

## 論文の内容の要旨

論文題目  $\gamma$ 線超伝導転移端センサアレイに向けたマイクロ波信号多重化法の研究

Study on Gamma-ray Transition Edge Sensor Array Based on Microwave SQUID Multiplexer

氏 名 入松川 知也

### 1. 背景・目的

核の安全利用を実現するための保障措置において、核物質の計量管理の高精度化・迅速化は重要な課題である。計量管理において、化学的な処理に基づいた破壊検査は、高精度な測定が可能であるが、時間的・経済的なコストを伴い、かつ安全性の確保や新たな核廃棄物の生成といった問題が生じる。したがって、非破壊検査の精度を向上することによって、計量管理の高精度化・迅速化が実現しうる。現状の非破壊検査において、主要な役割を果たしているのが高純度Ge半導体検出器(HPGe)を用いた $\gamma$ 線スペクトロスコピーである。しかし、Puの同位体は近接したエネルギーをもつ $\gamma$ 線を放出するため、HPGeのエネルギー分解能では不十分である。

超伝導転移端センサ(TES; Transition Edge Sensor)は、原理上HPGeよりも一桁以上高い分解能を実現する超伝導体を用いたマイクロカロリメータである。TESは、超伝導体の相転移領域における急峻な抵抗・温度曲線を温度計として利用することで、入射光子のエネルギーを極めて精密に読出す。実際にそのエネルギー分解能は、Ge半導体検出器よりも1桁以上優れた値を実証してきた。<sup>1)</sup>したがって、TESを用いたPu試料測定は非破壊検査の高精度化に資するものと考えられる。

しかしながら、TESの有感面積や応答速度は非常に小さいので、アレイ化による検出率の向上が必要不可欠である。例えば、Pu試料の $\gamma$ 線スペクトロスコピーに十分な統計精度を得るには $10^8$ 程度以上のカウント量が必要であるが、これを数時間以内の測定で完了するには、 $\gamma$ 線TESのカウントレート10 cpsとした場合、1000素子程度の大規模アレイが必要である。

TESは約100 mKの極低温で動作するため、配線増大による熱流入の増大や、読出回路の発熱を極力抑えなければならない。したがって、大規模 $\gamma$ 線TESアレイの読出には、信号多重化技術が不可欠である。本研究では、配線一本当たりの読出可能なTES素子数が多いマイクロ波信号多重化<sup>2)</sup>(MW-MUX ; Microwave SQUID Multiplexer)回路の開発を行った。

MW-MUXは、高 $Q$ 値をもつ超伝導共振器を利用した周波数多重化法の一つである。図1にMW-MUX回路の模式図を示す。図のように、マイクロ波伝送線路上に、異なる共振

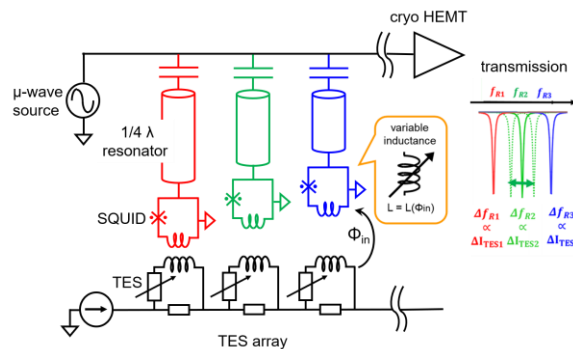


図1: MW-MUX 原理

周波数をもつ1/4波長共振器を並べ、SQUIDと呼ばれるTESの電流の関数となる可変インダクタンスで終端する。TESの電流変化によって、結語されたSQUIDのインダクタンスが変化し、共振周波数が増えるので、共振周波数変化をTESの電流変化として読出すことが可能となる。また、SQUIDは非線形の周期応答を示すので、ランプ磁束変調法を用いて線形化を行う。ランプ磁束変調法は、被測定信号(TES信号)より速いランプ波をSQUIDに加算し、被測定信号による周期応答の位相シフト量から入力信号を推定する。

本方式において、TESのエネルギー分解能の劣化なく信号を読出すには、信号多重化回路の雑音がTES自身の雑音よりも十分低いことが求められる。これには、高い無負荷 $Q$ 値( $Q_i$ )をもつ共振器が必要である。さらに、クロストークや入出力特性の線形化も課題となる。本研究では、MW-MUXによる複数 $\gamma$ 線TESの信号多読出実証と、読出性能の主制限要因がMW-MUX回路にならないレベルに低雑音化することを目的とした。

本研究で設計・試作したチップを図2に示す<sup>3)</sup>。チップ寸法は5 mm角であり、チップ中央を左右に貫くコプレーナ線路(Coplanar Waveguide; CPW)マイクロ波伝送線路を挟んで上下に8組ずつ、合計16個の長さの異なる1/4波長CPW共振器が配置される。全ての共振器は、インターディジタル型キャパシタを介してフィードラインに接続されている。また、この素子は産業技術総合研究所のクリーンルームCRAVITY(Clean Room for Analog digital superconductivity)で作製された。

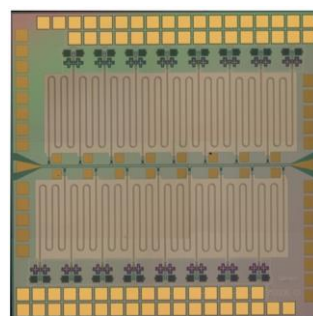


図2: MW-MU チップ

## 2. 共振器材料評価

SQUIDで終端されていない共振器のみのチップを用いて、雑音特性等の共振器材料依存性を調べた。

本研究では、電極材料としてNbとNbN、ウエハ材料としてSiとサファイアの組合わせで4種類の共振器の特性を評価した。Nbは金属系超伝導デバイスとして最も技術が確立されており、NbNはNbより約2倍高い超伝導転移温度を持つため低電極損失が期待される材料である。無負荷 $Q$ 値のパワー依存性(図3)を調べたところ、いずれの共振器でも低温で超伝導共振器の雑音源である二準位系のゆらぎによる $Q_i$ 値の抑制が小さいパワー領域で動作可能であることが分かった。また、 $Q_i$ の値としては最適なパワー領域でいずれの共振器でも $Q_i > 4 \times 10^4$ を満たし我々の系において十分高い $Q_i$ 値が得られることが分かった。ただし、NbNの方がNbよりも高 $Q_i$ 値を示し共振器の発熱に関しては有利となる。

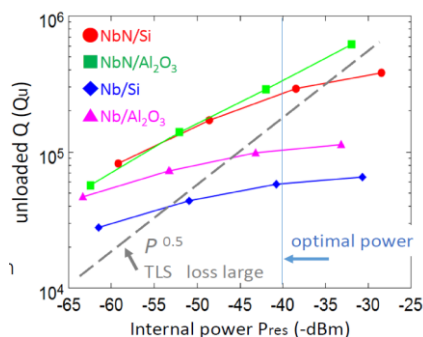


図3: 高 $Q_i$ のパワー依存性

ノイズに関しては位相ノイズの低周波成分から二準位系による超過雑音が観測されたが、値としては各共振器間に大きな違いが見られなかった。

ノイズに関しては位相ノイズの低周波成分から二準位系による超過雑音が観測されたが、値としては各共振器間に大きな違いが見られなかった。

## 3. クロストーク・直線性誤差の改善

実験的にクロストークや直線性誤差の評価を行うため、チップ上の共振器配置の異なる5つのチップを用意した。図4のように、ランプ磁束変調をかけない場合、チップ上で隣接する( $\Delta x =$

0.5 mm)場合には共振周波数を100 MHz以上のときクロストークが $1 \times 10^{-3}$ になり、共振周波数が隣接する場合は、 $\Delta x > 2.5$  mmに対して $5 \times 10^{-3}$ になることが分かった。また、共振周波数間隔とチップ距離のバランスがよいチップ ( $\Delta f_r = 60$  MHz,  $\Delta x = 2.5$  mm)を用いてランプ磁束

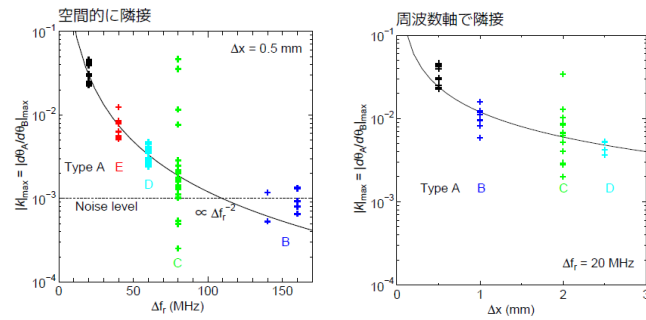


図4: クロストークまとめ

変調時におけるクロストークと直線性誤差を評価したところ、どちらも $\pm 0.6$  m $\Phi_0$ 以下となった。この値は、我々の $\gamma$ 線TESの波高値が $0.5 \Phi_0$ 程度であるので、 $\pm 0.6$  m $\Phi_0 / 0.5 \Phi_0 = \pm 1.2 \times 10^{-3}$ 以下の相対的直線性誤差が見積もられる。したがって、我々の $\gamma$ 線TESの典型的なエネルギー分解能100 eV/60 keV =  $\pm 1.7 \times 10^{-3}$ より小さく、MW-MUXチップがエネルギー分解能の劣化要因とならないことが示唆された。さらに、簡単なモデルの考察からクロストークが直線性誤差の要因となることを示し、クロストークの抑制により直線性誤差も小さくできることを示した。

#### 4. $Q_i$ 劣化プロセスの探索と改善

MW-MUXチップでは前述した共振器チップよりも1桁ほど劣化する現象が見られたため、この $Q_i$ 値の劣化要因の調査を行った。そこで、共振器チッププロセスではなくMW-MUXフルプロセスチップにのみ行うプロセスに関して、各々対照実験を行った。その結果、Pd抵抗層の有無によって $Q_i$ 値が一桁以上変化することが分かった。したがって、イオンミリングにより成形する際のPdの削れ残りが $Q_i$ 値の劣化要因であることが示唆された。この結果より、Pdの削れ残りを回避するためカルデラ平坦化を用いた新プロセスを考案し製作・ $Q_i$ 値の評価を行った。結果として、新プロセスにより $5 \times 10^4$ 以上の高い $Q_i$ 値を実現することができた。

#### 5. TESとの協調動作

新プロセスにより作製されたチップを用いて二素子の $\gamma$ 線TESとの協調動作を行った。ただし、大規模TESアレイを実現する上では、TESのバイアス源は共有すべきであるが、ここでは実験に使用するTESの特性等の都合により、TESのバイアス電源は独自に用意した。また、二素子のTESに加え、3つの入力のないチャンネルも含めた5チャンネルの同時測定を行った。TESとの接続のないチャンネルの磁束雑音は、100 mKにおいて $1.15 - 1.3 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、この値は他の研究機関で報告されている値 $1.9 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ よりも低い値<sup>4)</sup>となっている。

また、TES信号の読出特性を評価するためCo-57, Ho-166mを用いた $\gamma$ 線照射実験を行った。実験においては冷凍機の熱浴温度を100 mKまで冷却し、線源は冷凍機の外側に設置しTESに照射した。読出した $\gamma$ 線信号の時定数が0.13 msが得られ、従来型単素子読出時と同程度の値となったことから、我々の開発したMW-MUXチップが我々の $\gamma$ 線信号に十分追従する速度をもつことを確認した。Ho-166mを用いたTES二素子同時読出からはそれぞれ、 $\Delta E_{\text{FWHM}} = 128$  eV, 115 eV@184 keVという値が得られた(図5)。この値に対して読出回路の寄与は、 $\Delta E_{\text{readout}} = 67$  eV, 57 eVであった。したがって、読出回路による劣化は17%程度であり分解能の支配的な要因はTES自身であることが分かった。また、読出回路の寄与はインプットコイルとSQUIDの相互インダ

クタンスの向上と、アッテネータの最適化、低雑音HEMTアンプの適用により10 eV以下に抑制できることが期待できる。

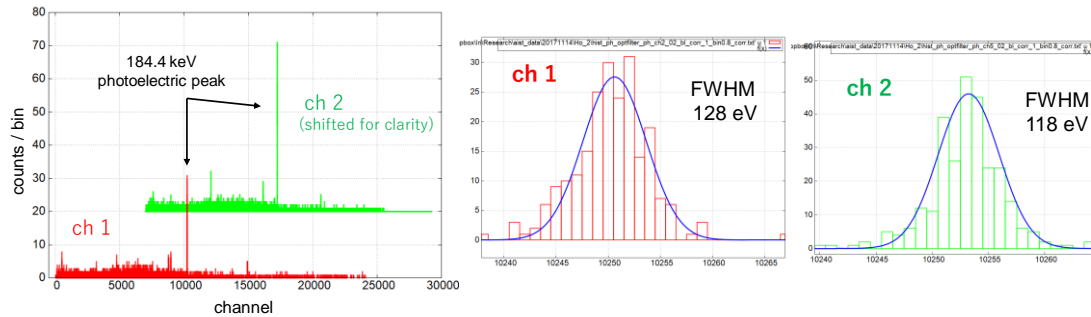


図5: Ho-166m 得られたスペクトル

## 6. 結論

本研究では、 $\gamma$ 線 TES の読出回路を、従来の多重化法に比べ1本の読出線あたりの多重化数の飛躍的増大が期待されるマイクロ波信号多重方式を基に開発した。

4種類の共振器を用いた特性の評価では、 $Q_i$ 値のパワー依存性を評価した。我々の系においてはどの材料でも二順位系の揺らぎによる $Q_i$ の劣化が小さいマイクロ波パワー領域で動作可能であることが確認された。また、NbNの方がNbよりも高い $Q_i$ を示したが、どの材料においても我々の系において十分高いと考えられる $4 \times 10^4$ 以上の値が得られた。

また、クロストークの実験的評価からは、入出力特性の非直線性誤差が、チップ上での隣接チャンネル間のクロストーク量に比例することを実験的に明らかにした。加えて、クロストーク量を1/1000以下とするチップ上チャンネル配置を見出した。

$Q_i$ 値の劣化プロセス探索においては、Pd抵抗層の削れ残りが原因であることが示唆される結果を得た。また、このPd削れ残りを回避するためカルデラ平坦化を用いた改良プロセスを考案し、それによって作製されたチップによって十分に高い $Q_i$ 値が得られることを示した。

TESとの共調動作により、 $\gamma$ 線照射を受けたTES出力をマイクロ波読出回路で読出し、従来の読出法に遜色ない高速応答性で読出すことに成功した。また、2画素の $\gamma$ 線TES同時読出によってマイクロ波信号多重化読出の実証を行った。その結果、Ho-166m線源を用いて、それぞれ $\Delta E_{FWHM} = 128 \text{ eV}, 115 \text{ eV} @ 184 \text{ keV}$ という値を得た。また、マイクロ波読出回路のノイズを評価から、設計値を最適化することで、TESのノイズレベルよりも十分低い雑音レベルに到達する、即ち本研究で開発したマイクロ波読出回路がTESのエネルギー分解能を劣化させることなく信号取得が可能であることを示した。

以上より、本研究では二画素の $\gamma$ 線信号同時読出と、信号多重化回路の低雑音化を実現し、大規模 $\gamma$ 線TESアレイ読出の基礎を築くことができたと考えられる。

## 参考文献

- 1) N. Iyomoto et al., J Low Temp Phys, 151 (2008)
- 2) J. A. B. Mates et al., Appl. Phys. Lett., 92 (2008).
- 3) F. Hirayam et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 23, 2500405 (2013).
- 4) D.A.Bennet et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 25, 2101405 (2009).