

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

X線イメージングを目指した
高エネルギー分解能X線マイクロカロリーメータ
High Sensitive X-ray Microcalorimeter for X-ray Imaging

申 請 者	
氏 名	工藤 寛之
	Hiroyuki Kudo

専攻・研究指導
(課程内のみ)

電子・情報通信学専攻 生物電子工学研究

半導体加工技術をもとに発展した **Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)** 技術は、自動車、IT、工業計測、バイオの分野で実用化が進んでいる。特に小型で高機能のセンサの開発においては欠かせない技術となっている。本論文は、**MEMS** 技術の宇宙応用を意図し、従来の技術では不可能であった高分解能と高効率を両立させた高機能 X 線検出器の実現を目指したものである。さらに、単体の高機能センサをアレイ化して X 線イメージングの実現を意図している。この種のデバイスは天文衛星に搭載して、大気圏外で使用されるため、小型軽量であることが要求されており、その製作には **MEMS** 技術の適用が不可欠である。

近年の X 線天文学では、高エネルギー天体が放射する X 線をより詳細に分析することを目的として、スペクトルの分離能力（エネルギー分解能）と X 線に対する感度（検出効率）の両面で高い性能を有する X 線検出器が必要とされている。この要求を満足する X 線検出器に、X 線のエネルギーを熱に変換し、薄膜の超伝導転移を用いた温度センサ（**TES: Transition Edge Sensors**）によってその熱量を検出する **TES** マイクロカロリメータ（**TMC: TES Micro Calorimeter**）がある。**TMC** は、従来用いられてきた半導体検出器のエネルギー分解能と比較して 20 倍以上の高エネルギー分解能の実現が期待できる。

現在打ち上げが検討されている **XEUS**（欧）、**Constellation X**（米）、**NeXT**（日）などの次世代型 X 線天文衛星では、例外なく **TMC** の搭載が計画されている。このため、アメリカ航空宇宙局（**NASA**）やアメリカ標準技術局（**NIST**）、オランダ宇宙研究機構（**SRON**）などで **TMC** の開発が行われている。上記ミッションでは、**5.9keV** の X 線に対して **10eV** 以下のエネルギー分解能および **100%** に近い検出効率を同時に実現する X 線検出器が要求されている。また、**TMC** を **32×32** ピクセルにアレイ化し、X 線を放射する天体を高い空間分解能でイメージングすることが必要とされている。

これらの要求を満たす X 線検出器を用いて天文観測を行うことによって、従来の半導体検出器では検出できなかった観測対象に含まれる微量な元素や X 線スペクトルの詳細な微細構造、ドップラー効果などによる輝線のシフトなどを検出することが可能になる。さらに、マルチアレイ化によって、空間的に広がった対象も観察することができる。このような情報から、元素の特定のみならず、そのエネルギー状態や運動などを調べることが可能となり、まだ解明されていない天体の観測や、宇宙がどのように進化してきたかを明らかにすると期待されている。

熱量検出によって **10eV** 以下のエネルギー分解能を得るには、検出器は熱容量が **1pJ** 程度のマイクロ構造体である必然性がある。また、それをアレイ状に形成する必要から、**MEMS** 技術の適用が必要不可欠である。これまでのところ **SRON** のグループが開発した単素子 **TMC** で **4.3eV** のエネルギー分解能が得られている。しかし、高エネルギー天体のイメージングを行うためには、この性

能を維持しつつ TMC のアレイ化を実現する技術の開発が急務となっている。

本論文は、X 線天文衛星に搭載することを目的とした TMC イメージセンサの研究の成果についてまとめたものである。すなわち、次世代の X 線天文衛星で要求される X 線検出器の性能を実現するため、MEMS 技術を活かした製作プロセスの開発、アレイ化に適した素子の設計とプロトタイプ試作を行った結果である。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的を述べる。また、従来の X 線検出器と TMC を比較することで、本研究の位置づけと、天文学分野で TMC がもたらすと期待される新しい天体観測の可能性を明らかにする。

第 2 章では TMC の構造と動作原理について論じ、マイクロカロリメータの設計と製作に必要な熱容量と熱伝導率に関する検討を行う。また、TMC に特有の電熱フィードバックによる応答の高速化と、エネルギー分解能の改善について述べる。これらの検討の結果から、具体的な設計パラメータを与えることにより、TMC では 5.9keV の X 線に対して原理的には 1eV 程度のエネルギー分解能が期待できることを明らかにする。

第 3 章では、単素子 TMC の設計・試作を行い、その特性評価の結果をもとに、構造と製作プロセスの改良を行った結果について述べる。試作した TMC の信号を分析し、エネルギー分解能を制限するノイズの種類を熱等価回路によって分類する。これにより TMC に発生するノイズの種類とその原因となる工程の関連性を明らかにする。この分析結果より、高エネルギー分解能を実現するための技術的な課題として、低温プロセス技術、TES をプロセスによるダメージから保護する手法、フォノンの平均自由行程の異方性を考慮した TES の形状、および吸収体のウエハレベルプロセスによる形成などの必要性について論じる。

第 4 章では、TMC のアレイ化を実現するために解決しなければならない技術的な課題を挙げ、そのために必要な要素技術の一つ一つを検討した結果について述べる。まず、電析を用いたマッシュルーム構造 X 線吸収体の必要性和その製作技術を述べる。マッシュルーム構造 X 線吸収体を用いることで、TMC をアレイ化した場合でも、基板全体の 85%をセンシング領域とする可能性を実験的に示した。本手法は、電析浴の組成や電析条件を変更するだけで吸収体の特性を容易に制御できる利点がある。次に、Sn 電析を用いた超伝導 3 次元配線技術の開発と特性評価について述べる。アレイ化によって生じる配線スペースの減少を補うため、高アスペクト比のスルーホールに超伝導体である Sn の配線を形成して基板の表裏に配線スペースを確保することを提案する。さら

に、アレイ化に適した TMC の構造と製作プロセスについて述べる。最後に上述の基礎技術の検討から、TMC アレイ実現への見通しを明らかにする。

第 5 章では、アレイ化の要素技術を取り入れて実際に Sn のマッシュルーム構造 X 線吸収体を有する TMC アレイを設計・試作した結果とその特性評価について述べる。Sn 吸収体を用いた TMC はアレイ化に適した構造を有し、全工程を通じてウエハレベルの低温プロセスで製作される。本プロセスでは TES を形成した基板は常に 100℃ 以下に保たれ、特性の劣化を防いでいる。電析で形成した吸収体は格子欠陥が少なく、結晶粒の大きい電析膜が得られた。このような材料では、X 線の入射によりクーパー対が解離して生成された準粒子が長い時定数成分を持つ。その影響でエネルギー分解能が低下するという結果となったが、解決策として準粒子の発生を抑えるための手法を検討した。この検討結果より、アレイ化 TMC では熱化の速い X 線吸収体を用いることの重要性を明確にする。

第 6 章では、Sn 吸収体を用いた TES マイクロカロリメータにおいて生じた問題点に対する考察から、吸収体材料として Bi を用いるなどの改良を施した撮像型 TES マイクロカロリメータ素子を試作した結果について述べる。Bi 吸収体を用いたアレイ化 TMC を用いて、5.9keV の X 線に対して 13eV という要求仕様に近い分解能を得た。この分解能は 170mK 以上で動作する 500 μ m 角の Ti-Au TMC 素子として、世界最高水準のものである。この結果は、本研究で開発した TMC のアレイ化プロセスが TES の本来有する性能を損なうことがないことを示している。本研究で開発した TMC アレイの製作技術は、吸収体材料を変更することによって TMC の信号波形を最適化できるなど、柔軟性に富んだプロセスであることが利点である。また、汎用性の高いプロセスであるため、本研究で開発した TMC アレイのみならず、さまざまな次世代の X 線イメージャの性能を向上させることが期待される。

第 7 章では各章で得られた結果を総括し、今後の見通しを述べる。