

ガンマ線用TES型マイクロカロリメータの開発

鶴田, 哲也

<https://hdl.handle.net/2324/6787598>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 鶴田哲也

論 文 名 : ガンマ線用 TES 型マイクロカロリメータの開発

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

マイクロカロリメータは放射線が吸収体に入射した際の温度上昇からエネルギーを測定する分光器であり、エネルギー分散型特有の高い検出効率と波長分散型に匹敵するエネルギー分解能を持つ。超伝導から常伝導に転移する際の急峻な抵抗変化を利用する Transition Edge Sensor (TES) を温度計として用いる TES 型マイクロカロリメータは X 線計測の分野では実用化されているが、数百 keV 以上のガンマ線計測のためには放射線吸収体の体積を 3~4 桁程度大きくする必要があるため、実用化するには吸収体へのガンマ線入射位置による波形のばらつきに対応する必要がある。また大きい吸収体を物理的に支える構造の開発や、基板でのコンプトン散乱の影響の低減などが必要となる。本研究では TES 型マイクロカロリメータをガンマ線に適用するために設計したマイクロカロリメータ素子の性能評価を行い、設計指針を確立する。

第 1 章では本研究の背景と目的について述べた。

第 2 章では TES 型マイクロカロリメータの動作原理について述べ、エネルギー分解能や信号の時定数の見積もり方法について概説した。

第 3 章では TES 型マイクロカロリメータの製作について述べた。ガンマ線用の素子は TES 温度計素子をフォトリソグラフィで製作した後、バルクから切り出した吸収体を TES に接着することで製作する。吸収体の重量は、TES 温度計と熱浴間の熱伝導度を適度に抑制するための構造であるメンブレンによって支えられることから、TES 温度計を成膜するシリコン基板として Silicon on Insulator (SOD) 基板を使用することでメンブレンが X 線用と比べて約 10 倍厚い TES 素子を設計・製作した (図 1)。

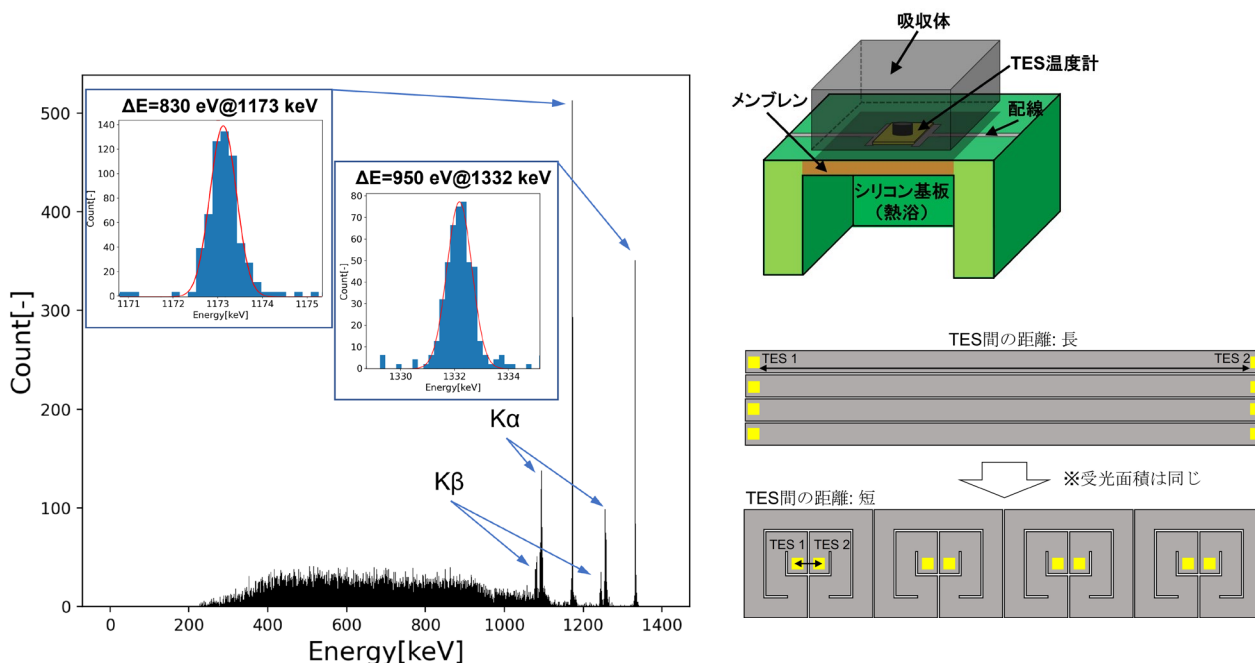
第 4 章ではシリコン基板でのコンプトン散乱イベント (シリコンイベント) と基板サイズの関係と、低周波ノイズへの影響を調査した。ガンマ線用のマイクロカロリメータ素子では、X 線用の場合と異なり、基板でのコンプトン散乱で発生する熱による低周波ノイズを考慮する必要がある。基板の体積が 2.4 mm^3 の素子と 5.0 mm^3 の素子に対して ^{137}Cs からの 662 keV のガンマ線照射実験を実施したところ、シリコンイベントの数は基板体積に比例すること、すなわちシリコンイベントは基板全体から TES に流入していることが判明した。また、基板体積 5.0 mm^3 の素子であっても現状の設計では低周波ノイズはシリコンイベントが主な原因ではなく、吸収体イベントの計数率に対して信号の減衰時定数が長すぎるということが原因であることがわかり、減衰時定数を短くすることがエネルギー分解能の向上につながるということが明らかになった。

第 5 章では厚いメンブレンの熱伝導度を調査した。X 線用の素子ではメンブレンは $1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下の厚さで、熱のキャリアであるフォノンの平均自由行程より短いので、熱は弾道的に輸送される。したがって熱伝導度は TES と熱浴間の距離に依存せず、メンブレンのサイズを自由に設計できる。一方でメンブレンが厚いガンマ線用素子の場合はフォノンの輸送が弾道的か拡散的か明らかでない。そこで設計の異なる 3 種類の素子の熱伝導度を測定することで比較を行った。厚さ $6 \text{ }\mu\text{m}$ のメンブ

レンの素子において TES と熱浴との距離が 4.5 倍異なる場合でもほぼ同じ熱伝導度が得られ、熱伝導度が距離に依存しないことが分かった。また、上記の素子と厚さ 10 μm のメンブレンの素子との比較でも、同様の結果が得られた。このことから熱リンクとしての役割を保ったまま機械的強度を上げるように TES と熱浴間の距離を製作可能な範囲で短くする設計を採用出来ることが明らかになった。熱伝導測定を行った TES でガンマ線照射実験を行って 1.33 MeV のガンマ線に対して 950 eV のエネルギー分解能を得た (図 2)。

第 6 章では吸収体へのガンマ線入射位置に信号波形が依存することを利用した Position Sensitive TES (PoST)型マイクロカロリメータの改良方法を考案した。吸収体が大きい場合、通常は吸収体へのガンマ線入射位置によって熱拡散に差が生まれて信号波形がばらつきエネルギー分解能が悪化するが、PoST 型で位置検出することによりエネルギー分解能の悪化を防ぐことが出来る。既に実績のある細長い形状の PoST 型 (図 3 上) の場合、熱収縮による素子の破損が問題になる場合があったため、TES 温度計間の距離を近づけることで熱収縮の影響を防ぐスパイラル PoST 型 (図 3 下) を考案した。吸収体を曲げることで熱の伝わり方が変化する可能性があるため熱伝導シミュレーションを行った。また、連続した吸収体が隣り合う形状のため、一部のガンマ線がコンプトン散乱後に吸収体に再入射することで、位置情報を失ったガンマ線が全吸収ピークに含まれる可能性があるため、そのようなガンマ線の有無についても調査した。その結果、熱の伝わり方は図 3 上と比べてわずかに異なるが位置検出に影響は無く、再入射後のガンマ線が全吸収ピークになることはほとんどないことが明らかになった。熱収縮の問題を解決出来る見通しが立ったことから、PoST 型マイクロカロリメータを用いた大面積の位置検出が現実的なものとなった。

第 7 章では本研究の総括を行うと共に、今後の展望について言及した。



(右上) 図 1 ガンマ線用 TES 型マイクロカロリメータの断面図

(左) 図 2 Co-60 線源を用いたガンマ線測定のエネルギースペクトル

(右下) 図 3 従来の 1 次元 PoST 型を並べた位置検出モデル (上) と熱収縮の問題を解決する可能性のあるスパイラル PoST 型を並べたモデル (下)