

TMU #61-B Simulation (2001年5月下旬)

広池 哲平

2001年6月4日

概要

素子 #61-B を都立大希釈冷凍機に組み込み、X線パルスの取得に成功した。エネルギー分解能は、最も良いデータを用いて 113 eV であった。素子の性能自体は良いので、今後はその性能をどこまで引き出せるかが鍵となってくる。動作条件についてシミュレーションを行った。

1 素子について

各種パラメータを表にしてまとめる。

素子の名称	#61-B
吸収体 (Sn)	有り
残留抵抗 R_0 [m Ω]	95.70
オフセット抵抗 [m Ω]	~ 3
転移温度 T_C [mK]	243
転移幅 ΔT_C [mK]	3.2

表 1: 各種パラメータ

温度 T_S [mK]	242
測定時のバイアス電流 I [μ A]	1.0
抵抗値 R [m Ω]	5.8
温度計感度 α	278
エネルギー分解能 ΔE [eV]	0.41
熱容量 C [J/K]	9.6×10^{-13}
熱伝導度 G [W/K]	2.0×10^{-10}
時定数 τ_0 [ms]	4.8

表 2: 熱浴温度 242 mK に於けるパラメータ

2 Simulation 其之壱

TES の動作温度を $T = 242$ mK にて動作させるとする。また、温度計感度 $\alpha = 250$ とし、 $G_0 = 5.0 \times 10^{-7}$ という値を用いている。以下では熱浴の温度 T_s を、240 mK、220 mK、180 mK と変化させたときの、TES の抵抗値、ジョンソンノイズ、ループゲイン、有効時定数、パルスハイトについて、それぞれ、バイアス電流に対する依存性を調べたものである。シャント抵抗の値は、実験にも用いた $T_s = 15.1$ m Ω を用いている。

2.1 TES の抵抗値

図 /reffig:simulation.eps のように、TES に流れる電流を i_{tes} 、シャント抵抗 R_s を流れる電流を i_s とする。TES の抵抗値を R とし、バイアス電流を I_b とすると、

$$I_b = i_{tes} + i_s \quad (1)$$

$$i_{tes} R = i_s R_s \quad (2)$$

の関係があり、また、TES のジュール発熱量と熱浴へ流れる熱量が釣り合っていることから、

$$i_{tes}^2 R = \frac{G_0}{n} (T^n - T_s^n) \quad (3)$$

$$= \frac{G_0}{4} (T^4 - T_s^4) \quad (4)$$

ここで、 $n = 4$ としている。以上3つの式を連立させて R について解くと、

$$R = R_s \left\{ -1 + \frac{2R_s I_b^2}{G_0(T^4 - T_s^4)} + \sqrt{\left(1 - \frac{2I_b^2}{G_0(T^4 - T_s^4)}\right)^2 - 1} \right\} \quad (5)$$

となる。図1に示す。

2.2 ジョンソンノイズ

読み出しを含めたシステムの増幅度を $\Xi = 1.6 \times 10^6$ [V/A] とする。ジョンソンノイズは、ボルツマン定数を k_B として、

$$\delta I = \frac{\sqrt{4k_B T R + 4k_B T_s R_s}}{R + R_s} \quad (6)$$

の様に表せる。 R は I_B の関数となっている。これに 1.6×10^6 [V/A] を掛けてやれば、 $[V/\sqrt{\text{Hz}}]$ としてノイズパワーが求まる。図2に示す。

2.3 ループゲイン

定電圧バイアス下でのループゲインを \mathcal{L} とすると、

$$\mathcal{L} = \frac{P_b \alpha}{GT} = \frac{P_b \alpha}{G_0 T^n} \quad (7)$$

$$= \alpha \frac{G_0/n(T^4 - T_s^4)}{G_0 T^4} \quad (8)$$

$$= \alpha \left\{ 1 - \left(\frac{T_s}{T}\right)^4 \right\} \quad (9)$$

と表せる。これに、疑似的定電圧バイアスを考慮して補正を加え、補正後のループゲイン \mathcal{L}_1 とすると、

$$\mathcal{L}_1 = \mathcal{L} \left(1 - \frac{2}{1 + R/R_s} \right) \quad (10)$$

という関係式で、疑似的定電圧バイアス下のループゲインが表せる。図3に示す。

2.4 有効時定数

熱伝導度 G と熱容量 C から時定数 $\tau_0 = C/G$ が求まる。有効時定数 τ_{eff} は、

$$\tau_{eff} = \frac{\tau_0}{\mathcal{L}_1 + 1} \quad (11)$$

と表すことができる。図4に示す。

2.5 パルスハイト

読み出し系を含めた全システムからの出力を、オシロスコープを用いてモニターできるわけだが、そのパルスハイトは、

$$V_0 = \frac{\Xi E}{V_b \tau_{eff}} \quad (12)$$

$$= \frac{\Xi E}{\tau_{eff}} \frac{R + R_s}{R_s R I_b} \quad (13)$$

の関係式で表される。ここで Ξ は読み出しシステムのゲインであり、 E は入射エネルギーを表しており、TMU に於いての実験では、線源のは Fe を用いており、 $E = 5.9$ [keV] = 9.45×10^{-16} [J] である。図5に示す。

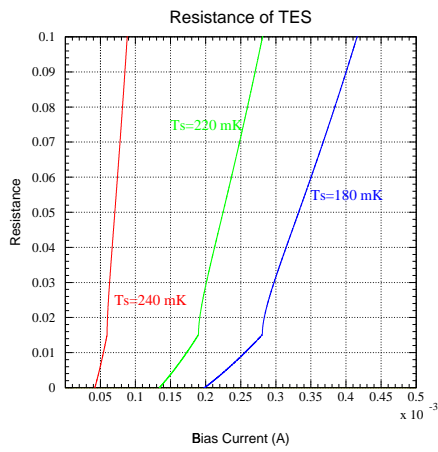


図 1: TES の抵抗値

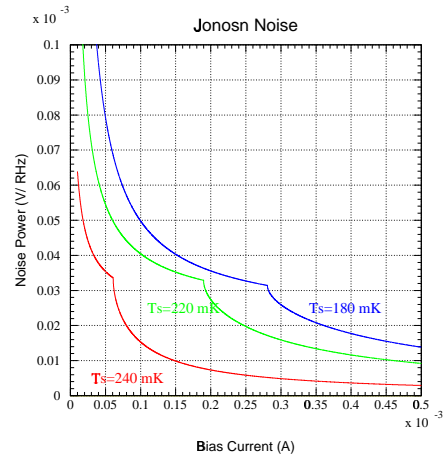


図 2: ジョンソンノイズ

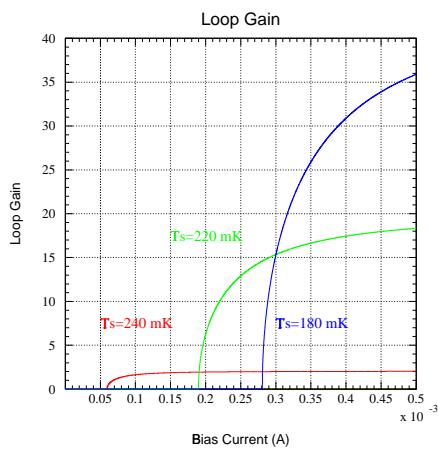


図 3: ループゲイン

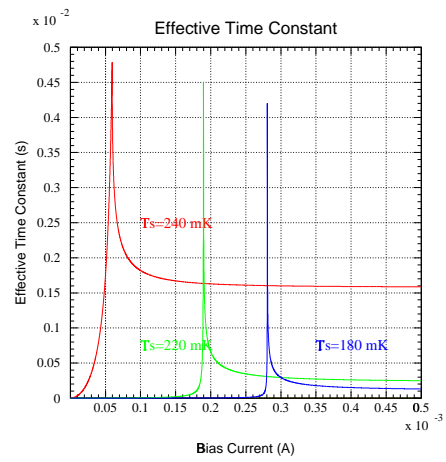


図 4: 有効時定数

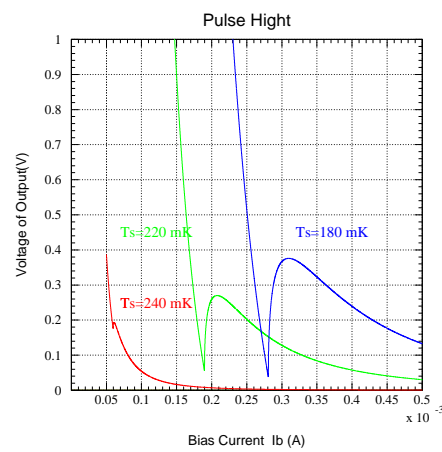


図 5: パルスハイト

3 Simulation 其之式 (おまけ)

今度は、シャント抵抗の値を仮に $1 \text{ m}\Omega$ とした場合について、上のシミュレーションと同様のことを行った。実線は上で行った $R_s = 15.1 \text{ m}\Omega$ での値を示しており、破線が $R_s = 1 \text{ m}\Omega$ とした場合について示している。

これらのデータは、

`tepei/exp/tes/0524/data/gragh/`

に入っています。1と付いているのが、シャント抵抗を $15.1 \text{ m}\Omega$ としているものです。2の添字が、 $1 \text{ m}\Omega$ を表しています。

このレポートは、すぐにでも改訂予定です。(AM 3:00 1.June.2001)

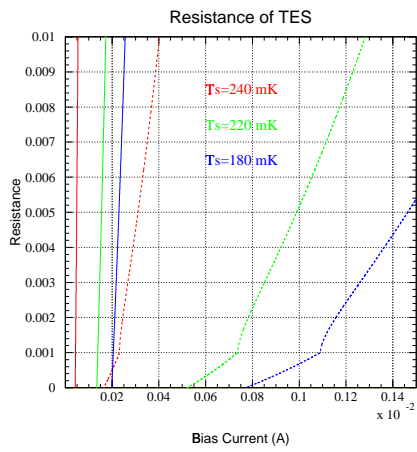


図 6: TES の抵抗値

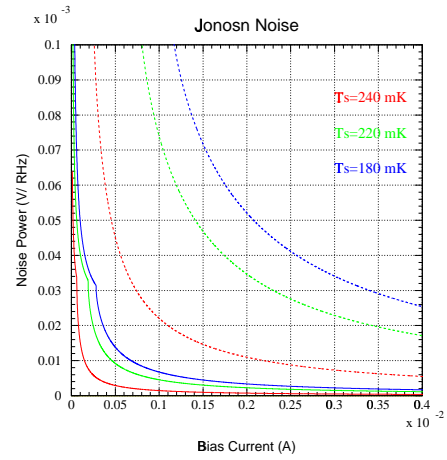


図 7: ジョーンソンノイズ

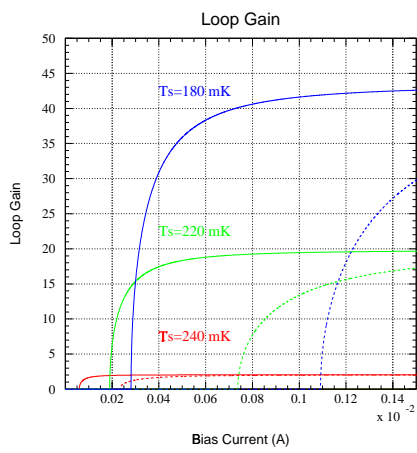


図 8: ループゲイン

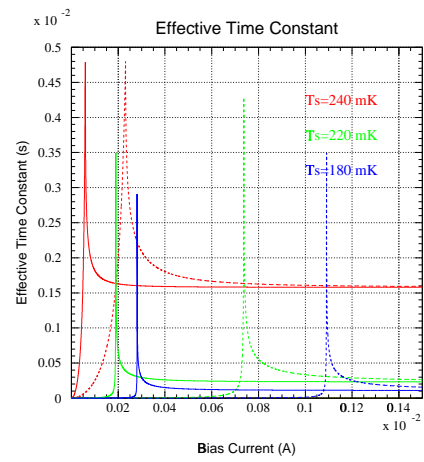


図 9: 有効時定数

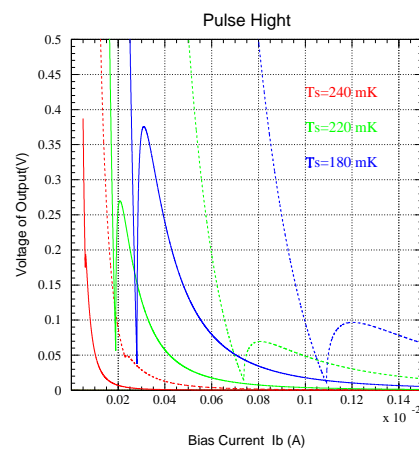


図 10: パルスハイト

4 Simulation 其之参

これまで、シャント抵抗 (マンガン線) の値については、常温での抵抗の値を用いてシミュレーションしてきたが、実験中は実際には He 温度にあるので、その寄与を考慮するべきである。

4.1 抵抗値の測定

6/1 の打ち合せの後、以下の 5 つの条件で抵抗値の測定を行った。

0) 抵抗の足のハンダ盛

1) ϕ 1 mm で 5 mm くらいの長さのマンガン線

2) ϕ 1 mm で 8 mm くらいの長さのマンガン線

3) ϕ 1 mm で 10 mm くらいの長さのマンガン線

4) ϕ 1 mm で 20 mm くらいの長さのマンガン線

この前の実験に用いたのは、4) で抵抗値 15.1 m Ω (常温) であるという触れ込みのものである。1 ~ 3) は今回新しく作ったものである。LR-700 の 20 m Ω / 200 uV レンジで測定した結果を、図 3 に示す。

	0)	1)	2)	3)	4)
常温 [m Ω]	4.6270	4.8505	6.700	9.681	14.252
He 温度 [m Ω]	0.0108	1.7810	3.0880	4.4402	9.8560

表 3: シャント抵抗の値

4.2 補正後

シャント抵抗の値を、きちんと He 温度のものに補正してやる。ただし、ここで G_0 の値を測定結果に合うように、 $G_0 = 5 \times 10^{-7}$ から $G_0 = 3 \times 10^{-7}$ に修正している。点線は $R_s = 15.1$ [m Ω]、 $G_0 = 5 \times 10^{-7}$ [W/K] という値を用いており、繋がっている方の線は、 $R_s = 9.856$ [m Ω]、 $G_0 = 3 \times 10^{-7}$ [W/K] という値を用いている。

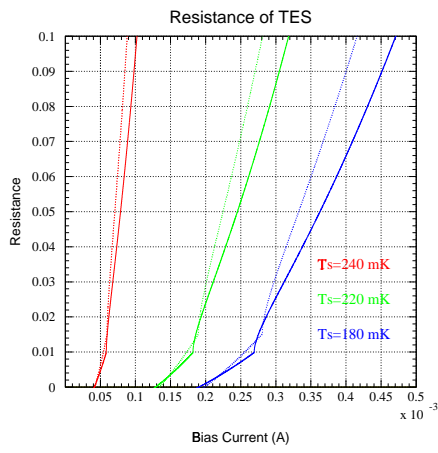


図 11: TES の抵抗値

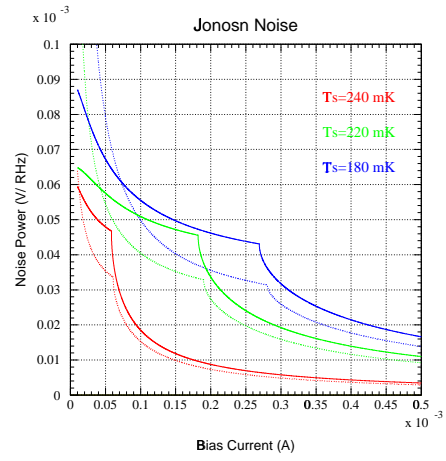


図 12: ジョソソノイズ

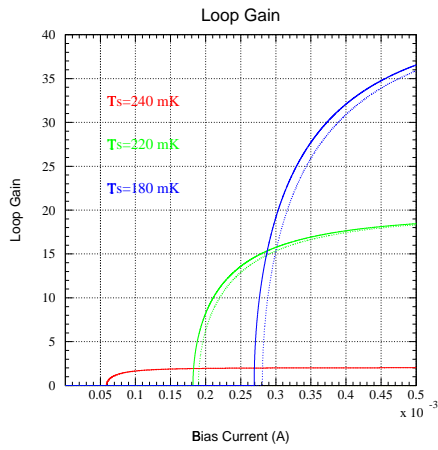


図 13: ループゲイン

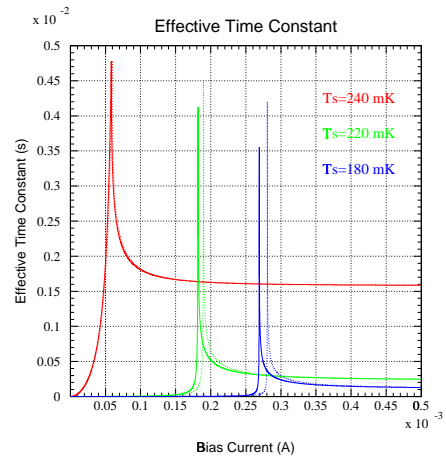


図 14: 有効時定数

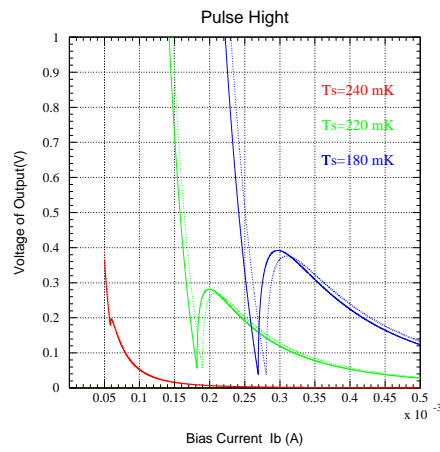


図 15: パルスハイト

5 Simulation 其之四

新しく作ったシャント抵抗について、 $1.7810 \text{ [m}\Omega\text{]}$ 、 $3.0880 \text{ [m}\Omega\text{]}$ の2つの条件について同様のシミュレーションを行った。破線は $R_s = 15.1 \text{ [m}\Omega\text{]}$ を示している。

5.1 $R_s = 1.7810 \text{ [m}\Omega\text{]}$

図 16 ～図 20にそれぞれ示す。

5.2 $R_s = 3.0880 \text{ [m}\Omega\text{]}$

図 21 ～図 25にそれぞれ示す。

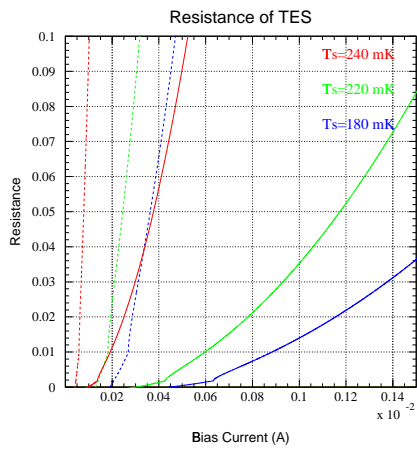


図 16: TES の抵抗値

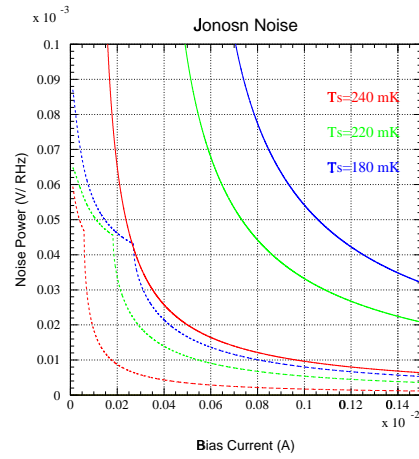


図 17: ジョーンソンノイズ

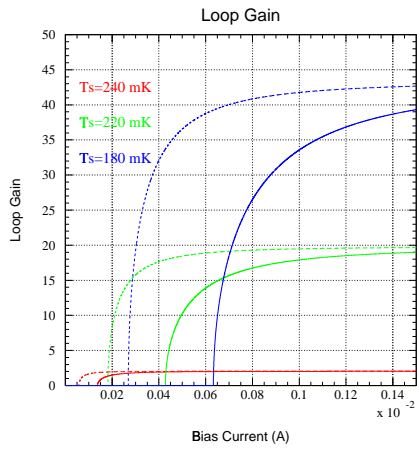


図 18: ループゲイン

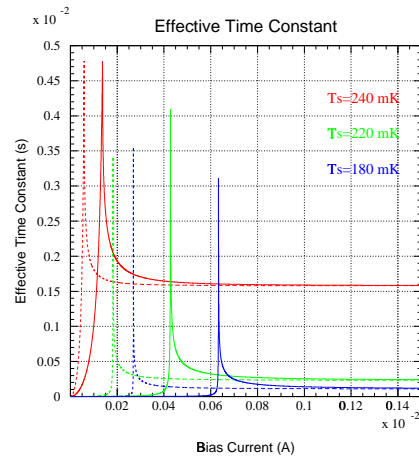


図 19: 有効時定数

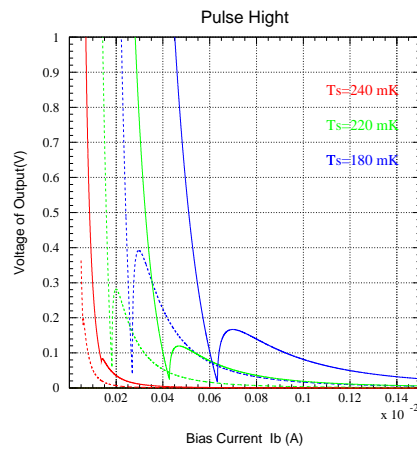


図 20: パルスハイト

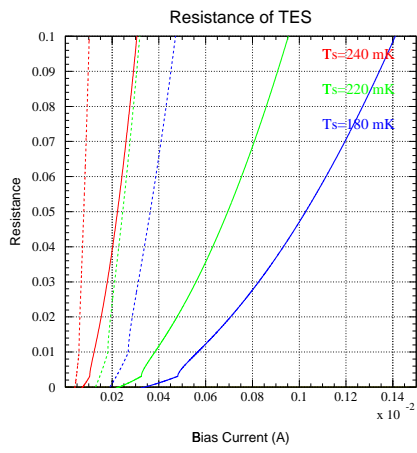


図 21: TES の抵抗値

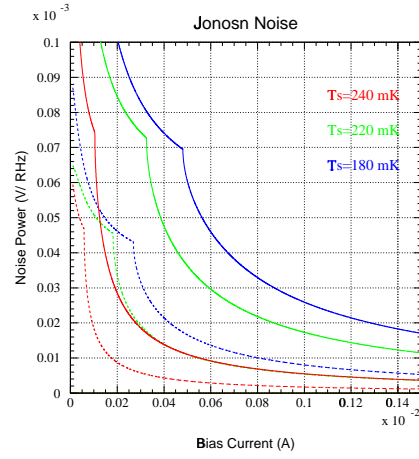


図 22: ジョンソンノイズ

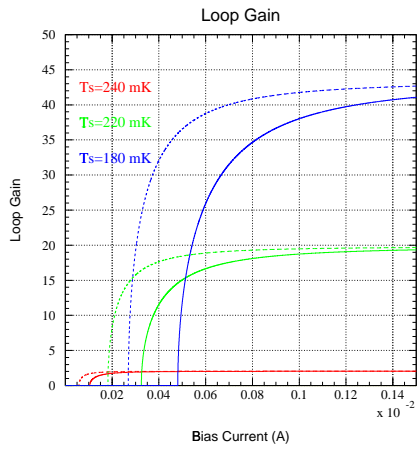


図 23: ループゲイン

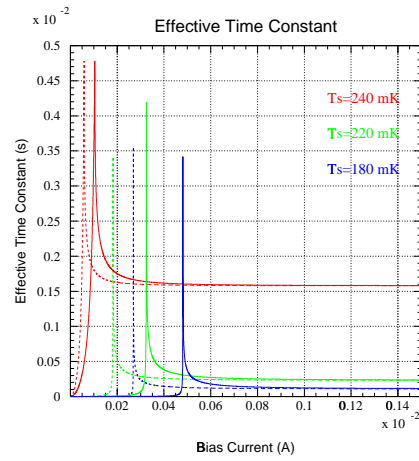


図 24: 有効時定数

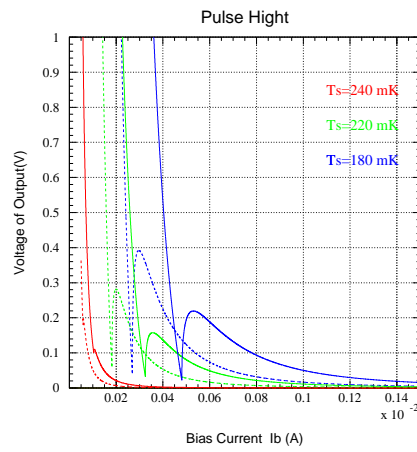


図 25: パルスハイト