

# 次世代 X 線衛星搭載を目的とした TES 型 X 線マイクロカロリメータの製作

林 佑 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

宇宙の大部分は X 線によって観測可能である。X 線は主に高温プラズマによって放射され、精密なプラズマ診断を行なうためには各輝線について微細構造を十分に分離できる分解能と 0.1keV~10keV の広いエネルギーバンドを観測できる X 線分光観測器が必要である。そのためには開口率を大きくするために吸収体を横に広くとることと、Wide Energy Bund で観測するために、吸収体を縦にのばしていくことが求められている。しかし吸収体を大きくするとエネルギー分解能が劣化してしまう。そこで横方向に吸収体を大きくするのにマッシュルーム型にするので解決をはかった。また縦方向には TES を重ねて配置することで吸収体を厚くすることなく、幅広いエネルギーバンドの実現に向けた X 線照射試験を行った。

## 1 研究の学術的背景

銀河団が実は高温のプラズマで満たされていることが X 線観測により初めて明らかになって以来 [e.g. ref]、X 線は宇宙の特に空間的に広がった高温領域を探索する重要なツールとしてその地位を確立してきた。0.1 – 10 keV には様々な元素の遷移過程から生じる輝線、吸収線が多く存在する。このエネルギー帯域で数 eV の精密分光を行うことができれば、輝線の広がりやピークシフトから ~100 km/s で運動する高温ガス運動を直接捉えたり、プラズマ診断により温度や元素組成を精度よく決定することができ、宇宙の構造進化や熱史、科学的進化に迫ることが可能となる。しかしそのためには、幅広いエネルギー帯域において精密分光と撮像能力を両立した次世代の X 線分光検出器が必須となる。

## 2 TES 型 X 線マイクロカロリメータ

X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線光子一つ一つによる素子の微小温度上昇を測定する検出器であり、熱雑音の小さい極低温 (100 mK) で動作させることで優れたエネルギー分解能を達成できる。我々の研究室では、超伝導遷移端の急峻な抵抗変化を高感度の温度計として用いることで、原理的に 1eV の分

解能を達成できる TES(Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータを開発している。

我々は (宇宙科学研究所と首都大学東京を中心としたグループ)、Ti/Au の 2 層薄膜を用いて超伝導転移温度を ~100 mK に制御した TES と、その上の中心部分に Au の薄い X 線吸収体を成膜した単ピクセル素子を開発し、5.9 keV の X 線に対して 2.8 eV の分解能を得ることに成功している (図 1)。現在はアレイ化による X 線検出効率の向上に取り組んでいるが 2 つ問題がある。1 つめは天体からくる X 線が非常に少なく、検出器の開口率を上げる必要があるが、検出器面積を X 線受光面積で覆うような吸収体を製作することが困難である点、2 つめは、広いエネルギーバンドにおいて X 線を効率よく止めなければならぬことである。我々はこの問題について次章の 2 つの観点から開発をすすめた。

## 3 開発項目

### 3.1 マッシュルーム型吸収体

天体から来る X 線は非常に少ない。そこで X 線検出開発では分光性能の追求だけでなく高い開口率も備えていなければならないが、カロリメータ特有の熱浴と弱い熱リンクを保つためのメンブレン構造や、配線スペースなどを考えると図 2 のような stem 構造

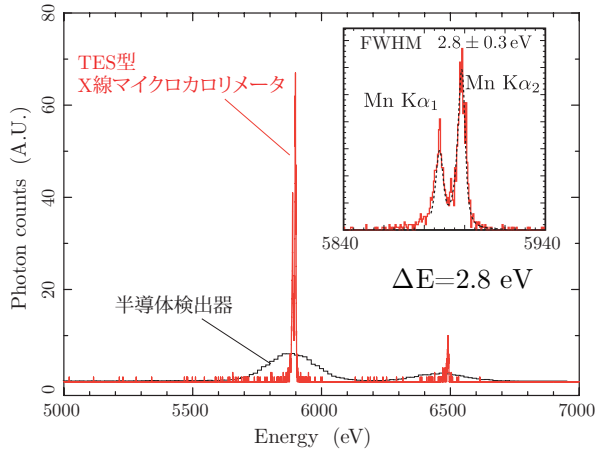


図 1: 図の挿入方法の説明

を持つ吸収体にしなければならない。これをその形状からマッシュルーム型吸収体とよんでいるが、このような片持ち構造を半導体プロセスで作り込むのは難しい。吸収体の笠の部分がかぶって基板と接触してしまったり、TES の Au との密着性の問題などにより、ここ数年間この吸収体が形成できたことはなかった。また、この吸収体開発では素子の熱設計に注意を払わなければならない。吸収体のサイズが大きくなると熱容量が大きくなり、分解能は劣化する。また、吸収体内での熱拡散のばらつきが X 線検出パルスのばらつきとなって、分解能を劣化させる可能性もある。

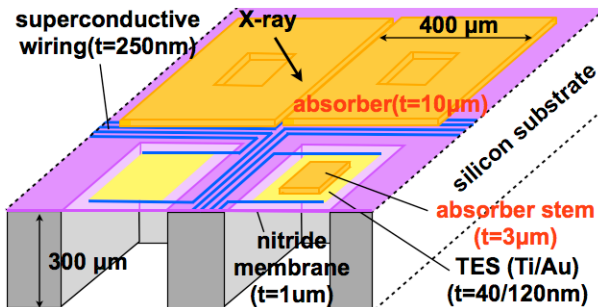


図 2: 図の挿入方法の説明

### 3.2 三次元カロリメータ

高いエネルギーの X 線を効率的に止めるためには吸収体が厚くなければならない。しかし吸収体が厚

くなると熱容量が増大し分解能が劣化する。そこで我々は上段を低いエネルギー用に吸収体がうすいカロリメータを配置し、下段には高いエネルギー用に吸収体が厚いカロリメータを配置することでこの問題に取り組んだ。

## 4 実験結果

### 4.1 電析出銅を用いたマッシュルーム型吸収体の設計と製作

我々は実験の段階で、電析（メッキ）で成膜した銅の熱伝導が他の成膜法で成膜したものよりも 10 倍熱伝導が優れていることを発見し、これを吸収体として用いることにした。熱容量や熱拡散計算を行い、例えば 10 eV を切るという目標に対して 400μm 角の吸収体までなら成立するという結果を得た。我々は条件出しを行いながら図 3 の m 製作プロセスフローを策定し、実際に製作した。

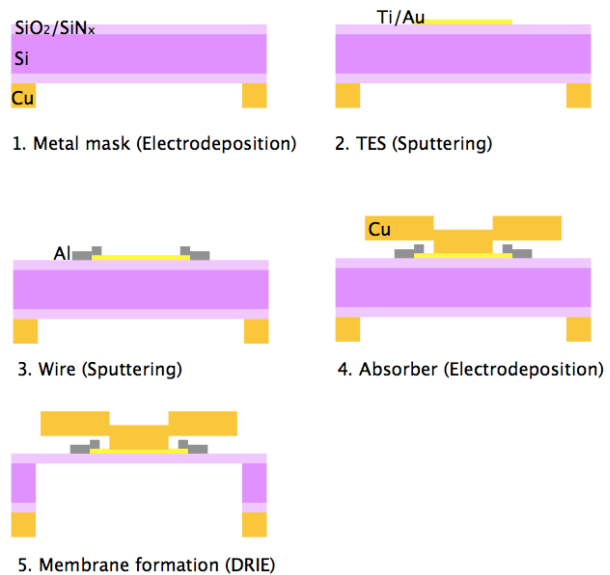


図 3: マッシュルーム型電析銅吸収体カロリメータの製作模式図 (実物のスケールとは異なる)

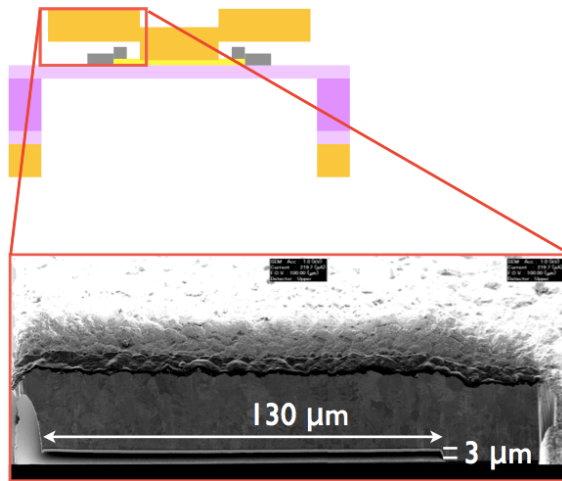


図 4: 製作した素子の断面図

#### 4.2 三次元カロリメータでの X 線検出

我々は共同開発を行っている企業が製作した 4 ピクセルの、それぞれ吸収体の膜厚が違う素子を、図 5 のようなジグをを設計、製作し、特に微小なアライメントに気をつけながら素子を収納し(図 6) 極低温において X 線照射試験を行った。配線が切れてしまい 8 素子のうち 5 素子しか測定できなかったが、5 素子を同時に動作させ、25 eV という分解能をえた。今回の測定では X 線パルスの有効時定数が設計よりながく、読み出し系の方でパルス形状の全てを取得できなかったという問題があり、これが分解能を大きく制限している理由と考えられる。したがって分解能改善にむけた余地が残されているのはもちろん、このような三次元的なカロリメータは世界でも我々しか開発していなく、新しい成果を得ることができた。

## 5 Discussion

今回製作した 200 $\mu\text{m}$  角, 280 $\mu\text{m}$  角, 400 $\mu\text{m}$  角の, 3 種類の吸収体である. 今後はこれに X 線照射試験を行い, 吸収体の面積の違いによるエネルギー分解能や, パルスのばらつき等が設計と一致するかを確かめる. また三次元カロリメータは、実は反同時計数法により宇宙線バックグラウンドを低減させる可能性をもつ

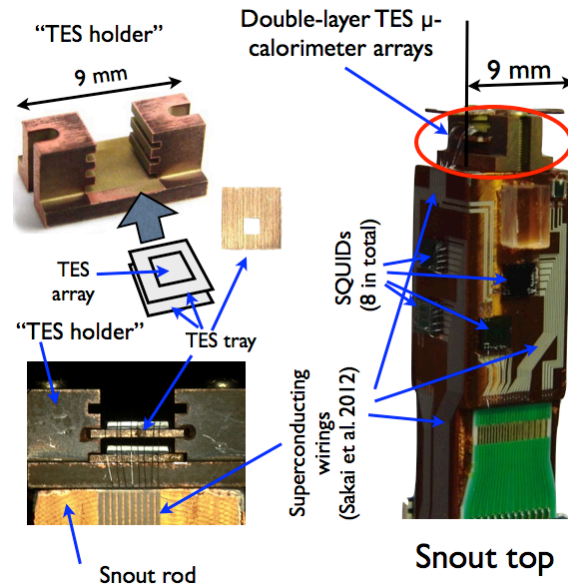


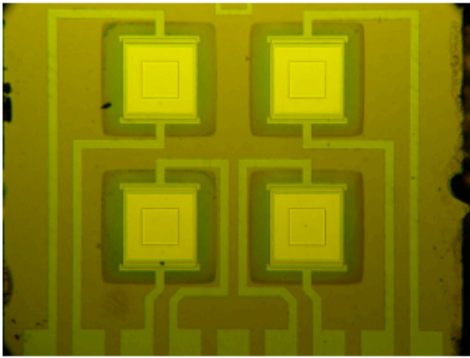
図 5: 三次元カロリメータシステム

ている。私は宇宙線バックグラウンド除去の原理実験を行っていく。

## Reference

- K Nagayashi. 2012. Master's thesis, University of Tokyo.
- H Yoshitake. 2009. Master's thesis, University of Tokyo.
- Renyue Cen and Jeremiah P Ostriker. 2006. The Astrophysical Journal, 650(2):560-572.

top layer



bottom layer is visible  
though top layer

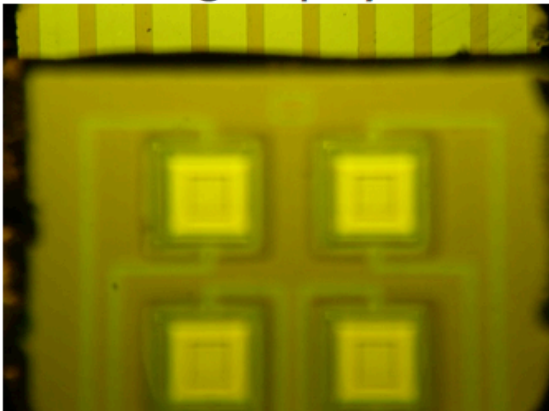


図 6: 2 段重ね素子の様子