

将来衛星搭載に向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの開発

村松はるか (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

我々は、次世代 X 線天文衛星 - DIOS 衛星に搭載する観測機器の開発を行っている。DIOS は、dark baryon の候補である WHIM からの酸素輝線を直接観測し、その空間分布を明らかにすることを目的としている。そのためには、2eV という高いエネルギー分解能を有し、16 × 16 素子以上の TES(遷移端温度計) 型 X 線マイクロカロリメータ検出器が必須である。我々のグループでは、単ピクセル素子で 5.9 keV の X 線に対し 2.8 eV の分光性能を達成しており、多素子化に向けて要素技術を確認することが重要となる。多素子化に伴い、各素子の転移曲線が一致し、素子製作の過程で転移特性が変化しないことが望まれる。そのため、素子製作の各段階で転移特性を調べ、各々の素子の転移曲線を評価した。本講演では、素子毎の転移曲線の変化と素子製作の各段階での転移特性の結果を報告する。

1 研究の学術的背景

我々は、現在提案中の X 線天文衛星 DIOS(Diffuse intergalactic Oxygen Surveyor) に向けて X 線マイクロカロリメータ検出器の開発を行っている。近傍宇宙に存在するバリオンのうち半分以上は未だ観測にかかっていない。宇宙流体シミュレーションによると、このバリオンは大規模構造のフィラメントに沿って、薄くて広がった中高温のガス (WHIM: Warm Hot Intergalactic Medium) として存在していることが示唆されている (図 1)。WHIM は高階電離した酸素からの特性 X 線を捉えることで観測できる。DIOS では、WHIM からの酸素輝線の赤方偏移を精密に測定することで銀河系内からの酸素輝線と区別し、その空間分布を探ることを目的としている、そのためには、従来の X 線 CCD の 50 倍に相当する約 2eV のエネルギー分解能を有し、16 × 16 素子以上の TES 型 X 線マイクロカロリメータ検出器が必須である。

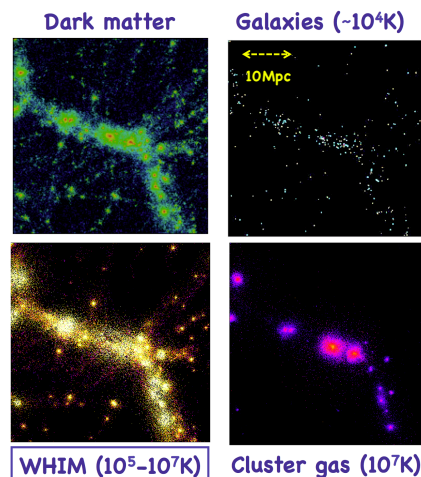


図 1: 流体シミュレーションによる銀河団周辺の物質分布

2 TES 型 X 線マイクロカロリメータ

TES 型 X 線マイクロカロリメータとは、熱雑音の小さい極低温 (~ 100 mK) で動作し、超伝導遷移端の急峻な抵抗変化 (図 2) を高感度の温度計として用いることで、入射 X 線による素子の温度上昇を精密

に測定する検出器である。エネルギー分解能は

$$\Delta E \sim 2\sqrt{\frac{k_B T^2 C}{\alpha}} [\text{eV}] \quad (1)$$

と書ける。 k_B はボルツマン定数、 C は素子の熱容量である。典型的な TES 素子として、動作温度 $T \sim 100\text{mK}$, $C \sim 1\text{pJ/K}$, 温度計の感度 $\alpha \sim 100$ を仮定すると、 $\sim 1\text{eV}$ のエネルギー分解能を達成できることがわかる。ただし α は次式によって定義され、こ

れを温度計の感度とする．

$$\alpha \equiv \frac{d \log R}{d \log T} = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2)$$

R は温度計の抵抗値，T はその温度である．我々のグループでは，単ピクセル素子で 5.9 keV の X 線に対し 2.8 eV の分光性能を達成しており，検出器開発は分解能追求のステージから多素子化へと移行している．

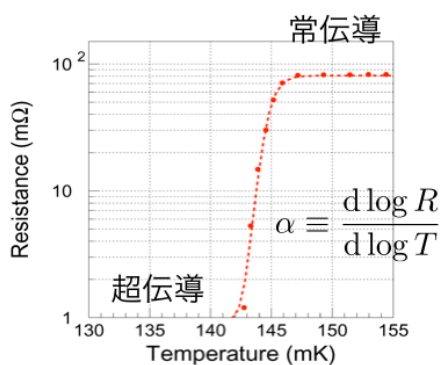


図 2: 超伝導遷移端

3 開発項目

3.1 TES のアレイ化

撮像可能な検出器を実現するためには，素子のアレイ化が必須となる．しかし，TES の読み出しには 1pixel あたり最低でも 8 本の配線が必要となり，256pixel を同時に読み出すには 8×256 本の配線数となり常温から極低温へ配線を通すことができない．そこで，配線数を減らす試みの 1 つとして TES のバイアスライン共有化を行った．

3.2 TES バイアスラインの共有化

TES の動作点はバイアスに流す電流によって制御している．TES のバイアスライン共有化とは，1 素子毎にバイアス電流によって制御していたのを，数素子を 1 セットとして同一のバイアスラインで読み

出しを行うことである．その結果，従来の配線数から 1 桁も削減することができた．

3.3 TES の転移特性

同一のバイアス電流で TES を制御するにあたり，各々の素子の動作点が一致している必要がある．つまり，各素子の転移曲線が一致していることが要求される．しかし，我々のグループで製作した TES では，各素子の転移曲線が一致しないことや，転移しない問題があった．これは，各製作プロセスで転移温度の変化があったことが一因であると考えられる．そこで，TES の製作プロセス毎に転移特性を調べ，各素子の転移曲線を評価した．

4 実験内容

4.1 TES の製作プロセス

我々は以下のプロセスで TES 型 X 線マイクロカロリメータを製作している．その製作断面模式図を図 3 に示す．また，実際に製作した 64pixel の TES は図 4 である．まず，シリコン基板 (厚み: $300 \mu\text{m}$) の裏面の窒化膜，酸化膜を掘る．そして，TES となる Ti と Au の二層薄膜 (厚み: 170nm) をシリコン基板に成膜する．この Au の厚みにより Ti の転移温度を制御している．次に，TES 読み出し用配線の Al (厚み: 230nm) を成膜し，エッチングとリフトオフの混合プロセスを用いて Al 配線を形成する．そして蒸着法を用いて Au (厚み: 600nm) を成膜し，リフトオフにより吸収体を形成する．最後に，シリコン基板の裏面を掘ることで完了する．本研究では， 3mm 角に 64pixel の TES を形成し，TES 製作と Al 配線製作，吸収体製作の各々のプロセス後に，冷却試験を行った．

4.2 転移特性の評価方法

64 素子 1 つ 1 つの転移特性を同時に調べるには冷凍機のシステムとして不可能である．そのため，まずは 8pixel を 1unit とし，8pixel を素子上の配線パツ

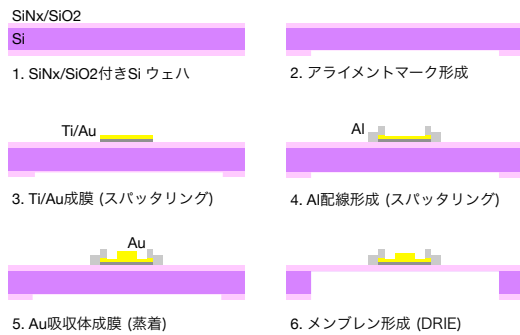


図 3: TES 型 X 線マイクロカロリメータの製作模式図

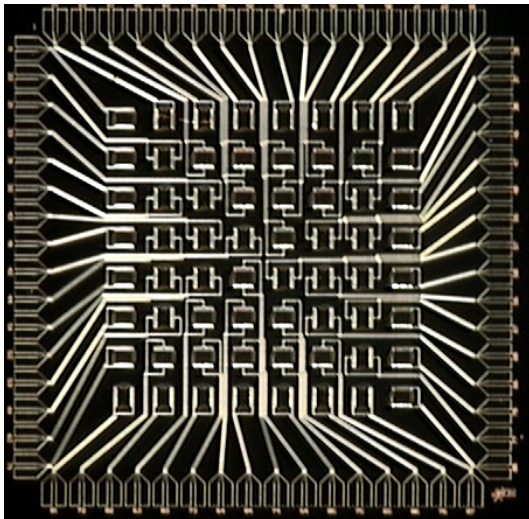


図 4: 実際に製作した 64pixel の TES

トで直列に繋いで、1 回の測定で 8pixel を同時に読み出した。

5 結果

1pixel の TES のみの転移曲線は図 5 となり、Al 配線後と吸収体成膜後の転移曲線は図 6 となった。Al 配線製作後と吸収体成膜後では超伝導遷移が 2 段になっているように見える。これは TES のみの転移曲線には見られないので、Al 配線の製作過程に要因がある。図 6 より、Al 配線後と吸収体成膜後の超伝導遷移幅は変化していない。また図 6 より吸収体を成膜すると、Al 配線後よりも常伝導抵抗値が低くなっている。

これは、吸収体を成膜したことにより、TES+Au が抵抗となり断面が増えるので、抵抗値が低下したと考えられる。実際に素子の設計パラメータを用いて計算すると、吸収体を成膜後は抵抗値が 1/2 以下になるという結果が得られた。そのため、抵抗の断面の変化により素子の抵抗値が低くなったことを理解できる。また、超伝導の抵抗値が吸収体を成膜した後で増加していることが分かる。この要因としては、測定環境によるものと、超伝導状態でも少し抵抗が残っており吸収体形成後 TES の面積が減少したためその抵抗値が増加して見えたと考えられる。

1pixel と 8pixel での転移特性は図 7 となった。また、図 7 の 1pixel の R-T 曲線を 8 倍して 8pixel の R-T 曲線と重ねると図 8 となった。これより両者の転移曲線は 165mK 以上で非常に良く一致している。

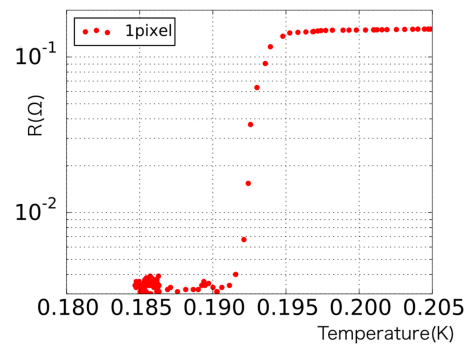


図 5: TES のみの R-T 曲線

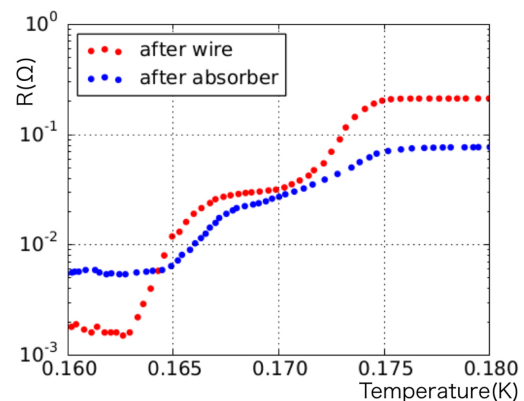


図 6: Al 配線後と吸収体成膜後の R-T 曲線 (1pixel)

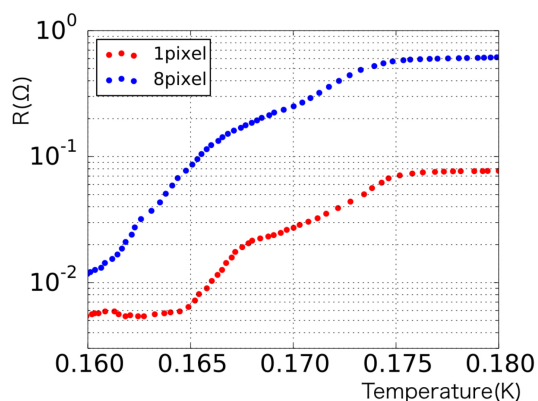


図 7: 1pixel と 8pixel の R-T 曲線

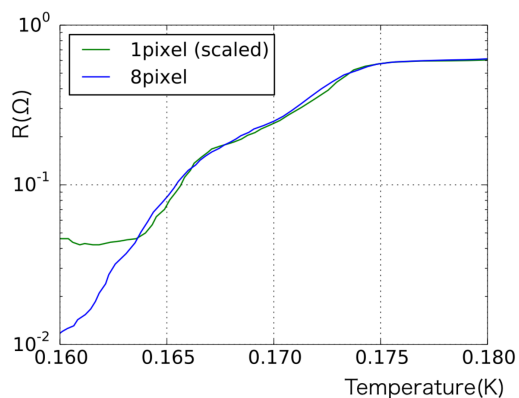


図 8: 8pixel の R-T 曲線と 1pixel の R-T 曲線を 8 倍にした図

6 まとめ

Al 配線形成後と吸収体成膜後で超伝導遷移の始まりの温度と終わりの温度は変化していない。つまり、TES の各製作プロセスで転移幅は変化しないといえる。

温度が 165mK 以上のところでは 1pixel と 8pixel の転移曲線は良くそろっている。よって、素子毎の転移特性の違いはほとんどないといえる。

今後はメンブレンを形成した TES に X 線を照射し、エネルギー分解能を評価する。