

TMU #61-A #61-B 冷却実験 (2001年4月下旬)

広池 哲平

2001年5月14日

概要

1 素子について

1.1 構造

1.2 熱特性の見積もり

1.2.1 理論

低温でのSiの比熱は、電子比熱 c_e に比べ、格子比熱 c_s が支配的である。1モル当たりの格子比熱は、デバイ温度 Θ_D よりも十分に低い温度 T ($T \ll \Theta_D$) に於いては、

$$c_s = \frac{12\pi^4}{5} N_A k_B \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \quad (1)$$

と表すことができる(デバイの T^3 則)。ここで、 N_A はアボガドロ数、 k_B はボルツマン定数である。この式にSiのパラメータ ($\Theta_D = 645$ [K]、原子濃度 5.00×10^{-22} [cm^{-3}]) を用いて、 1cm^3 当たりの比熱を求めると、

$$c_s(\text{Si}) = 6.01 \times 10^{-7} \times T^3 \text{ [J/cm}^3\text{/K}^4] \quad (2)$$

となる。同様にAlの比熱に関しては、 $\Theta_D = 428$ [K]、原子濃度 6.02×10^{-22} [cm^{-3}] を用いて、

$$c_s(\text{Al}) = 2.48 \times 10^{-6} \times T^3 \text{ [J/cm}^3\text{/K}^4] \quad (3)$$

と求まる。ただし、Alの場合にこの式を用いて良いのは、電子比熱の寄与が無視できる1K以下の温度のときである。一方、熱伝導率 k は、

$$k = \frac{1}{3} cvl \quad (4)$$

と書ける。ここで、 c は比熱、 v は音速、 l は平均自由行程である。カロリメータの様にサイズが平均自由行程と同程度になる場合には、寸法効果によって、 D を試料のサイズとして、

$$k \sim cvD \quad (5)$$

と表すことができる。

1.2.2 見積もり

今回実験に用いた素子は、膜厚が Ti/Au 1000/1200[Å] で、 $250\mu\text{m} \times 290\mu\text{m}$ の正方形形状である。Siピクセルについては、 $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 20\mu\text{m}$ である。

熱容量

式(2)に従って、熱容量を求めると、

$$C = 1.2 \times 10^{-11} \times T^3 \text{ [J/K}^4] \quad (6)$$

となる。

熱伝導度

式 (3) の Si の比熱を用いて $D = 20$ [μm] として、式 (5) から熱伝導率を見積もる。ただし、 v については、値がはっきりしないので典型的な値として、 $v = 5000$ [m/s] を仮定する。このときの Si の熱伝導率 k_{Si} は、

$$k_{Si} = 6.01 \times 10^{-2} \times T^3 \text{ [W/m/K}^4\text{]} \quad (7)$$

となり、これをカロリメータに適応させると、ビームの部分の Si による熱伝導度 G_{Si} は、断面積 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 、長さ 2 mm のアームが 2 本あるので、

$$G_{Si} = k_{Si} \frac{20 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^{-6} \times 2}{2 \times 10^{-3}} = 2.4 \times 10^{-8} \times T^3 \text{ [W/K}^4\text{]} \quad (8)$$

と見積もられる。

メモ

今回、宇宙研にてボンディングを完了させ、それから配線を半田付けしたのだが、半田付けの際、ボンディングパッドが取れてしまった。そのスタイクキャストが外れたところは、PEG α を用いて接着させ、もう一度、宇宙研にてボンディングを行ったのち、都立大にて配線の半田付けをし、組み込んだ。

今回の組み込み手順を簡単に示すと、

素子のマウント \rightarrow ボンディング \rightarrow 半田付け

であったが、接着剤が熱に弱いので、この順序ではなく、

半田付け \rightarrow 素子のマウント \rightarrow ボンディング

の順で作業を行う方が、作業自体は多少やりにくい側面も出て来るが、失敗する可能性が低くなり、失敗した際やり直すことになっても、二度手間になることを防ぐことが可能となる。

2 測定

都立大希釈冷凍機に、カロリメータ #61-A(吸収体なし)、#61-B(吸収体あり)を組み込んだ。図1参照。温度計

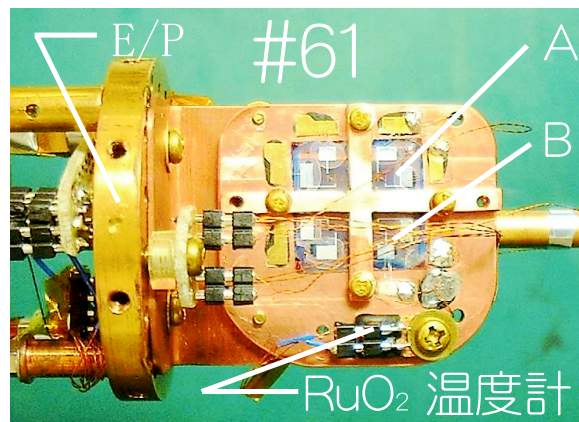


図 1: #61 組み込み時の写真

には RuO_2 を用いて E/P の温度、パッド上の温度を別々にモニターできる仕様である。カロリメータの乗っているパッド上での温度モニターには、LTC-21 Temperature Controller を用いている。E/P の温度コントロールには、AVS-47 Resistance Bridge、TS-530 Temperature Controller を用いてコントロールしている。カロリメータの抵抗値の測定には、LR-700 Resistance Bridge を用いている。このブリッジは、約 16Hz の交流電流をサンプルに流して抵抗値を測定する。この時流れる電流は、Resistance Range (R_{range}) と Excitation Range (V_{range}) の値によって

決まり、実行値で、

$$I = \frac{V_{range}}{R_{range}} \quad (9)$$

のようになる。測定装置などの配線の模式図を、図??に示す。測定は、LR-700のResistance、Exitationのレンジを、下の表1の様に变化させ、カロリメータを流れる電流の大きさを、6通りとれるようにし、Filter 10sにセットして10秒間の平均値を記録した。

Resistance [Ω]	2	2	20	20	200	200
Exitation [μV]	20	60	20	60	20	60
Current [μA]	0.1	0.3	1	3	10	30

表 1: LR-700 のレンジと、その時流れる電流値

3 結果

3.1 R-T 特性

2 Ω レンジで取ったデータでは、測定した温度範囲内では超伝導に転移しなかったということと、200 Ω レンジで取ったデータは、誤差内でほとんど20[Ω]/20[μV]レンジで測定したデータと一致するので、ここでは20[Ω]/20[μV](黒丸)と、20[Ω]/60[μV](白丸)とを重ねて、図2、図3にそれぞれ示す。20[Ω]/60[μV](白丸)では、流す電流値が大きくなっているため、発熱量が大きく、LTC-21で見ている温度よりもカロリメータの温度は高く、超伝導転移温度が低くなって、R-Tの傾きも急になっているように見える。

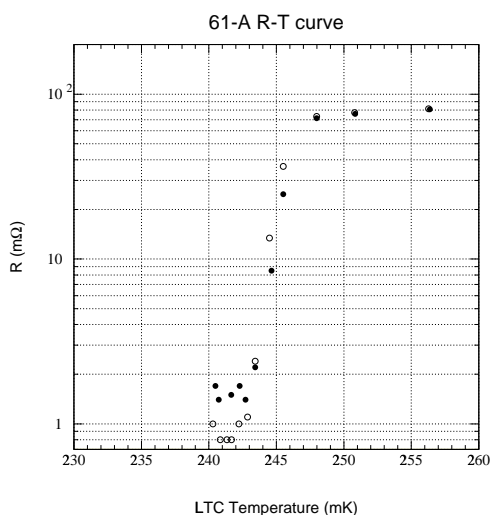


図 2: #61-A R-T 特性

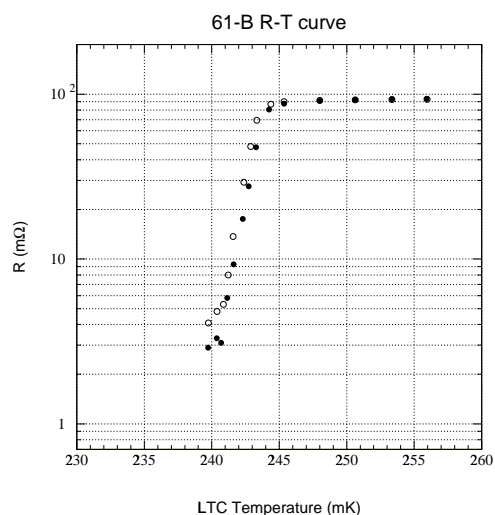


図 3: #61-B R-T 特性

3.2 パラメータ

20[Ω]/20[μV]レンジで測定したものを用い、各種パラメータを求めたものを、表2にまとめる。転移温度 T_C は、残留抵抗 R_0 の半分の値を持つときの温度として求め、転移幅 ΔT_C については、抵抗値が残留抵抗の値の10%から90%になる温度幅として求めている。表中の α については、

$$\alpha \sim \frac{8}{5} \frac{T_C}{\Delta T_C} \quad (10)$$

という式を用いて求めた。また、 $20[\Omega]/20[\mu V]$ レンジで測定したものから、ある測定点と、その前後の温度での測定

素子の名称	#61-A	#61-B
吸収体	無し	有り
残留抵抗 R_0 [Ω]	87.26	95.70
オフセット抵抗 [Ω]	~ 3	~ 3
転移温度 T_C [mK]	246	243
転移幅 ΔT_C [mK]	3.4	3.2
α	116	123

表 2: 測定より求めた各種パラメータ

値の、合計 3 点を通る 2 次曲線を求めてやり、その点での接線の傾き dR/dT を下の式に代入することで、

$$\alpha \equiv \frac{d \ln R}{d \ln T} = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT} \quad (11)$$

α の値をそれぞれの温度で求めることができる。これをグラフにするとそれぞれ、図 4、図 5 となる。

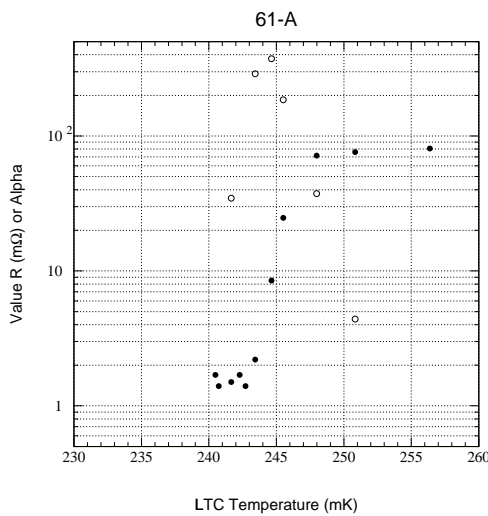


図 4: #61-A α の値を上書き

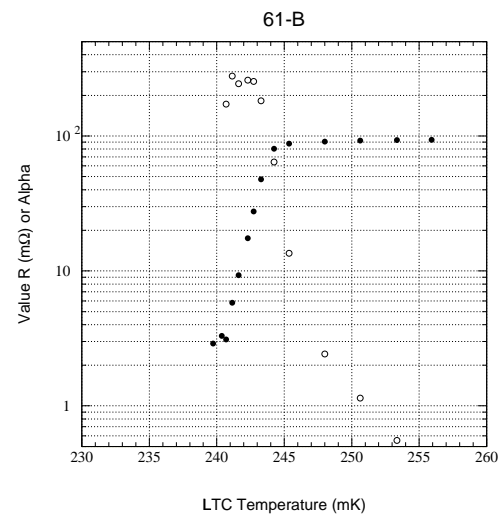


図 5: #61-B α の値を上書き

3.3 I-R 特性

熱伝導度 G は、

$$G \equiv \frac{dP}{dT}$$

の式で定義される。これと α の定義式 (??) から、

$$G = \frac{\alpha R}{T} \frac{dP}{dR} \quad (12)$$

と表すことができるので、測定時のジュール発熱の変化量 dP と、それによる抵抗値の変化量 dR とから G を求めることができる。この方法を用いて、#61-A、#61-B それぞれの素子について求め、熱伝導度 G と温度 T との関係を表したのが、それぞれ、図 6、図?? である。LR-700 のブリッジのレンジを、 $20[\mu V]/20[\Omega]$ として測定した抵抗値と、 $20[\mu V]/60[\Omega]$ として測定した抵抗値との差を dR とし、その時のジュール発熱の差を dP として求めた。

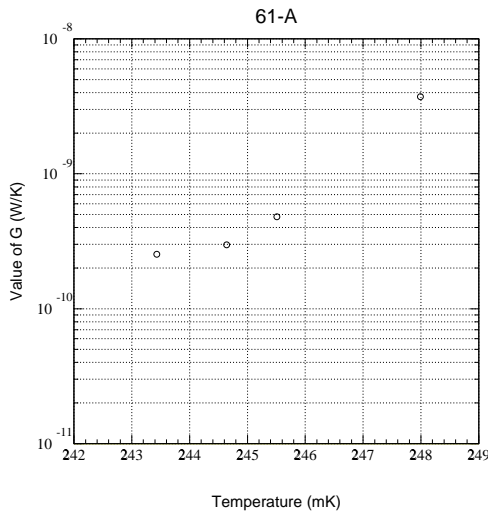


図 6: #61-A 熱伝導度

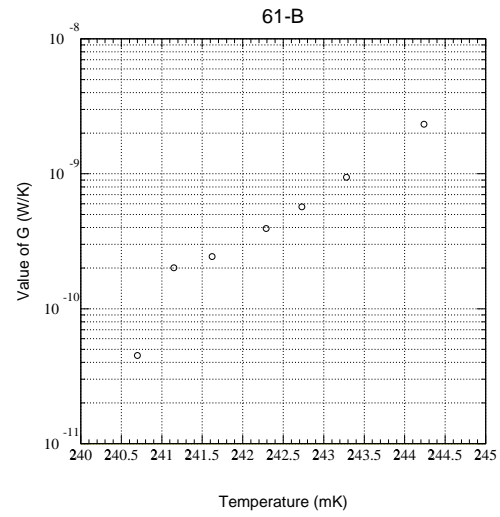


図 7: #61-B 熱伝導度

4 考察

5 性能の見積もり

5.1 エネルギー分解能

α の大きな極限での TES カロリメータの素子のみで決まるエネルギー分解能は、動作温度 T 、その温度での熱容量を C として、

$$\Delta E \sim 2.36 \sqrt{4k_B T^2 C \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{n+1}{2}}} \quad (13)$$

で表される。ここで、 n は物質による定数で Si の場合は、 $n = 4$ として良い。また、Si の熱容量の式は、式 (6) で表されるため、

$$\Delta E \sim 480 \sqrt{\frac{T^5}{\alpha}} \text{ [eV]} \quad (14)$$

と表すことができる。これを素子 #61-B に適用し、カロリメータの動作温度と、そのときに期待される分解能との関係をプロットしたものが、図 8 である。

5.2 動作点の決定

次に動作時にカロリメータに流すバイアス電流について考える。カロリメータを温度 T_C の熱浴に固定して動作させる場合を考える。動作点での TES の部分の温度を T 、抵抗値を R 、バイアス電流を I 、熱伝導度を G とする。動作点では、TES のジュール発熱 RI^2 が、熱浴に逃げて行く熱量 $G(T - T_C)$ と等しいことから、

$$RI^2 = G(T - T_C) \quad (15)$$

が成り立っている。これを变形させると、

$$I = \sqrt{\frac{G(T - T_C)}{R}} \quad (16)$$

となるので、動作温度 T を固定した際の、熱浴の温度とバイアス電流の関係を求めることができる。 α の値、 ΔE の値から $\sim 241\text{mK}$ で動作させるのが好ましい。その際の最適なバイアス電流の値を図 9 から求めると、 $5\mu\text{A}$ 程度のバイアス電流で動作させてやれば良いことがわかる。

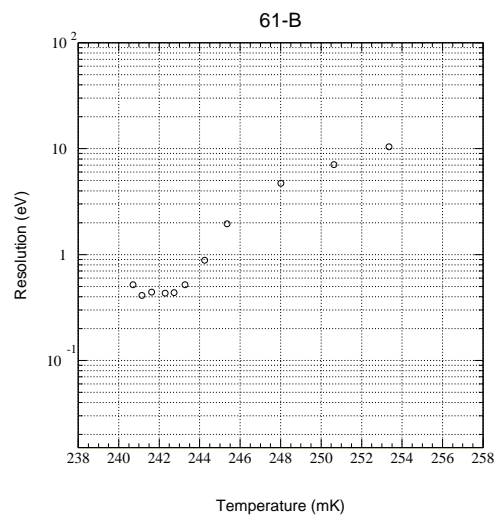


図 8: #61-B 素子のみで決まるエネルギー分解能

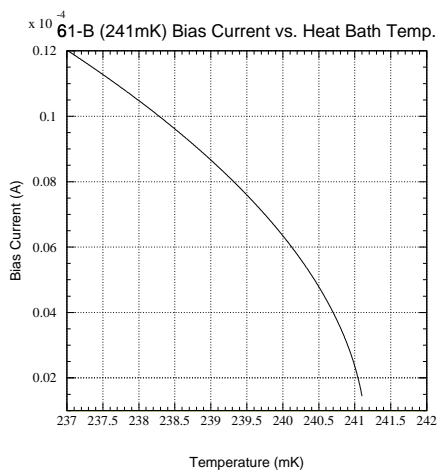


図 9: バイアス電流と熱浴の温度の関係

素子の名前	#61-B
T [mK]	241
R [Ω]	5.8
α	278
ΔE [eV]	0.41
C [J/K]	1.7×10^{-13}
G [W/K]	2.0×10^{-10}

図 10: 動作点候補