

論文の内容の要旨

論文題目 マイクロ波マルチプレクサを用いた
 光TES信号読み出しに関する研究

氏 名 中田 直樹

超伝導転移端センサ (Transition Edge Sensor: TES) は超伝導体を用いたカロリメータの一種である。TESの基本原理を図1に示す。光子がセンサに入射し吸収されるとそのエネルギーによりセンサの温度が数mK上昇する。この温度上昇を抵抗値の変化として検出する。通常、超伝導体はその臨界温度付近で数十mK以内の幅で超伝導から常伝導へ相転移する。従ってこの転移領域を光子入射に伴う温度変化の検出に利用することによって、高い検出感度を実現することができる。光子検出後は、一定時間経過することでTESは再び平衡状態へと戻る。

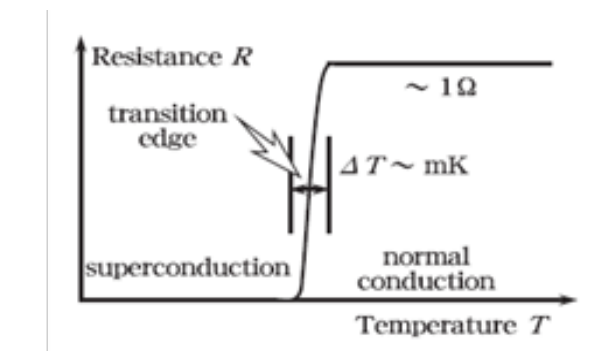


図1 超伝導転移端センサの原理

TESはもともとX線天文学の用途で開発された検出器であるが、非常に優れた量子効率・エネルギー分解能・暗計数率を持つため、近年では可視光・近赤外域における単一光子検出器として、バイオイメージングや量子コンピューター等の最先端の研究分野で期待されている。こうした分野への適用を目指して、これまでの研究では既に可視光用TESを用いたシステムの開発や量子光学実験が行われてきた。しかしながらこれらの研究ではTESの素子数が制限となり、システムとして測定効率が低いことが問題となっている。この問題を解決するためにアレイ化した光TESから信号を読み出す技術について研究を行った。

X線TESの信号読出しの多重化方法として、時分割多重化、コード分割多重化、MHz帯周波数分割多重化、マイクロ波帯周波数多重化(Microwave SQUID Multiplexing: MW-Mux)の4つの技術が研究されてきた。しかしながら光TESはX線TESよりも信号が100倍以上速いため、前3つの手法で読み出すことは難しい。そこで本研究では信号多重化の手法としてMW-Muxを採用し実証を行った。

MW-Muxの原理模式図を図2に示す。マイクロ波が流れる一本のフィードラインに対して各々の共振周波数が異なる共振器がキャパシタを介して複数個接続される。共振器の終端はrf-SQUIDを介してTESに接続される。TESに可視光が入射するとrf-SQUIDに入力される磁束が変化しインダクタンスの値が変化する。共振器の共振周波数はキャパシタンス成分とインダクタンス成分によって決定される。その結果、共振器の共振周波数が変化する。従って各TESに入射した光子の信号は対応する共振器の共振周波数のシフト量を求めることで測定することが出来る。

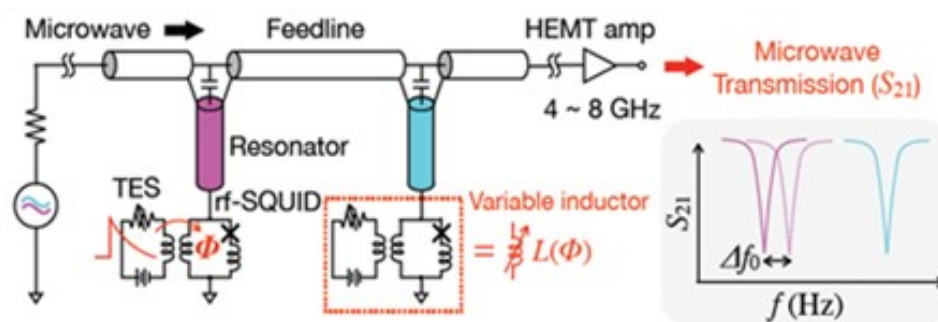


図2 MW-Muxの原理模式図

実証試験ではMW-Muxを用いて単素子の光TESから信号を読み出した場合と、4素子同時に読み出した場合について評価した。それぞれの極低温系の測定体系を図3に示す。極低温系(100mK)は可視光用TES、MW-Muxチップ以外にシャント抵抗が搭載されたBias回路や配線を行うためのPCB、コプレーナ導波路チップで構成した。MW-Muxの前段にはアテネータを、後段には極低温高電子移動度トランジスタ(High Electron Mobility Transistor: HEMT)増幅

器を接続した。HEMT増幅器からの出力信号はADCとFPGAを用いて室温でサンプリングされる。また図3(a)では二つの可視光用TESが接続されているが、この実験では2素子のうち1素子のみを用いて測定を行った。

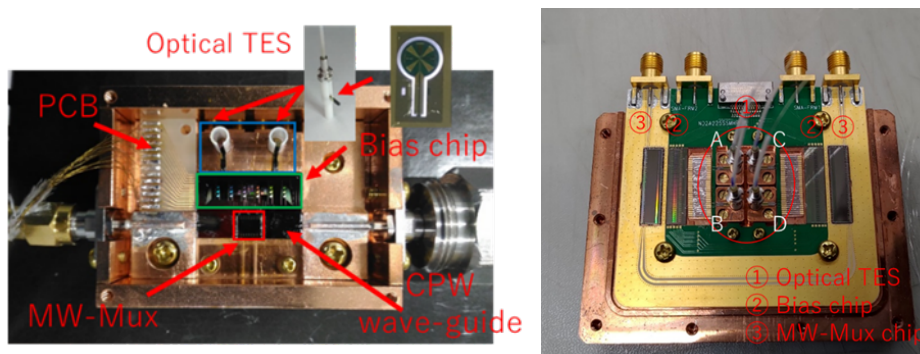


図3 極低温系のセットアップ (左：単素子読出し実験、右：読出し4素子実験)

実際に光子入射時の得られた応答信号を図4に示す。室温系にて波長1550 nmのパルスレーザーを用意し、光ファイバを通して可視光用TESに光子を入射した。どちらの測定についても、時定数が200ns以下の非常に速い信号を読み出すことに成功した。ただし、共振器の帯域幅によって高周波成分がカットされているため、dc-SQUIDも用いた際の信号波形よりも立ち上がり時間が遅くなっている。また4素子読出し時のTES Cに関してはTESと熱浴間の熱接触が十分でなかったため、信号波形が確認できなかった。

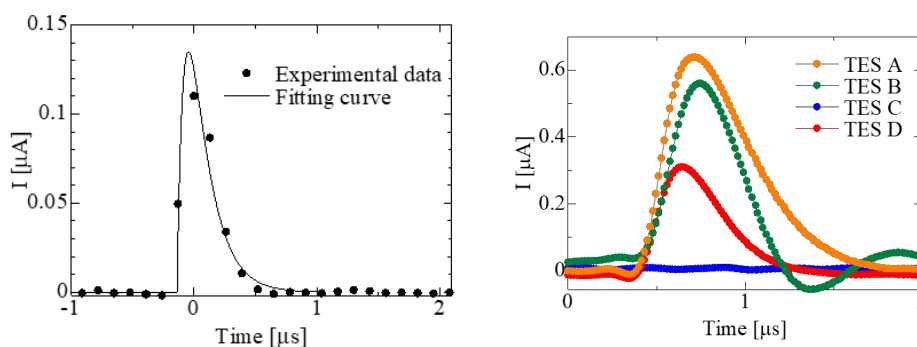


図4 光子入射時の応答信号 (左：単素子読出し実験、右：読出し4素子実験)

またMW-Muxによる信号読出しが、光子数識別能力やエネルギー分解能に対してどの程度影響を及ぼしているのか求めるために、測定結果から光子数スペクトルを作成した(図5、図6)。光子数スペクトルを作成する際の各パルスの波高値は、最適フィルタ法により算出した。この結果より光子数識別が可能であることを確認した。また、単素子読出し時にはサンプリングの粗さによりエネルギー分解能の劣化が起きているが、4素子読出し時にはサ

ンプリング速度を早くしたため、エネルギー分解能が向上している。

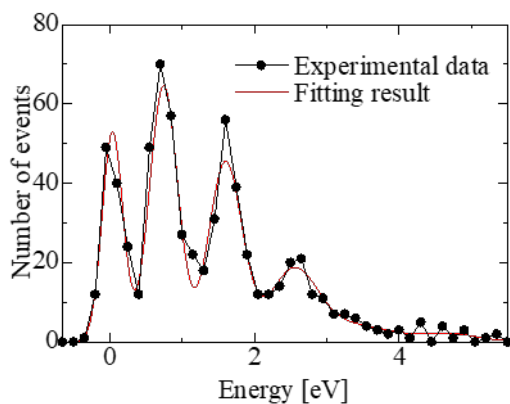


図5 単素子読み出し実験時のエネルギースペクトル

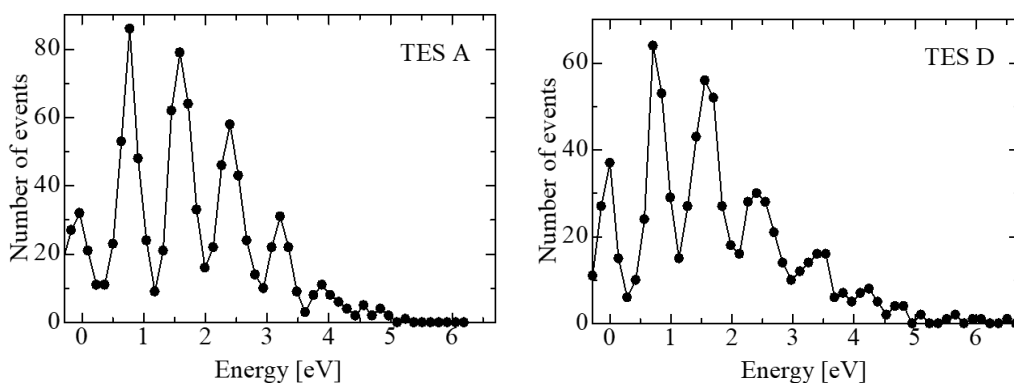


図6 4素子読み出し実験時のエネルギースペクトル

MW-Muxを用いた光TESからの信号読み出しについて実証を行った。光子入射時の応答についてはその入射タイミングでTESからの信号が出力されることを確認できた。この信号波形は高周波成分がカットされ鈍っていたが、X線用TESよりも100倍以上速い時定数であった。また得られた出力信号から光子数識別を行うことにも成功した。これらの結果よりMW-Muxが光TESの信号を読み出すことについて、問題がないことは分かったが、今後実用化を進めるためには、1系統のMW-Muxで読み出すことができる素子数の増大や室温系エレクトロニクスの並列化といったことが必要となる。