

研究課題別評価書

1. 研究課題名

高速超伝導転移端マイクロカロリメータの開発

2. 氏名

大野 雅史

3. 研究のねらい

超伝導体を用いた放射線検出器は既存半導体検出器の分光性能を大きく超える優れた X 線リアルタイムスペクトロメータであり、特に放射光応用あるいは X 線天体観測等の先端科学領域において絶大な威力を発揮するものと期待されている。とりわけ超伝導体の急峻な転移領域を利用した温度計 (TES: Transition Edge Sensor) と電熱フィードバック (ETF: Electro Thermal Feedback) を組み合わせた ETF-TES マイクロカロリメータはシリコン半導体検出器より 2 桁以上優れたエネルギー分解能を実現する。しかしながら、現状では TES は有感面積 (ピクセル数)、応答速度に制約があり、実用レベルにはまだ達していない。このうち TES の応答速度が十分でない一つの理由としては、電圧バイアスにより動作させた TES がバイアス点の安定化と X 線検出の両方の機能を担い、X 線検出のための最適な動作条件を満たさないという点にある。本研究ではエネルギー分解能を劣化させずに、速い応答速度と高い放射線吸収効率を実現する TES マイクロカロリメータの実現を目指し、TES の機能の一部を自己温度安定機能を有する吸収体にもたせた独自の TES ピクセル素子構造を提案、実証を進める。さらにこの TES ピクセルをアレイ化し、各ピクセルを電氣的に並列にバイアスする独創的な TES アレイ駆動方式と周波数分割型 SQUID マルチプレクサ信号増幅システムを適用して信号読み出しを行う大面積 TES ピクセルアレイイメージングを実現することを目標とする。

4. 研究成果

[自己温度安定機能を有する放射線吸収部と温度センサ部を分離した新 TES 構造]

極低温に冷却し比熱を極小化した物質に放射線を吸収させ、生じる比較的大きな温度上昇を、超伝導-常伝導転移領域における急峻な温度抵抗変化を用いた高感度な温度センサにより電気信号に変換して放射線のエネルギーを測定するのが TES マイクロカロリメータの検出原理である。急峻な温度抵抗変化を示す超伝導転移領域中においてセンサを安定に動作させるためには、TES を定電圧バイアス下で駆動させ、この時生じる強い電熱フィードバックを利用する。TES に一定の電圧を印加すると TES の転移領域中の抵抗によりジュール加熱が生じ、これとセンサから外部へ逃げる熱量とが等しくなる点で熱的な平衡状態が生じる。このような系に放射線が入射されると TES の温度が上昇し抵抗値は転移曲線に沿って上昇するが、定電圧バイアスされているためにセンサを流れる電流が減少する。すると TES 内のジュール発熱量も減少し、系が冷却される

方向に負の熱的なフィードバックが生じる。したがって元のバイアス点への帰還が促進され、バイアス点の安定化と応答時定数の高速化が図られることとなる。光子入射による TES の電流減少は微小変化であるために一般的に超伝導量子磁束干渉素子(SQUID)を用いて低インピーダンスな電流増幅を行うことにより読み出され、これより入射した光子1個ずつのエネルギーが極めて高精度に検出されることとなる。本研究実施者等はこれまでにイリジウム/金近接 2 重層超伝導薄膜を用いた TES において 5.9keV の X 線に対して 6.9eV のエネルギー分解能を達成している。しかしながら、これまで試作した検出素子においては、超伝導薄膜が温度センサと放射線吸収体の役割を兼ねており、その厚さは高々100nm 程度であり 6keV 程度のX線の吸収効率は非常に低いものであった。今後、TES の応用を広げる上で、エネルギー分解能の向上のみならず、検出効率の向上と計数率(応答速度)の改善は必要不可欠である。現在、国内外の TES 開発研究グループにおいて、超伝導薄膜温度センサ上に放射線吸収効率の高い錫やビスマス製の金属膜吸収体を覆いかぶせるような構造(マッシュルーム吸収体構造)を持つ素子の開発が進められているが、このような構造の放射線吸収体においては、光子入射位置により信号波形が変化し分光特性が損なわれ、さらに応答時定数も劣化する現象が明らかになってきている。そこで、本研究では、マッシュルーム吸収体構造とは異なり、放射線吸収部と超伝導温度センサを分離し、これらを電氣的に直列接続した新規 TES 構造を提案した。図 1 に新規 TES 構造の原理検証を目指した試作検出素子を示す。これはイリジウム/金近接 2 重層からなる 25 μm 角の極めて小さな超伝導温度センサ部に 150 μm 角程度の金膜製の放射線吸収部を電氣的に直列接続したものである。このような構造の場合、放射線吸収体中にも TES バイアス電流が流れてジュール発熱が生じている。吸収体での光子吸収による熱が超伝導薄膜温度センサ部に伝わり TES としての抵抗変化が生じれば、瞬時に吸収体内を流れる電流が減少し、これに伴いジュール発熱量も減少するため熱的フィードバックが発生して冷却が促進される。したがってこれまで超伝導薄膜温度センサに集約されていた自己温度安定機能(バイアス点安定化機能)の一部あるいは大部分を放射線吸収部に担わせることで放射線吸収部自体がアクティブに動作すること、つまり吸収体内部での冷却が促進され高速応答に寄与することとなり、一方、温度センサ部は極度に小型化され、超伝導薄膜内の

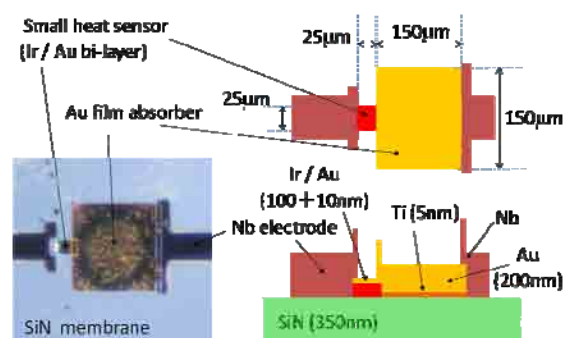


図 1: 放射線吸収部と温度センサを分離、直列接続した新規 TES 構造と試作素子。

図 1 に新規 TES 構造の原理検証を目指した試作検出素子を示す。これはイリジウム/金近接 2 重層からなる 25 μm 角の極めて小さな超伝導温度センサ部に 150 μm 角程度の金膜製の放射線吸収部を電氣的に直列接続したものである。このような構造の場合、放射線吸収体中にも TES バイアス電流が流れてジュール発熱が生じている。吸収体での光子吸収による熱が超伝導薄膜温度センサ部に伝わり TES としての抵抗変化が生じれば、瞬時に吸収体内を流れる電流が減少し、これに伴いジュール発熱量も減少するため熱的フィードバックが発生して冷却が促進される。したがってこれまで超伝導薄膜温度センサに集約されていた自己温度安定機能(バイアス点安定化機能)の一部あるいは大部分を放射線吸収部に担わせることで放射線吸収部自体がアクティブに動作すること、つまり吸収体内部での冷却が促進され高速応答に寄与することとなり、一方、温度センサ部は極度に小型化され、超伝導薄膜内の

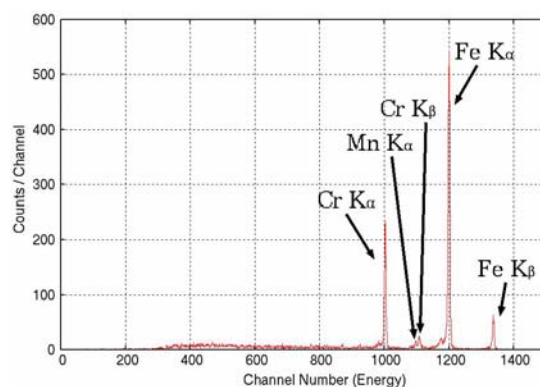


図 2: SPring-8 にて放射線吸収部と温度センサを分離、直列接続した新規 TES 構造の試作素子で検出したステンレスサンプルの蛍光 X 線スペクトル

温度分布はほぼ完全に除去される(無視できる)ために理想的な電流信号生成機構として機能することから優れたエネルギー分解能が期待できる。SPring-8 BL01B1 において、放射光をステンレスサンプルに照射し、発生した蛍光X線を本試作素子を用いて測定した。得られた蛍光X線スペクトルを図 2 に示す。ステンレスに含まれる元素に起因した特性X線のエネルギーピーク Cr K α (5415eV), Mn K α (5899eV), Cr K β (5947eV), Fe K α (6404eV), Fe K β (7058eV)が分離できている。なお、X線検出波形の立下り時定数は 200 μ s 以下、エネルギー分解能は 6.4keV において 29.9eV(FWHM)が得られており、本素子構造において優れた分光特性を有する蛍光X線分析が可能であることを実証した。

[TESピクセルアレイの作製とアレイ素子多チャンネル信号読み出し回路の開発]

TES が高エネルギー分解能を得るには入射エネルギーがフォノンに変換され、それが超伝導体薄膜全域に拡散し十分な温度上昇をもたらすことが重要となり、そのため有感面積が数 100 μ m 四方以下の非常に狭いものに限られ、1 つのピクセルだけではほとんど実用にはならない。そこで小さなピクセルを多数並べた TES アレイ検出器の開発を進め、さらに個々のピクセルからの信号情報を元にイメージング検出器として発展させる試みとして、本研究実施者はこれまでに超伝導 Ir ピクセル 10 個からなる 1 次元 TES ピクセルアレイ検出器を試作し、13eV 程度の高エネルギー分解能と全イベントの入射ピクセル位置を特定することに世界で初めて成功している。このイメージング TES は全ピクセルに並列バイアスを適用して各ピクセルからの信号を合わせて 1 つの SQUID アレイを用いた回路で合理的に信号を読み出し、各ピクセルからの出力信号波形を位置に応じて変化させ、SQUID で得られた信号波形からその位置を求めようという独創的な発想に基づいたものである。本研究では TES の有感面積拡大を図るため前項にて動作実証を済ませた常伝導放射線吸収領域/超伝導温度センサ部分離型ピクセルのアレイ化を進めた。図 3 に示した試作アレイ素子は、複数(図 3 では 10 個)のピクセルを同時に電気的に並列にバイアスし、それらのピクセルを流れる信号電流を合算して読みだすものであり、金膜の極小超伝導温度センサ部の大きさを意図的に変化させてある。この極小超伝導温度センサの形状、大きさの違いに起因する熱特性の微妙な変化が放射線入射信号波形に反映されることから、詳細な信号波形解析により各々のピクセル入射信号の弁別を可能にする。本研究では、冷凍機極低温ステージ上にこのような並列バイアスピクセルアレイ素子をさらに複数組並べ、周波数分割型 SQUID マルチプレクサの適用をすることで、これらアレイ素子を同時に駆動させ信号読み出しを行い、大規模 TES ピクセルイメージングの実現を目指している。周波数分割型 SQUID マルチプレクサは TES ピクセルと LC フィルタを組み合わせ、各 TES ピクセルを異なる周波数で AC バイアスし、各ピクセルからの電流を合算して一つの SQUID にて信号増幅を行った上で駆動周波数毎に信号を分離して各ピクセルでの入射応答を検出する方式であり、UC Berkeley (UCB) の Adrian Lee 等はこの方式にて赤外天文観測用 TES ボロメータアレイにおいて動作実績を有し世界最先端の技術を有している。このマルチプレクサをX線単一光子検出用 TES に適用するためには、X線入射応答信号が数百 μ 秒以下の時定数をもつ指数減衰波形となり非常に速い

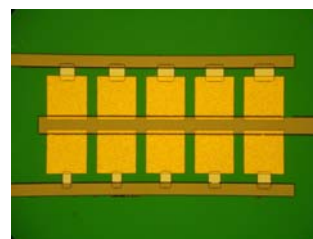


図 3: 作成した常伝導放射線吸収部/極小超伝導温度センサ部分離型 10 ピクセル並列バイアスアレイ素子

ため、分割する個々の周波数バンド幅が 1MHz 程度必要となり、例えば 12 ピクセル同時に読み出す場合は $1 \times 12 = 12\text{MHz}$ 程度の帯域にて読み出し回路が安定に動作することが必須となる。本研究実施者は UCB にて Adrian Lee 等の協力を得て SQUID マルチプレクサ読み出し回路を試作し回路のループゲイン周波数特性を精査した(図 4 参照)。その結果、熱流入を抑制しつつ SQUID と室温増幅回路間の配線長を最小限にし、浮遊インダクタンスの小さい LC フィルタを選択し使用することで回路の周波数帯域を大幅に拡大できることが明らかになった。TES ピクセルアレイを並列バイアスにより駆動する信号読み出し原理と周波数分割型 SQUID マルチプレクサ動作原理は全く異なるため、これら 2 つの方式を組み合わせることで大規模 TES アレイイメージングが実現可能になると考えられる。

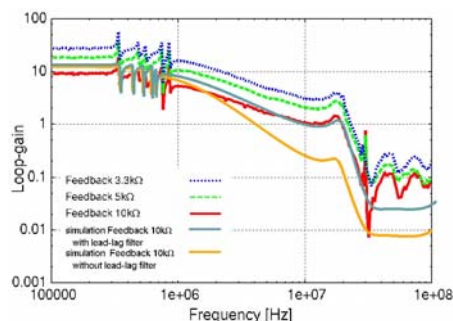


図 4: パークレーにて試験した 8ch 周波数分割型 SQUID マルチプレクサコントローラ制御ボードと SQUID マルチプレクサ回路ループゲインの周波数特性

5. 自己評価

超伝導転移端センサの高性能化を目指した検出素子開発研究では、近年諸外国において、超伝導薄膜上に常伝導金属製パターンを形成することで、常伝導金属直下のセンサ領域の超伝導転移温度を低下させ、つまり意図的に常伝導状態を保たせ、センサを流れる電流経路を制限することにより、高エネルギー分解能化を狙うこと、そしてこの常伝導金属パターン上にマッシュルーム状放射線吸収体を搭載することで、超伝導薄膜領域内の感度ムラがエネルギー分解能劣化に響かないようにする手法が主流になりつつある。本さきがけ研究では、検出性能スペックとしてエネルギー分解能を劣化させずに、高速応答かつ高放射線吸収効率を目指してきたが、その根底にある開発意図の原点は、上述のような電流経路を制限すること、つまり折角、温度感度(信号生成能力)を持つ超伝導体の一部分をわざわざ殺してまで、低ノイズ化を図ろうとする他研究グループの手法に疑問を抱き、これまで集約しすぎていた超伝導薄膜センサ内部の役割をシンプルに整理することで、超伝導センサの能力をフルに引き出せる手法を編み出そうということにあり、それゆえ、独自の放射線吸収領域と超伝導温度センサ領域部に分離し電熱的に直列接続した新規超伝導転移端センサ素子構造を着想するに至った。本研究期間内において、エネルギー分解能では、まだ従来の構造を持つ検出素子を超えるには至っていないが、新規素子構造の原理検証、動作実証には成功しており、放射線吸収領域内に信号電流を流し、自己温度制御機構を機能させるという本研究の最大の意図は達成できたと考えている。現在、本素子構造を持つ作製素子のエネルギー分解能劣化の主たる要因は、図 1 の素子写真において放射線吸収領域金薄膜上に現れている模様が示すことから、作製薄膜の不均一性および微細パターン形成等における素子作成プロセスの不完全性によるところが大きいと考えられる。しかしながら、このような作製プロセス上の諸問題は日々、試行錯誤を経て着実に解決してきており、たとえば図 3 のアレイ素子写

真に示すとおり、最近(研究終了直前)の作製素子は目視による観察でも明らかに改善が認められるほどである。今後、さらなる微細パターン形成の歩留まり率向上が進めば、製膜の均質性のみならず、放射線吸収領域と超伝導温度センサの熱結合状態を改良するような熱特性改善が見込まれ、本研究で提唱した新規素子構造が検出素子全体を効率良く機能させられる分、エネルギー分解能、検出効率、応答速度全てにおいて既存の手法より秀でたスペックを達成できるものと期待している。

また、本研究期間後半においては、大規模超伝導転移端センサアレイの信号読み出し実現のために、並列バイアスを適用して動作させるアレイ素子の開発と並行して、本研究開始当初は想定していなかった周波数分割型 SQUID マルチプレクサの開発を、UC Berkeley と共同にて進めることができ、ようやく、X線分析の実用レベルとなりうる有感面積、ピクセル数を達成する見通しが立てられるようになった。現在、周波数分割型 SQUID マルチプレクサにおいて世界最先端のレベルを誇る UC Berkeley の技術を習得し、本格的にこの技術を世界ではじめてX線検出用大規模アレイ読み出しに応用することを前提に開発研究を実施できた意義は大きいと考える。

6. 研究総括の見解

超伝導薄膜の転移領域の大きな抵抗変化を利用して、ユニークかつ有用なカロリメータの実現を狙うものである。従来に比べて格段に大きなピクセル数を持つとともに、シリコン半導体検出器より2桁以上優れたエネルギー分解能の実現を目指すチャレンジングな研究である。

主たる成果は次の2点である。

1. 独創的な放射線吸収部と超伝導温度センサとを分離した分離型ピクセルを開発し、蛍光 X 線分析において 6.4keV におけるエネルギー分解能 29.9eV、X 線検出波形の立下り時定数 $200 \mu s$ の分光特性を実現した。
2. アレイ化した分離型ピクセルの多チャンネル信号の読み出し回路を検討し、並列バイアス方式と周波数分割型 SQUID マルチプレクサ方式を組み合わせた方式により、各ピクセルの信号波形の同時処理が可能である見通しを得た。

TES マイクロカロリメータの開発と並行して、読み出し技術の習得等を行い、両者の特徴を生かしつつ最適化を図り、実用性の高い大規模 TES アレイイメージング実現へ開発を推進した努力を高く評価する。

これらの成果は8篇の原著論文にまとめられ、2件の招待講演で発表された。

TESアレイについては詰めるべき点が残っており今後のデータの積み上げに期待したい。集積化に関しては、どこまでの集積度が達成されたらどのようなメリットがあるのか、そのための技術課題が何であるかの一段の詰めが必要である。世界をリードするマイクロカロリメータの実現を期待したい。

7. 研究成果リスト

A. さきがけ個人研究者主導で得られた成果で主なもの

- (1) 論文(原著論文)発表

論文(国際)

- M. Ohno, H. Sato, K. Mishima, T. Ikeda, H. M. Shimizu, “Low Energy Particle Detector Using a Superconducting Transition Edge Sensor”, *IEEE Trans. App. Supercond.* **2007**, 17, 2, 328-331.
- M. Ohno, F. Mori, Y. Minamikawa, R. M. Thushara Damayanthi, H. Takahashi, H. Sato, H. Toyokawa, “Development of High Count Rate TES Microcalorimeters”, *J. Low Temp. Phys.* **2008**, 151:229-233.
- M. Ohno, H. Takahashi, R. M. Thushara Damayanthi, Y. Minamikawa, K. Nishimura, H. Toyokawa, “Development of a new TES structure using a radiation absorber self-adjusting the operating temperature”, *IEEE Trans. App. Supercond.* **2009**, 19, 3, 473-476.

(2) 著書

- 大野 雅史、低温検出器 -TES(Transition Edge Sensor)-、電気学会高機能放射線発生利用技術専門委員会技術報告書(2009)

(3) 学会発表**口頭発表(国内)**

- 大野 雅史、高橋 浩之、全 伸幸、R.M.T.Damayanthia、南川 泰裕、森 文彬、低温検出器 -TES(Transition Edge Sensor)-、平成 19 年電気学会全国大会、シンポジウム「原子力・核融合における電気計装および放射線発生技術の動向」(2007)
- 大野 雅史、森 文彬、西村 堅太郎、南川 泰裕、Thushara Damayanthi、高橋 浩之、自己温度安定性を有する放射線吸収体を用いた超伝導転移端マイクロカロリメータ、2008 年春季第 55 回応用物理学関係連合講演会(2008)

ポスター発表(国際)

- M. Ohno, H. Takahashi, R.M.T. Damayanthi, Y. Minamikawa, K. Nishimura, H. Sato, H. Toyokawa, Development of a new TES structure using a radiation absorber self-adjusting the operating temperature, 2008 Applied Superconductivity Conference (2008)
- Masashi Ohno, Martin Lueker, Kam Arnold, Matt Dobbs, Elizabeth George, William Holzapfel, Naoko Iyomoto, Adrian Lee, Helmuth Spieler, Hiroyuki Takahashi, Benjamin Westbrook, Paul Richards, Readout circuit using the Frequency-Domain SQUID Multiplexing technique for X-ray TES microcalorimeters, 13th international workshop on Low Temperature Detectors (LTD-13)(2009)

(4) 招待講演**招待講演(国際)**

- Masashi Ohno, Hiroyuki Takahashi, Nobuyuki Zen, Yasuhiro Minamikawa, Fumiakira Moria, R.M.T.Damayanthi、Ir-TES Development at The University of Tokyo、2nd CREST

Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)(2006)

招待講演(国内)

- 大野雅史、高橋浩之、「X線イメージングを目指した超伝導検出器の開発」2010年春季 第57回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「放射線分科会企画-X線イメージングの最前線」(2010)

B. 本研究課題に関連した成果で主なもの

(1)論文(原著論文)発表

論文(国際)

- F. Mori, Y. Minamikawa, R. M. Thushara Damayanthi, S. Leman, N. Zen, M. Ohno, H. Takahashi, H. Toyokawa, H. Tanida, T. Uruga, “Synchrotron Beam Test of a Position-Sensitive Small-Pixel Ir-TES Array”, *J. Low Temp. Phys.* **2008**, 151:150–154.
- Y. Minamikawa, H. Sato, F. Mori, R. M. Thushara Damayanthi, M. Ohno, H. Takahashi, “Simulation of Transient Response of Ir-TES for Position-Sensitive TES with Waveform Domain Multiplexing”, *J. Low Temp. Phys.* **2008**, 151:229–233.

(2)学会発表

口頭発表(国際)

- Y. Minamikawa, K. Nishimura, R.M.T. Damayanthi, M. Ohno, H. Takahashi, The University of Tokyo, Simulation of Transient Response and TES Noise Parameters, 2008 Applied Superconductivity Conference (2008)