

Bi系高Tc超伝導体を用いたX線センサの理論解析

Analysis of X-Ray Transition Edge Sensor by use of Bi-Sr-Ca-Cu-O High Tc Superconductor

拓殖大学大学院 工学研究科 機械・電子システム工学専攻 吉森研究室

梁 湘恵

指導教員 教授 吉森 茂

キーワード：高Tc超伝導体、熱的検出器、X線センサ、フェルミ・ディラック分布関数、ナイキストの式

1. まえがき

X線は1895年にドイツのレントゲンによって発見され、天体からも放射されていることが分かっている。X線は、X線CTなどの医療診断だけでなく、X線光電子分光などの物性研究応用やブラックホール観測などの宇宙物理学でも応用されており、超伝導X線センサが観測衛星に搭載されたこともある。

超伝導デバイスの電磁波検出器としては、ジョセフソン接合の研究が主として行われてきたが、X線は極めて周波数が高いためにジョセフソン効果は応用できない。一方、微弱なX線が超伝導センサに吸収されることによってセンサの温度がわずかに変化することから、動作原理が単純な熱的検出器を利用することができる。温度変化による超伝導状態から常伝導状態への急峻な変化が生じる現象を応用することができる超伝導センサの利用がブラックホール観測や物性研究応用に有力とされている。このようなセンサをTES(Transition Edge Sensor)と呼ぶ。

本研究は、Bi(ビスマス)系高Tc超伝導体の応用として、X線検出TESとしての特性解析を行う。

2. 高Tc超伝導TESの構造

本研究で理論解析する臨界温度110[K]のBi系高Tc超伝導TESの構造を図1に示す。LはAu薄膜の幅、Wは高Tc超伝導薄膜の幅、dは高Tc超伝導薄膜の厚さである。その動作原理は次のようにある。

中央のAu薄膜にX線が入射すると、その部分の温度がわずかであるが上昇し、Au薄膜の下にある高Tc

超伝導薄膜で超伝導から常伝導への遷移が生じる。よって、超伝導TESに一定の直流電流を流しておけば、常伝導に遷移した瞬間に微少であるが検出可能な程度の直流電圧が左右電極間に生じる。Au薄膜が被さっている部分の常伝導抵抗は、式(1)で計算できる。ここで、抵抗率 ρ としては、高Tc超伝導体のc軸方向の抵抗率を採用して、できるだけ大きい抵抗値を得ることにして、 $\rho = 6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ とおいた。長さLや幅W、厚さdを変化させればRの値を変えることができる。一定の直流電流をI_dとおけば超伝導から常伝導遷移によって生じる出力直流電圧V_dは、オームの法則の式(2)によって計算できる。1個のX線のエネルギーをE_x[J]、1秒間に入射するX線の個数をN[1/s]とすれば、検出器の感度Sは式(3)のように定義できる。

一方、絶対零度より高い温度では抵抗で熱雑音が生じる。熱雑音電圧をV_nとすると、抵抗R[Ω]、絶対温度T[k]、使用する増幅器の帯域をB[Hz]とするときV_nはナイキストの式(4)で表すことができる。

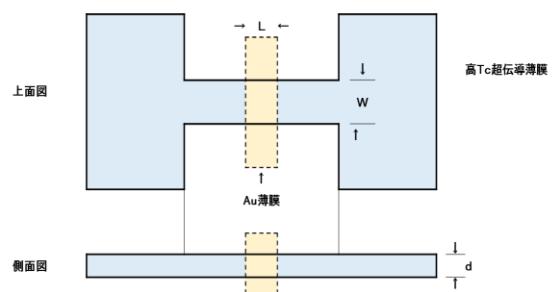


図1. 高Tc超伝導TESの構造

$$R = \rho \frac{L}{Wd} \quad (1)$$

ここで、長さ L、幅 W、厚さ d は以下の範囲で変えて理論解析を行った。

$$L=1 \sim 100 \text{ [nm]}$$

$$W=1 \sim 10 \text{ [nm]}$$

$$d=1 \sim 10 \text{ [nm]}$$

$$\text{出力電圧 } V_d = RI_d \quad (2)$$

$$\text{感度 } S = \frac{V_d}{E_x N} \quad (3)$$

熱雑音のナイキストの式

$$\langle V_n^2 \rangle = 4Rk_B T B \quad (4)$$

ここで k_B はボルツマン定数である。

高 T_c 超伝導 TES の S/N 比は、式(5)で表せる。

$$S/N = 20 \log \left(\frac{V_d}{\sqrt{4Rk_B T B}} \right) \text{ [dB]} \quad (5)$$

3. 解析結果の例と考察

$L=100 \text{ [nm]}$, $W=1.0 \text{ [nm]}$, $E_x=20 \text{ [keV]}$, $N=1$ のときのセンサ部の抵抗値と S/N 比の解析結果の例を図 2 に示す。センサ部の抵抗値が増加すると、S/N 比が改善することが分かった。出力電圧の増加が雑音の増加を上回るからである。

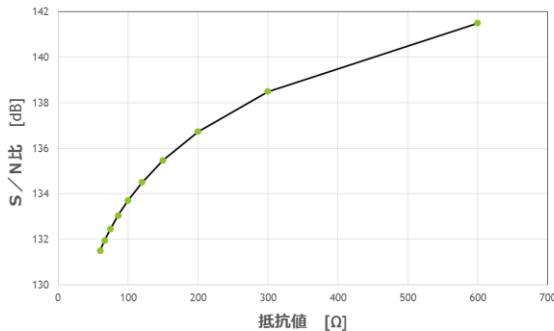


図 2. センサ部抵抗値と S/N 比の関係

以下、金属の電気抵抗の温度変化を考慮した場合と電子の分布関数の違いを考慮した場合について考察を行った。

金属の電気抵抗は温度を下げるとき減少することは知られている。抵抗の温度係数 $\alpha = 1.0 \times 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ を考慮すると、室温で $R=1 \text{ [\Omega]}$ であれば、 $T=110 \text{ [K]}$ では、 $R=0.81 \text{ [\Omega]}$ になる。

金属内の電子が従う分布関数はフェルミ・ディラック分布関数であるが、マクスウェル・ボルツマン分布関数に従うと仮定した場合とフェルミ・ディラック分布関数に従うとした場合とでは、極低温における電子数に違いが生じ、その結果、抵抗は変化する。なお、抵抗値は電子数密度に反比例する。分布関数の違いを考慮した場合、室温で $R=1 \text{ [\Omega]}$ と仮定すると、 $T=110 \text{ [K]}$ では、 $R=0.63 \text{ [\Omega]}$ となる。電子数密度はフェルミ・ディラック分布に従うとして S/N 比を解析した結果を図 3 に示す。

4. まとめ

Bi 系高 T_c 超伝導 TES の感度と S/N 比の解析を行った。S/N 比の改善につながるデバイス構造の改良やこのデバイスの物性研究への応用について検討することが今後の課題である。

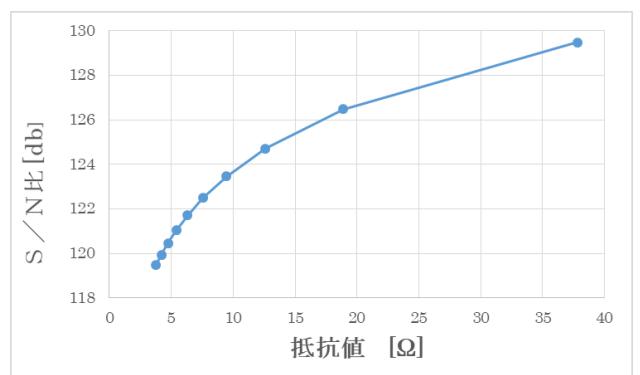


図 3. フェルミ・ディラック分布関数に従うとして求めた抵抗値を用いて解析した S/N 比 ($L=1 \text{ nm}$, $W=1 \text{ nm}$, $d=1 \sim 10 \text{ nm}$)