

# X線マイクロビームを用いた超伝導転移端センサアレイの応答特性解析

## (Spatially-resolved Analysis of a superconducting transition edge sensor Array with an X-ray microbeam)

課題番号：2007B1678 / 萌芽的研究課題 / 成果非専有 / BL01B1

東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻

南川 泰裕

### 1 はじめに

今回の実験では、次世代型極低温放射線検出器として期待されている、超伝導転移端マイクロカロリメータ (TES: Transition Edge Sensor) アレイ型検出器の特性解析を目的とし、X線マイクロビームスキャンによる信号波形データの蓄積と、TESを利用した蛍光X線分析についての基礎実験を行った。

マイクロカロリメータとは、物質の比熱が非常に小さい極低温下において、放射線入射により生じる比較的大きな温度上昇を利用したスペクトロメータである。そのなかでも超伝導と常伝導との相転位を利用するTESは、原理的には1eVという非常に優れたエネルギー分解能と数kcps程度の高速な応答特性を持ち、単一光子計測をも可能とする次世代の検出器である(図1)

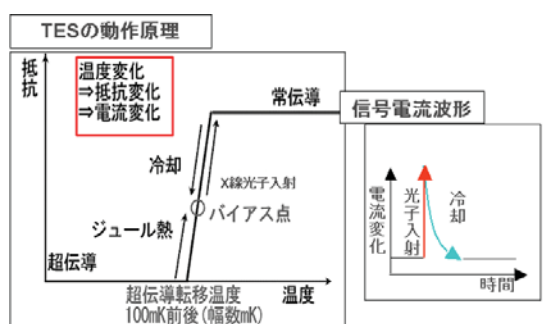


図 1: TES マイクロカロリメータの動作原理

このような優れたエネルギー分解能を実現するには、検出素子の熱容量を小さく抑え

る必要があり、TESの有感領域の大きさは数100um角程度に限られてしまう。そのため多数のTESを二次元上に並べたアレイ型検出器の開発が現在進められている。しかしそこで問題となるのが、TESを動作させるためのバイアス回路と、信号読み出しのためのSQUIDアレイ電流増幅器の配線である。配線数の増大は超伝導センサ部への熱流入量の増大につながり、極低温下の微小な温度変化によって信号を検出するTESにとってこれは非常に重要である。

これを解決するために複数のTESマイクロカロリメータの信号を一つのSQUID回路で読み出すマルチプレクス技術が開発されている。その一つの方式として、実験者らの所属する研究グループでは、複数のTESピクセルを並列バイアスで同時に駆動させることで、1つの高感度SQUID電流増幅器による信号増幅を可能とし、応答波形を解析から入射ピクセル位置と入射エネルギーを高精度に決定するという波形弁別多重化(WFM: Wave Form Multiplexing)技術を世界に先駆けて開発してきた。

このようなWFM方式の高効率化と高精度化を目指すため、Ir超伝導センサにスリットを入れることで、複数の領域に分割した分割型の超伝導転移端センサアレイを開発した。

今回の実験ではこのような分割型超伝導転移端センサアレイ上を、高精度にコリメートした単色X線マイクロビームを用いて走査することで、X線入射位置と信号波形のマッピングを行うことを目指した。これにより得

られたデータを元に計算機によるシミュレーションを行い、さらに優れたエネルギー分解能と大きな受光面積を持つ新型の超電導転移端センサアレイの開発を狙うことができる。

## 2 超伝導センサの作成

本実験で用いたのは 320 $\mu\text{m}$  角の Ir 検出器に 5 $\mu\text{m}$  幅のスリットをいれ、5 $\mu\text{m}$ ~50 $\mu\text{m}$  幅の 10 の領域に分割した非対称型のセンサアレイである。(図2)。 図中左方向からと右方向からではスリットの間隔をかえることで、対称性をなくし、信号弁別を行いやすくすることを狙っている。

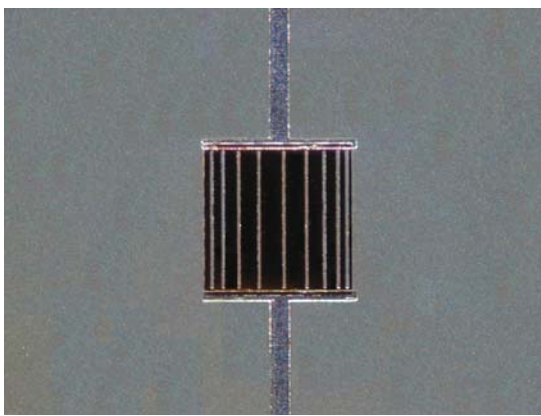


図 2: 実験に用いた超伝導転移端センサアレイ

Ir- TES マイクロカロリメータの作製過程を(図3)に示す。製作にあたり、マイクロマシン技術が必要である。装置は、東京大学武田クリーンルームにあるものを使用した。

1. Si 基板の両面に LPCVD 法を用いて SiN を成膜する。
2. Ir をスパッタリング法により成膜する。
3. BCl<sub>3</sub> を用いた RIE により TES のパターンニングを行う。
4. 基板裏面の SiN を Si エッチング用に RIE で取り除く。
5. Nb 電極をスパッタリング法とリフトオフ法により成膜、パターンニングする。
6. ヒドラジンエッチングし、メンブレン構造を形成する。

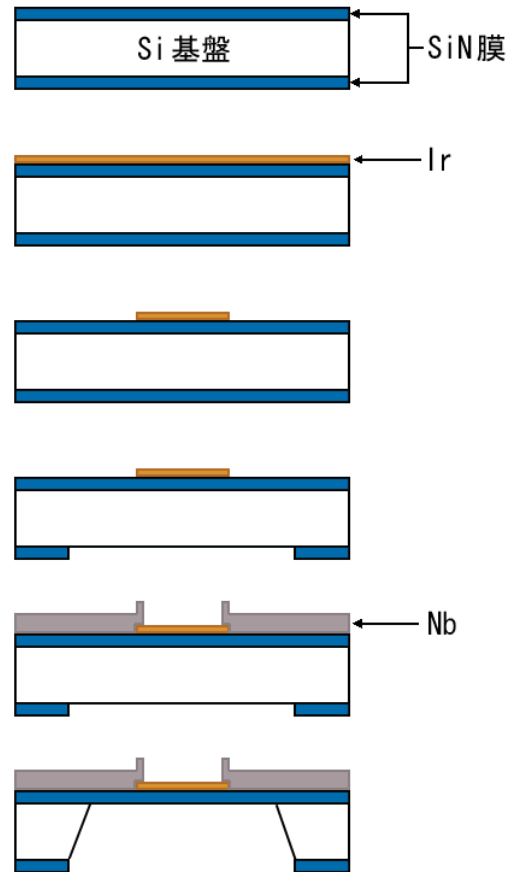


図 3: TES マイクロカロリメータ作製の流れ

## 3 測定手順

本実験で検出器に用いた Ir 超電導体の超電導転位温度はおよそ 100mk であり、測定には 60mk 程度の極低温が必要となる。これには液体 <sup>3</sup>He が液体 <sup>4</sup>He にとけ込む際の溶解熱を利用した <sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 希釈冷凍機を用いる。通常の冷却の手順は次のようになる。

1. 冷凍機、<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He ガス循環ラインの組立及び真空引 (~16 時間)
2. 液体窒素を用いた冷凍機の予冷 (~20 時間)(77K)
3. 液体 He を用いた冷凍機の予冷 (~12 時間)(4.2K)
4. 真空ポンプを用いて液体 He を気化 (~3 時間)(1K)
5. <sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He ガスの循環開始 (~1 時間)(60mk)

このように 48 時間以上の準備時間が必要となるが、ビームタイム開始前までに手順 1, 2 をハッチ外で行い、ビームタイム開始と同

時に冷凍機をハッチ内で専用のステージ上に固定(図4)、再度ガス循環ラインの真空引きを行い(~6時間)、手順3-5にうつることで、ビームタイム開始から20時程度で冷却を完了することができる。



図4: 冷凍機設置の様子

本実験ではハッチ外で一度予備的に60mkまでの冷却と動作チェックを行い、ビームタイム開始前に液体Heの残量が0になるように調整、ビームタイム開始と同時にガス循環ラインと冷凍機を分断し、ハッチ内に移設するという方法をとった。液体Heが残っている状態で $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 循環ラインを分断することは非常に危険なためである。これにより手順3の液体Heによる冷却時間を短く抑えることができ測定時間に余裕ができる。

しかし今回の実験では冷凍機トラブルのため、液体窒素温度以上までの昇温を余儀なくされ測定までの準備に24時間以上余分にかかってしまう結果となった。本冷凍機内部のガス循環ラインには超流動Heを流すために非常に細くなっている部分がある。液体窒素温度以下では、そこに微量の空気が混入する

だけで、凍結、閉塞が起こる可能性がある。通常手順での冷却時は、ガス循環ラインは液体窒素フィルタを通して $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ ガス置換を行っているためにHeガス循環を行っているため閉塞する心配はない。しかし、循環ラインと冷凍機をハッチ内に移動する際に、このHeガスを回収したために、真空中に保たれていると思われた循環ライン内部になんらかの吸着ガスが入り込み、閉塞を起こしたものである。

このため72時間のビームタイム中、設置・冷却に24時間、測定36時間、昇温・撤去に12時間と予定してたのが、およそ12時間の測定時間となってしまった。

次回以降の測定では、液体He温度以上(4.2K~77K)で、He雰囲気中で移設を行うことで、このような不具合は回避できると考えられる、

#### 4 測定結果

初めの6時間では、素子中心を通ると思われる二方向において、20 $\mu\text{m}$   $\phi$ にコリメートした6KeVのX線マイクロビームによるスキャンを行った。熱飽和による検出器特性の低下を抑えるため、アルミニウム製のアテナニューエータにより、カウント数1.5cpst程度に抑え、14点 $\times$ 1000波形と7点 $\times$ 500波形の測定を行うことができた。スキャン結果の一例を(図5)に示す。波形は各点における平均的なエネルギーを持つ信号波形から求めた平均波形である。y0とy13よりも外側ではカウント数は1/10以下にまで落ち、ばらばらな波形のみが見られるようになったため、ここが有感面積の両端であると判断した。この幅はおよそ280 $\mu\text{m}$ に相当し、検出器アレイの大きさ320 $\mu\text{m}$ と比較すると小さい。これは両端の細かいアレイにおいてコンタクトの不良による動作不具合が起きていたと考えることができる。

各点における波形の立ち上がり、及び立ち下がりにおける減衰時定数は(図6)のようになった。特に立ち下がり時間においてはX線照射位置による違いが大きく表れている。中央のアレイ素子の方が熱浴との距離が長くな

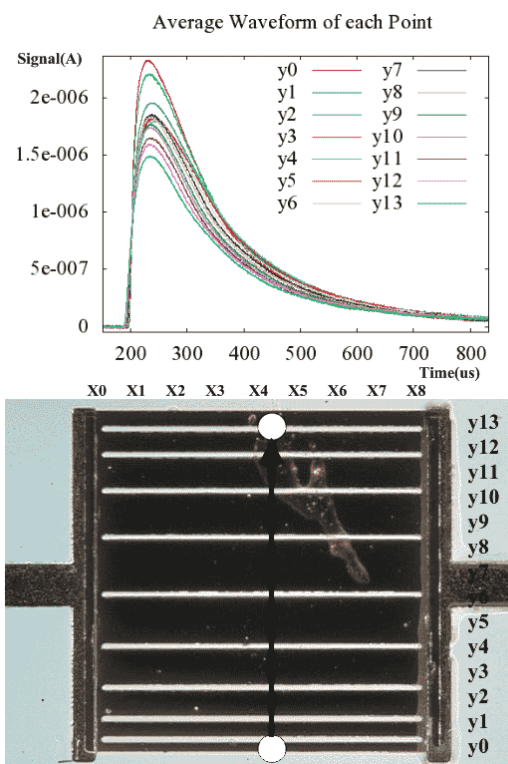


図 5: 各点における代表的な波形

るため、減衰が遅くなることが予想されていたが、結果は必ずしもそうとはなっていない。この原因として考えられる主な理由は、作成プロセス中での位置合わせの精度である。薄膜上の TES 超伝導体の位置は、そのまま低温熱浴までの熱的な距離となるため、正方形の薄膜上のアレイ素子の位置によって、電熱フィードバックの係数は異なり、また熱平衡状態における温度も変化し、電気抵抗や流れる電流は大きく変わってしまう。また同様に検出された信号の強度も位置による違いが大きかった (図 7)。

残りの 4 時間では、蛍光 X 線測定を行ったが、もともと信号の入射位置依存性の大きな素子あったため、エネルギー分解能は  $619\text{eV}@6.4\text{KeV}$  にとどまった (図 8)。

## 5 考察とまとめ

普段の測定と比較して無信号時のノイズがやや大きかった。これは普段の測定時とは装置の固定方法が異なったため、真空排気ポンプの振動が配管を通じて冷凍機に伝わってしまったのが原因であった。さらに本来冷

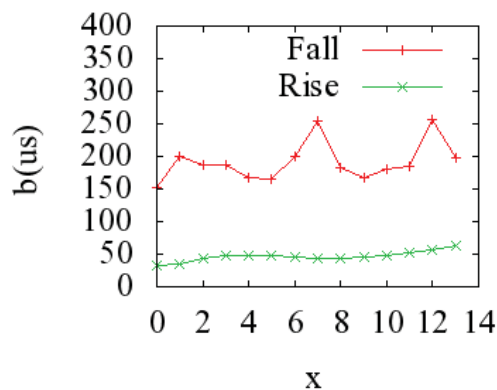


図 6: 各点における信号の時定数

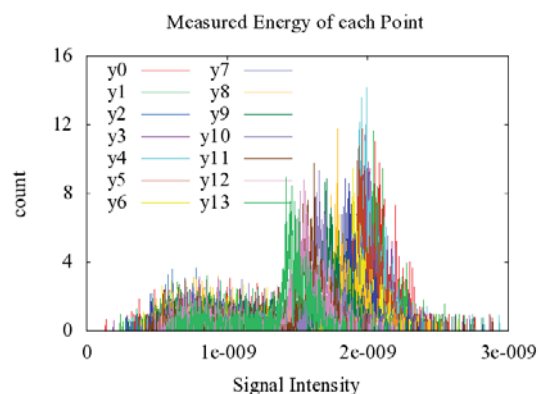


図 7: 各点における信号強度

凍機の温度が安定するまで、数時間おいてからの測定が望ましかったのだが、今回は最低温度到達後すぐからの測定となったことも原因として考えられる。

また設計上数十 cps での測定も十分可能であり、実際に一つの信号波形の長さは 1ms 程度であったが、アテニューエータを減らして数 cps 以上に計数率を上げた場合では、検出器のベース電流が大きく変化してしまった。これは検出器の温度が変化していることを示唆するものであり、検出器 (吸収率 1% 程度) を透過した X 線が冷凍機の冷却部に吸収され、温度上昇を起こしていたものと思われる。高いエネルギー分解能を維持しつつ検出器の吸収率を向上させることは困難であるため、冷却部と検出器の設計を大きく変更することが必要であると思われる。

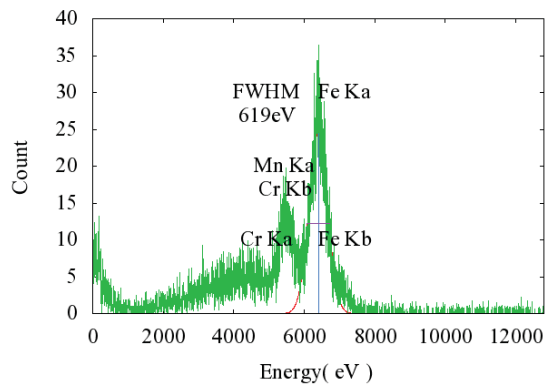


図 8: ステンレス試料を用いた蛍光 X 線測定の結果

検出器上のスキャンと蛍光 X 線スペクトル測定を行い、データを取得することはできたが、本実験の目的である、各測定点での波形のばらつきも大きく、本来の狙いであった波形とピクセルの間の厳密な関係を調べることは至らなかった。今回の実験であきらかとなった、ノイズ低減のための対策と、より高計数率での測定を行うための熱対策を十分に行なうことが必要である。