

X線マイクロビームを用いた Zebra 型超伝導転移端センサの応答特性解析 (Analysis of a Zebra Shaped superconducting transition edge sensor with an X-ray microbeam)

課題番号：2008B1768 / 萌芽的研究課題 / 成果非専有 / BL01B1
 東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻
 博士課程3年 みなみかわ やすひろ 南川 泰裕

1 はじめに

試料に X 線を照射し、電子を励起すると、その物質に特有の蛍光 X 線が発せられる。これを測定し、試料の構成元素や化学結合状態などを特定するのが蛍光 X 線分析である。現在 ここでは X 線による電離作用を用いた半導体検出器と、波長分散型と呼ばれる蛍光 X 線の波長の違いによる屈折率の違いを用いた検出器が用いられている。しかし前者のエネルギー分解能は 200eV(@5.9keV) 程度と、試料の分子構造を知るためには不十分であり、後者はエネルギー分解能は高い (~1eV@5.9keV) が検出効率が低いために高強度な励起線が必要なことが、特に放射線による損傷を受けやすい生体試料を扱う場合などに問題となる。

これに対して超伝導体の超伝導-常伝導転移領域における急峻な抵抗変化によって温度変化を検出する超伝導転移端センサ (TES: Transition Edge Sensor) を用いた TES マイクロカロリメータは、高い検出効率と高いエネルギー分解能 (~1eV@5.9keV) 高い非常に高感度な熱量計である。TES は現在宇宙線計測など、限られた用途にしか用いられていないが、非常に高いエネルギー分解能で高速なスペクトル測定が可能で、次世代のエネルギー分散型の検出器として、注目されている。

2 TES(超伝導転移端センサ) とは

超伝導転移端センサの動作原理を (図 1) に示す。超伝導と常伝導の間の温度領域、超伝導転移領域においては、微小な温度変化 (数 mk) によって大きな抵抗の変化が起こる。これを利用した非常に高性能な温度計が超伝導転移端センサである。素子の熱容量を小さくし、熱的なノイズを減らすために 100mk 前後の極低温下で超伝導転移を起こすような超伝導体が温度センサとして用い

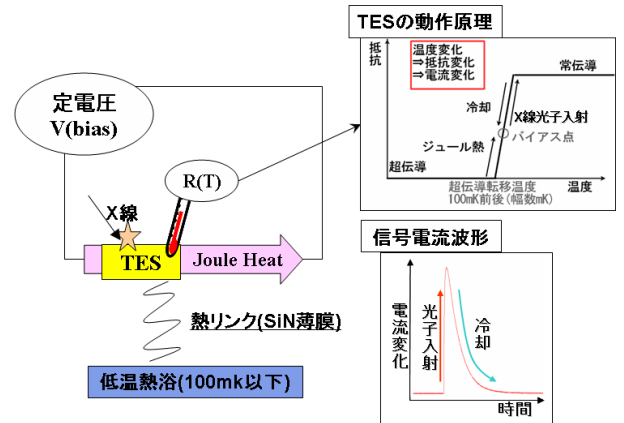


図 1: TES の動作原理

られるため、単一光子の入射によっても十分に大きなパルス信号を得ることができる。

TES を温度センサとして動作させるためには、素子の温度を極めて高い精度で転移領域内の一定の温度に保つ必要がある。これは TES にバイアス定電圧をかけることによって実現される。信号が入射していない定常状態では、この定電圧によって発生するジュール熱と、熱浴に廃棄される熱とが釣りあい、素子の温度は超伝導転移領域内のある一定の温度に保たれている。ここに X 線光子が入射すると、そのエネルギーに応じて素子の温度は上昇し、抵抗が増加する。すると TES を流れる電流と発熱量が減少し、素子は積極的に冷却される。この熱的なフィードバックは、ETF(Electro Thermal Feedback)と呼ばれている。

TES の信号応答時の一連の過程にかかる時間はおおよそ数 100us 以下であり、単一光子の入射に対して一つの電流パルス信号が得られる。この一つ一つのパルス電流の大きさによって、入射した光子それぞれのエネルギーを測定することができる。

ここで TES マイクロカロリメータの有感面上に、常伝導金属の棒を、電流の流れる方向に対して互い違いに配置することで、ノイズレベルが低下し、エネルギー分解能が改善することが実験的に知られている。このような構造を持つ TES は Zebra 型 TES と呼ばれているが、Zebra 構造がどのようにしてノイズレベルを抑え、エネルギー分解能を改善するのかは明らかにはなっていない [1][2]。

本研究では Zebra 型 TES の有感面上を X 線マイクロビームでスキャンすることで、細かな応答波形の変化を調べ、ここで得られた波形をこれまで開発を行って来た計算機シミュレーションによって再現することで、Zebra 型 TES の内部でどのような現象が起こっているのかを調べることを目指す。Zebra 構造が TES 内部においてどのように作用し、エネルギー分解能を改善しているのかをあきらかにすることができれば、さらに高いエネルギー分解能を実現する新しい TES 構造の開発を期待することができる。

3 超伝導センサの作成

本研究で用いた TES (以降 1Bar-Zebra 型 TES と呼ぶ) を図 2 に示す。250 μm 角の正方形の形状をしており、100nm 厚の Ir 薄膜と 20 μm 厚の Au 薄膜を重ねた 2 層構造からできている。この TES 上に 400 μm 厚ほどの Au の Zebra 型構造を加えることで、応答特性がどのように変化するかを調べることを目指す。

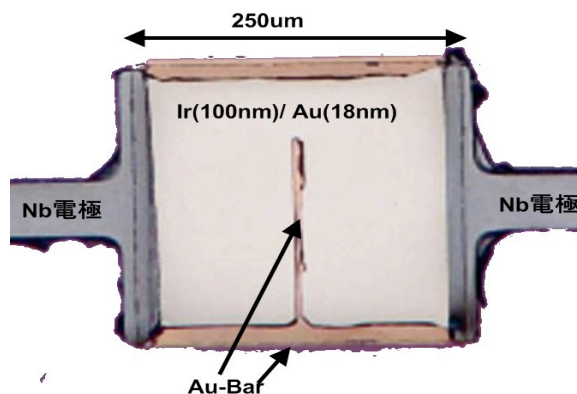


図 2: 作製した 1Bar-Zebra 型 TES

TES マイクロカロリメータの作製過程を (図 3) に示す。製作にあたり、マイクロマシン技術が必要である。装置は、東京大学武田クリーンルー

ムのものを使用した。

1. Si 基板の両面に LPCVD 法を用いて SiN を成膜する。
2. Ir および Au ををスパッタリングにより成膜する。
3. BCl₃ を用いた RIE により TES のパターニングを行う。
4. Zebra 型構造体となる Au をスパッタリングにより成膜、王水エッチングによりパターニングする。
5. 基板裏面の SiN を Si エッチング用に RIE で取り除く。
6. Nb 電極をスパッタリング法とリフトオフ法により成膜、パターニングする。
7. ヒドラジンエッチングし、メンブレン構造を形成する。

4 測定手順

本実験で検出器に用いた Ir 超伝導体の超伝導転位温度はおよそ 100mk であり、測定には 60mk 程度の極低温が必要となる。これには液体 ³He が液体 ⁴He にとけ込む際の溶解熱を利用した ³He-⁴He 希釈冷凍機を用いる。通常の冷却の手順は次のようになる。

1. 冷凍機, ³He-⁴He ガス循環ラインの組立及び真空引 (~16 時間)
2. 液体窒素を用いた冷凍機の予冷 (~20 時間)(77K)
3. 液体 He を用いた冷凍機の予冷 (~12 時間)(4.2K)
4. 真空ポンプを用いて液体 He を気化 (~3 時間)(1K)
5. ³He-⁴He ガスの循環開始 (~1 時間)(60mk)

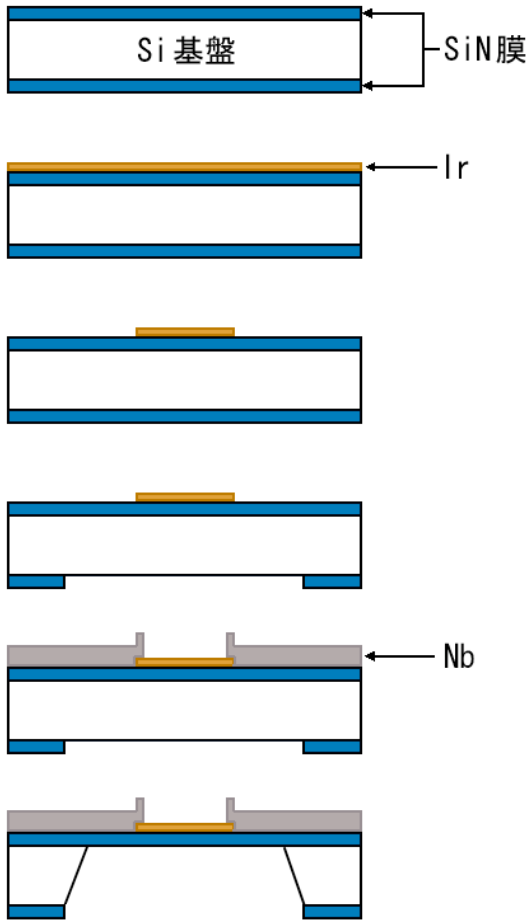


図 3: TES マイクロカロリメータ作製の流れ

5 実験室における測定結果

作製した 1Bar-Zebra 型 TES の動作を確認するため、 ^{55}Fe 線源を用いて実験室において行った測定結果を図 4 に示す。Mn の $K\alpha$ 線と $K\beta$ 線の強度比を元にフィッティングを行うと 1Bar-Zebra 型 TES のエネルギー分解能は 15.0eV と評価することができた。

ただし、このときの信号波形をみると、立ち上がりの遅い波形と早い波形と二種類の波形がみられた(図 5)。Zebra 型 TES においてこのような事例はこれまであまり注目のされていなかったが、このような差異はエネルギー分解能に影響を与えている可能性がある。

6 シミュレーションのための数値モデルの構築

測定は極低温下の高真空中で行われることから、熱の移動は直接の接触面のみを考えれば十

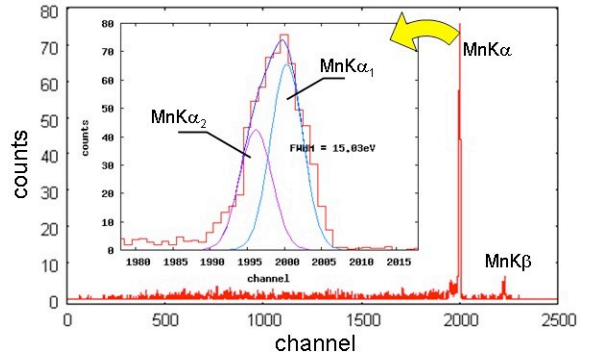


図 4: Fe 線源からのスペクトル測定結果

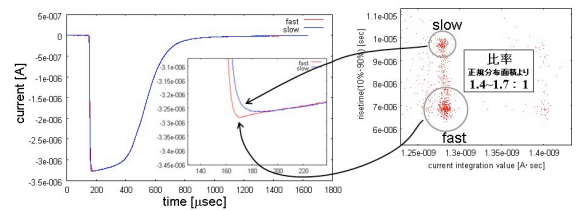


図 5: Fe 線源から得られた波形の特性と立ち上がり時間の異なる二種類の波形

分であり、熱放射や自由分子による影響は無視できるものとする。ここで Ir 薄膜と SiN_x 薄膜の温度、熱伝導率、単位体積あたりの熱容量をそれぞれ $T(x, y, t)$, $T_m(x, y, t)$, κ_T , κ_m , $c_T(T)$, $c_m(T_m)$, それぞれの薄膜を xy の二次元平面で近似し、Ir-TES の単位長さあたりのジュール熱による発熱量を $P_T(x, y, t)$, Ir- SiN_x 間の熱伝達係数を G_K , SiN_x から熱浴へ流れる熱量を $P_C(x, y, t)$ とすると、次のような熱伝導方程式が得られる。

$$\frac{\delta T(x, y, t)}{\delta t} = \frac{\kappa}{c_T} \nabla^2 T - \frac{G_K}{c_T} (T - T_m) + \frac{P_T(x, y, t)}{c_T}$$

$$\frac{\delta T_m(x, y, t)}{\delta t} = \frac{\kappa}{c_m} \nabla^2 T_m + \frac{G_K}{c_m} (T - T_m) - \frac{P_C(x, y, t)}{c_m}$$

素子中の電流密度分布 $I(x, y, t)$ は電位分布 $V(x, y, t)$ の空間微分から求められ、素子中の各点での発熱量 $P_T(x, y, t)$ は、 $I(x, y, t)$ と素子の各位置における抵抗率 $R(T(x, y, t))$ から求めることができる。

また電位分布 $V(x, y, t)$ は

$$V(x_0, y, t) = V_{bias}$$

$$V(x_1, y, t) = 0$$

という境界条件をおくことで、 $R(T(x, y, t))$ から求められる。

薄膜上に三次元的な構造体のある場合でも、平面近似を行い、各層間の熱伝導率と電気伝導率を与えることで、同様の手法で考えることができる。

7 シミュレーションによる実験結果の評価

実験により測定されたデータをもとに、1Bar-Zebra 型 TES の信号波形のシミュレーションを行った (図 7)(図 7)。1Bar-Zebra 型 TES の有感面上の、さまざまな位置に X 線が吸収されたときの信号波形を (図 8) に示す。入射位置よる波形の違いもあるが、常伝導金属である金の部分で吸収されたときと、超伝導金属である Ir の部分で吸収されたときとで大きくことなる波形が得られた。これは (図 5) の二種類の波形とよく一致するものである。またそれぞれの吸収効率から計算した金での吸収と Ir での吸収との比率も 1.5 対 1 程度であり、これも測定結果とよく一致している。

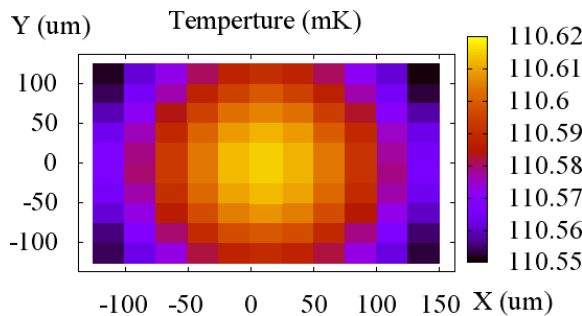


図 6: シミュレーションによる無信号状態での 1Bar-Zebra 型 TES の温度分布 (右)

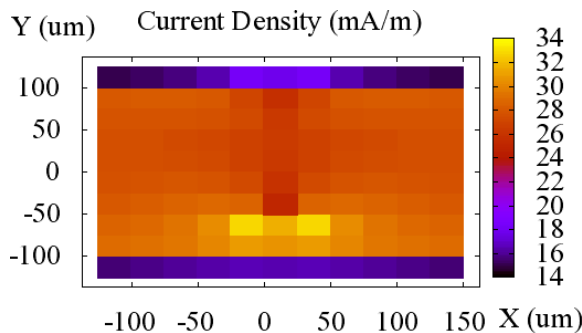


図 7: シミュレーションによる無信号状態での 1Bar-Zebra 型 TES の電流分布

シミュレーションから得られた波形

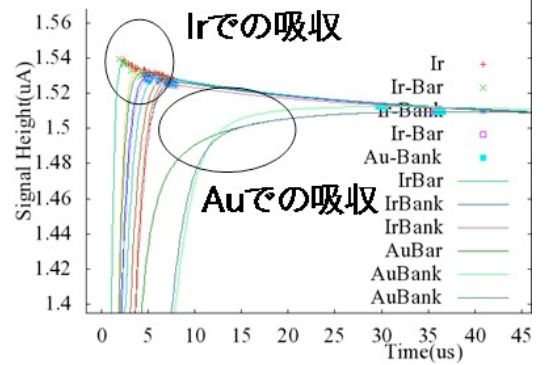


図 8: Fe 線源から得られた波形の特性と立ち上がり時間の異なる二種類の波形

8 SPring-8 での測定

今回 Spring-8 では X 線マイクロビームを用いて TES の有感面上の各位置における応答波形を取得し、Zebra 構造の入射位置による波形の違いと、エネルギー分解能などとの関係を調べ、シミュレーションの精度向上と Zebra 構造の最適化により、これまでにない高いエネルギー分解能を持つ新しいデバイスの開発を目指す予定であった。

しかし測定の直前になり、それまで 40mk 程度であった冷凍機の最低到達温度が、140mk 以上と悪化してしまった。予定していた TES の転移温度は 110mk 以下であるためにこの温度では測定をおこなうことはできない。冷凍機の納入元とも連絡をとりつつ、ビーム入射窓だけでなく、シールドや配線など全ての部分に異常がないことを確認し、冷却試験を繰り返したが、十分な冷却能力をとりもどすことはできなかつたため、残念ながら実験は中断となった。

9 その後の経緯とまとめ

この冷凍機は同購入してから 10 年ほど経過したものであるが、実験後しばらくして、同時期に同じ冷凍機を購入した他の研究グループにおいても、同様に冷凍機が冷えなくなってしまうという事例が報告され、冷凍機の経年劣化による不良であると判断した。

そのため、新しく購入した液体 He を利用しない無冷媒冷凍機 (パルスチューブ方式/断熱消磁方式の併用) に測定環境をうつし、再度の実験を予定している。これにより、測定までの冷凍機立上

時間が短縮されるとともに、安全性も大幅に増す。

また TES 作成プロセスの改良も同時に行い、これまでの王水エッチングよりも高い選択比での構造体の作成も可能となった (図 9)。

今後この新しい冷凍機と TES を用いて再度の測定を行う予定である。

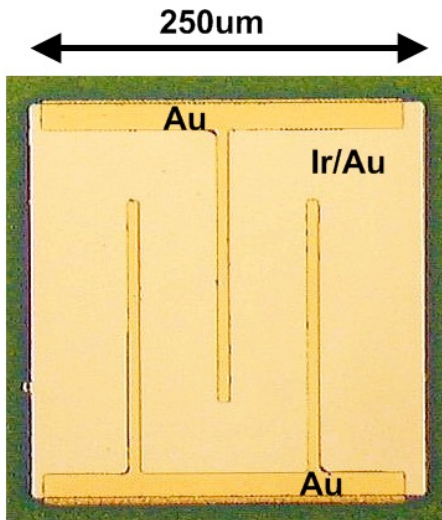


図 9: 今後実験予定の 3Bar-Zebra 型 TES

参考文献

- [1] J.N. Ullom et al., “Characterization and reduction of unexplained noise in superconducting transition-edge sensors,” *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 4206–4208 (2004)
- [2] M. Lindeman, et al., “Percolation model of excess electrical noise in transition-edge sensors,” *Nuc. Ins. Meth. A*, **559**, 715–717 (2006).