

## 論文内容の要旨

論文題目 **STUDY ON OPERATING POINT CONTROLLED  
SUPERCONDUCTIVE TES MICROCALORIMETERS**  
(超伝導転移端中での動作点を制御した TES マイクロカロリメータの研究)

氏名 全 伸幸

### 1. 緒言

超伝導の急峻な相転移現象を利用した超伝導転移端マイクロカロリメータ (TES: Transition Edge Superconductor) は、光子の入射によるフォノンの励起を高感度に検出することを動作原理とする放射線検出器である。従来、医療応用や工業材料の非破壊検査などの材料分析手法としては半導体検出器による蛍光 X 線測定が幅広く利用されてきたが、次世代の検出手法として TES マイクロカロリメータを用いることにより、より詳細な元素分析が可能となるだけでなく、化学種の動的な状態変化であるケミカルシフトを観測することも可能となる。例えば、近年目覚ましい発展を遂げている高輝度放射光と併用することにより、生体細胞への薬剤投与の影響、環境汚染物質の取り込みと新陳代謝の関わり、細胞内・細胞間の情報伝達物質の動きなどを詳細かつ定量的に捉えることも可能となり、多方面に多大なインパクトを与えるものと予想される。ところが、計数率という観点からは、現状の TES マイクロカロリメータでは不十分であり、一桁以上の改善が必要とされている。

一方、宇宙の地図を完成させることは、古代より人類が抱いてきた夢のひとつである。X 線を用いて見ることのできる宇宙の領域には、超新星爆発やブラックホールなどの極限状態が多く、宇宙の時空構造やその構造形成と密接に関係している。精密なプラズマ診断や X 線ドップラーシフトによる輝線の微細構造分析が可能であるという観点から、TES マイクロカロリメータは画期的な進展をもたらすものと期待されているが、依然、イメージング能力が不足しており、世

界各国の研究グループにより精力的に TES のピクセルアレイ化が行われている。

これらの背景を踏まえ、本論文では高計数率特性を有する多ピクセル型 TES マイクロカロリメータの開発を目指して研究を行った。TES の性能は、受光素子部の熱容量と密接に関係しており、応答速度とエネルギー分解能はともに、熱容量が小さい、すなわち受光素子部のサイズが小さいほど、向上する。我々は  $20\ \mu\text{m}$  というサイズをベースに TES の開発を行った。これは従来の TES 素子の  $1/100$  程度の大きさである。天体 X 線観測など、イベントが稀な用途への応用を考えた場合は、高計数率は必要とされないが、放射光施設における高輝度 X 線を用いた蛍光 X 線測定などの用途においては、小サイズの TES は計数率という観点からは有利ではない。そこで、本研究では、イメージングのためだけではなく、大受光面積を得るという視点にも立って、ピクセルアレイ型 TES の研究開発を行った。

## 2. ETF 動作の TES

X 線入射にともなう TES の温度上昇は高々サブ mK であるが、超伝導の転移領域においては極めて急峻な抵抗-温度特性を示すため、高感度に温度変化を検知することができる。TES は一般的に、電熱フィードバック (ETF: Electro-Thermal Feedback) と呼ばれるシステムを用いて動作させる。TES には擬似的な定電圧バイアスが印加されており、TES で発生するジュール熱を電熱的にフィードバックさせることにより、温度を超伝導転移領域に安定に保持させる。X 線入射があったときも同様であり、上昇した TES の温度分だけ、TES のジュール熱が電熱的に減少し、バイアス回路を流れる電流変化を読み取ることにより、入射エネルギーを決定している。

ETF とは、熱入力により増加した TES の熱量と同じ量だけ TES のジュール熱を減少させ、熱入力の前と同じ状態に冷却するシステムであるが、それはあくまでも見かけ上のことである。実際に TES を冷却しているわけではなく、微小な量ではあるが、熱入力によって TES は温められる。通常の場合なら、熱入力の前後で、TES の温度は変化しないと考えて差し支えない。ところが、高輝度放射光など、高計数率下でフォトンを受光する場合は、個々のフォトン入射がもたらす温度上昇はわずかであっても、これらが蓄積することにより、元のバイアス平衡点からのズレが生じることが考えられる。TES 素子を並列に接続したピクセルアレイ型 TES の場合も同様のことが危惧される。フォトン入射にともなうわずかな温度上昇は、入射した素子だけではなく、周辺の素子にも及ぶことになり、その影響は計り知れない。この場合も、わずかな温度上昇が蓄積しやすいケースであり、各素子のバイアス平衡点が揺らぐことになる。

## 3. LTSSM によるピクセルアレイ型 TES の信号波形評価

超伝導受光素子としてイリジウムを用い、素子同士を並列に接続することによりピクセルアレイ型 TES マイクロカロリメータを実現している。我々は、ピクセルごとの信号を読み出す手段として、波形分割方式 (WDM: Waveform-Division Multiplexing) と呼ばれる、独自の信号多重化方式を採用している。全ピクセルからの信号を 1 つの SQUID アンプで読み込み、応答信号の波形の違いを元に、ピクセルの弁別を行うというものである。

WDM方式のコンセプトに基づき、ピクセルごとに異なる信号波形を取得するため、各素子のサイズが異なる10ピクセルのアレイ型TESを開発した。ピクセルごとの熱容量が異なるため、同一エネルギーの入射に対して様々な波高値が得られるためである。しかしながら、極低温走査シンクロトロン顕微鏡法(LTSSM: Low Temperature Scanning Synchrotron Microscope)により、コリメートしたX線ビームを用いてピクセルごとの応答を調査したところ、期待されたような信号波形の違いを見ることはできなかった。これは、TES素子同士が熱的な相互作用をしていることの顕れであり、ETFという自ら電熱制御を行う機構に内在する問題を指摘した結果である。

#### 4. External-ETF制御による絶対パワー計測用TESの開発

レーザパワーの絶対値を決定することは、産業応用上、極めて重要である。しかしながら、現在広く用いられている低温ラジオメータは、ダイナミックレンジが狭く、応答時間も数分と非常に長いため、動作点のドリフトが生じやすい。

TESをラジオメータとして応用する際の基本的な原理は従来と同様である。TESに未知のパワーが入力されると、ETF機構によって、TESのジュール熱が電熱的に変化する。その変化分を読み取ることにより、未知のパワーを決定するが、しかしながら、パワーの絶対値は、極めて厳密に求めなければ意味がない。そこで、熱入力の有無に関わらず、転移端中でのTESのバイアス点の揺らぎを抑える機構が必要となる。これは、TESの温度揺らぎによるSQUID出力を、ヒータの入力にフィードバックすることにより実現され、Temperature Locked Loop (TLL)と呼ばれる。外部の系から電熱制御を行うTLL機構によって、転移端中でのTESの動作点を制御することは可能となり、数10 nWから300  $\mu$ Wという広いダイナミックレンジにわたって、熱揺らぎを1.5 nWという極小の値に抑えることに成功した。

#### 5. 小ピクセルアレイ型TESの動的特性評価

素子のサイズが20  $\mu$ mという小サイズのアレイ型TESを開発した。1素子あたりの熱容量は $C = 1.0$  [fJ]と極めて小さく、エネルギーの入射に伴って素子の温度は大幅に上昇し、いったん常伝導領域まで到達したあと、元の動作点に戻ることになる。そのため、信号の頂点付近は飽和することになる。一方、素子のサイズに由来して、信号の立ち上り・立ち下りともに数 $\mu$ sという高速な応答を示し、擬デジタルな応答波形が得られることになった。このため、信号の応答特性は、波形のパルス幅で決定されることになるが、そのパルス幅は数10  $\mu$ sと依然速く、従来のTESよりも一桁程度の応答速度の向上が見られた。

さらに、出力信号のパルス幅は、信号の時間積分値と良好な直線性を示した。信号のパルス幅を用いてエネルギースペクトルを形成したところ、積分値を用いたスペクトルよりも、30%程度、エネルギー分解能が向上した。このデバイスの複雑な構造のため、エネルギー分解能は劣化しているが、デジタルモードで動作させるという、TESの新たな信号読み出し方式を示唆するものである。

## 6. 結言

本研究では、高計数率特性を有するピクセルアレイ型 TES を目指して研究開発を行った。LTSSM 法により、ピクセル間に熱のクロストークが存在し、ETF のみではピクセルごとのバイアス点を制御しきれないことが明らかとなった。一方、外部の系より TES 素子のバイアス点を制御する External-ETF 機構を用いて、レーザパワーメータを開発した。パワーメータの性能は向上し、External-ETF 機構により転移領域中の動作点を制御することは可能であることが示された。External-ETF 制御によるピクセルアレイ型 TES 開発の礎となるものである。

また、小サイズのアレイ型 TES の性能評価を行った。サイズ効果にともない擬デジタル信号が得られたが、その応答速度は従来の TES よりも一桁程度向上していた。デジタル動作モードのピクセルアレイ型 TES と External-ETF 機構を組み合わせることにより、同一のデバイスでありながら、大受光面積を必要とする高輝度放射光下における材料化学分析と、X 線天文学などのイメージング特性を必要とする用途の両方に適用できることが示された。