

# TES 型 X 線マイクロカロリメータの AC 駆動時のクロストーク減少に向けた研究

前久 景星 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

我々は DIOS 衛星搭載に向け、TES(Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータの研究開発を行っている。TES の信号は超伝導量子干渉計 (SQUID: Superconducting QUantum Interference Device) で読み出し、通常一素子について 8 本の配線が必要となる。TES は  $\sim 100\text{mK}$  で動作させるため、多素子化に伴う読み出し配線群からの熱流入を無視できない。我々のグループでは、複数素子からの信号を 1 つの SQUID で読み出すために、各 TES を異なる周波数 ( $\sim \text{MHz}$ ) の交流で駆動する、周波数分割多重化法の研究を行っている。高周波数での信号のやりとりは、配線間のクロストークを増加させるという問題がある。そこで TES バイアス配線から他配線へのクロストーク抑制に向け、従来のシャント抵抗を用いた擬定電圧駆動ではなく、トランスを用いた TES の定電圧駆動法を考えた。本発表では、その製作に向けた、シミュレーションによるトランス部の最適パラメータの決定と、その設計について報告する。

## 1 はじめに

我々は次世代 X 線天文衛星、DIOS (Diffuse Inter-galactic Oxygen Surveyor) 衛星への搭載に向けた観測機器の開発を行っている。DIOS はダークパリオンを直接観測し、その空間分布を求めることを目的としている。銀河団間に分布する  $10^5 - 10^7 \text{ K}$  の温度を持ったパリオンを 3 次元的にマッピングするため、TES 型 X 線マイクロカロリメータを  $16 \times 16$  素子でアレイ化する必要がある。

X 線マイクロカロリメータは  $\sim 100 \text{ mK}$  の極低温

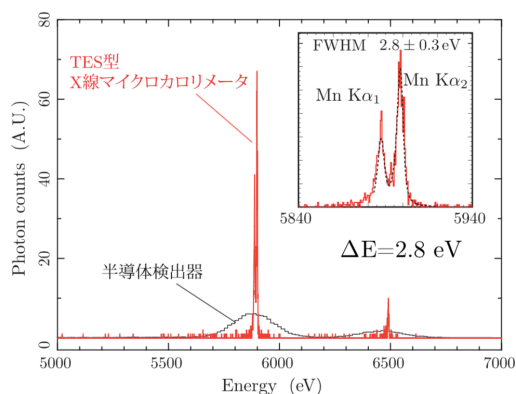


図 1: 我々のグループが達成したエネルギー分解能

下で動作させる分光器のため、大規模アレイを一素子一読み出しで動作させると低温部への配線は数千本となり、配線からの熱流入が無視できなくなる。そこで、複数の素子を一度の読み出しで測定する信号多重化が必須である。我々はそれぞれの素子を異なる周波数の交流で駆動し、電流的に信号を加算して室温にて検出する、電流加算方式による周波数分割多重化を提案した。すでに、我々のグループが行った TES カロリメータの交流駆動実験において、2.5 MHz $\sim$ 3.3 MHz での 4 素子同時駆動における読み出しにも成功している。しかしその後の追実験において、直流駆動時には見られなかったノイズが確認され、これが配線間クロストークによるものであることが確かめられた。そこで我々はクロストーク抑制に向け、新たな TES バイアス法を考案した。

## 2 クロストークによる問題

TES を駆動し信号を読み出すためには、1 素子あたり室温 - 極低温間に 8 本の配線が必要であるが、その中でも特に TES バイアス配線は、他の配線に比べて 1 桁ほど大きい電流が流れており、この配線からのクロストークが最も大きい。クロストークが増えると、読み出し側のノイズが大きくなるだけでな

く、フィードバック電流の位相がずれることや、本来 SQUID に入力された磁束以上のフィードバックを返してしまうことにより、磁束固定ループ (FLL: Flux-Locked Loop) が破れるという問題がある。

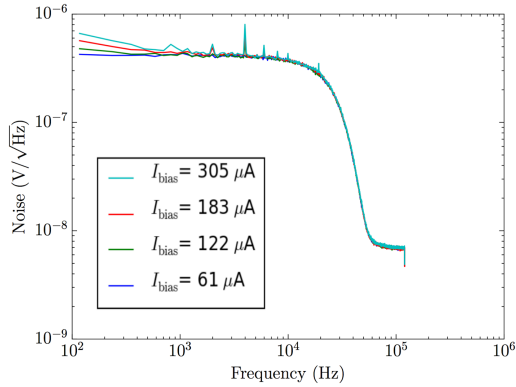


図 2: 電流に依存したノイズの推移

図 2 はバイアスを大きくした時の出力ノイズの変化を表したものである。電流の増加に伴って読み出しのノイズが増えていることがわかる。

### 3 新しい定電圧駆動法

そこで考えられたのが、シャント抵抗を用いて TES を定電圧バイアスとするのではなく、トランスを用いて TES を定電圧バイアスとする方法である。図 3(右) のような回路において、

$$\frac{I_{tes}}{I_{bias}} = \frac{i\omega M}{Z - i\omega L_{shunt}}$$

の関係が成り立つ。ここで、 $I_{tes}, I_{bias}$  はそれぞれ 1 次側、2 次側に流れる電流、 $\omega$  は電流の各周波数、 $Z$  は 2 次側のインピーダンス、 $L_{shunt}$  は 2 次側のコイルの自己インダクタンスである。TES のインピーダンスを理想的に  $Z = R$  とすれば、

$$\left| \frac{I_{tes}}{I_{bias}} \right| = \frac{M}{\sqrt{\left(\frac{R}{\omega}\right)^2 + L_{shunt}^2}}$$

となるので、TES の抵抗値と流す電流の周波数を固定して考えれば、 $I_{tes}$  と  $I_{bias}$  の電流比は、Input coil と Shunt coil の自己インダクタンスの値と、結合定数の値のみで決まる。つまりこの駆動法を用いれば、

自己インダクタンス  $L_{in}, L_{shunt}$ , 結合定数  $k$  の値をうまく調整することで、TES に流す電流は変えずに、バイアス電流を小さくすることができると期待される。

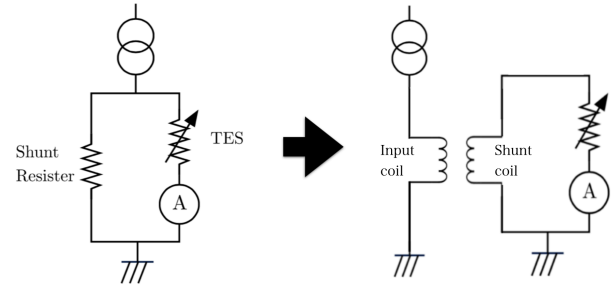


図 3: (左) シャント抵抗を用いた擬似定電圧バイアス、(右) トランスを用いた定電圧バイアス

### 4 製作に向けた目標設定

ここではトランスの製作を前提に、各パラメータについての説明と目標値の設定を行う。

最も問題は、シャント抵抗を TES と並列につなぎ、分流させて電流を流すために、TES の 10 倍程度のバイアス電流を流さなければならないことである。配線間のクロストークを抑えるためには各配線に同じだけの電流が流ることが望ましく、 $I_{bias}$  の目標値を TES に流す電流と同じ  $100 \mu A$  とする。

これより、上記の目標値を実現できるような、自己インダクタンス  $L_{in}, L_{shunt}$ , 相互結合定数  $k$  の値について考えていく。

TES の  $\sim 10 \text{ m}\Omega$  の抵抗変化を読み出すためには、 $L_{shunt}$  のインピーダンスが TES の抵抗値より十分小さくなくてはならない。周波数分割多重化法にて  $\sim \text{MHz}$  の周波数帯域で駆動することを考えれば、 $\omega L \sim \text{数 m}\Omega$  とするために自己インダクタンス  $L_{in}$  は数 nH でなければならない。よって今回は  $L_{in} = 1 \text{ nH}$  とする。また TES の動作点での抵抗は、典型的に  $40 \text{ m}\Omega$  とする。

また、シャント抵抗時の TES 電流は、ベース電流に対して 10 % 以上の変調を示していたが、これと同程度の振幅変調が見られることも確認する。

## 5 結果

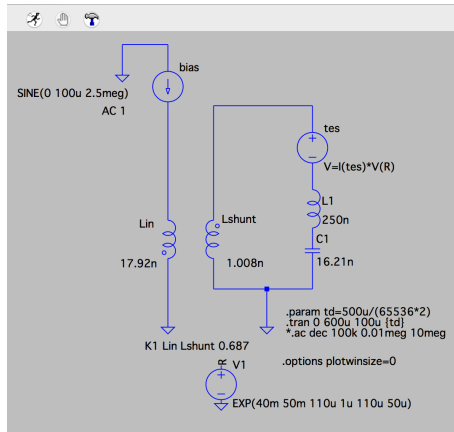


図 4: LTspice シミュレーションで用いた回路

回路シミュレーションソフト LTspice にて、図 4 に示すような回路を作成した。バイアス配線側には交流電流源と Input coil をつなぎ、TES 側には、TES に X 線が入射した時の TES の抵抗変化を模擬した可変抵抗と Shunt coil をつないでいる。TES の抵抗変化は、これまで得られた TES の信号をもとに、40 mΩ の抵抗が、立ち上がり時間 2 μsec で 50 mΩ となり、立ち下がり時間 50 μsec でゆっくりもとの抵抗値に戻る様子を再現した。図 4 回路内右上の TES がこれにあたる。

また、今回はトランス部のパラメータ決定を目標としたため、TES 1 素子のみでのシミュレーションを行ったが、周波数分割多重化のため、共振周波数 2.5 MHz に設定した LC フィルタを回路内に入れてある。

トランス部の設計、及びコイルの自己/相互インダクタンスの値の推定は、Xic と Fast-Henry にて行った。各層の膜厚は下から順に、BAS(黄):300 nm, COU(青):400 nm, CTR(紫):500 nm である。さらに最小線幅 1.5 μm, 最小線間隔 1.0 μm より、その値で設計を行った。まず BAS 層に自己インダクタンスのシミュレーションを行いながら、 $L_{shunt}$  を設計した。次に  $L_{shunt}$  とカップリングさせる形で、 $L_{in}$  を設計し、その都度シミュレーションを行った。シミュレーションにより求めた  $L_{in}, L_{shunt}, k$  の値を用いて、LTspice にて回路シミュレーションを行い、

$I_{bias}$  の大きさを確かめ、目標値とのズレを小さくするよう再び設計し、これを繰り返した。 $L_{shunt}$  1 巻きではトランスを SQUID 基板に組み込む際のスペースに余裕がないため、2 巻きとしている。

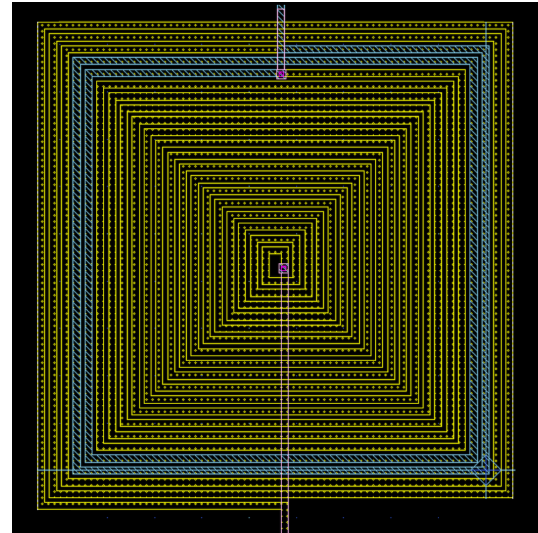


図 5: Xic で設計したトランス  $L_{in}$ (黄) と  $L_{shunt}$ (青)

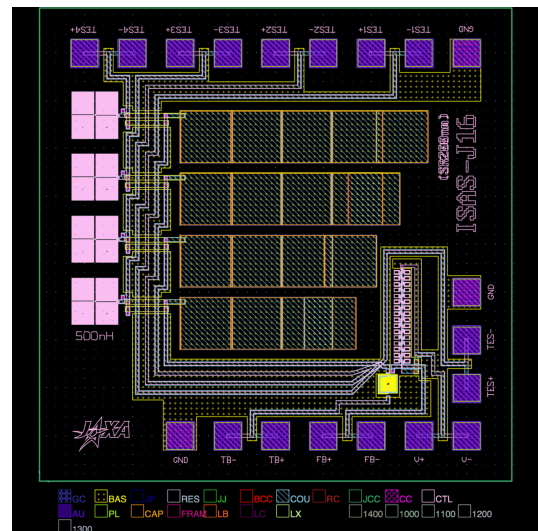


図 6: トランスを組み込んだ SQUID 基板の設計図

図 6 はトランスを組み込んだ SQUID 基板であり、右下の黄色い部分が図 5 に示したトランスである。

以下に求めた最適パラメータを示す。L は自己インダクタンスを表している。このパラメータでの相互インダクタンスは 2.9 nH、結合定数は 0.69 となった。

表 1: トランス部のパラメータ

種類	サイズ ( $\mu\text{m}^2$ )	巻き数	L(nH)
$L_{in}$	101×103	20	17.9
$L_{shunt}$	87×87	2	1.0

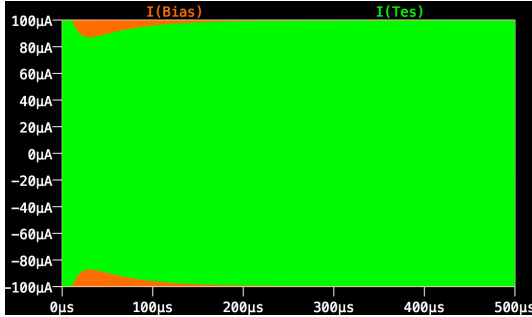


図 7: 新しい TES バイアスを用いた振幅変調の様子

Xic で求めた最適パラメータを用いて、LTspice にて回路シミュレーションを行った結果を図 7 に示す。縦軸は電流 ( $\mu\text{A}$ )、横軸は時間 ( $\mu\text{sec}$ ) である。図 7 より、 $I_{tes}=I_{bias}=100 \mu\text{A}$  であることが確認できる。また TES の抵抗変化に対応して、 $\frac{\Delta I}{I} \sim 0.146$  と、10 %以上の振幅変調をしていることが確認できた。

## 6 まとめと今後

TES バイアス配線から他配線へのクロストーク抑制に向け、新しい定電圧バイアスの設計を行った。トランス部の最適パラメータは  $L_{in}=17.9 \text{ nH}$ 、 $L_{shunt}=1.0 \text{ nH}$ 、結合定数 0.69 であった。

今後は、設計したものを実際に製作し、クロストークの測定、多重読み出しの研究を行っていく。

## 7 参考文献

K.Sakai. A Frequency-Division Multiplexing Read-out System for Large-Format TES X-Ray Microcalorimeter Arrays towards Future Space Missions. PhD thesis .University of Tokyo (2015).