2002年度 卒業論文
ホトダイオードを用いた半導体検出器の基礎特性の研究

奈良女子大学
理学部物理科学科
藤田真由子　　山内栄美

目 次

第 1 章　はじめに **1**
1.1　実験の目的 1
1.2　本論文の構成 1

第 2 章　放射線測定の原理 **3**
2.1　荷電粒子の相互作用 3
2.1.1　電離損失 3
2.2　γ 線の相互作用 5
2.2.1　光電効果 5
2.2.2　コンプトン散乱 6
2.2.3　電子対創生 7
2.2.4　光子の相互作用の全断面積 8

第 3 章　半導体検出器の特性 **9**
3.1　基本的な半導体の性質 9
3.1.1　バンド構造 9
3.1.2　半導体の荷電キャリア 10
3.1.3　真性荷電キャリアの濃度 11
3.1.4　不純物が加わった半導体 12
3.2　半導体検出器 14
3.2.1　pn 半導体接合 14
3.2.2　空乏層の厚さ 14
3.2.3　接合の静電容量 16
3.2.4　逆バイアス接合 17
3.2.5　半導体検出器の性質 17
3.2.6　電子ホールペアの平均エネルギー 17
3.2.7　線形性 18

第 4 章　実験準備 **19**
4.1 実験の概要 19
4.1.1 検出器 20
4.1.2 Pre-Amp 22
4.1.3 線源 24

第 5 章　実験 **27**
5.1 テストパルスによる動作チェック 27
5.1.1 Pre-Amp の線形性 28
5.1.2 ノイズと逆バイアスの関係 31
5.1.3 ノイズの Shapingtime への依存性 35

第 6 章　放射線源を用いた測定 **39**
6.1 Am の測定のセットアップ 39
6.2 Am 線源での Shapingtime への依存性 40
6.3 electron 数への変換 41
6.3.1 ペデスタルの測定 41
6.3.2 Threshold の決定 42
6.3.3 最もノイズが小さい時の測定 43
6.3.4 ADCcount から electron 数への変換 44
6.4 線源のみのシグナル 45

第 7 章　測定の解析 **47**
7.1 ノイズの解析 49
7.1.1 Pre-Amp の原理的ノイズ 49
7.1.2 Am での測定でのノイズの解析 52

第 8 章　まとめ **55**

第1章　はじめに

1.1　実験の目的

高エネルギー物理学は、素粒子物理学の実験的研究を行なう学問である。素粒子物理学の課題は, 究極的な構成要素とそれらの間に働く相互作用についての性質を明らかにすることである。そのため高エネルギー実験では、粒子の運動量や質量を精度良く計測できる検出器が要求される。検出器にはさまざまな種類があり、検出する粒子の種類やその実験目的によって使用する検出器が分けられる。

本実験では半導体検出器を用いて γ 線の検出を行い、その特性を調べる。また、信号とノイズの関係から粒子検出が可能であるか調べる。

1.2　本論文の構成

本論文では、はじめに放射線の相互作用について、半導体の性質について、半導体検出器について説明する。次に、本実験の Pre-Amp の作成と実験装置の動作チェック、線源をおいての γ 線の測定、ノイズの解析について述べる。

第2章　放射線測定の原理

素粒子を測定するためには、その粒子が物質中を通過する時にその物質を構成している原子(分子)、原子核と相互作用することを利用している。その相互作用は荷電粒子と γ 線のような荷電粒子でないものの 2 つに分けることができる。この章ではそれぞれについて述べていく。

2.1　荷電粒子の相互作用

2.1.1　電離損失

高速の荷電粒子は、物質を通過するときに物質を構成する原子内の電子と連続的に衝突を起こし、原子を励起したり電離したりして持っていたエネルギーを失っていく。このエネルギー損失を電離損失という。物質 1 g/cm^2 通過するときエネルギー損失は Bethe-Bloch の式によって次のように与えられる。

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_0 Z z^2 e^4}{mv^2 A}\left[ln\left(\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)}\right) - \beta^2\right] \tag{2.1}$$

$$\begin{cases} I : \text{電離ポテンシャル} \\ v : \text{入射荷電粒子の速度} \\ z : \text{入射荷電粒子の電荷} \\ e : \text{電子の電荷} \\ N_0 : \text{アボガドロ数} \\ Z : \text{物質の原子番号} \\ A : \text{物質の原子量} \\ m : \text{電子の質量} \\ \beta = v/c \end{cases}$$

よって、電離損失の特徴は次の通りである。
式 2.1 にあるように電荷 z の入射粒子の電離損失は

- 非相対論的速度 $(v \ll c)$ のとき $1/\beta^2$ に比例し、入射荷電粒子の運動量が大きくなると急激に減少する。
- 相対論的速度 $(\gamma \gg 1)$ のとき $log[b^2/Z(1-b^2)]$ に比例し、粒子の運動量とともに緩やかに増加する。

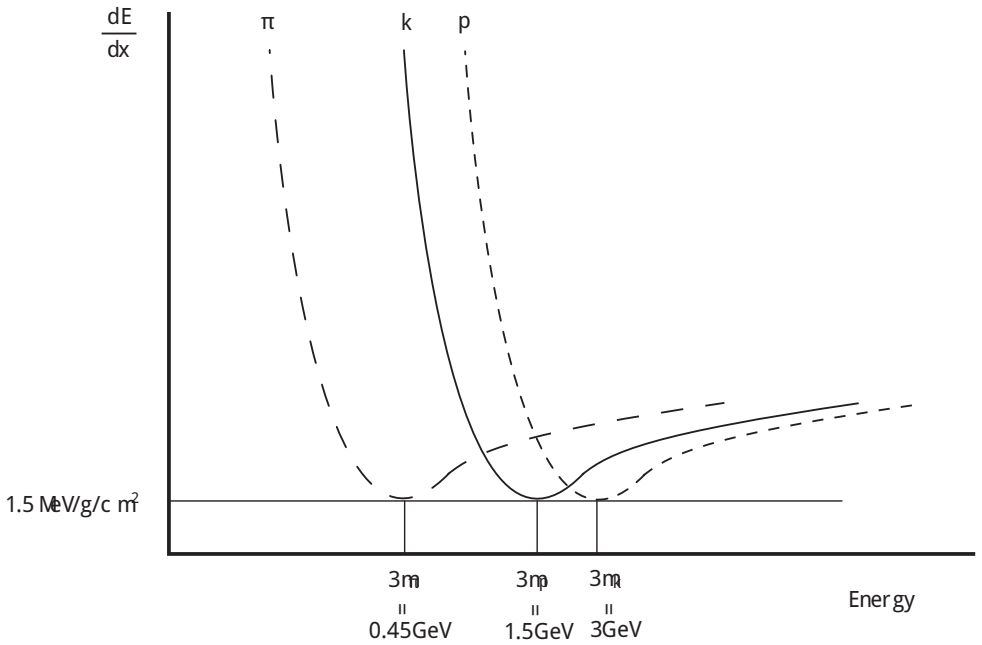

図 2.1: 入射荷電粒子の運動量と電離損失の関係

dE/dxが最小になる領域での電離を Minimumionizaition と呼ぶ。dE/dx は物質によらずほぼ一定である。よって、運動量と dE/dx を測定すると粒子を判別することができる。

2.2 γ 線の相互作用

物質中の光子 (X 線や γ 線) の振る舞いは、電荷を持った粒子の振る舞いとかなり異なる。特に光子は電荷を持っていないので、原子の電子との非弾性散乱を不可能にさせる。その代わりの物質中での X 線や γ 線の主な相互作用は次の 3 つである。

- ⋆ 光電効果
- ⋆ コンプトン散乱
- ⋆ 電子対創生

これらの反応は X 線や γ 線の 2 つの定量的な特徴の法則がある。

- X 線や γ 線は電荷を持った粒子より、物質中を良く浸透する。
  - これは、電子との非弾性衝突の断面積より、上記の 3 つの作用の断面積の方が小さいからである。
- 光子のビームは、物質を通過する際に強度が減少するだけで、エネルギーは変わらない。
  - これは吸収作用と分散作用によってビームからの光子が取り除かれることによる、3 つの過程の結果である。それゆえ、光子は最初のエネルギーを保っているが、相互作用することにより、総計は減っている。

2.2.1 光電効果

光電効果とは、電子が光子を吸収し、原子が電子を放出することである (図 2.2)。飛び出す電子のエネルギーは、次式で表わされる。

$$E = h\nu - B.E \tag{2.2}$$

ここで、B.E(binding energy) は電子の束縛エネルギーである。自由電子には光子の吸収は出来ないし、運動量保存も出来ないので、光電効果は常に、核の束縛電子で起る。
図 2.2 は、入射光子のエネルギー関数としての典型的な光電断面積である。

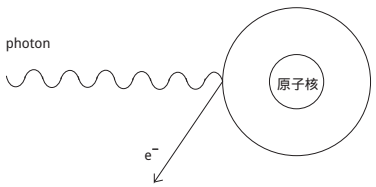

図 2.2: 光電効果

この断面積はボルン近似を使って計算でき、K 殻については、1 原子当り、

$$\Phi_{photo} = \frac{6.3 \times 10^{-18}}{Z^2}(\frac{\nu_k}{\nu})^{\frac{8}{3}} \tag{2.3}$$

ν_k:K 殻における振動数

となり、この寄与は Z の 4 ~ 5 倍に比例する。よって、原子番号の大きい物質の方が、断面積が大きくなり、光電効果が起きやすい。

2.2.2　コンプトン散乱

コンプトン散乱は、自由電子と光子の散乱である。
コンプトン散乱の断面積は Klein-Nishina の公式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2}\frac{1}{[1+\gamma(1-cos\theta)]^2}(1+cos^2\theta+\frac{\gamma^2(1-cos\theta)^2}{1+\gamma(1-cos\theta)}) \tag{2.4}$$

$d\Omega$:立体角　　r_e:古典的電子の半径　　$\gamma = h\nu/m_ec^2$

として知られ、これを $d\Omega$ について 1 回積分すれば、求められる。

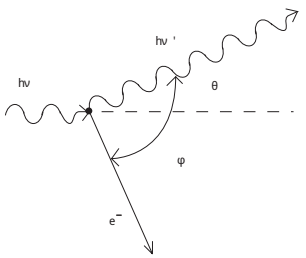

図 2.3: コンプトン散乱

2.2.3 電子対創生

電子対創生は光子が電子-陽電子のペアに変化することである。この反応は運動量保存という理由から、核が存在するときにしか起らない。さらにペアを作る時には、光子は最低でも、1.022MeV のエネルギーが必要である。

$$\sigma_{pair} = 4Z^2\alpha r_e^2 \left[\frac{7}{9}\left(ln\frac{2h\nu}{m_e c^2} - f(Z)\right) - \frac{109}{54}\right] \tag{2.5}$$

α=1/137

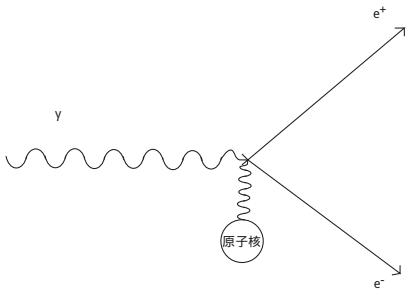

図 2.4: 電子対創成

また、高エネルギーの光子を制動放射による対創成の最も顕著な例はシャワーである。

$$\gamma \rightarrow e^+e^- \tag{2.6}$$

これは対創成のエネルギーが臨界エネルギーに落ちるまで続く。

2.2.4　光子の相互作用の全断面積

物質中の光子の相互作用する全確率は個々の断面積の合計である。原子当りの断面積は

$$\sigma = \Phi_{photo} + Z\sigma_c + \sigma_{pair} \tag{2.7}$$

となる。

また図 2.5 は原子番号とエネルギーによる光子全断面積である。

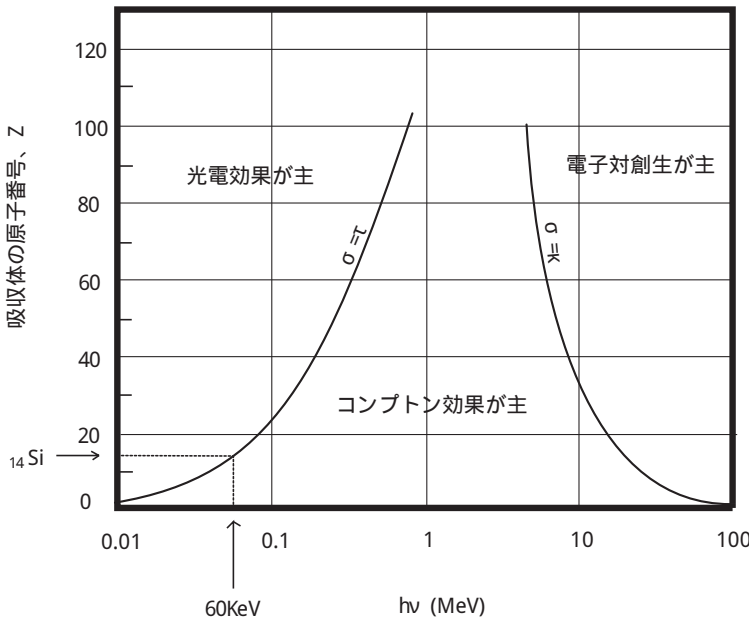

図 2.5: 光子全断面積

例：原子番号 14 の吸収体 Si が 60keV の γ 線を吸収する場合の主な相互作用は、光電効果とコンプトン効果である。

第3章　半導体検出器の特性

半導体検出器は水晶結晶性半導体物質で出来ている。ここでは、半導体物質の基礎的な特性や、放射線検出器としての重要な電気的性質を述べる。

3.1　基本的な半導体の性質

3.1.1　バンド構造

半導体は結晶体からなる物質で、その外殻のエネルギー準位はエネルギーバンド構造を示している。この基本的な構造は、価電子帯、禁止帯、伝導帯から成っている。

◊ 価電子帯: 価電子によって満たされている。
◊ 禁止帯 (エネルギーギャップ) : エネルギー準位が存在しない。
◊ 伝導帯: 電流を運ぶ電子が存在する。

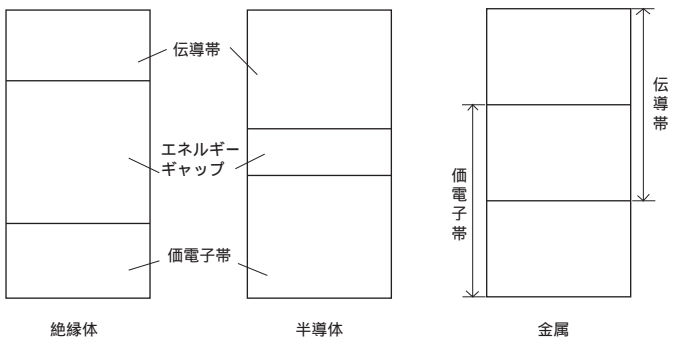

図 3.1: エネルギーバンド構造

バンド構造によって絶縁体、導体、半導体と性質が変わる。

◇ 絶縁体

電子は全て価電子帯にあり、エネルギーギャップが大きいため熱エネルギーによって励起した電子は伝導帯へ行くことができない。そのため、電場が加えられたとき、電流は流れない。

◇ 導体

エネルギーギャップがないので、熱エネルギーによって励起した電子が伝導帯にすぐに行ける。そのため、電場が加えられるたとき電流が流れる。

◇ 半導体

エネルギーギャップは、熱エネルギーで励起されたいくつかの電子は越えることができる。そのため、電場が加えられたとき、小さな電流が流れる。

3.1.2　半導体の荷電キャリア

半導体のエネルギー状態がもっとも低い 0K では価電子帯の電子は全て格子間の共有結合に関与している。例として、シリコンとゲルマニウムの場合を図示する。

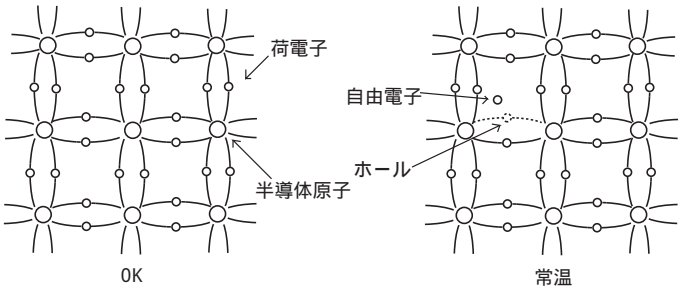

図 3.2: シリコンとゲルマニウム

シリコンとゲルマニウムは 4 つの価電子を持っている。しかし、熱エネルギーの作用によりもとの位置にホールを残し、価電子は伝導帯へ励起することができる。ホールに隣接した電子はホールに移動し、これを繰り返して、ホールは結晶を通り抜ける。

価電子帯で負の電子の海と比べて、ホールは正であるので正の電荷を持ったキャリアのように作用し、結晶を通してその動きは電流を構成す

る。半導体では電流は 2 つの源から発生する。その 2 つは、伝導帯の自由電子の動きと価電子帯のホールの動きである。

3.1.3 真性荷電キャリアの濃度

半導体では電子ホールペアは熱エネルギーによって絶えず発生している。同時に、再結合する電子やホールも存在する。安定した条件下では、電子ホールペアは均衡した濃度で作られている。電子の濃度を n_i とすると

$$n_i = \sqrt{N_c N_r} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \tag{3.1}$$

$$\begin{cases} N_c\text{: 伝導帯での状態数} \\ N_r\text{: 価電子帯での状態数} \\ E_g\text{: } 0K \text{ でのエネルギーギャップ} \\ k\text{ : ボルツマン定数} \\ A\text{ : 温度に独立な定数} \end{cases}$$

$N_c N_r$ は Fermi-Dirac 統計で計算でき、$T^{\frac{3}{2}}$ に比例する。

T=300K での濃度 n_i の値は、ゲルマニウムで $2.5 \times 10^{13} cm^{-3}$、シリコンで $1.5 \times 10^{10} cm^{-3}$ である。物質は $10^{22} atoms/cm^3$ のオーダーで構成されているので、とても濃度が低いことがわかる。

3.1.4　不純物が加わった半導体

真性半導体の結晶では、伝導帯の電子とホールの数は等しくなっている。このバランスは 1 つ多いまたは少ない価電子を持つ不純物を入れることによって変わる。 4 価のシリコンやゲルマニウムにとって、それは 5 価や 3 価を意味する。それらの不純物が加わったものを、不純物半導体と呼ぶ。不純物の量は一般にとても少なく 10 億分の 1 の濃度で含まれている。

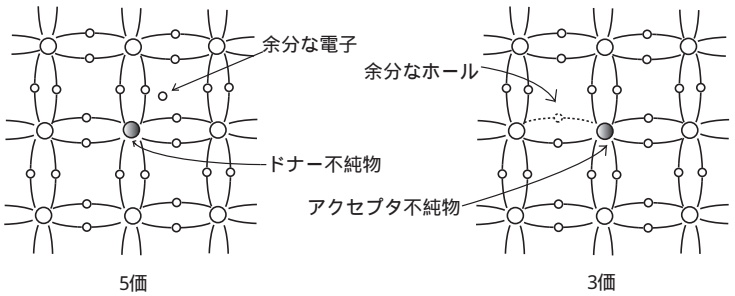

図 3.3: シリコンとゲルマニウム

◇ 不純物が 5 価の場合
電子は 1 原子当り 4 つの価電子を持つため、価電子帯を満たしている。不純物の原子は 5 つの価電子を持っているため、余分な電子はこの価電子帯に入ることができない。この余分な電子は、エネルギーギャップに作られた不連続エネルギー準位に属する。この準位と伝導帯の間は極端に狭い。(シリコン:0.05eV、ゲルマニウム:0.01eV) そのため室温で、この余分な電子は簡単に伝導帯に励起される。そのような物質で、電流は電子が主である。このような電子が主なキャリアである不純物半導体を n 型半導体と呼ぶ。

◇ 不純物が 3 価の場合
不純物の原子は 3 つの価電子を持つため、価電子帯を満たす十分な電子がない。そのためホールが過剰な状態となる。エネルギーギャップに不連続エネルギー準位を作る。この準位と価電子帯の間は非常に狭い。そのため、価電子帯の電子はこの余分な準位へ簡単に励起でき、あとにホールを残す。そのような物質で、電流はホールが主である。このようなホー

ルが主なキャリアである不純物半導体を p 型半導体と呼ぶ。

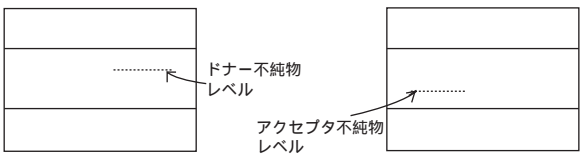

図 3.4: 不連続エネルギー準位

電子とホールの濃度は不純物の種類によらず、熱平衡の時シンプルな質量作用の法則に従う。

$$np = n_i = AT^3 \exp\left(\frac{-E_q}{kT}\right) \tag{3.2}$$

$$\begin{cases} n : \text{電子の濃度} \\ p : \text{ホールの濃度} \\ n_i : \text{真性濃度} \end{cases}$$

半導体は中性であるので、正と負の電荷密度は等しくならなければならない。

$$N_D + p = N_A + n \tag{3.3}$$

$$\begin{cases} N_D : \text{ドナーの濃度} \\ N_A : \text{アクセプターの濃度} \end{cases}$$

n 型の物質では N_A = 0 、$(n \gg p)$ 電子の密度は $(n \sim N_D)$。すなわち電子の濃度は近似的に不純物の濃度と同じである。少数キャリアの濃度は

$$p \simeq \frac{n_i^2}{N_D} \tag{3.4}$$

となり、n 型の伝導率または抵抗率は

$$\frac{1}{\rho} = \sigma \simeq eN_D\mu_e \tag{3.5}$$

となる。

3.2　半導体検出器

3.2.1　pn 半導体接合

pn 接合の形は 2 つの領域間の境界面について、特別な領域が作られる。2 つの物質間の電子とホールの濃度が違うので、ホールが n 型領域へ拡散し、同様に電子も p 型領域へ拡散する。その結果、電子の拡散は p 側でホールを満たし、ホールの拡散は n 側で電子を捕らえる。最初は p 側も n 側も中性だったので、電子とホールの再結合で、 p 側は余分な電子を注入され負になり、n 側が正の電荷を持った状態になる。これは接合を横切る電場の勾配を作る。この電場のために接合を横切るポテンシャルの違いが生まれ、この差を接触ポテンシャルと呼ぶ。

また、このポテンシャルの変化した領域は空乏層として知られている。この領域に入るどんな電子またはホールも、電場によって、運び去られるので、自由に動く電荷はない。

もし、イオン化した放射線がこの領域に入ると、電子とホールのペアを解放し、電場によって運び去られ、半導体の端でイオン化に比例した電流の信号が検出できる。この空乏層の特性は放射線の検出にとって大いに魅力的なのである。

3.2.2　空乏層の厚さ

空乏層の幅は一般に小さく、n と p の不純物の濃度に依存する。空乏層の電荷密度分布 $\rho(\mathrm{x})$ が判っていれば、ε を誘電率として、ポアソン方程式

$$\frac{dV^2}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} \tag{3.6}$$

より、決定できる。
x_n は n 側の空乏層の広がりであり、x_p は p 側の広がりであるとすると、

$$\rho(x) = \begin{cases} eN_D & 0 < x < x_n \\ -eN_A & -x_p < x < 0 \end{cases} \tag{3.7}$$

となる。ここで、全電荷は保存されるので、

$$N_A x_P = N_D x_N \tag{3.8}$$

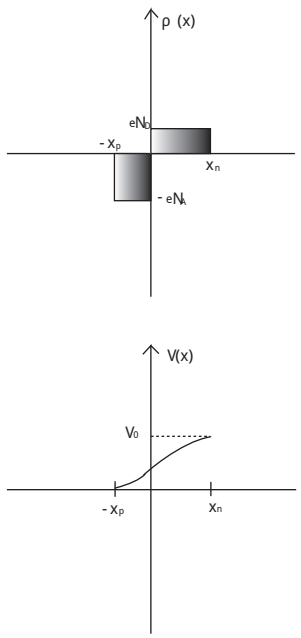

図 3.5: pn 接合の空乏層の計算の模型

となる。式 3.6 を 1 回積分して、

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}x + C_n & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}x + C_p & -x_p < x < 0 \end{cases} \tag{3.9}$$

となり、x=x_n,-x_p で dV/dx=0 であるから、

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}(x + x_n) & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}(x + x_p) & -x_p < x < 0 \end{cases} \tag{3.10}$$

となる。さらにもう 1 回積分して、

$$V(x) = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}(\frac{x^2}{2} - x_n x) + C & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}(\frac{x^2}{2} + x_p) + C' & -x_p < x < 0 \end{cases} \tag{3.11}$$

となり、2 つの解は x = 0 で連続なので、C=C' となる。
今 x = x_n で V(x)=V_0(一定) であるから、

$$V_0 = \frac{eN_D}{2\varepsilon}x_n^2 + C \tag{3.12}$$

となり、同様に p 側で x=x_p の時、V = 0 なので、

$$0 = -\frac{eN_A}{2\varepsilon}x_p^2 + C \tag{3.13}$$

ここで、C を消去すると、

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}(N_D x_n^2 + N_A x_p^2) \tag{3.14}$$

となる。ここで、電荷保存の関係より、

$$x_n = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D(1+N_D/N_A)}\right]^{\frac{1}{2}}, \quad x_p = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{eN_A(1+N_A/N_D)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.15}$$

となる。式 3.15 から、もし片方が他方より多くの不純物を含んでいるなら、空乏層は不純物が少ない方へ広がることが判る。

空乏層の全幅は、

$$d = x_n + x_p = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{e}\frac{(N_A+N_D)}{N_A N_D}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.16}$$

となる。もし、$N_A \gg N_D$ ならば、式 3.16 を近似して、

$$d \simeq x_n \simeq \left[\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.17}$$

となり、式 3.5 の抵抗率を使って、式 3.17 は、

$$d \simeq (2\varepsilon\rho_n\mu_e V_0)^{\frac{1}{2}} \tag{3.18}$$

となる。

3.2.3　接合の静電容量

電機的形状のために空乏層は、ある容量を持っている。平行平板での容量は、A を空乏層の面積、d を空乏層の幅として、

$$C = \varepsilon\frac{A}{d} \tag{3.19}$$

となる。この容量はノイズに比例する。

3.2.4 逆バイアス接合

これまでに記述されたpn接合は検出器として働くが、それだけでは、良い作用の特性を持っていない。一般に、pn固有の電場は効率のよい電荷の収集をするには十分ではない。そして、空乏層の厚さは低エネルギーの粒子だけは十分に止められる。この薄さは、信号を出力する時に電気的ノイズを増加ノイズに大きな容量を示す。よりよい結果は、逆バイアス電圧を接合にかけた時に得られる。 すなわち、負の電圧がp側にかかった時、この電圧はホールが接合から離れて、p側に引き付けられる効果を持つ。同様に電子はn側に引かれる。この効果は放射線検出のため空乏層を大きくし、感度も上がる。電圧を高くするほど、空乏層は広がる。さらに、外部からの高い電圧は、より効率のよい電荷収集ができる。加えられる最大の電圧は、半導体の抵抗によって限界がある。

3.2.5 半導体検出器の性質

ここで放射線の検出器としての半導体の特性を調べる。一般に金属を半導体に直接置いてもオーム性接触を作ることができない。実際、金属と半導体の接触は空乏層が半導体の方へ広がり、整流接合を作る結果となる。これを避ける為に不純物が半導体とリード線の間に使われる。不純物の濃度が高いので、空乏層は0に近くなり、要求されたオーム性接触を作る。

信号の分離の目的の為に検出器のバイアス電圧は直接より、むしろ連続の抵抗を通して与えられる。検出器からの電荷の信号を集める為に荷電敏感型のプリアンプが一般に使われる。信号は低いので、このプリアンプは低いノイズの特性を持っていなければならない。プリアンプの後の信号の過程は、1番よいシグナル-ノイズの特性を手に入れる為に、パルスを作ることを要求する。

3.2.6 電子ホールペアの平均エネルギー

他の検出器に比べて、半導体の主な長所は、電子-ホールペアを作るのに必要な平均エネルギーがとても小さいことである。与えられた温度での平均エネルギーは放射線の種類や、エネルギーに依存せず、金属の種類に依存する。

≪表 3.1 Average Energy / Electron-Hole Pair ≫

	Si	Ge
300K	3.62eV	-
77K	3.81eV	2.96eV

3.2.7　線形性

空乏層が全ての粒子を完全に止めるのに十分な厚さであることを過程すると、半導体の反応はエネルギーに比例しているべきである。もし、放射のエネルギーを E とすれば、$\frac{E}{W}$ の電子-ホールペアが作られる (W:平均エネルギー　表 3.1 参照)。n を収集効率と仮定すると、$Q = n\frac{E}{W}$ が電極に集められる。空乏層は容量 C を持っているので、測定できる電圧は、

$$V = \frac{Q}{C} = n\frac{E}{WC} \tag{3.20}$$

となり、E に比例している。

また、もし空乏層が放射線源の持つエネルギーよりも小さかったら、満たされたエネルギーは有感部に残すエネルギー が全てではないので、比例しない反応が予測される。その代わり、測定するものはエネルギー損失 ΔE であり、これは比例する。

第4章　実験準備

4.1　実験の概要

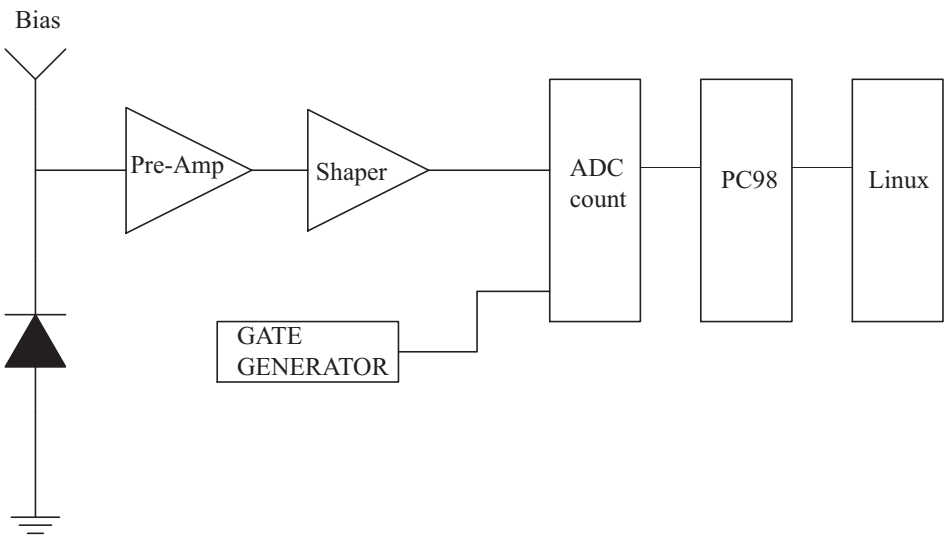

図 4.1: 実験の流れ

ホトダイオードに逆バイアスをかけ、空乏層を広げる。
⇓
空乏層を放射線通過する。
⇓
電極には電子-ホールペアの全電荷物 Q に比例した電圧が誘起され、
Q は入射粒子のエネルギー E に比例するので、
E に比例したパルスが得られる。
⇓
このパルスを Pre-Amp で増幅する。

⇓

Shaper でテールを切り ($\sim \mu$sec) 、ノイズを小さくする。

⇓

ADCcountor でアナログの信号をデジタル信号に変換する。

⇓

PC98 でデータをとる。

⇓

Linux で解析する。

4.1.1　検出器

半導体検出器は検出部(ホトダイオード)と前置増幅器(Pre-Amp)から成っている。

◊ 使用した IC について

CS515-2 型：帰還抵抗=4700M Ω

帰還コンデンサー=0.5pF

今回製作した検出部の回路図を以下に示す。

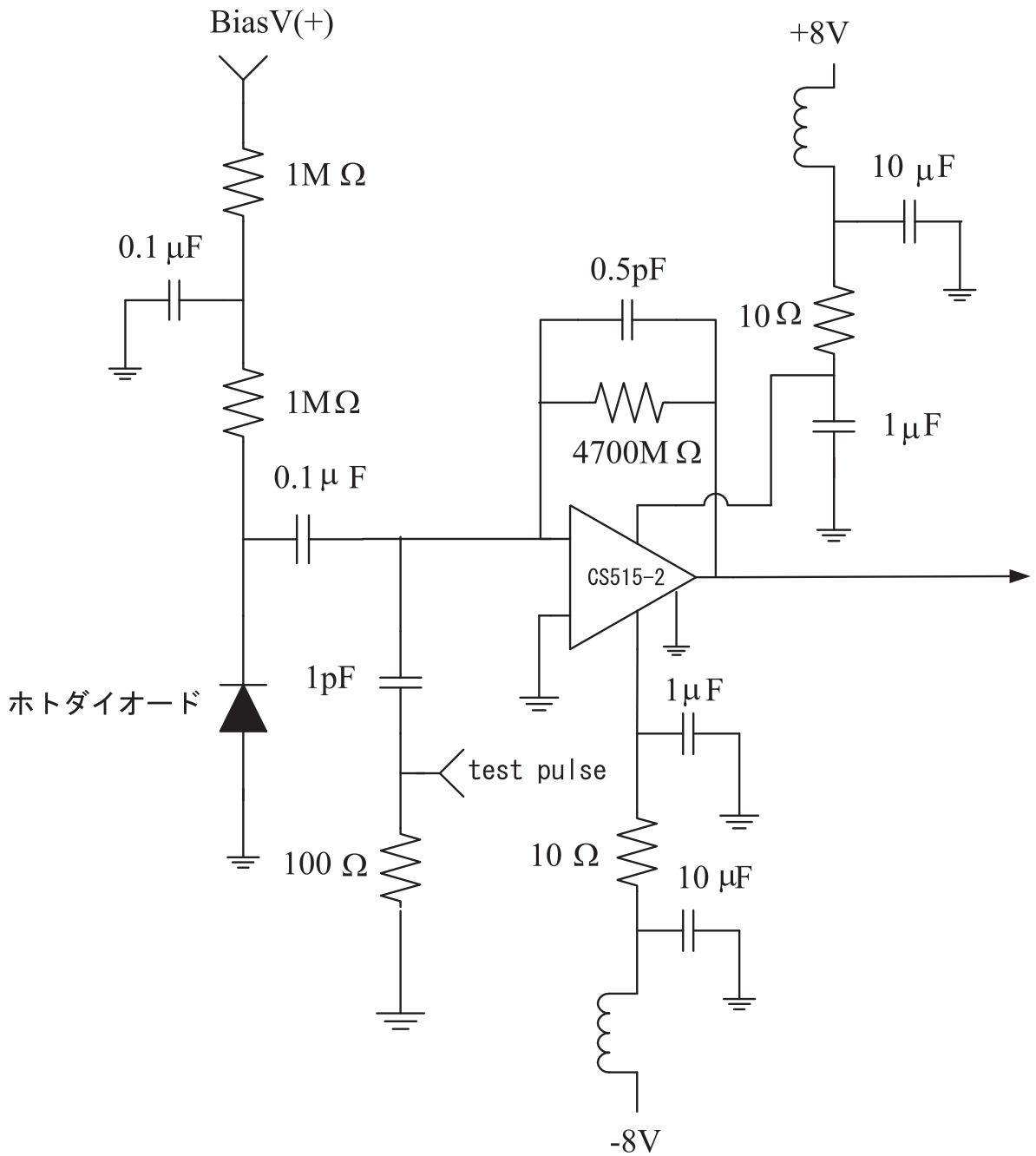

図 4.2: Pre-Amp 回路図

4.1.2 Pre-Amp

Pre-Amp (前置増幅器) の基本機能は、検出器からの弱い信号を増幅し後に接続された設備へ送ることである。主に検出器のインピーダンスの修正を与えることに使用されたり、その後の出力波形を形作ることに使用される。
Pre-Anp は 3 つの基本的な型がある。

- □ voltage sensitive (電圧増幅器)
- □ current sensitive (電流増幅器)
- □ charge sensitive (電荷増幅器)

半導体検出器には電荷型増幅器が適している。

≪ Pre-Amp の入、出力波形 ≫
図 4.4 のようなステップパルスを入れたときの出力波形を求める。

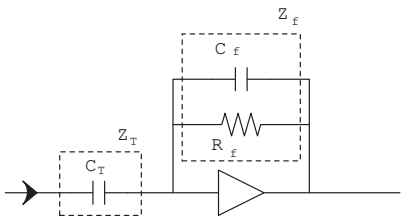

図 4.3: インピーダンス

各インピーダンスは

$$Z_{T(S)} = \frac{1}{SC_T} \tag{4.1}$$

$$\frac{1}{Z_{f(S)}} = \frac{1}{R_f} + SC_f = \frac{1 + SC_f R_f}{R_f} \tag{4.2}$$

$$Z_{f(S)} = \frac{R_f}{1 + SC_f R_f} = \frac{\frac{1}{C_f}}{S + \frac{1}{C_f R_f}} \tag{4.3}$$

となる。増幅率を A とすると

$$A = -\frac{Z_f}{Z_T} = -\frac{\frac{1}{C_f}}{S + \frac{1}{C_f R_f}} C_T S \tag{4.4}$$

となる。ここで、ステップパルスの波形はラプラス変換によって $\frac{1}{S}$ と表すことができるので V_{in} は

$$V_{in} = -\frac{V_T}{S} \tag{4.5}$$

となる。この時の V_{out} は

$$V_{out} = AV_{in} = SC_T \frac{\frac{1}{C_f}}{S + \frac{1}{C_f R_f}} V_T = \frac{C_T}{C_f} \frac{1}{S + \frac{1}{C_f R_f}} V_T \tag{4.6}$$

$Q = C_T V_T$ より

$$V_{out} = \frac{Q}{C_f} \left(\frac{1}{S + \frac{1}{C_f R_f}} \right) \tag{4.7}$$

となる。ラプラス変換 ($\frac{1}{S+x} \rightarrow \exp(-xt)$) を用いると

$$V_{out} = \frac{Q}{C_f} \exp\left(-\frac{1}{C_f R_f} \right) \tag{4.8}$$

となるので、

パルス高　$\frac{Q}{C_f}$

時定数　$\tau = C_f R_f$

となる。

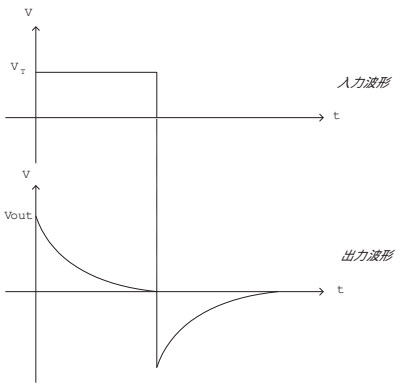

図 4.4: 入力波形と出力波形

4.1.3　線源

≪放射線の種類≫

放射線源とは、原子そのものが不安定で、α 線や β 線、γ 線などを放出して安定な状態へ崩壊していく物質のことである。

α 線　：He の原子核のビーム。電離作用が強く、透過力は小さい。

β 線　：電子 (陽電子) で構成される放射線。

$$\beta^- \ :\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p} + e^-$$

$$\beta^+ \ :\mathrm{p} \rightarrow \mathrm{n} + e^+$$

γ 線　：核のエネルギー準位が基底状態へ落ちる時のエネルギー。電離作用が弱く、透過力が大きい。

X 線　：電子のエネルギー準位が下位へ落ちる時のエネルギーから放射される特性 X 線と、制動放射の際に出される連続 X 線がある。

≪用いたダイオードのエネルギー損失≫

本実験で使用する線源を決めるために γ 線がシリコン中を通過したときのエネルギー損失 ΔE を求める。

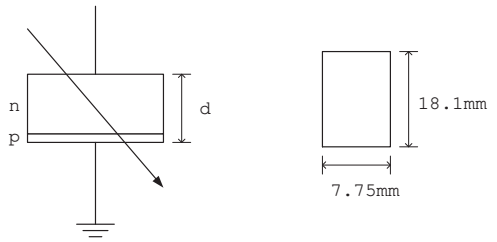

図 4.5: 使用したホトダイオード

$$\Delta E = \frac{dE}{dx} \times d \times \rho \tag{4.9}$$

$$\begin{cases} dE/dx = 1.5MeV/g/cm^2 \\ d = 200\mu m \\ \rho = 2.33g/cm^3 \text{(シリコンの密度)} \end{cases}$$

したがって、ΔE は

$$\Delta E = 1.5 \times 200 \times 10^{-6} \times 2.33 = 6.99 \times 10^{-2}(MeV) \simeq 70KeV \quad (4.10)$$

ホトダイオードを通過するのに必要なエネルギーは 70keV であり Am の γ 線のエネルギーは約 60keV なので、Am の γ 線はホトダイオードの中で相互作用して全てなくなる。よって本実験では、質量数 241 の Am 線源を使用する。

≪ Am について≫

原子番号 95 の超ウラン元素である。その中での最長半減期 432.7 年の Am^{241}_{95} を用いた。kg 単位で得られ、物理的、化学的的性質が調べられている。シーホーグらによって質量数 241 の Pu の β^- 崩壊生成物、質量数 241Am が最初に発見された (1944)。金属の融点は 994 度。複六方最密構造で、金属結合半径は配位数 12 で、$1.81\mathring{A}$ である。質量数 241、243 の Am は有用な放射線源である。質量数 241 は煙探知機にも使われる。

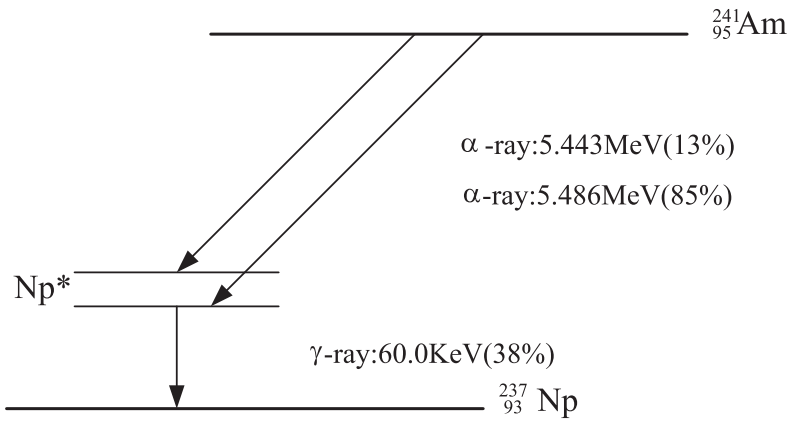

図 4.6: Am^{241} 崩壊

≪本実験について≫

- Pre-Amp の製作
- テストパルスを用いた、Pre-Amp の線形性
- テストパルスを用いた、ノイズの特性
  - ⋆ 逆バイアスとの関係
  - ⋆ 波形整形時間 (Shapingtime) との関係
- 線源 Am を用いた γ 線の測定
  - ⋆ ADCcount から electron 数の変換
- ノイズの解析

以上の事について調べた。

第5章　実験

5.1　テストパルスによる動作チェック

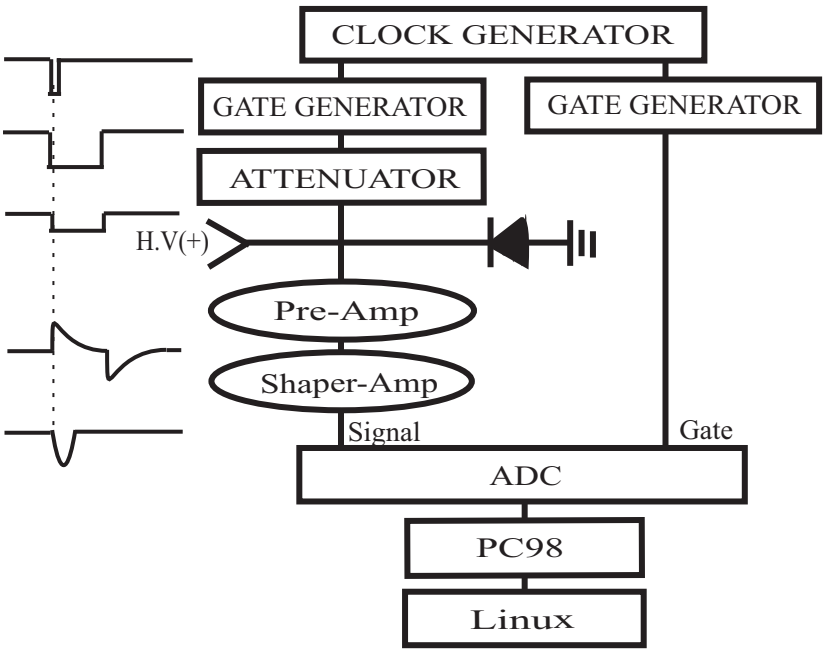

図 5.1: テストパルスのセットアップ

CLOCK GENERATOR：パルスの発生装置 (パルスの間隔を決定)
GATE GENERATOR：width のコントロール (パルスの幅を決定)
ATTNUATOR：V_T の調整 (パルスの高さを決定)
ADCcountor：アナログ信号をデジタル信号に変換する装置

5.1.1　Pre-Amp の線形性

まず、ATTNUATOR の dB と出力した V_T の関係について、Shaper-Amp を通さずに出力させてオシロスコープで調べた。

dB	$V_T[mV]$	dB	$V_T[mV]$
20	100	40	11
25	58	45	6.0
30	32	50	3.5
35	18	51	3.0

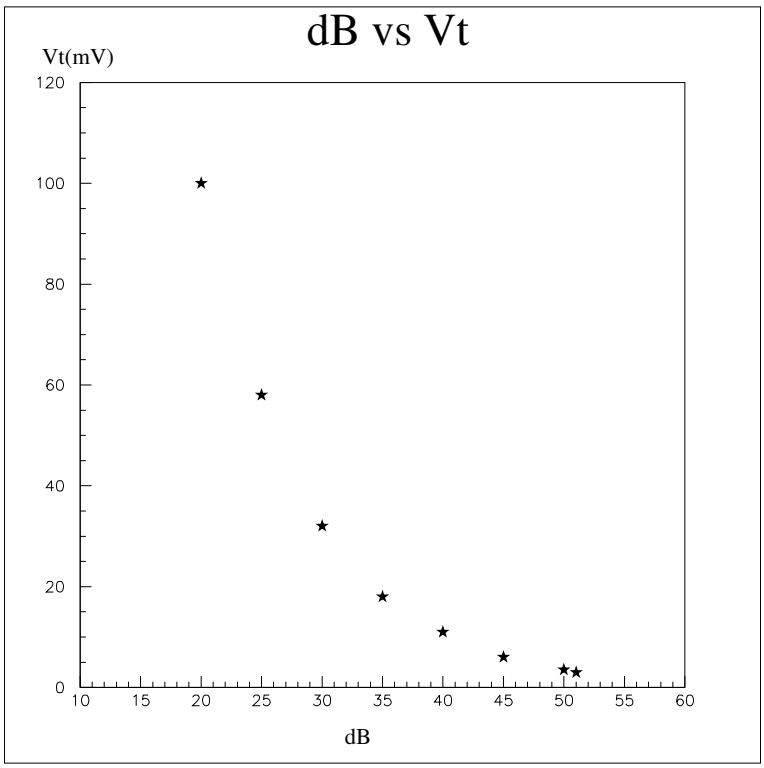

図 5.2: dB と V_T の関係

$V_{in} \rightarrow$[ATTNUATOR]$\rightarrow V_T$ としたときの V_{in} と V_T の関係

$$dB = -20 \log_{10} \frac{V_T}{V_{in}} \tag{5.1}$$

テストパルス入力し、出力を ADCcountor(peakmode) で測定した結果を以下に示す。

条件：CLOCK:10Hz、GATE:5 μ sec

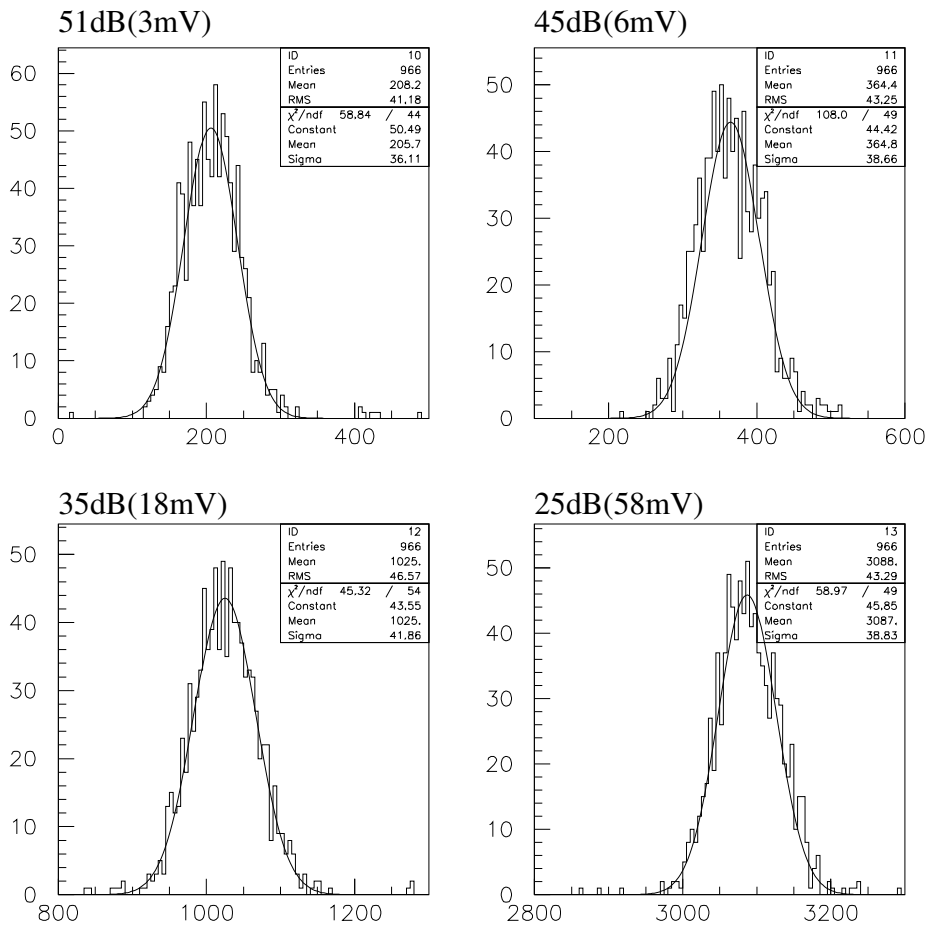

図 5.3: V_{peak} のヒストグラム

V_T と ADCcount のピーク値 V_{peak} をグラフに表す。

dB	V_T[mV]	V_{peac}[ADCcount]
30	32	2555.0
35	18	1444.0
40	11	836.3
45	6.0	491.0
50	3.5	281.3
51	3.0	256.8

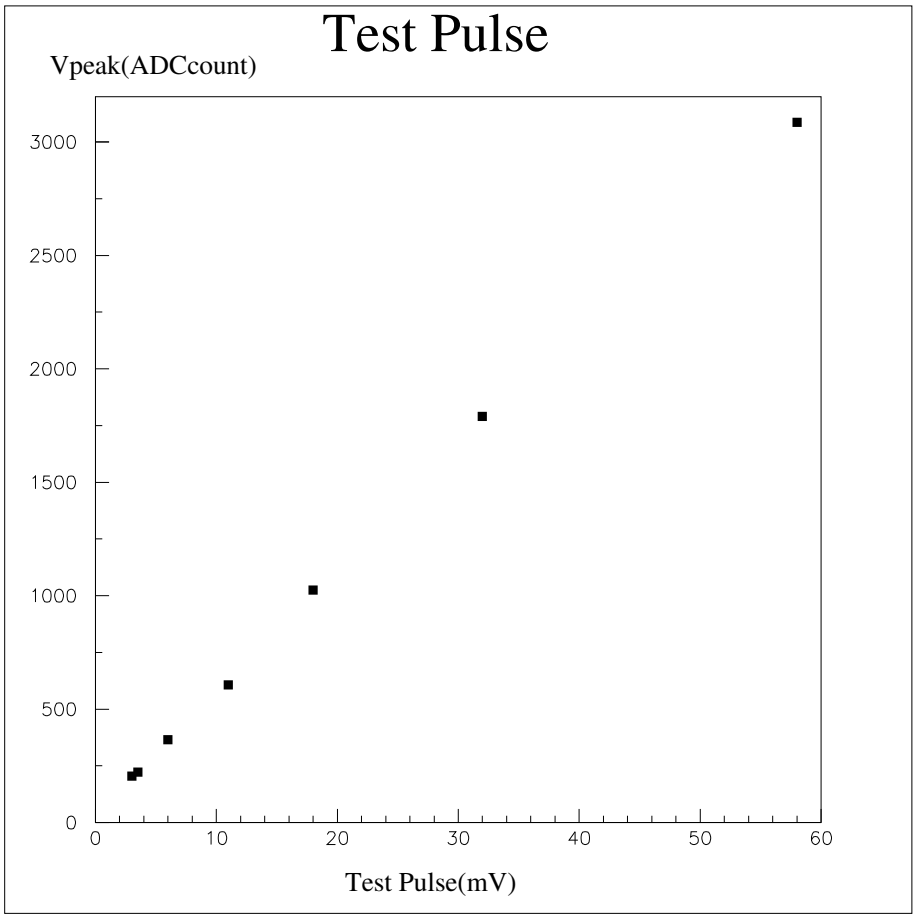

図 5.4: V_T と V_{peak} の関係

線形性があることがわかった。

5.1.2 ノイズと逆バイアスの関係

検出器に逆バイアスをかけるとノイズが減る。
まず、テストパルスの大きさ V_T を決める。
生成される電子とホールのペアの数 n_e は

$$n_e = \frac{\Delta E}{W} \tag{5.2}$$

$$n_e = \frac{70 \times 10^3}{3.62} = 1.93 \times 10^4 \tag{5.3}$$

W:電子とホールの生成の平均エネルギー
となり、信号の電荷 Q は $e = 1.60 \times 10^{-19}[C]$ より

$$Q = en_e = 1.60 \times 10^{-19} \times 1.93 \times 10^4 = 3.1 \times 10^{-15}[C] \tag{5.4}$$

となる。

$$V_T = \frac{Q}{C_T} \tag{5.5}$$

に、$Q = 3.1 \times 10^{-15}[C]$ 、$C_f = 1.0 \times 10^{-12}[F]$ を代入すると、

$$V_T = \frac{3.1 \times 10^{-15}C}{1.0 \times 10^{-12}F} = 3.1 \times 10^{-3}[V] \tag{5.6}$$

となる。

逆バイアスとノイズの関係について 0V から 20V まで 2V 単位で調べた測定結果を以下に示す。

条件：$V_T = 3mV(51dB)$、CLOCK:10Hz 、GATE:5 μsec、
Shapingtime=$0.5\mu sec$

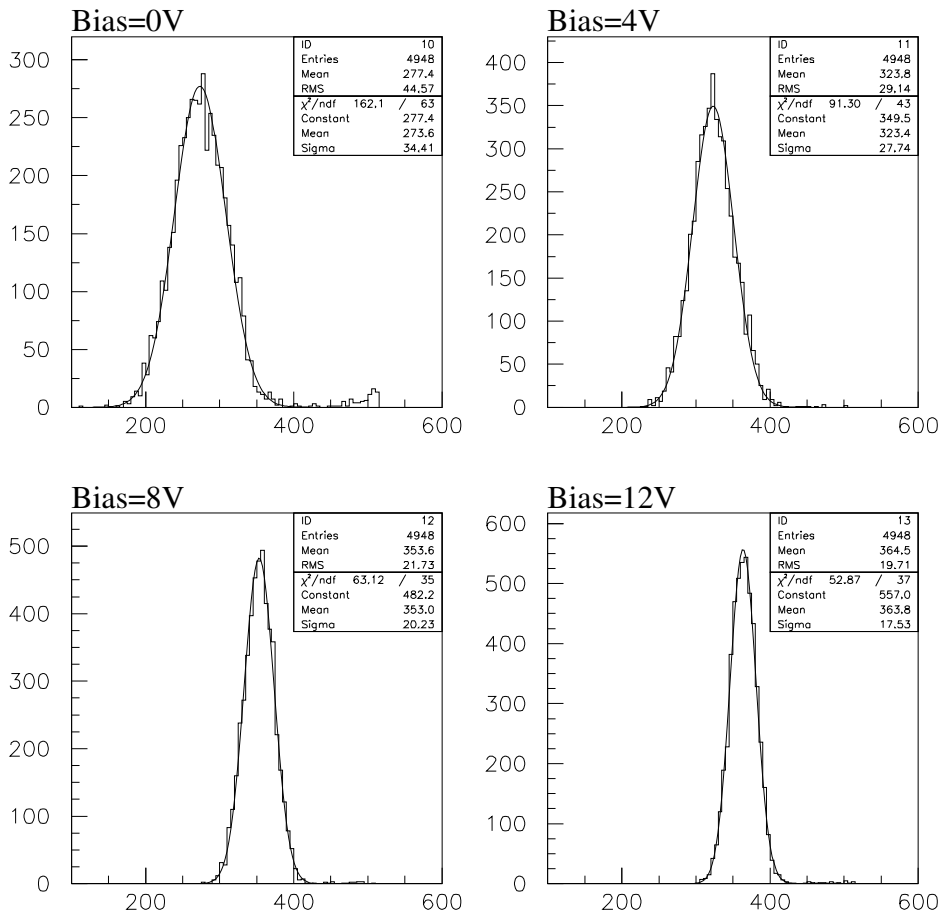

図 5.5: Bias

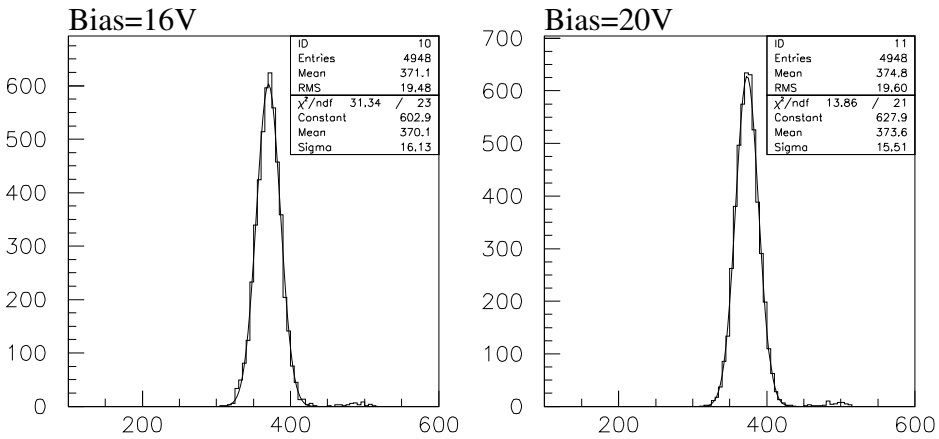
Bias=16V
ID 10
Entries 4948
Mean 371.1
RMS 19.48
χ²/ndf 31.34 / 23
Constant 602.9
Mean 370.1
Sigma 16.13
Bias=20V
ID 11
Entries 4948
Mean 374.8
RMS 19.60
χ²/ndf 13.86 / 21
Constant 627.9
Mean 373.6
Sigma 15.51

図 5.6: Bias

逆バイアスとガウスフィットした時のシグマの関係をグラフに表す。

Bias V	mean ADCcount	Sigma ADCcount	Bias V	mean ADCcount	Sigma ADCcount
0	273.6	34.41	12	363.8	17.53
2	292.5	32.62	14	367.7	16.93
4	323.4	27.74	16	370.1	16.13
6	345.9	22.62	18	372.1	15.79
8	353.0	20.23	20	373.6	15.51
10	358.7	18.51			

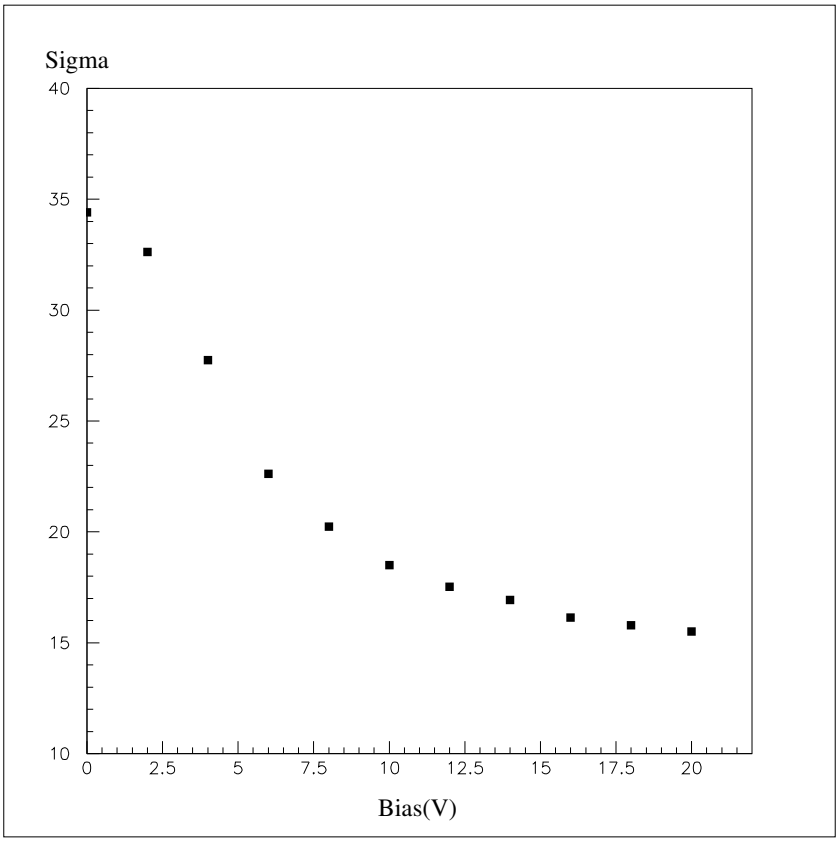

図 5.7: 逆バイアスと sigma の関係

以上より、逆バイアスを大きくしていくとノイズが小さくなることがわかった。また、ノイズ $\propto 1/\sqrt{V_{Bias}}$ の関係があることもわかった。

5.1.3 ノイズの Shapingtime への依存性

テストパルスを用いて、Shapingtime の依存性について調べた。

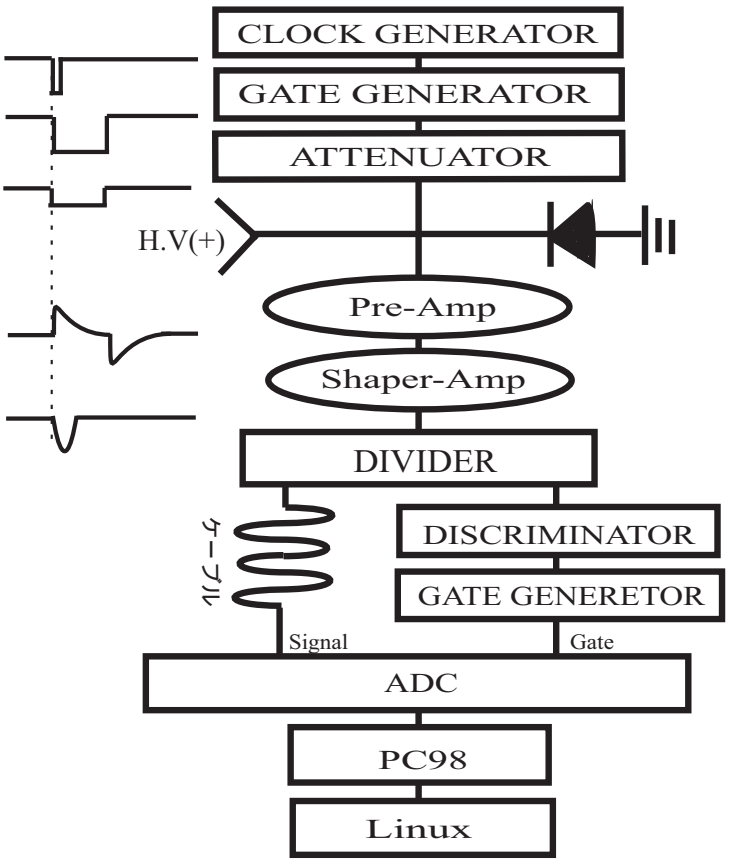

図 5.8: Test-pulse のセットアップ

DIVIDER：シグナルを 2 つに分ける。
DISCRIMINATOR： $V_{signal} \geq V_{th}$ の条件で NIM 信号を出す。

Shapingtime を変化させた時 ADCcountor で測定した結果を以下に示す。

条件：V_{Bias}=15V, V_{th}=81.9mV

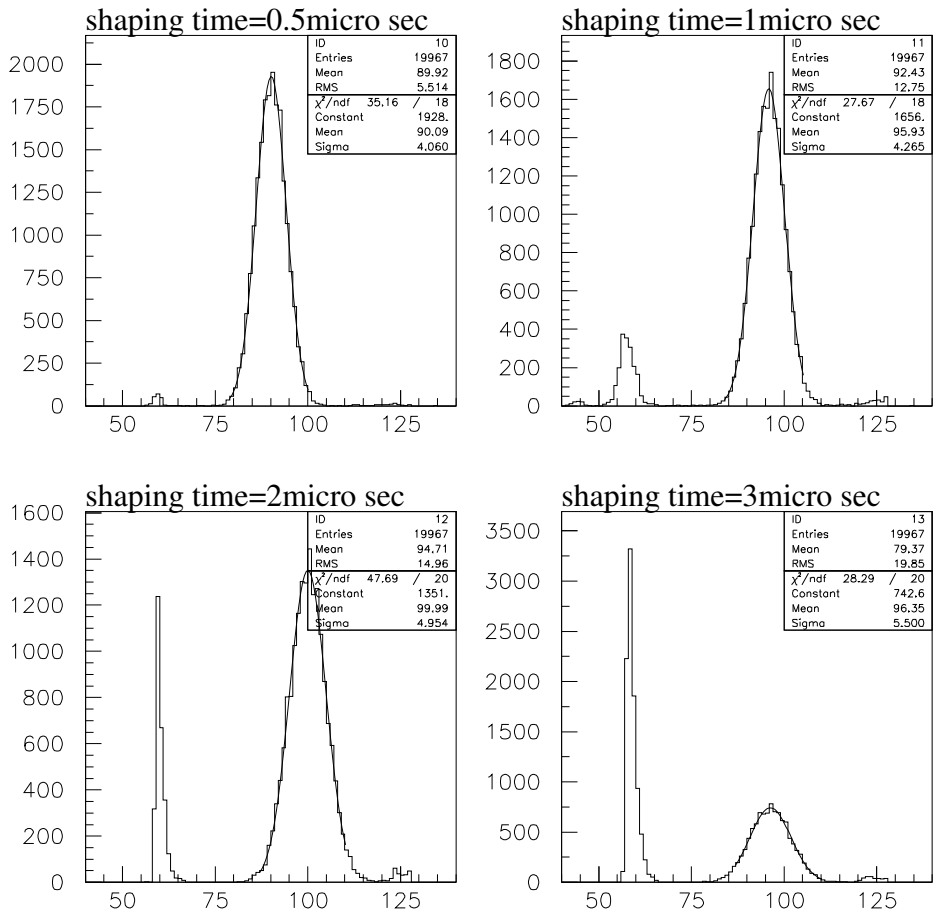

図 5.9: Testpulse による Shapingtime の測定

この測定結果より、シグマと Shapingtime の関係を示す。

Shapingtime	Mean [ADCcount]	Sigma [ADCcount]
0.5μsec	90.09	4.060
1μsec	95.93	4.265
2μsec	99.99	4.954
3μsec	96.35	5.500
6μsec	102.4	8.403

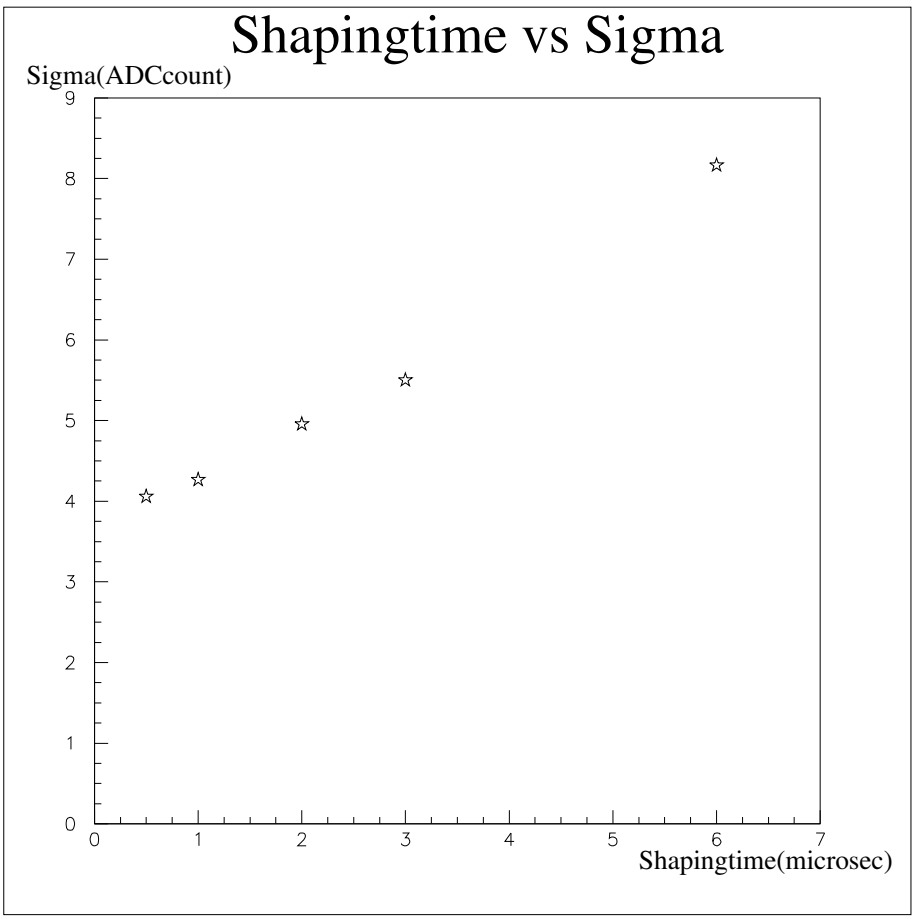

図 5.10: Shapingtime と Sigma の関係

これより、Shapingtime = 0.5μsec が 1 番ノイズが小さく、測定に最適であることが判った。

第6章　放射線源を用いた測定

この章では、Amが60keVのγ線を出すことを利用し、ADCcountをelectron数へ変換することを目的とする。

6.1　Amの測定のセットアップ

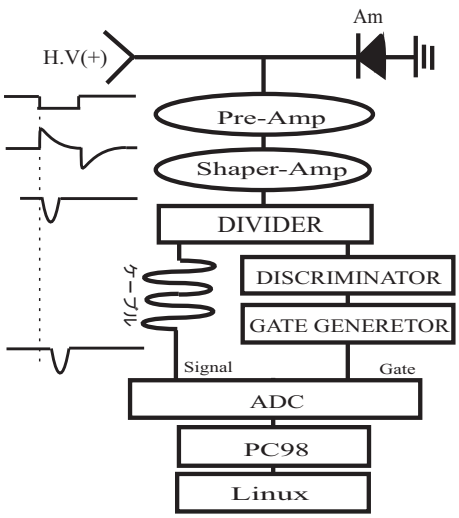

図 6.1: 線源の測定でのセットアップ

DIVIDER：1つの入力信号を2つに分ける
DISCRIMINATOR：Thresholdが$V_{signal} \geq V_{th}$の時、NIM信号を出力

また、図5.7より逆バイアスの値をノイズが十分に小さくなっているV_{Bias}=15Vに固定して測定を行った。

6.2　Am 線源での Shapingtime への依存性

Am 線源を入れ、V_{th}=81.9mV のままで、Shapingtime を変え、最もノイズの小さい Shapingtime を探した。

条件：V_{Bias}=15V、 V_{th}=81.9mV

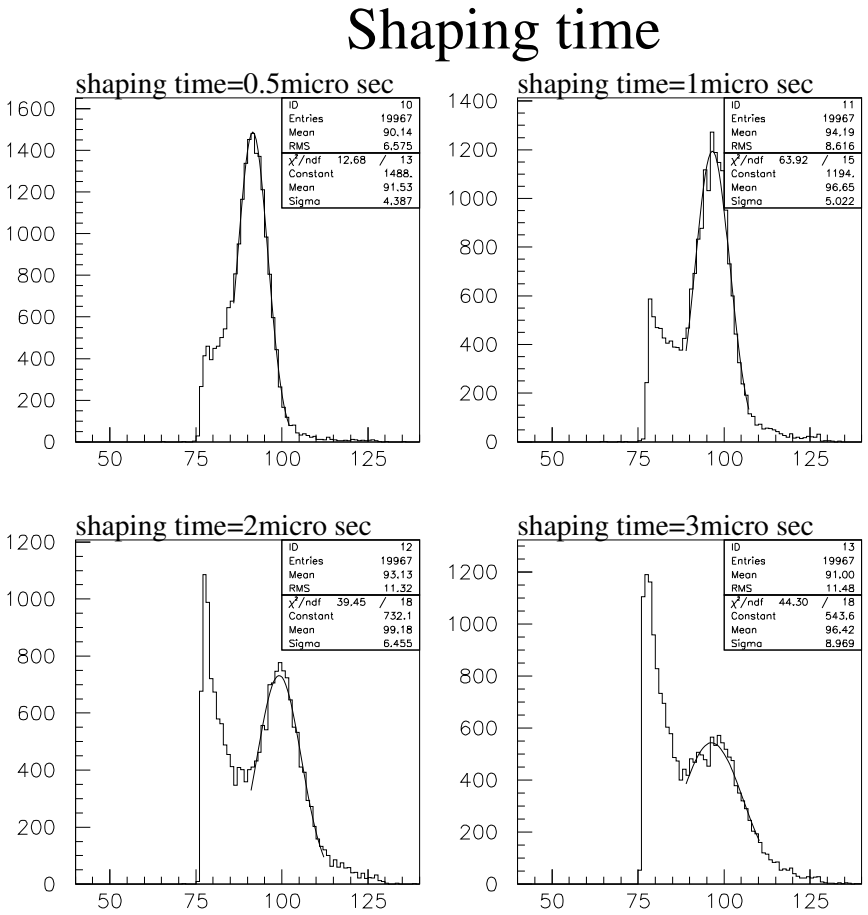

図 6.2: Am 線源による Shapingtime の測定

これより、テストパルスでの結果と同様に Shapingtime = 0.5μsec が 1 番ノイズが小さく、測定に最適であることが判った。

6.3 electron 数への変換

6.3.1 ペデスタルの測定

線源なしでの 0 点を決めるためにペデスタルを測った。

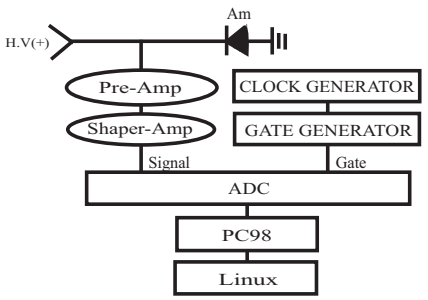

図 6.3: ペデスタルのセットアップ

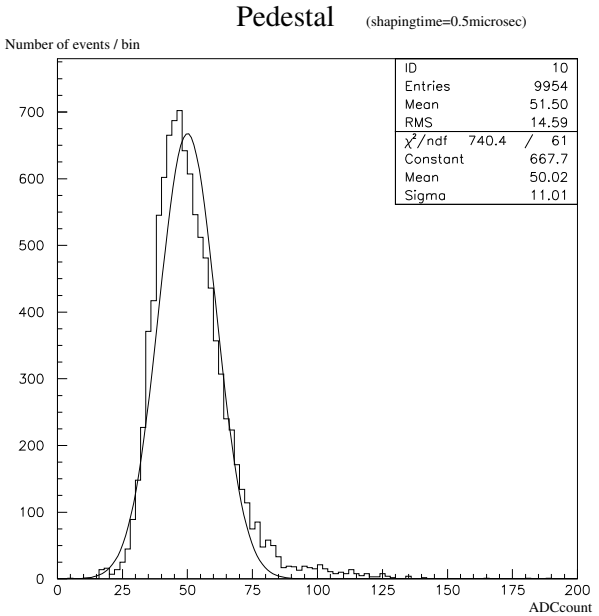

図 6.4: ペデスタルの測定

これより、ペデスタルを 50.02[ADCcount] とする。

6.3.2　Threshold の決定

Discriminator の Threshold の値 V_{th} を変えて、Am の 60keV の γ 線に相当するシグナルがきれいに見える値を調べた。

条件：V_{Bias}=15V、 Shapingtime=0.5μsec

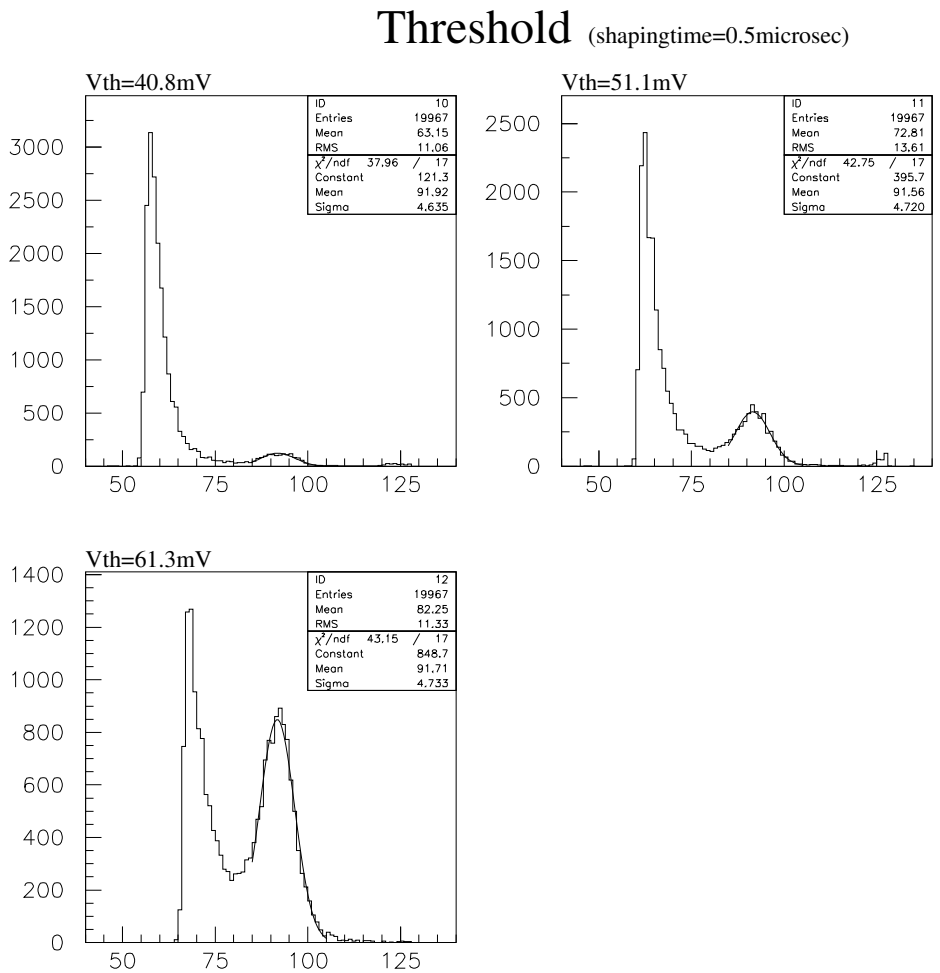

図 6.5: Threshold の決定

これより、Threshold の最適値は V_{th}=61.3mV とする。

6.3.3 最もノイズが小さい時の測定

測定に最適な条件で、イベント数 50000 個に増やし、Am のシグナルを取った。

条件：V_{Bias} = 15V、Shapingtime=0.5μsec、V_{th}=61.3mV

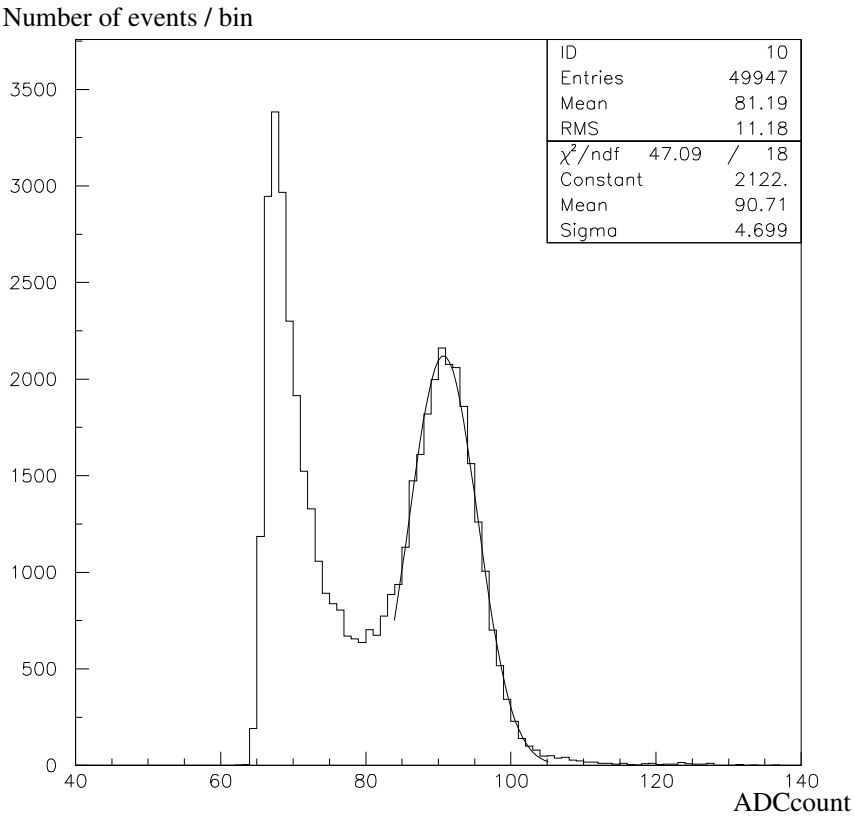

図 6.6: 最適条件での測定

よって、Am の γ 線エネルギーの 60keV のシグナルピークでの ADC-count は

$\Rightarrow$90.71[ADCcount] となる。

6.3.4　ADCcount から electron 数への変換

Am 線源は約 60KeV の γ 線を放出する。また、常温での電子ホールペアを作り出す平均エネルギーは 3.6eV である。

よって、γ 線が通過したとき生成される電子の数 n_e は

$$n_e = \frac{60 \times 10^3}{3.6} \simeq 16.7 \times 10^3 (electron) \tag{6.1}$$

となる。

この $16.7{\times}10^3$(electron) に相当する ADCcount はペデスタルと Am の 60keV に相当するシグナルのピーク値 (下表) の差なので、

Pedestal	50.02[ADCcount]
Am の Peak	90.71[ADCcount]

$$\frac{n_e}{ADC} = \frac{16.7 \times 10^3}{90.71 - 50.02} \simeq 410.42 (electron/ADCcount) \tag{6.2}$$

となる。

この値を用いて、electron 数の変換を行った。

6.4 線源のみのシグナル

また、‘線源あり’と‘線源なし’の 2 つの測定を行い、線源のみの波形を得ようとした。

条件：V_{Bias}=15V、 Shapingtime=2μsec、$V_{th} = 51.5mV$

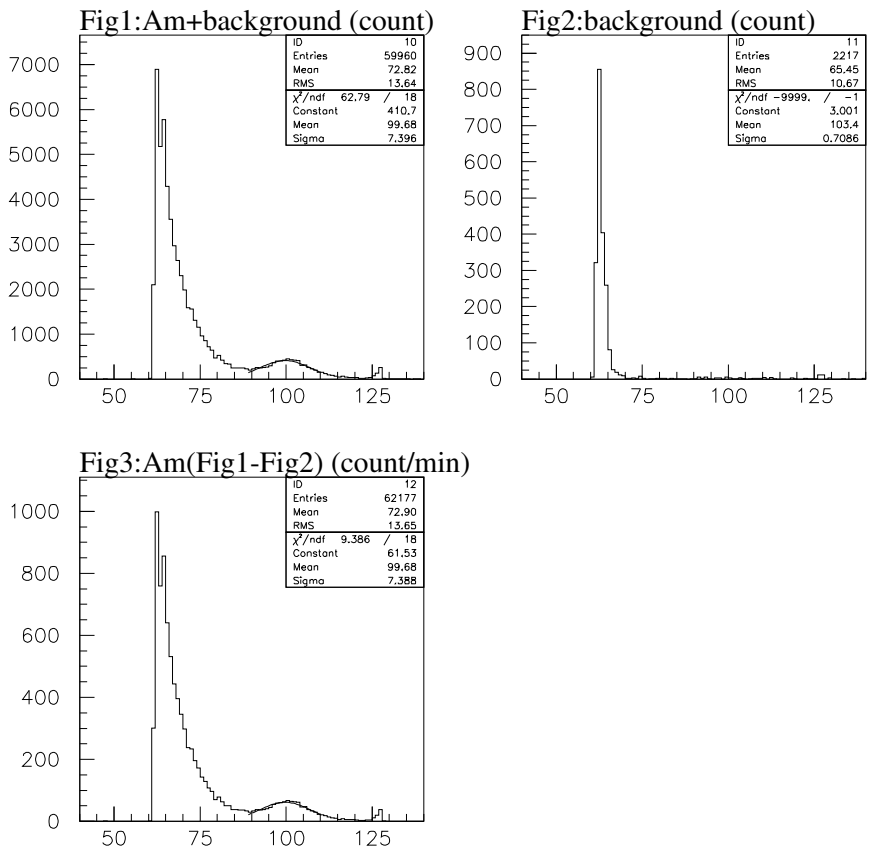

図 6.7: Am のみのシグナルについて

Fig3 より、Am の 60keV の γ 線以外にも沢山のシグナルが入っていることが判った。

線源を入れることによるノイズが多いのではないか。Am からは 60keV の γ 線以外にも多くのシグナルが入っているのではないか、と考えられる。

第7章　測定の解析

ADC1count 当り 410.42electron を用いて electron 数の変換を行った。変換したグラフ以下に示す。

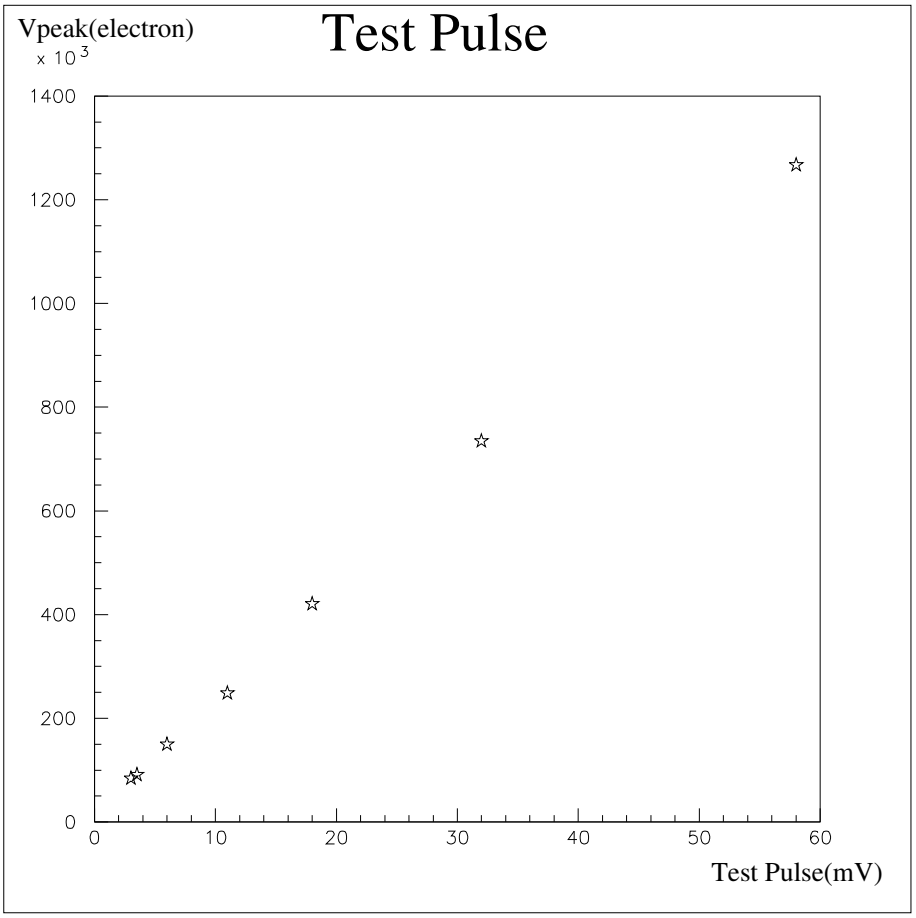

図 7.1: テストパルス

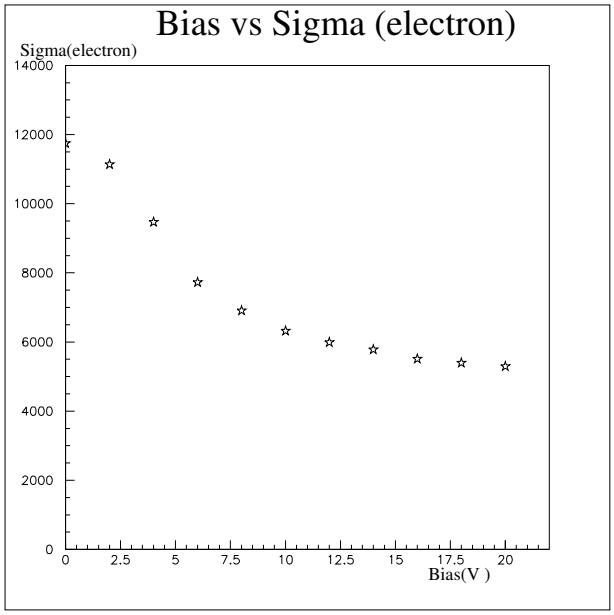

図 7.2: バイアスと Sigma の関係

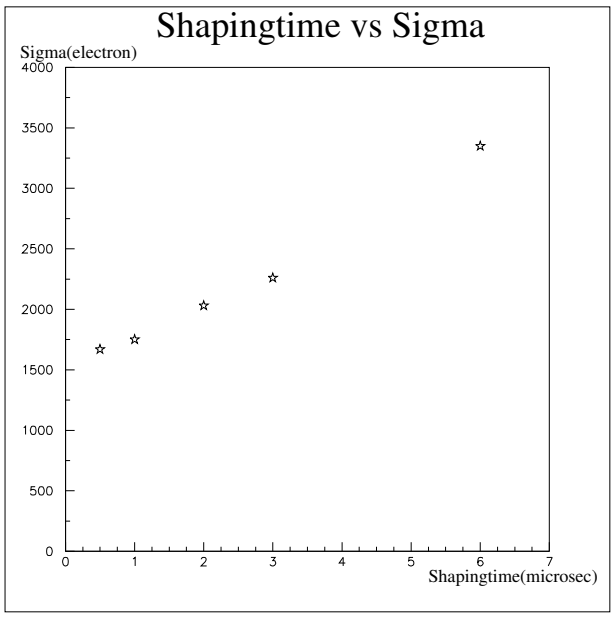

図 7.3: Shapingtime と Sigma の関係

7.1 ノイズの解析

7.1.1 Pre-Ampの原理的ノイズ

Pre-Ampのノイズのうち、電子放出の不規則性によって電流に揺らぎが生ずるノイズ(ショットノイズ)と、結晶の熱振動によるノイズ(熱ノイズ)がもっとも大きい。

原理的ノイズ

$$\left(e_n{}^2\right)_{total} = (e_n{}^2)_h + (e_n{}^2)_s \tag{7.1}$$

熱ノイズ

$$(e_n{}^2)_h = \frac{8}{3} C_d{}^2 \frac{kT}{g_m} \frac{1}{T_M} + \frac{3}{4} \frac{kT}{R_f} T_M \tag{7.2}$$

ショットノイズ

$$(e_n{}^2)_s = \frac{1}{3} T_M 2qI_{leak} \tag{7.3}$$

$$\begin{cases} C_d\text{: 静電容量} \\ k\text{: ボルツマン定数} \\ T_M\text{: } shapingtime \\ R_f\text{: フィードバック抵抗} \\ I_{leak}\text{: リーク電流} \\ g_m\text{: 相互コンダクタンス} \\ q\text{: 電荷} \end{cases}$$

静電容量C_dは

$$C_d = \varepsilon \frac{A}{d} \tag{7.4}$$

あり、バイアス15Vでの空乏層の幅は$200\mu m$と近似でき$\varepsilon = 12\varepsilon_0$より

$$\begin{aligned} C_d &= 12 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \frac{0.775 \times 1.81 \times 10^{-4}}{200 \times 10^{-6}} \\ &\simeq 74.5 \times 10^{-12} = 74.5pF \end{aligned} \tag{7.5}$$

である。

T=300K、$R_f = 4700M\Omega$、$I_{leak} = 24nA$、$g_m = 20 \times 10^{-3}\Omega^{-1}$、を代入し、$T_M$の関数にする。

熱ノイズ

$$({e_n}^2)_h = (3.06 \times 10^{-33})\frac{1}{T_M} + (0.0006606 \times 10^{-33})T_M \qquad (7.6)$$

ショットノイズ

$$({e_n}^2)_s = (1.07 \times 10^{-33})T_M \qquad (7.7)$$

この 2 式より、ノイズの計算を行う。

shapingtime	ショットノイズ	熱ノイズ	全ノイズ
0.2μsec	$0.21\times10^{-33}[C^2]$	$15.3\times10^{-33}[C^2]$	$15.5\times10^{-33}[C^2]$
0.5μsec	$0.53\times10^{-33}[C^2]$	$6.13\times10^{-33}[C^2]$	$6.66\times10^{-33}[C^2]$
1μsec	$1.07\times10^{-33}[C^2]$	$3.06\times10^{-33}[C^2]$	$4.13\times10^{-33}[C^2]$
2μsec	$2.14\times10^{-33}[C^2]$	$1.53\times10^{-33}[C^2]$	$3.67\times10^{-33}[C^2]$
3μsec	$3.20\times10^{-33}[C^2]$	$1.02\times10^{-33}[C^2]$	$4.23\times10^{-33}[C^2]$
6μsec	$6.41\times10^{-33}[C^2]$	$0.515\times10^{-33}[C^2]$	$6.92\times10^{-33}[C^2]$

この表の単位を electron 数に変換する。$q = 1.60 \times 10^{-19}$ であるから

shapingtime	ショットノイズ	熱ノイズ	全ノイズ
0.2μsec	90[e]	770[e]	860[e]
0.5μsec	140[e]	490[e]	630[e]
1μsec	200[e]	340[e]	550[e]
2μsec	290[e]	240[e]	530[e]
3μsec	350[e]	200[e]	550[e]
6μsec	500[e]	140[e]	640[e]

ショットノイズ、熱ノイズ、全ノイズをグラフに表す。

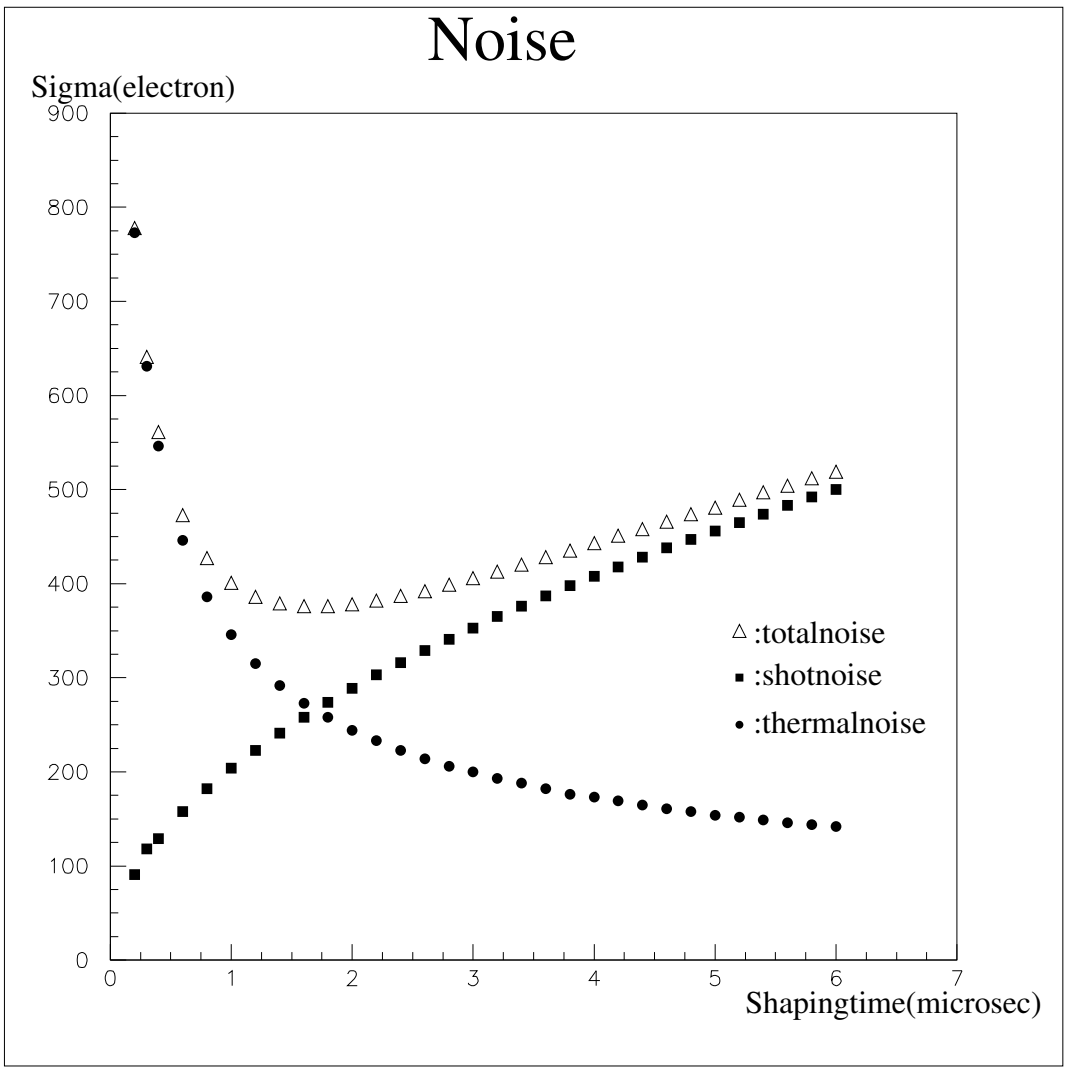

図 7.4: Pre-Amp の原理的ノイズ

7.1.2　Am での測定でのノイズの解析

測定した結果と Pre-Amp の原理的ノイズの計算値を比較してみた。
測定の結果

shapingtime	Sigma[ADCcount]	Sigma
0.5μsec	4.06	1670[e]
1.0μsec	4.27	1750[e]
2.0μsec	4.95	2030[e]
3.0μsec	5.50	2260[e]
6.0μsec	8.17	3350[e]

1 番ノイズが小さい Shapingtime0.5μsec のときの値で比較する。

測定ノイズ	1670[electron]
Pre-Amp の原理的ノイズ	630 [electron]

測定ノイズの方が原理的ノイズに比べて、2 倍ほど大きくなっている。これは、Pre-Amp から以外のノイズの寄与が考えられる。

Shapingtime とノイズの関係を原理的ノイズの式より

$$\sigma_{ex} = \sqrt{\frac{a}{T_M[\mu sec]} + bT_M[\mu sec]} \tag{7.8}$$

と表し、これに Am の測定値を代入して a、b を求めた。

$$\sigma_{exfit}[e] = \sqrt{\frac{8.3 \times 10^5}{T_M[\mu sec]} + (2.2 \times 10^6)T_M[\mu sec]} \tag{7.9}$$

原理的ノイズの式である、式 7.6 と式 7.7 を合わせて書くと

$$\sigma_{theory}[e] = \sqrt{\frac{1.2 \times 10^5}{T_M[\mu sec]} + (4.2 \times 10^4)T_M[\mu sec]} \tag{7.10}$$

となる。

式 7.10、式 7.9、測定値をグラフに表す。

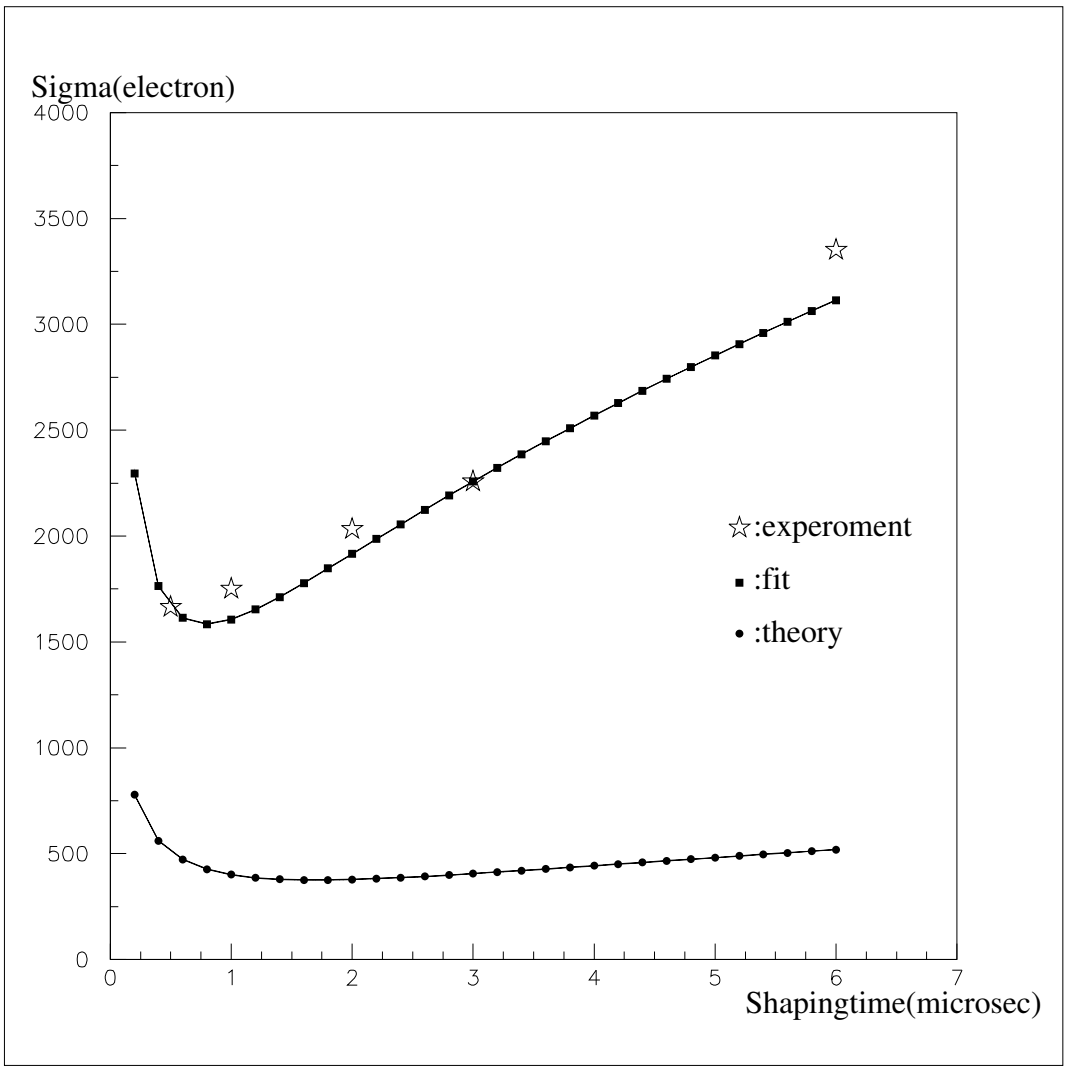

図 7.5: 原理的ノイズと実験ノイズ

式 7.10 と式 7.9 を比較すると、
$\diamondsuit\frac{1}{T_M}$ の項

$$\frac{\sigma_{exfit}}{\sigma_{theory}} = \frac{\sqrt{8.3\times10^5}}{\sqrt{1.2\times10^5}} \simeq 2.6[\text{倍}] \tag{7.11}$$

$\diamondsuit T_M$ の項

$$\frac{\sigma_{exfit}}{\sigma_{theory}} = \frac{\sqrt{2.2\times10^6}}{\sqrt{4.2\times10^4}} \simeq 7.3[\text{倍}] \tag{7.12}$$

となり、T_M に比例する項すなわちショットノイズの寄与が大きいことがわかった。

≪ノイズに相当するエネルギー≫
Am の 60KeV の γ 線のエネルギーに相当する値は、

$$\begin{gathered}\text{ADCcount=90.71[ADCcount]}\\ \Downarrow\\ \text{electron 数=16700[electron]}\end{gathered}$$

また、ノイズは 1670[electron] なので、

$$\frac{1670}{16700} = 0.1 \tag{7.13}$$

となり、ノイズが 6KeV に相当することが判る。

第8章　まとめ

ホトダイオードを用いた半導体検出器を製作して、以下の性能を調べた。

- テストパルスでの線形性
- ノイズの特性

  shapingtime=0.5 μsec が最もノイズが小さい。
- 線源 Am の γ 線の測定より、

  ADCcount の 1count 当り、410electron である。
- ノイズの解析より、

  T_M に比例する項の寄与が大きい。

  ノイズは 1670[electron] で、エネルギー 6KeV に相当する。

荷電粒子が厚さ 200μm の Si を通過した時の電離損失は 70KeV で、ノイズは、6KeV となるので、

$$\frac{6}{70} \simeq \frac{1}{12} \tag{8.1}$$

となる。よって、ノイズは荷電粒子のエネルギーに対して、小さいといえる。

結論

今回製作した Si 半導体検出器は、
放射線測定を十分に行える検出器であるといえる。

図 目 次

2.1 入射荷電粒子の運動量と電離損失の関係 4
2.2 光電効果 6
2.3 コンプトン散乱 6
2.4 電子対創成 7
2.5 光子全断面積 8

3.1 エネルギーバンド構造 9
3.2 シリコンとゲルマニウム 10
3.3 シリコンとゲルマニウム 12
3.4 不連続エネルギー準位 13
3.5 pn 接合の空乏層の計算の模型 15

4.1 実験の流れ 19
4.2 Pre-Amp 回路図 21
4.3 インピーダンス 22
4.4 入力波形と出力波形 23
4.5 使用したホトダイオード 24
4.6 Am^{241} 崩壊 25

5.1 テストパルスのセットアップ 27
5.2 dB と V_T の関係 28
5.3 V_{peak} のヒストグラム 29
5.4 V_T と V_{peak} の関係 30
5.5 Bias 32
5.6 Bias 33
5.7 逆バイアスと sigma の関係 34
5.8 Test-pulse のセットアップ 35
5.9 Testpulse による Shapingtime の測定 36
5.10 Shapingtime と Sigma の関係 37

6.1 線源の測定でのセットアップ 39
6.2 Am 線源による Shapingtime の測定 40
6.3 ペデスタルのセットアップ 41
6.4 ペデスタルの測定 41
6.5 Threshold の決定 42
6.6 最適条件での測定 43
6.7 Am のみのシグナルについて 45

7.1 テストパルス 47
7.2 バイアスと Sigma の関係 48
7.3 Shapingtime と Sigma の関係 48
7.4 Pre-Amp の原理的ノイズ 51
7.5 原理的ノイズと実験ノイズ 53

関連図書

[1] W.R.Leo 'Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment'

[2] William J.Price '放射線計測' 訳:関口晃

[3] 岩波理化学辞典第 5 版

[4] 物理学辞典 培風館

[5] 2001 年度卒業論文

謝辞

お忙しい中、私たちを一から御指導下さった林井先生を始め、ゼミやミーティングで御指導下さった野口先生、宮林先生、先輩方のおかげで、卒業研究及び卒業論文を仕上げることが出来ました。この場をお借りして御礼申しあげます。ありがとうございました。