. 研究の目的

本研究では、ガンマ線分光の分光性能を従来の検出器から1桁向上させることを目標に、数百keVから数MeVのガンマ線用のマイクロカロリメータの開発を行なった。

ガンマ線用マイクロカロリメータの吸収体は、ガンマ線入射により温度が十分に上昇するよう比熱が小さい超伝導体や半金属を使う。これらの物質は熱拡散が遅いため、ガンマ線が吸収体のどの位置に入射したかで、発生した熱が温度計に伝わるまでにかかる時間が異なり、そのために温度変化信号の信号波形が入射位置によって異なる位置依存性が現れる。マイクロカロリメータの通常信号処理では信号波形が一定であると仮定しているため、このような信号では本来の分光性能が達成できない。1.で述べた分光性能の劣化はこの位置依存性が原因と考えられる。

そこで本研究では波形解析による入射位置の特定をまず行ない、次にその位置ごとに信号処理することでこの劣化を避けることを目指した。通常マイクロカロリメータは1つの吸収体と1つの温度計からなり、位置検出能力は無い。本研究で開発を目指した位置検出型のマイクロカロリメータは1つの

細長い吸収体の両端に1つずつ温度計を取り付けたものであり、2つの温度計からの出力を比較することで1次元の位置検出が可能となる。

さらに、この検出器2次元アレイ状に並べれば、3次元の位置検出能力が得られる。

3. 研究の方法

X線用とガンマ線用のマイクロカロリメータの主な違いは吸収体の厚さである。10keV程度までのX線の吸収に必要な厚さは数μm程度であるが、本研究で対象とするエネルギー帯域のガンマ線では数mm程度の厚さが必要となる。そのためX線用の場合はマイクロカロリメータ素子全体を微細加工で製作するのに対して、ガンマ線用では吸収体以外を微細加工で製作して、その上に低温用の接着剤で吸収体を接着することで素子を製作する。吸収体以外の部分の微細加工の装置は、宇宙科学研究所などのものを出張して使用した。

マイクロカロリメータは100mK程度の極低温に冷却して使用するため、性能評価には冷凍機が必要である。冷凍機は既存の希釈冷凍機を使用した。使用した冷凍機は冷媒の代わりに機械式冷凍機で予冷する無冷媒式であり、機械式冷凍機が希釈冷凍機の直上に配置されたタイプであるため機械的な振動が大きかった。X線用の素子の場合には問題が無い程度の振動であるが、ガンマ線用の素子では吸収体の重量と冷凍機の振動とで、熱リンクのメンブレン(厚さ1μm程度の薄膜)が破損した。そのため冷凍機の素子の組み込み部分を改良する必要があった。また4.で述べるように破損しにくい熱リンクの開発が必要となった。

性能評価では、ガンマ線を照射しての信号取得の他、温度計の抵抗・温度特性や電流・電圧特性を測定した。またマイクロカロリメータの複素インピーダンスを測定した。これらのデータをシミュレーションと比較することで素子の電氣的・熱的特性を評価した。

4. 研究成果

(1) 通常のメンブレン構造のガンマ線マイクロカロリメータの開発:

既存のX線用のTES型マイクロカロリメータにガンマ線用の吸収体を接着することでガンマ線マイクロカロリメータ素子を製作した。吸収体としてスズを利用した素子とビスマスを利用した素子をそれぞれ製作した。X線用の素子のメンブレン構造の機械的強度は十分ではないため、0.5mm×0.5mm×1mmという比較的小さい(軽い)吸収体を取り付け、さらに冷凍機への組み込み方法を工夫することで、機械式冷凍機においても破損せずにガンマ線用の素子を冷却できた。

しかし冷却の結果、この素子のTES温度計の転移温度(動作温度)は設計値の120

mKより大幅に低い75～80 mK程度であることがわかった。原因として、ガンマ線吸収体の重量によりメンブレンがたわんでT E S 温度計に応力が加わることで転移温度が変化した可能性が考えられる。

吸収体の比熱は温度の3乗に比例するため、これら素子では設計値である120 mKでの転移に比べて吸収体の比熱が3～4倍小さく、そのため662 keVのガンマ線の入射により温度計が飽和してしまった。温度計が飽和するとマイクロカロリメータの本来の分光性能を発揮できない。

また冷凍機の最低到達温度が70 mK程度のため、この素子の動作温度では冷凍機の温度を十分に安定させることができず、これらの素子で優れた分光性能が得ることは難しかった。

(2) メンブレン構造無しのガンマ線マイクロカロリメータの開発：

素子が吸収体の重量と冷凍機の振動で破損しないように、また吸収体の重量で転移温度の変化が起きないように、素子の機械的強度を高めることを目的に、メンブレン構造のないガンマ線マイクロカロリメータを開発した。メンブレン構造を持たないマイクロカロリメータはX線用の開発例があり、大きな問題なく動作している。図2が製作したマイクロカロリメータ素子の写真である。

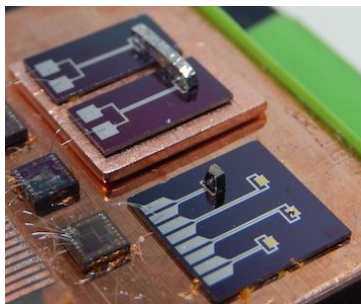


図2 メンブレン構造無しのガンマ線マイクロカロリメータ。右下：吸収体を取り付ける前の素子3個と0.5 mm × 0.5 mm × 1 mmの吸収体を取り付けた素子1個。左上：1次元の位置検出型の素子。

これらの素子のT E S 温度計の転移温度は189 mKであり、吸収体接着の有無で転移温度の目立った変化はなかった。素子を冷却してセシウム137からの662 keVのガンマ線を照射してエネルギースペクトルを得た。図3はビスマス吸収体でのエネルギースペクトルである。ビスマスで吸収された662 keVのガンマ線による光電吸収ピーク、ビスマスでのエスケープピーク、ビスマスでのコンプトン散乱成分が見えている。信号雑音比から推測されるエネルギー分解能は3.2 keV、光電吸収ピークでのエネルギー分解能は4.1 keVであり、どち

らも設計値より1桁以上悪かった。波形解析の結果、これらの素子での信号雑音比と光電吸収ピークでの差は位置依存性が原因ではなく、冷凍機の温度揺らぎの影響であると考えられる。

また設計値との差は以下のようにメンブレン構造が無いことが原因と考えられる。これらの素子では図4のように2種類の信号波形が得られた。このうち(b)が吸収体で光電吸収またはコンプトン散乱されたガンマ線による本来の信号であり、(a)はシリコン基板でのコンプトン散乱による信号である。(図3は波形弁別により(b)の信号のみを取得して作成した。)

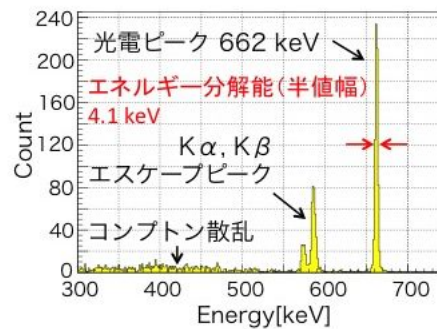


図3 エネルギースペクトル

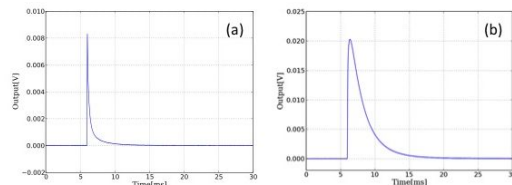


図4 信号波形。(a) シリコン基板への入射。(b) 吸収体への入射。

シリコン基板が熱浴としての役割を果たすには、温度が常に一定である必要がある。今の場合、コンプトン散乱で与えられた熱によりシリコン基板の温度が細かく揺らぎ、熱的な雑音源となる。これにより、信号雑音比が悪化したためにエネルギー分解能が悪化したと考えられる。

メンブレン構造がある場合は、シリコン基板でのコンプトン散乱は同様であっても、シリコン基板に与えられた熱は熱伝導の悪いメンブレン経由でT E S 温度計に伝わる前に冷凍機に排出されるため、悪影響が少ないと考えられる。

また、X線用のマイクロカロリメータの場合はコリメータを使用すればコリメータと吸収体とでシリコン基板へのX線の入射をほぼ完全に防ぐことができるが、ガンマ線の場合は必要なコリメータの厚さが非常に厚くなるという問題の他に、コリメータを使用した場合でも吸収体に入射したガンマ線の大部分は吸収体を通り抜けて直下のシリコン基板へ到達するため、シリコン基板でのコンプトン散乱の影響を避けるにはメンブレ

ン構造が必要と考えられる。

以上は分光性能への影響であるが、シリコン基板でのコンプトン散乱は、他に計数率にも影響がある。これらの素子の場合、シリコン基板からの信号は吸収体からの信号の5～10倍の頻度で検出された。これは素子が対応できる計数率が5～10分の1になることを意味しており、計数率の点でも実用上問題となる。

(2') 位置検出型素子の作成

(2)のメンブレン構造無しの素子で、図2のように5mm×0.5mm×5mmの吸収体の両端に1つずつTES温度計を接着して位置検出型ガンマ線マイクロカロリメータを製作して冷却した。しかし上述のように雑音が多いことと転移温度が高く比熱が大きいことにより信号と雑音の区別ができなかった。信号取得には100mK程度の転移温度を持つ素子を製作することと、(3)で述べる壊れにくい厚さのメンブレン構造を持つ素子を開発することで必要と考えられる。

(3) 厚いメンブレン構造のガンマ線マイクロカロリメータの開発：

以上の結果より、通常のメンブレン構造では機械的強度が不足する一方で、メンブレン構造無しでは優れたエネルギー分解能と高い計数率を実現する際に問題があることがわかった。これを解決するには、機械的強度とエネルギー分解能を両立できるような、適度な厚さを持ったメンブレン構造を開発する必要がある。そこでシリコン基板をエッチングする際に一部を残すことで、厚いメンブレン構造を持つガンマ線マイクロカロリメータを開発することにした。このプロセスの試作品として、厚さ16μmのメンブレン構造を製作した。この構造でのガンマ線マイクロカロリメータの製作と性能評価は今後の課題である。

(4) ガンマ線入射時の吸収体内部での熱伝導のシミュレーション：

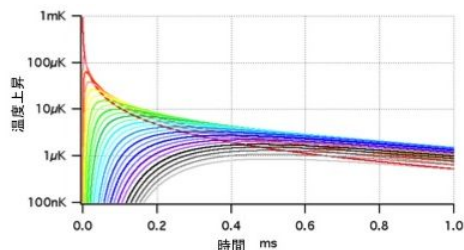


図5 位置検出型マイクロカロリメータの温度計からの出力波形のシミュレーション。対象とする温度計に近い位置への入射は赤いパルスのように立ち上がり速度が速く、逆の温度計に近い位置への入射は黒いパルスのように立ち上がりが遅くなる。2つの温度計から等距離に入射した場合は緑の波形となる。

位置検出型のガンマ線マイクロカロリメータの設計のため、差分法によるシミュレーションを行なった。転移温度が100mKの温度計と0.5mm×0.5mm×10.5mmの吸収体を組み合わせた1次元位置検出型素子にガンマ線が入射した場合の波形を図5のように見積もった。

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 3件)

”Development of gamma-ray position-sensitive transition-edge sensor microcalorimeters”, Naoko Iyomoto, Keisuke Maehata, Makoto Maeda, Kenji Ishibashi, Enectali Figueroa-Feliciano
“14th International Workshop on Low Temperature Detectors”
2011年8月 Heidelberg University (ドイツ)

「TES型マイクロカロリメータの電気的・熱的特性の測定」安部英恵, 伊豫本直子, 前畑京介, 前田 亮, 江崎翔平, 高野 彬, 川上久雄, 善本翔大
2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会
2013年9月 同志社大学

「ビスマス吸収体を用いたガンマ線検出用TES型マイクロカロリメータの開発」川上久雄, 伊豫本直子, 前畑京介, 江崎翔平, 高野 彬, 善本翔大, 吉峰郁洋
2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会
2014年9月 北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊豫本 直子 (IYOMOTO, Naoko)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：40508173