

極低温放射エレクトロニクスラボ (Cryogenic Radioelectronics Lab.)

研究項目：放射線励起による量子作用の高効率検出技術に関する研究
研究期間：平成8年度～12年度

1. はじめに

放射線検出技術は、原子力、放射光、天文観測、エレクトロニクス産業、バイオサイエンス、医療などの分野で重要な基盤となるものである。放射線検出技術に常に求められているのは、各分野から寄せられる検出器性能向上の要請に応えることと、新たな検出器開発によるシーズ提供である。放射線の中でもX線光子の検出は、広範な分野に関係する。要求されるX線検出器の仕様は、エネルギー分解能、時間分解能、エネルギー範囲(波長範囲)、位置分解能に分けられる。我々が開発している超伝導現象を利用した放射線検出器は、エネルギー分解能、エネルギー範囲において、従来の半導体検出器等の性能を大きく凌駕できるものである。

超伝導現象を利用したX線検出器は二種類に分けられる。一つは、量子力学的効果により直接光子エネルギーを電流に変換して測定する電子励起型超伝導検出器である。もう一つは、光子吸収による吸収体の温度上昇を測定する光熱変換型超伝導検出器である。

2. 電子励起型超伝導検出器

電子励起型超伝導検出器は、超伝導エネルギーギャップ(2Δ)を光子エネルギー測定のスケールとして用いて、量子力学的に励起されるキャリア-(クーパ対が壊れて生成される準粒子)を超伝導トンネル接合(superconducting tunnel junction (STJ))で測定する。STJはジョセフソン接合と同じ構造である。超伝導の特徴は、エネルギーギャップがmeVと非常に小さく、このギャップが超伝導電極の微視的な欠陥に左右されずに、巨視的なスケールで一定に保たれることである。 2Δ は、Siのバンドギャップに比べて3桁程度小さいので、検出器のエネルギー分解能は、半導体検出器より統計的に30倍程度良くなることが期待される。エネルギー分解能の限界は、半導体の $\sim 120\text{eV}@6\text{keV}$ に

対して、STJではNbを吸収体とした場合、 $\sim 4\text{eV}$ と分光結晶を使った波長分散分光に迫る値である¹⁾。実験的に実現されているのは、検出効率の点で実用的ではないが、Alを吸収体とする検出器の12eVである²⁾。時間分解能は、準粒子寿命あるいはキャリア収集時間に相当する準粒子トンネル時間によって決まり、1-5 μs である。エネルギー範囲は、小さなギャップのため、X線領域から近赤外域の広い範囲をカバーでき、単一光子のエネルギー測定が可能である。

STJ検出器の欠点は、準粒子寿命がトンネル時間と同程度であることである。このため、半導体検出器のように全てのキャリアを瞬時に集めることが困難である。したがって、キャリア損失過程があると顕著に検出器の性能に影響する。これは、検出器出力の空間的不均一性を大きくする原因となる。このため、準粒子の損失過程と空間不均一性を評価することが重要となる。

我々は、今までにSTJ検出器作製と3つの極低温走査型顕微鏡による検出器評価を実施してきた。検出素子作製は、電総研超伝導エレクトロニクスグループの有するNb/Alジョセフソン接合に関するノウハウを基に、X線の検出に必要なリーク電流の少ない(品質因子=サブギャップ領域のダイナミック抵抗/常伝導抵抗 $>10^6$)を実現して、X線検出に十分な品質を得た。極低温走査型顕微鏡は、検出器を超伝導状態に冷却して、空間分布測定が行えるものであり、極低温走査型電子顕微鏡(Low Temperature Scanning Electron Microscope (LTSEM))、走査型SQUID顕微鏡 Scanning SQUID Microscope (SSM)、極低温走査型放射光顕微鏡(Low Temperature Scanning Synchrotron Microscope (LTSSM))である。LTSEMは、X線光子の代わりに制御性のよい電子線を使って、検出器応答の空間分布測定と短い電子パルスによる時間分解測定を行うことができる。SSMは、ミクロンサイズの磁場検出コイルとSQUIDの組み合わせで、2次元磁場分布を測定することができる。

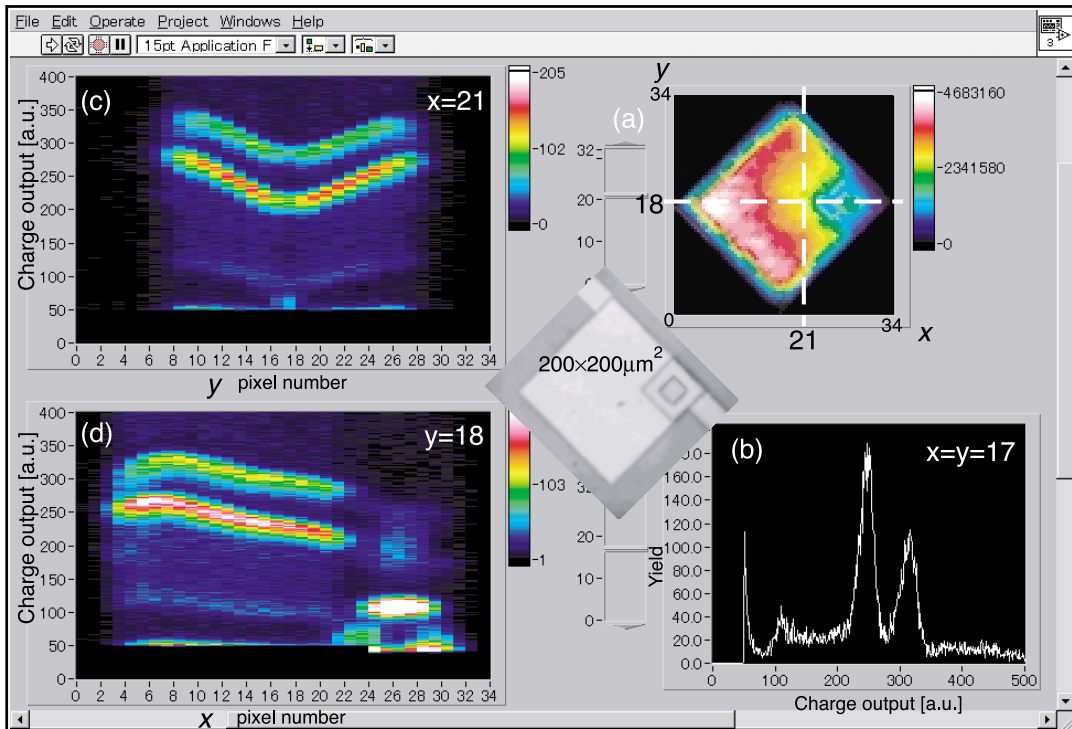


図1 極低温放射光顕微鏡の測定例。右上の(a)は 検出された全電荷を黒から白の色階調で示したものである。全電荷は、右下の(b)に示されるエネルギースペクトルを積分した量である。左上の(c)は $x=21$ でのy方向のX線全吸収ピークの電荷出力分布、左下の(d)は $y=18$ でのx方向の出力分布である。

これにより、準粒子損失の原因となる磁束量子の観察が可能である³⁾。LTSEMとLTSSMの結果については、文献4と5を参照いただきたい。

LTSSMは、電総研(TERAS)あるいは高エネルギー加速器研究機構(PF)の放射光を使って、 $\sim 0.4\text{K}$ の極低温に冷却された検出器のX線マイクロビームによる2次元イメージング診断を可能にした装置である。従来、放射性同位元素X線源(^{55}Fe)と固定されたピンホールを使ったX線のコリメーション実験はあるが⁶⁾、検出器上を自由に走査できるものは初めてである⁷⁾。

図1は、 3keV $5\mu\text{m}$ のX線マイクロビームで、中央の写真の $200 \times 200\mu\text{m}^2$ のNb/Al/AIOx/Al/Nb接合検出器を測定したものである。この図から、右隅のコンタクトホールでの出力が低いことや、コンタクトホールに向かって電荷出力が低下していく様子が明らかになった。これは、準粒子が拡散により電極リードへ逃げるためであり、コンタクトホールとリード線が準粒子損失の一因であることが分かる。図2は、リード線への準粒子拡散を防ぐために、極力小さくしたコンタクトホール($4\mu\text{m}$ 角)とリード線($4\mu\text{m}$ 幅)をもつ検出器の 6keV における測定例である。この場合、コンタクトホー

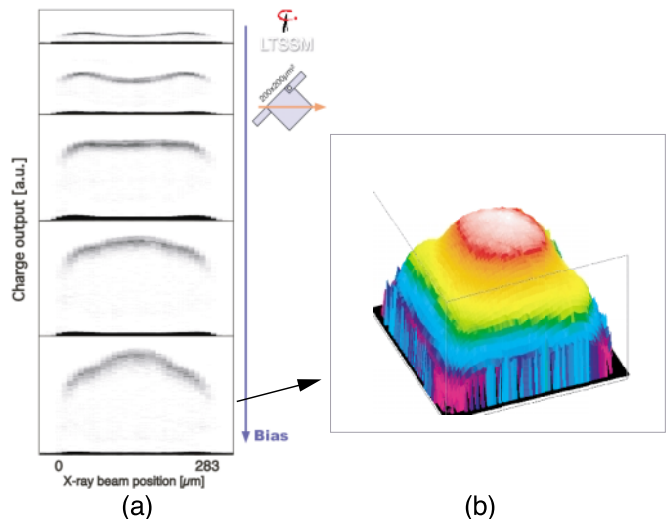


図2 X線全吸収ピーク空間分布のバイアス電流依存性(a)と検出された全電荷の3次元プロット。

ル付近での出力低下は見られなくなる。図2(a)は、X線全吸収ピークの対角線方向分布のバイアス電流依存性を示したものである。(b)は、最大バイアス点($eV_b \approx \Delta$)での検出全電荷の3次元プロットを示す。図2からは、空間分布はバイアス点により大きく変化することが分かる。この現象はLTSSMによって初めて明らかになっ

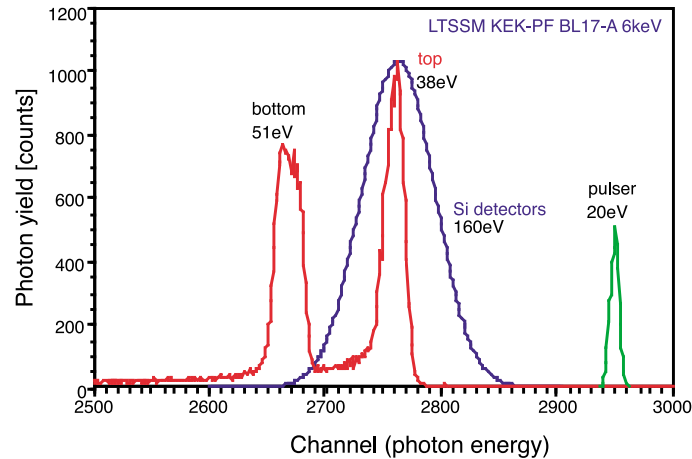


図3 検出器中央での6keV X線に対するエネルギースペクトル
上部電極と下部電極での吸収イベントが分離して観測される。

たもので、従来の静的な準粒子トンネリングのモデルでは説明できず、新たな検出器動作原理モデルの必要性を示している。なお、検出器中央にて得られた最良のエネルギー分解能は、図3に示す38eV @ 6keVであり、半導体の分解能を大きく上回っている。この値は、0.4Kで動作するNbベースの接合としては世界最高水準である。また、半導体検出器に比べて、桁程度高い計数率まで対応可能であることを確認している。

3. 光熱変換型超伝導検出器

光熱変換型超伝導検出器であるカロリメーターのエネルギー分解能は、検出器の熱容量、ベース温度、温度計の感度によって決まり、原理的には1eV以下のエネルギー分解能も可能である。このためには、0.1K以下のベース温度が必要とされる。従来のカロリメーターの欠点は、光子吸収による温度上昇がベース温度に戻るのに時間が掛かり、数msの時間分解能しか得られないことである。最近注目されている超伝導カロリメーターでは、温度上昇の測定に、常伝導-超伝導転移を利用した超伝導転移端センサー (superconducting transition edge sensor (TES)) を用いる。TESカロリメーターの特徴は、TESによる電気熱負帰還を使って、高速化が可能となることである。また、高感度の温度計により、吸収体の熱容量などの設計上のパラメーターに余裕ができる。また、設計の仕方によって、γ線から近赤外まで単一光子のエネルギー測定が可能である。TESカロリメーターでは、4.5eV @ 6keVという非常に高い

エネルギー分解能が報告されている⁸⁾。

我々は、TESカロリメーターについては、Ti/Au膜をTESとして採用して近接効果によるTESの超伝導転移温度制御と熱パラメーター測定を実施してきた⁹⁾。また、図4に示すアレイ化に有利な新たな素子構造を提案して¹⁰⁾、この素子とSQUIDアレー電流アンプを用いたX線検出に成功している。

4. まとめ

極低温検出器の開発は、主に暗黒物質探索やX線天文学といった純粋科学分野からの要請に応えるために進められてきた。しかしながら、現在、純粋科学以外にもエレクトロニクス産業、バイオ工学、医療といった幅広い分野への応用を念頭に置いた研究開発が進められるべき時期に来ていると言える。超伝導X線検出器は、他では実現できないパフォーマンスと引き換えに1K以下、あるいは0.1K以下の超低温環境を必要とする。現在、冷凍技術の進歩により4Kクラスの寒剤フリー冷凍システムが実現されており、これと断熱消磁冷凍機を組み合わせた0.1K以下の冷凍システムも登場し始めている。このような冷却システムにより、超伝導検出器の応用分野が飛躍的に広がると予想される。

我々は、エネルギー分解能向上により、蛍光X線分析で化学シフトの観測が可能となる数eVのエネルギー分解能達成を目指す予定である。位置分解能は、超伝導検出器のこれからの課題である。半導体のX線検出器で実現されているアレイによる位置分解測定のレベ

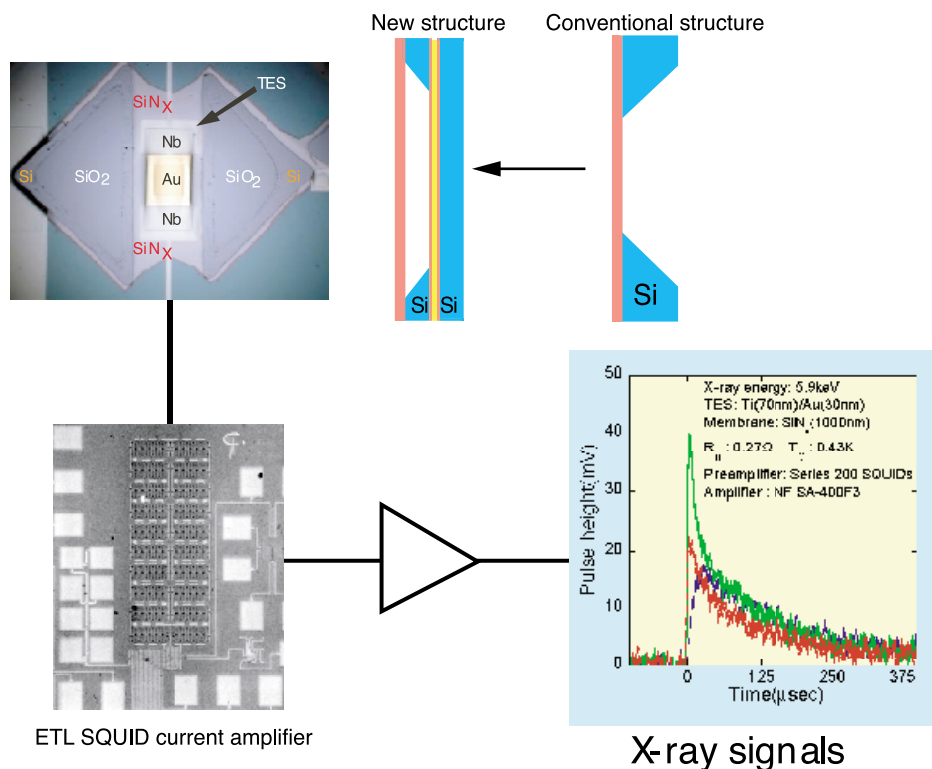


図4 新しい素子構造の超伝導転移端マイクロ
カロリメーターによるX線検出実験。

ルに達するには、読み出し系まで含めたブレークスルーが必要である。

化学状態分析、不純物分析、X線天文衛星といったニーズに応えるとともに、X線から赤外の広い波長領域における超伝導光子センシング技術を確立して、従来の検出器では不可能であった光子利用の道を開拓したいと考えている。本テーマは、光技術領域にて推進予定である。

参考文献

- 1) M. Kurakado : Nucl. Instrum. Methods **196**, 275 (1980).
- 2) G. Angloher *et al.* : Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A **444**, 214 (2000).
- 3) M. Ohkubo *et al.* : J. Appl. Phys. **85**, 595 (1999).
- 4) M. Ohkubo *et al.* : Phys. Rev. B **54**, 9484 (1996).
- 5) M. Ohkubo *et al.* : Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A **444**, 237 (2000).
- 6) P. Verhoeve *et al.* : Appl. Phys. Lett. **72**(25), 3359 (1998).
- 7) 極低温放射光顕微鏡 : ETL NEWS 1991.11, vol. 598.
- 8) K. D. Irwin *et al.* : Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A **444**,

184 (2000).

- 9) M. Ukibe *et al.* : Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A **444**, 257 (2000).
- 10) 田中他 : 第47回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 (2000).

当該研究担当者等

1) ラボ構成員(総数10名)

職員(8名) 大久保雅隆*、浮辺雅宏、小池正記、座間達也 (量子放射部)、平山文紀 (基礎計測部)、小柳正男 (電子基礎部)、東海林 彰 (電子デバイス部)、小林直人 (量子放射部)

職員以外(2名) ハラルドプレスラー、中村龍也

2) その他の研究協力者

R. P. Huebener (チュービンゲン大学)、片桐政樹 (日本原子力研究所)、中沢正治 (東大)、田辺圭一 (超電導工学研究所)、茅根一夫 (セイコーインスツルメンツ)

*ラボリーダ