

目次

概要	1
第 1 章 Si フォトダイオード	2
1.1 Si フォトダイオードとは	2
1.2 動作原理	3
第 2 章 読みだし系のテスト	5
2.1 読みだし系の構成	5
2.2 PreAMP のゲイン測定	5
2.3 微分バイアス分布による測定法	6
第 3 章 最小荷電粒子 (Minimum Ionization Particle) の測定	9
3.1 微分バイアス分布による MIP	9
3.2 チャージ積分型 ADC による ^{90}Sr による β 線の測定	11
第 4 章 議論	14
謝辞	15
参考文献	15

目 次

1.1	Si-PAD の設計図	2
1.2	PD の動作原理	3
2.1	読みだし系の構成	5
2.2	PreAMP のゲイン測定のセットアップ	6
2.3	PreAMP のゲイン測定	7
2.4	微分バイアス曲線と積分バイアス曲線	8
3.1	積分バイアス曲線	9
3.2	微分バイアス曲線	10
3.3	ADC による MIP の観測	12

概要

今回の研究では、Si-PAD 粒子検出器を用いて、十分な S/N 比をもったエネルギー測定を行なう方法を確立した。そして、これを用いて ^{90}Sr の β 線のエネルギースペクトラムを測定し、MIP (Minimum Ionization Particle) を確認し、これが理論から推定される値に近いことを確かめた。

一方、チャージアンプの出力をチャージ積分型の ADC を用いて測定することの正当性を検証し、ADC カウント数と入力電荷の関係を導出した。

第1章 Siフォトダイオード

1.1 Siフォトダイオードとは

今回使用した Si-PAD は、1つのセラミック基盤上に $1.5\text{cm} \times 1.0\text{cm}$ の有感面積で、厚さ $300\mu\text{m}$ の PIN 型フォトダイオード (PD) が 6面載っている Si 単結晶のウエハーが埋め込まれているものであり、浜松ホトニクス製の特注品 ($30 \times 30 / 6$ SPL Si) である。PIN 型とは、P 層と N^+ 層の間に高抵抗型の真性半導体層 (I 層) を作り、空乏層の接合容量を低くして、応答速度を速めているものである。そして、PD が 6面載っているセラミック基盤が 3枚、一つのアクリル樹脂の板に埋め込まれている。ここで PAD とは、Photo Arrayed Diode の略称で、Si の単結晶上に複数の PD を配置することにより、位置分解能を持たせた PD のことである。この PAD は、PD を一個単位で読み出しするために、個別のアノード (A-F) と共通カソード (Kc) の出力端子がついている。しかし、今回はその中の 1CH のみを使って性能評価を試みたため、以下では PD と記すことにする。

また、この PD に印加する逆バイアス電圧 V_R の標準値は、 -70V であり、その条件下での端子間 (A-K) 容量は 70pF である。 ($f=1\text{MHz}$)

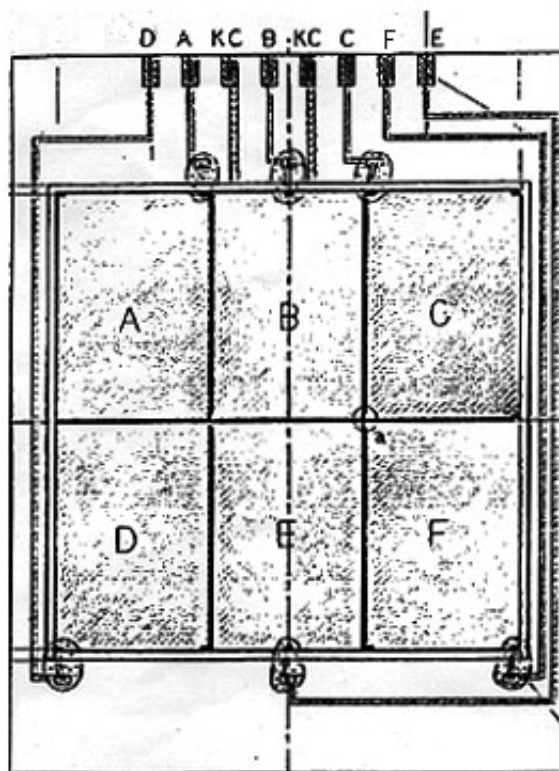


図 1.1: Si-PAD の設計図

1.2 動作原理

Siでできたフォトダイオードに放射線が入射すると、その飛跡の近傍で価電子バンド (valence band) から伝導バンド (conduction band) に電子が励起され、価電子バンドに正孔 (hole) が生じる。このとき発生する電子-正孔対 (electron-hole pair) の平均の数 N_0 は、半導体内で失われた放射線のエネルギーを ΔE として、

$$N_0 = \Delta E / \epsilon \quad (1.1)$$

で与えられる。ここで、 ϵ は、1個の電子-正孔対を作るのに必要なエネルギーであり、

$$\epsilon = 3.6 \text{ eV} \quad (1.2)$$

と測定されている。これは、価電子バンドと伝導バンド間のエネルギーギャップ $E_g = 1.106 \text{ eV}$ よりも大きく、余剰のエネルギーによって電子-正孔対は運動エネルギーをもつ。

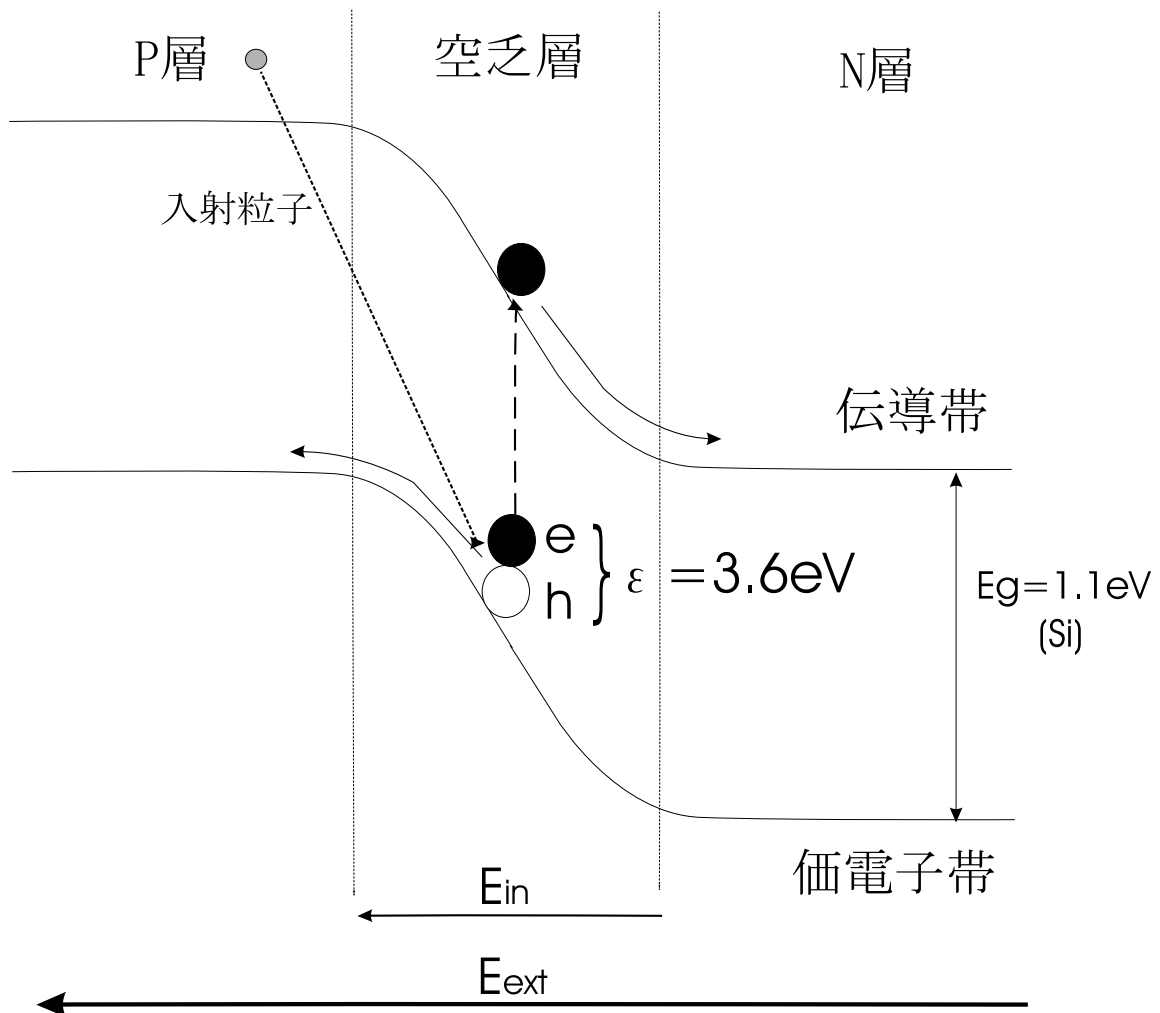


図 1.2: PD の動作原理

さて、Si を放射線が通過するとき失われるエネルギーは、放射線が MIP (Minimum ionization

particle)とみなせる場合、単位長あたり

$$\frac{dE}{dx} \Big|_{min} \cdot \rho = 1.66 \text{ MeV/g} \cdot \text{cm}^2 \times 2.33 \text{ g/cm}^2 = 3.8678 \text{ MeV/cm}$$

なので、放射線が $300 \mu\text{m}$ を垂直に通過した場合、

$$\begin{aligned} \Delta E &= 300 \times 10^{-4} \text{ cm} \times 3.8678 \text{ MeV/cm} \\ &= 0.116 \text{ MeV} \end{aligned} \tag{1.3}$$

だけのエネルギーを失う。ただし、放射線が Si 中で、電磁カスケードシャワーを起こさないと仮定している。よって (1) より発生する電荷は、

$$\begin{aligned} N_0 \times e &= \frac{\Delta E}{\epsilon} \times e \\ &= \frac{0.116 \text{ MeV}}{3.6 \text{ eV}} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \\ &= 5.16 \text{ fC} \end{aligned} \tag{1.4}$$

と計算される。

第2章 読みだし系のテスト

2.1 読みだし系の構成

逆バイアス電圧

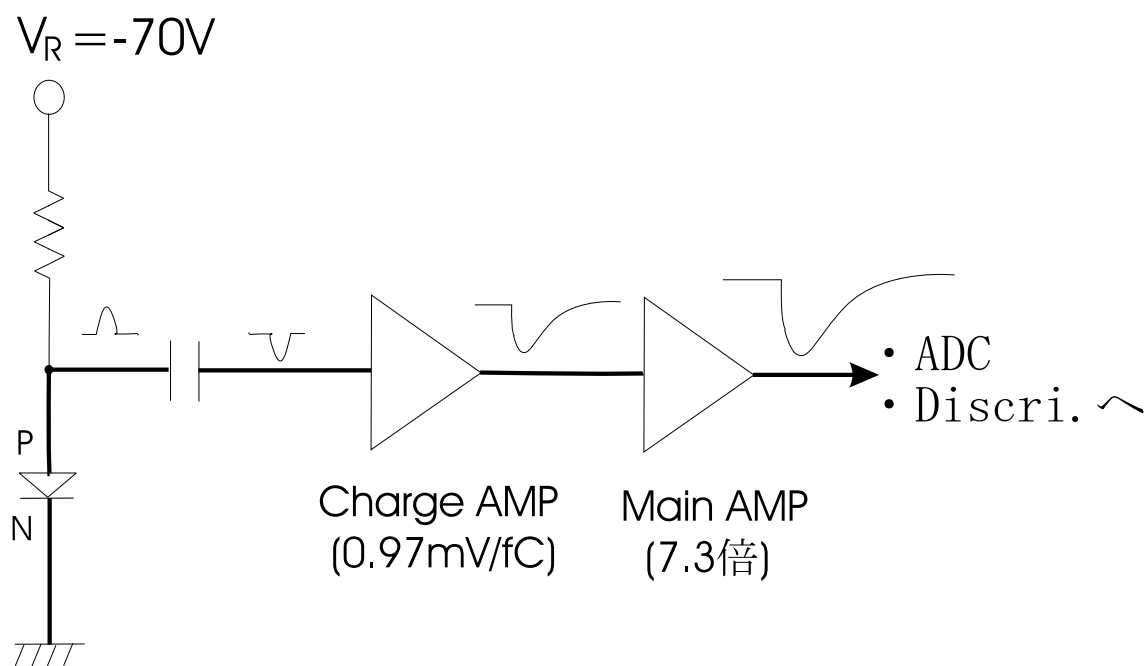


図 2.1: 読みだし系の構成

2.2 PreAMP のゲイン測定

PreAMP(DP-1887)は、テスト入力端子が付いている。これは、入力信号を 50Ω で終端したのち、 $1/11$ に減衰させたのち、外付の $500pF$ と アンプ基盤の $1pF$ のコンデンサに充電する積分回路を形成している。そして、チャージアンプは、 $1pF$ のコンデンサを介して入力に接続されているので、これらのコンデンサの電位差を測定すれば、アンプに入力された電荷が測定できる。すなわち、コンデンサの電位差を V_C とすれば、入力電荷 Q_{in} は、

$$Q_{in} = 1 \text{ rmpF} \times V_C$$

である。

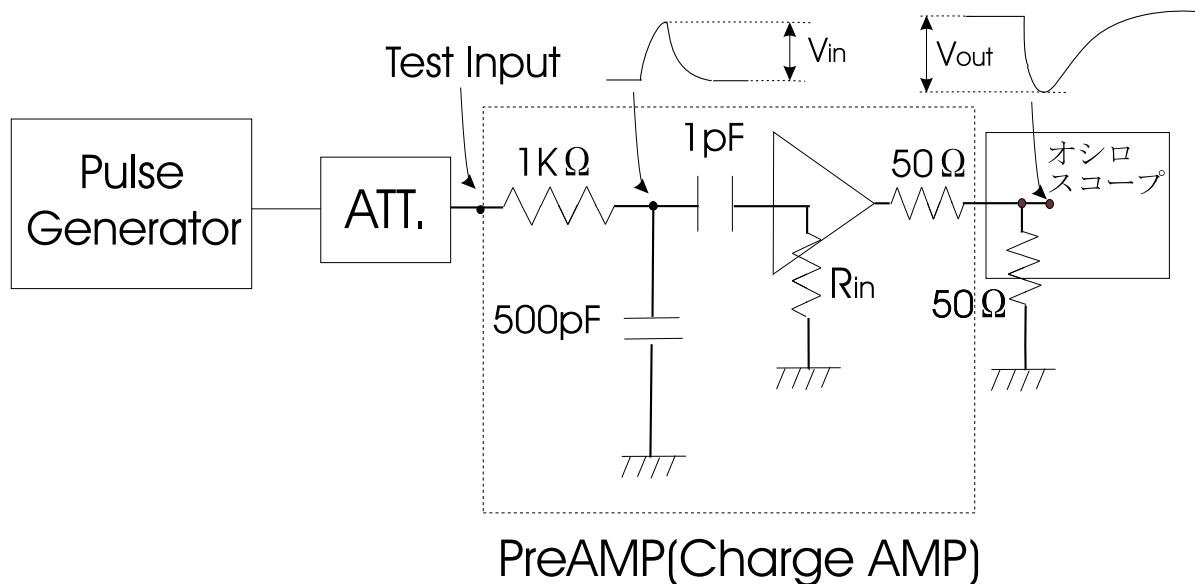


図 2.2: PreAMP のゲイン測定の設定アップ

今回、コンデンサの電位差の測定は、外付の 500pF でおこなった。また、入力は、パルスジェネレータから Width を固定した様々な電圧のパルスを入力した。ゲインの算出は、これによるコンデンサの電位差 V_{in} の最大値とアンプ出力のピーク値 V_{out} をオシロスコープで測定し、

$$\begin{aligned}
 Gain &= 2 \cdot \frac{V_{out}}{Q_{in}} \\
 &= 2 \cdot \frac{V_{out}}{1 \text{ pF} \cdot V_{in}} \quad (\text{V/pC}) \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

により求めた。ここで、係数 2 は開放端換算電圧への換算係数である。

したがって、10ns-20ns あたりでは、ゲインがほぼ一定値に近付いていることがわかる。これは、チャージアンプのインパルス応答とみなすことができる。この値は、グラフより、0.97V/pC と求まる。

2.3 微分バイアス分布による測定法

設定された一定のスレッシュホールド電圧よりも高いピークをもつパルスをディスクリミネータ (波高弁別器) に入力した場合、一定長の NIM レベルのパルスが発生する。このスレッシュホールド電圧を順次変化させて、一定時間内のパルスの計数数を記録すれば、波高分布の積分バイアス曲線が得られる。積分と言うのは、スレッシュホールド電圧以上の入力パルスの計数数の総和が、そのスレッシュホールド電圧の時の計数数であるからである。

隣り合うスレッシュホールド値の計数数の差をとり、これを対応するバイアス電圧の差で割ることにより、そのスレッシュホールド値の区間でのパルス波高の計数数の割合が求まることになる。これを、微分バイアス曲線という。

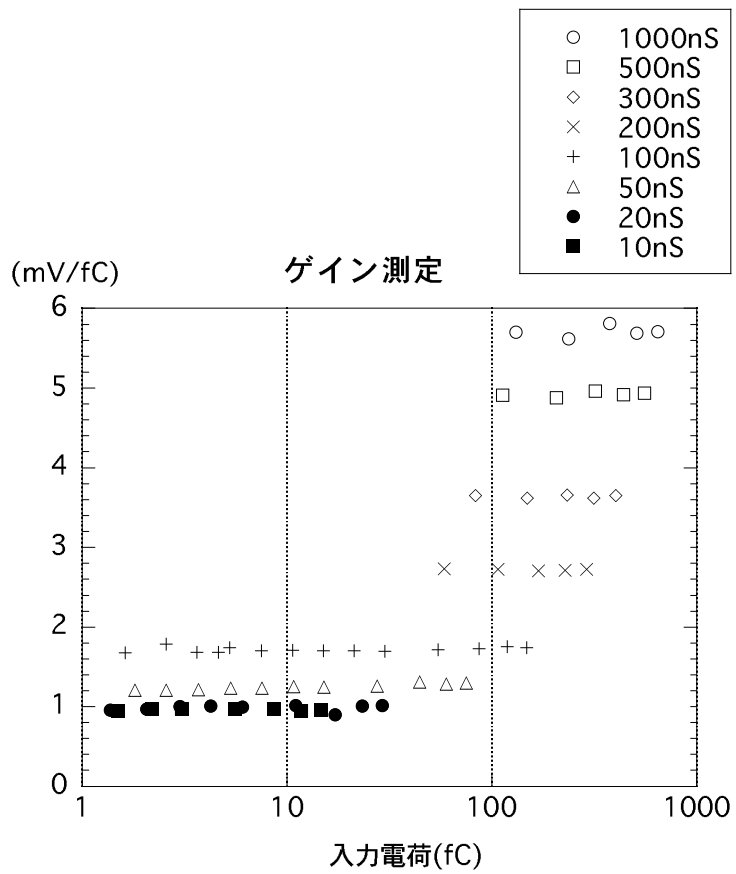


図 2.3: PreAMP のゲイン測定

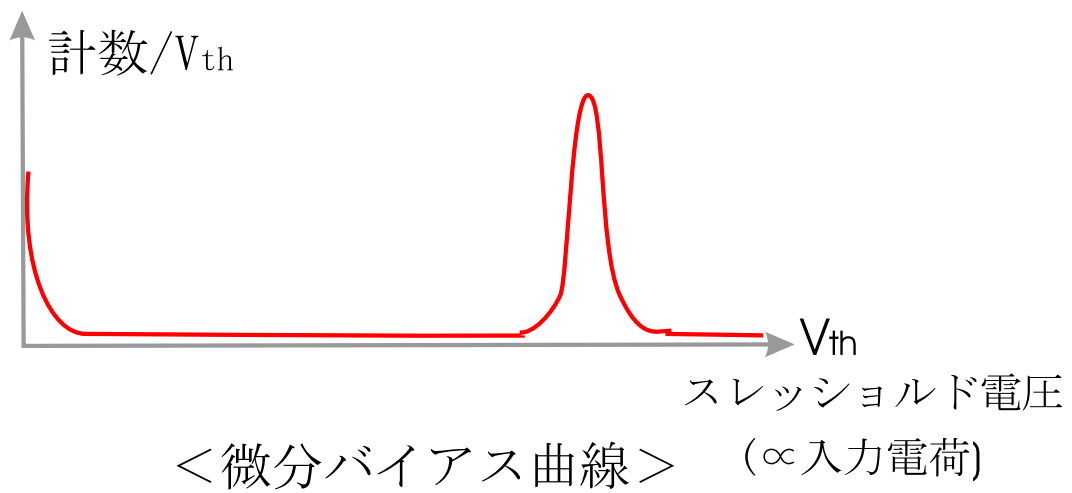
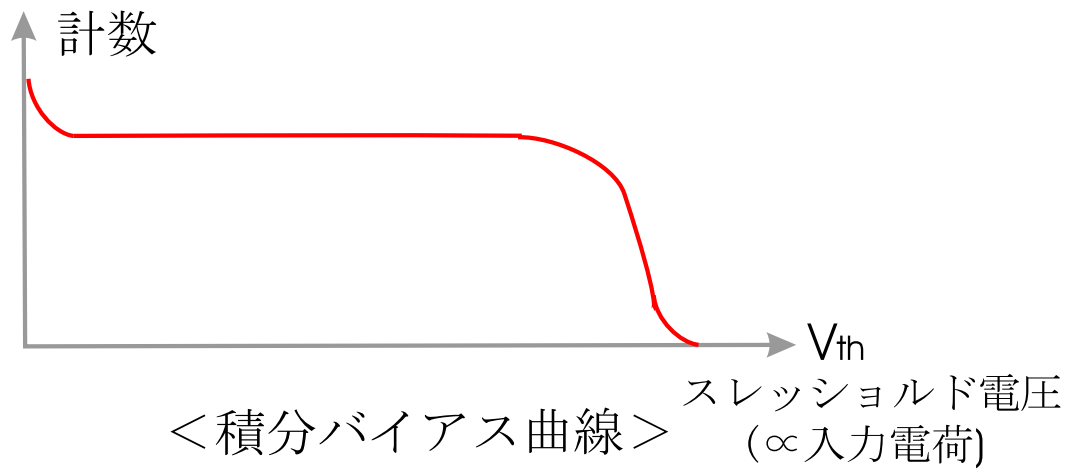


図 2.4: 微分バイアス曲線と積分バイアス曲線

第3章 最小荷電粒子 (Minimum Ionization Particle) の測定

3.1 微分バイアス分布によるMIP

この方法で取った、 ^{90}Sr の通過 β 線のグラフを示す。

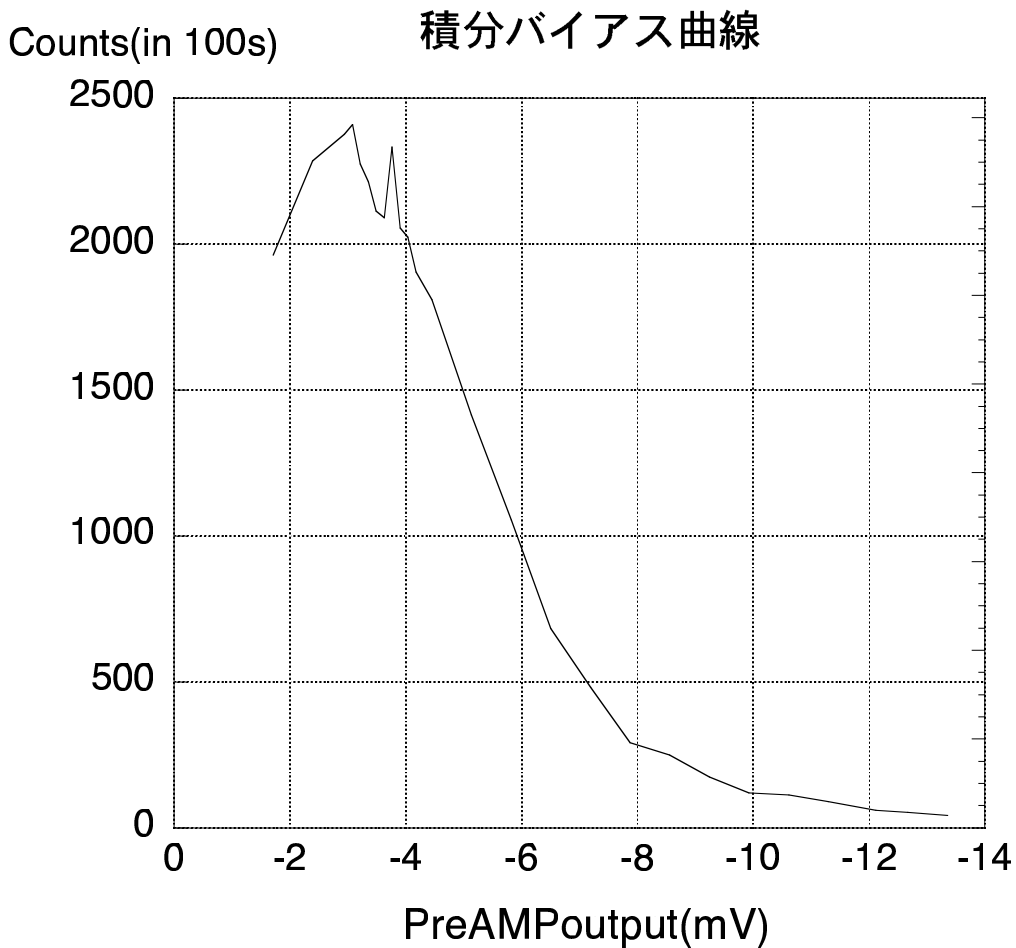


図 3.1: 積分バイアス曲線

微分バイアス曲線を見ると、4mV 付近にピークがきていることが読める。この値から、通過 β 線の Si-PAD でのエネルギー損失は、

$$\Delta E = \frac{4(\text{mV})}{0.97(\text{mV/fC})/2} \times \frac{1}{e} \times \epsilon$$

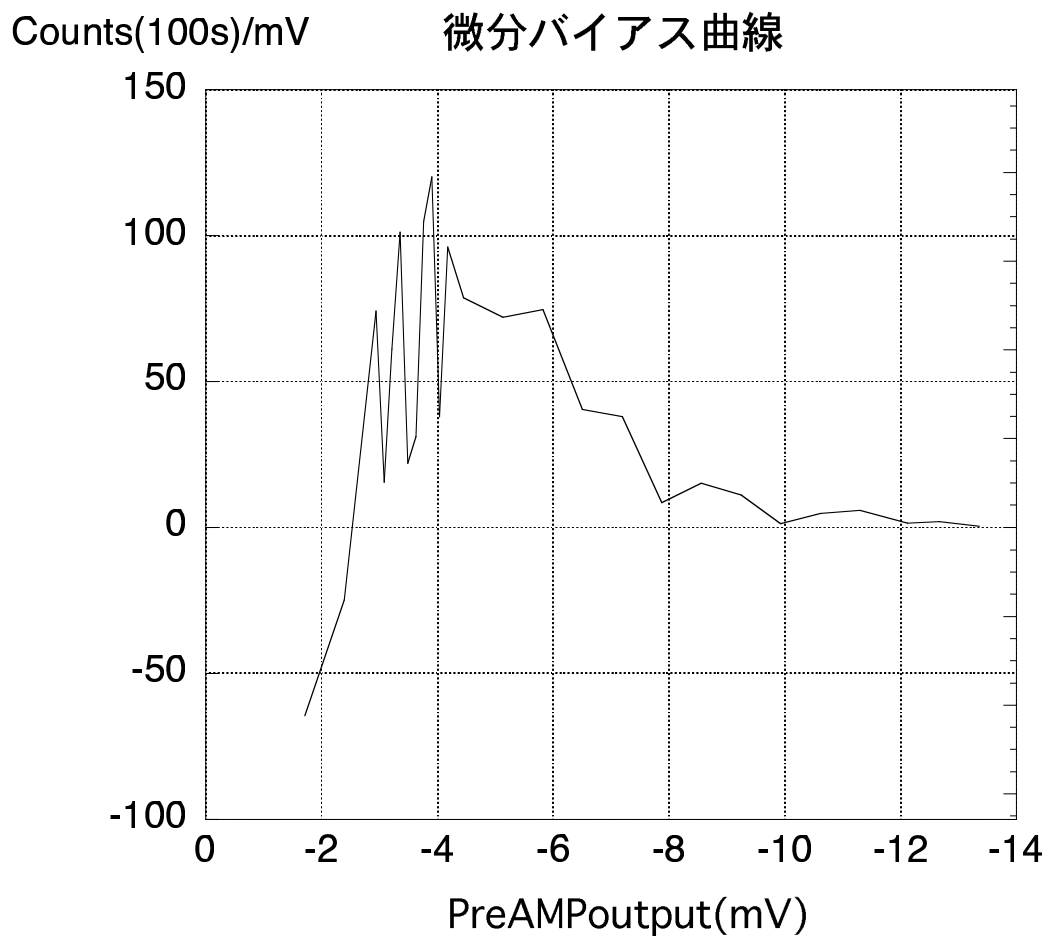


図 3.2: 微分バイアス曲線

$$\begin{aligned}
&= 8.25\text{fC} \times \frac{1}{1.60 \times 10^{-19}\text{C}} \times 3.6\text{eV} \\
&= 0.18\text{MeV}
\end{aligned}
\tag{3.1}$$

となる。これは、(3)と良く一致する。

3.2 チャージ積分型 ADC による ^{90}Sr による β 線の測定

前節により、チャージ積分型 ADC でのカウント数と入力電荷との関係が付けられた。これにより、プリアンプの出力をチャージ積分型 ADC に入力することにより、4 節での微分バイアスによる方法と同等の結果が得られることになる。今回は測定精度を上げるために、チャージアンプの後に電圧増幅率 7.3 倍のメインアンプを入れて ADC を取った。これにより ADC カウント数は、7.3 倍になっている。

上の図は、オーバーフローとアンダーフローを除いた ADC カウント分布である。左のピークはペDESTAL である。右のピークが通過粒子 (Minimum ionization particle) だと考えられる。そのため、下の図は右側のピークの位置が取り出せるようにカットを掛けた。また、ペDESTAL も引いてある。

すると図によれば、ピーク位置は 2875 counts 付近である。これより、この点でのエネルギーを算出してみる。

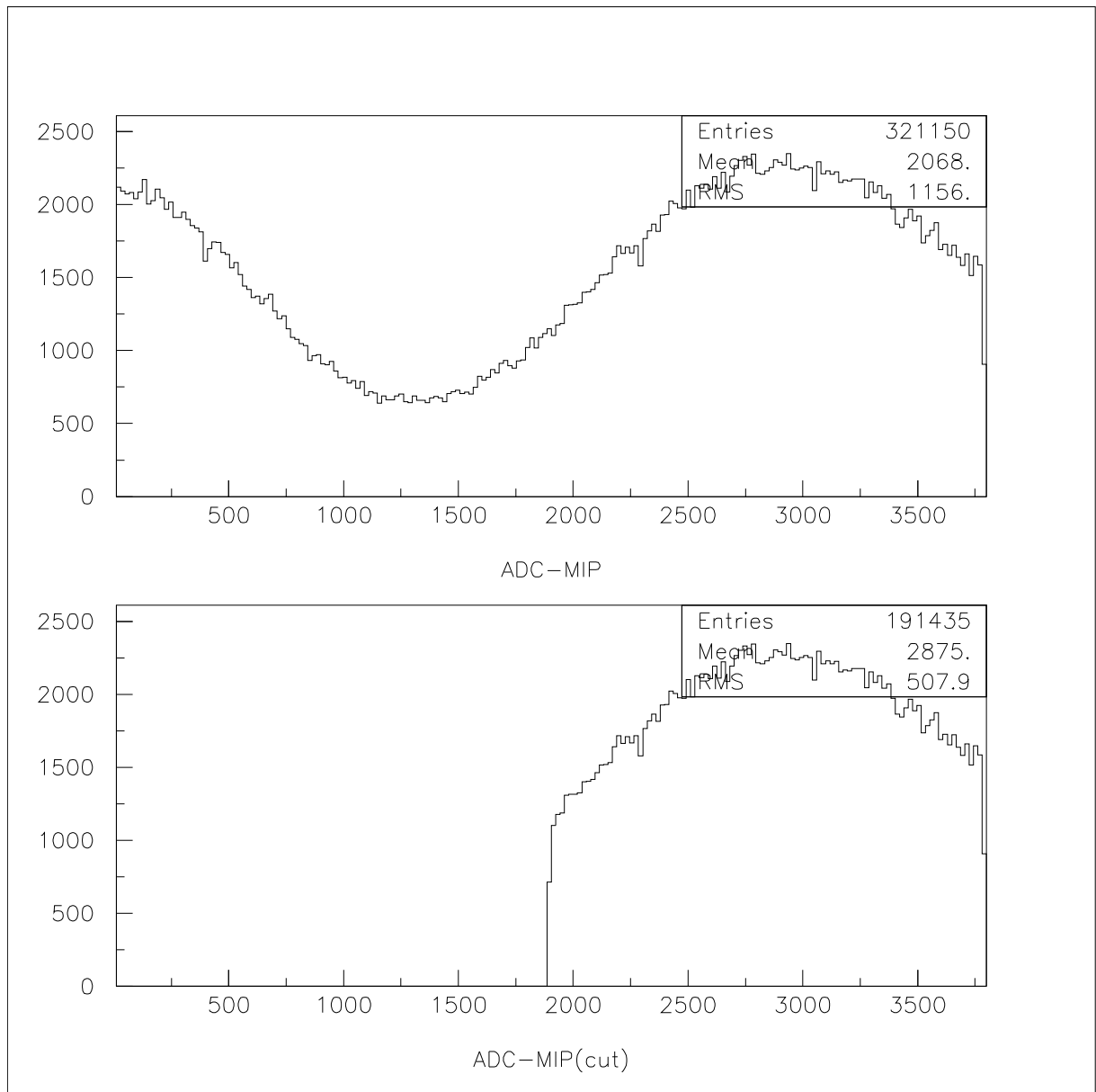


図 3.3: ADC による MIP の観測

$$\begin{aligned}
\Delta E &= \frac{2875(\text{counts})}{7.3} \times 3.1 \times 10^{-17}(\text{C}/\text{counts}) \times \frac{1}{e(\text{C})} \times \epsilon(\text{eV}) \\
&= 393.8(\text{counts}) \times 3.1 \times 10^{-17}(\text{C}/\text{counts}) \times \frac{1}{1.60 \times 10^{-19}(\text{C})} \times 3.6(\text{eV}) \\
&= 12.2(\text{fC}) \times \frac{1}{1.60 \times 10^{-19}(\text{C})} \times 3.6(\text{eV}) \\
&= 0.27(\text{MeV})
\end{aligned} \tag{3.2}$$

となり、(3) とオーダーは同じなものの、少し大きめの値になっている。

第4章 議論

現在、粒子検出に用いられている、ガスクエンバーや半導体検出器などは電荷出力型の検出器である。そして、そのためのアンプの初段にはチャージアンプが用いられることが多い。このような測定系の場合、出力のピーク波高に意味があり、ピーク電圧検出型の ADC を用いて測定するのが自然であると思われる。しかし、少なくとも高エネルギーの世界では、チャージアンプの出力をチャージ積分型の ADC で測定する事がほとんどである。確かに、5節で示したように、十分なゲート幅をもってチャージアンプの出力波形を積分すれば、ADC カウント数とピーク波高とのあいだに良い比例関係が成立する。それでは、チャージ積分型の ADC での測定がピーク電圧検出型の ADC での測定に対し、優れていると思われる点を挙げてみる。

- ピーク検出型の ADC の場合、ノイズによるベースラインが変動した場合、それがそのまま測定の誤差となって現れる。それに対し、チャージ積分型の ADC では、ゲートが開いている間入力電荷を積分しているので、ベースラインの変動はキャンセルされる傾向がある。
- 加速器に使う場合、アンプからの出力を長距離同軸ケーブルで引き回す事がある。このとき、パルスの形は鈍ってしまい、パルスハイトは保存されなくなる。しかし、このときでもパルスのもつチャージの量は一定である。したがって、十分なゲート幅さえ取れば、鈍った信号からも正確な測定ができる事が期待できる。

次に、測定値が理論値よりも大きめにでてきてしまった理由について考察する。

まず、粒子が物質中で失うエネルギーは $\frac{dE}{dx}$ で与えられるが、今回の計算ではその最低値を計算に使う値として採用した。この値は、粒子の運動量に依存している。 β 線は、連続スペクトルであるため、この値も幅をもつことが考えられる。これにより、ピークの値が数割大きめに出来来る可能性があると思われる。

最後に、この実験の精度を向上させる可能性のある方法について述べておきたい。まず、Si-PAD は原理的に検出器自体に増幅作用をもっていないため、極めて微量の電荷 (fC 単位) しか発生しない。そのため、その出力をプリアンプまで伝送し、増幅して測定するまでの過程で、できるだけ外来ノイズを防ぐようにしなければならない。現在は、Si-PAD アルミ箔でシールドして、シグナルケーブルもアルミ箔でシールドされたツイストペア線を使っているが、それでも人が数十センチ以内に近付いただけで、測定不能状態になってしまう。これをさらに改善することにより、より精度の高い測定ができるようになるであろう。

謝辞

物理や実験の様々なことに関して、適切なアドバイスを与えてくれて、仕事の遅い僕を忍耐強く指導して下さいました指導教官である竹下先生に深く感謝します。

関連図書

- [1] 山崎 文男 実験物理学講座 26 放射線, 共立出版