

自動精密ステージを用いた半導体検出器の光子応答の位置依存性の測定

右田 雄二

広島大学 理学部 物理科学科

u1179063

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

平成 15 年 2 月 28 日

目次

第1章	序論	3
第2章	半導体検出器とX線応答の位置依存性	4
2.1	宇宙観測における半導体検出器の役割	4
2.2	シリコン半導体検出器の種類	4
2.2.1	フォトダイオード (PD)	4
2.2.2	シリコンストリップ (SSD)	4
2.2.3	アバランシェフォトダイオード (APD)	5
2.2.4	CCD 撮像素子	5
2.3	半導体検出器の光子応答	5
2.3.1	半導体の性質	5
2.3.2	X線検出器としての半導体	6
2.3.3	リーク電流	8
2.3.4	エネルギー分解能	8
2.4	光子応答の位置依存性	10
2.4.1	空乏層の厚さの非一様性	11
2.4.2	サブピーク成分	11
2.4.3	テール成分	11
2.5	本研究の目的	12
第3章	フォトダイオードの光子応答の位置依存性の測定	13
3.1	XY ステージによる自動制御の意義	13
3.2	実験のセットアップ	13
3.2.1	フォトダイオード	13
3.2.2	XY テーブルと制御系	14
3.2.3	固定治具とコリメータ	16
3.2.4	データ取得系	17
3.3	実験装置の動作試験	18
3.4	LED を用いた感度領域の測定	18
3.5	X線 線を用いたフォトダイオードの位置依存性の測定	20
3.5.1	X線を用いた位置依存性の測定	20
3.5.2	線を用いた位置依存性の測定	22
3.5.3	逆バイアス電圧を変化させた場合の測定	24
3.6	考察	25
3.7	今後の課題	25

表 目 次

3.1	フォトダイオード SPL PD typeA の特性	13
3.2	ステージの特性	15
3.3	測定に用いた機器	17

第1章 序論

宇宙観測におけるX線と 線

X線天文学は、約40年まえから始まり可視光だけに頼っていた私達に多くの発見をもたらした。それは、可視光領域で輝かずX線領域で輝くものが宇宙には多く存在し、そのX線スペクトルをみることにより、物質の状態や熱的/非熱的放射の判断など、多くの情報を得ることができるからである。その情報は、私達に見えていなかった新しい宇宙を教えてくれた。

その最大の発見は、動的宇宙という概念だといえる。X線天文学以前、可視光領域で観測していた私達には、太陽や星の光の情報しかなく、それは静的宇宙をおもわせた。しかし、X線観測による情報は、星の進化や爆発、太陽の10億倍ものエネルギー放射が起こる天体など、活動的な宇宙を示したのである。

このように、人類に多くの功績をもたらしたX線天文学だが、宇宙にはまだ多くの観測しきれていないものがある。それは私達に、さらに新たな宇宙を教えてくれるかもしれない。そのためにも、検出器の改良などがおこなわれている。

第2章 半導体検出器とX線応答の位置依存性

2.1 宇宙観測における半導体検出器の役割

半導体検出器は、放射線検出器として半導体(シリコン、ゲルマニウム、テルル化カドミニウム)を使用したものであり、動作原理は気体電離箱と同じである。気体電離箱は、放射線のイオン化作用によるイオンおよび電子を集めるが、半導体検出器では、放射線の電離作用により生成された正孔と電子対を集めて測定する。半導体検出器の特長は、シンチレーション検出器と比べ、エネルギー分解能が優れていることである。これは、シンチレーション検出器は発生電子数が少なく、統計的ゆらぎによるエネルギー分解能を改善することが出来ないが、半導体検出器は発生電子数が多くなるなど原理的にエネルギー分解能が良くなる。また、入射した放射線にたいして比較的速いタイミング特性をもつ。しかし欠点もあり、生成された正孔と電子の寿命による有感部の大きさの制限や放射線損傷による劣化、シンチレーション検出器に比べて小さい阻止能、特性の位置依存性などがあげられる。

2.2 シリコン半導体検出器の種類

2.2.1 フォトダイオード(PD)

半導体検出器として、もっとも一般的なものであり、今回の実験でも使用したものである。半導体にエネルギーギャップ(数keV)よりも大きなエネルギーを持つ光子が入射すると、電子が伝導体に励起され、その抜け穴が正孔になる。電場があると発生した電子と正孔は、互いに逆方向に走行し電流を発生させる。また、シリコンの厚みを大きくし、空乏層を大きく発達させたものを特にPIN型と呼ぶ。また、結晶シンチレータの発光をフォトダイオードを使って読みだすこともできる。この場合、光電子増倍管に比べ量子効率が高く、統計的ゆらぎだけを考えればエネルギー分解能は向上する。しかし、発光した情報は増幅されないので電氣的に扱う信号レベルが弱く、電気回路系雑音を小さくしないとエネルギー分解能が良くならない。

2.2.2 シリコンストリップ(SSD)

シリコンストリップ検出器は、短寿命粒子の検出のために高い位置分解能を持つ飛跡検出器として開発されたものである。シリコンストリップの基本的な構造は、 n 型半導体の上に P^+ 型半導体を短冊状に並べたものであり、多数の $p-n$ 接合を形成したものである。これら多数の $p-n$ 接合半導体が独立な検出器として働き、生成された正孔は最も近い P^+ ストリップに引き寄せられることにより、軌跡を測定することができる。

半導体結晶に高電場を加えたとき、高速に加速されたキャリアが格子原子に衝突することにより束縛されていた電子を励起し、キャリアの自由電子と正孔を作る。これら二次キャリアも次々と衝突電離に加わるために、なだれ状にキャリアの増幅がおこる。これをアバランシェ効果と呼び、

このような効果を利用したフォトダイオードをアバランシェダイオードという。この効果により、光電子増倍管のように情報キャリアを増幅してくれるので、電気回路系雑音によるエネルギー分解能の低下を防止することができる。

また、この増幅機能は温度依存性を持っていて、温度をさげるほどゲインが増加する傾向が見られている。しかし、増幅率のゆらぎなどによりエネルギー分解能は思うほど良くはならない。

2.2.4 CCD 撮像素子

電荷結合素子 (CCD) に小さなフォトダイオードを組み合わせた撮像用の半導体素子である。小さなフォトダイオードを2次的に数百個×数百個並べたものであり、優れたエネルギー分解能をもつX線検出器となる。CCDは印加された電圧によって広がった空乏層が生じる電位井戸に信号電荷をため、順次隣接する電位井戸に信号を転送することにより、電荷ロスが少ないのが特徴であるが、読み出し時間が数秒かかり、また $100\mu\text{m}$ 以上の厚さのものを作るのが難しいという欠点もある。

2.3 半導体検出器の光子応答

2.3.1 半導体の性質

結晶性物質の電子のエネルギー準位は、格子の周期性によりバンド構造を持ち、電子の禁制帯 (バンドギャップ) を生じる。電子のフェルミエネルギーがこのバンドギャップ中に存在するとき、バンドギャップの下側に電子に満たされた価電子帯ができ、バンドギャップの上側に熱励起などによってエネルギーをもらって励起できるバンドとなる伝導帯ができる。絶縁体ではこの励起エネルギーが大きく電気は流れないが、半導体はこのエネルギーが小さく励起されやすいのが特徴である。

ここで、不純物が全然含まれていない半導体 (真性半導体) を考える。伝導帯中の電子や価電子帯中の正孔はすべて熱励起によってもたらされる。この条件では各電子は正孔をつくるので、伝導帯中の電子の数は価電子帯中の正孔の数と必ず等しくなる。それぞれの密度を n_i (電子密度)、 p_i (正孔密度) とすると、その関係は式で書くと次のようになる。

$$n_i = p_i$$

この値は、常温のシリコンで $1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ である。

次に、半導体に不純物を混ぜた状態を考える。

- N型半導体

不純物が5価すなわち周期律表の第五族に属しているとする。すると、シリコンは4価であるので、共有結合することにより1個の電子があまる。これはドナー不純

熱励起の確率が十分大きく、伝導電子の数 (n) はドナー不純物からの寄与が大部分をしめる。ここで不純物濃度を N_D とすると、

$$n \cong N_D \text{ となる。}$$

この増大した電子が再結合率をあげ、 n と P の積であたえられる平衡定数が、 $n_i P_i$ と等しくなるような量だけ正孔の数が減少する。

$$nP = n_i P_i = n_i^2 \quad (n + p \geq 2n_i)$$

この式は不純物を含むほうが、電気伝導度がおおきくなることを示す。

- P 型半導体

不純物が 3 価の周期律表の三族に属しているとする、電子が足りなくなり正孔がある。これは、アクセプタ不純物と呼ばれる。このような半導体を P 型半導体といい、それが作るエネルギーギャップをアクセプタ準位という。n 型半導体と逆に正孔の数が增加する。

2.3.2 X 線検出器としての半導体

p 型半導体と n 型半導体を接合して、X 線検出器として用いる。これを p-n 接合と呼ぶ。

二つを接合させるとまず、それぞれのキャリアの移動が起こる。この移動は、電荷の移動によって生じた電圧によって平衡状態になる。その間に生じたキャリアのない空間を空乏層という。図 2.1 のようにこの空間に入射した光子の軌跡上に電子、正孔対が生じる。それらを測定して、X 線検出器として利用する。

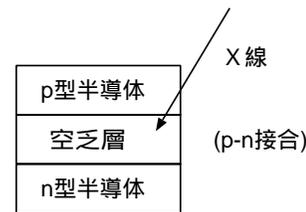


図 2.1: 空乏層

生じた電圧とは逆に電流を流れやすくする向きにかけるとを順バイアスといい、電流が流れないようにかけたものを逆バイアスという。X 線検出器として使う場合は逆バイアス方向に電圧をかけて用いる。

空乏層の厚さ

ここで、空乏層の厚さを考えるために図 2.2 のような p-n 接合を考える。
 N_A : アクセプタ不純物濃度, N_D : ドナー不純物濃度, E_0 : 電場の最大値, V_c : 接触電位

方向を X 軸とする。

理想的な電荷分布をしているとすると、(図 2.2 の (b))

$$\rho(x) = \begin{cases} -eN_A & (-a < x \leq 0) \\ eN_D & (0 < x \leq b) \end{cases} \quad (2.1)$$

となる。空乏層領域では、キャリアは空になっているためポアソン方程式は次のように簡単になる。(図 2.2 の (b))

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \begin{cases} \frac{eN_A}{\varepsilon} & (-a < x \leq 0) \\ -\frac{eN_D}{\varepsilon} & (0 < x \leq b) \end{cases} \quad (2.2)$$

半導体全体で空間電荷は中性であるので、 p 側の単位面積あたりの負の空間電荷は n 側の空間電荷と等しくなければならない。よって、

$$N_A b = N_D a \quad (2.3)$$

となり、ここで電場は $E = -\frac{d\varphi}{dx}$ である電荷分布の両端で電場がゼロになるという境界条件をもちいて式 2.2 を積分すると、(図 2.2 の (c))

$$E = \begin{cases} -\frac{eN_A(x+a)}{\varepsilon} & (-a < x \leq 0) \\ \frac{eN_D(x-b)}{\varepsilon} & (0 < x \leq b) \end{cases} \quad (2.4)$$

この式を積分すると電位が求まる(図 2.2 の (d))。それに式 2.3 を代入すると、

$$V_C = e \frac{N_A b^2 + N_D a^2}{2\varepsilon} = e \frac{N_D (a+b)b}{2\varepsilon} \quad (2.5)$$

となる。ここで、空乏層の厚さは $d = a + b$ であるが、この厚さは不純物濃度によって変化する。

いま、 p 側の不純物濃度が n 側よりもずっと高いと仮定すると、 $N_D \gg N_A$ であり(式 2.2)より、 $b \gg a$ となる。これより、空乏層は n 側に大きくのびる。空乏層の厚さは $d = a + b \simeq b$ となり、

$$d \simeq \sqrt{\frac{2\varepsilon V_C}{eN_D}} \quad (2.6)$$

となる。 n 側が高いときは N_D を N_A にすればよく、つまり、濃度が薄い側の不純物濃度で決まっている。

これに、逆バイアス電圧をかけることにより厚さを増すことができる。加える逆バイアス電圧を V とすると、

$$d \simeq \sqrt{\frac{2\varepsilon(V + V_C)}{eN_D}} \quad (2.7)$$

となる。このようにして、 X 線検出器として使用するときには、逆バイアス電圧をかける。また、 p - n 接合では電荷が両側に蓄積されコンデンサーのような性質をし、単位面積あたりの接合容量を C_I とすると、

$$C_I = \frac{\varepsilon}{d} \simeq \sqrt{\frac{e\varepsilon N_D}{2(V + V_C)}} \quad (2.8)$$

である。半導体検出器としては半導体検出器の面積を S とすると、 $C_I S$ が小さいほどエネルギー分解能が良くなる。

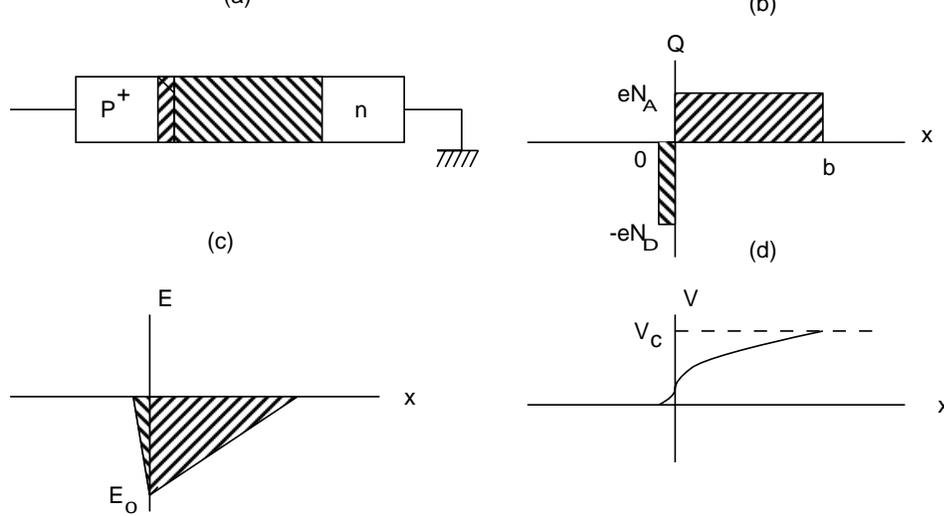


図 2.2: (a)p-n 接合 $N_A \gg N_D$ (b) 空間電荷分布 (c) 電界分布 (d) 電位分布

2.3.3 リーク電流

接合型検出器にバイアス電圧をかけた場合は nA 程度の直流電流が流れる。これをリーク電流と呼ぶ。このリーク電流は回路雑音となる。原因としては以下のことがあげられる。

- 拡散電流
 半導体のキャリアは逆バイアスにより流れにくくなっているが、接合面で少数のキャリアが引き寄せられ接合電位を超えて流れてしまう。この電流は少数キャリアが連続的に生成されるのが原因で、面積に比例した定常電流になる。ほとんどの場合あまり影響をあたえない。
- 発生電流
 空乏層領域の電子正孔対の熱励起によるものだと考えられる。これは空乏層の大きさに比例するが、低温にすれば低下する。また、シリコン検出器はゲルマニウム検出器と比べて十分低い熱励起電流を示す。
- 表面リーク電流
 短い距離に大きな電圧をかけるために、電圧をかける接合の端部に強い電場の部分が局所的に現れリーク電流が発生してしまう。これは検出器の表面状態によっても変わるものであり、表面構造の工夫や表面を綺麗に保つ必要がある。

このように回路に生じるリーク電流は、半導体検出器の分解能などの性能を悪くしてしまうため、出来るだけ小さくする必要がある。

2.3.4 エネルギー分解能

X線が空乏層に入射すると、光電効果で生じた光電子やコンプトン散乱された電子が空乏層中をはしることにより多数の電子・正孔対が生じる。ここで電気素量を e 、電子・空正対を 1 個作るのに必要なエネルギーを ϵ とし、入射した X 線が E_0 というエネルギーを

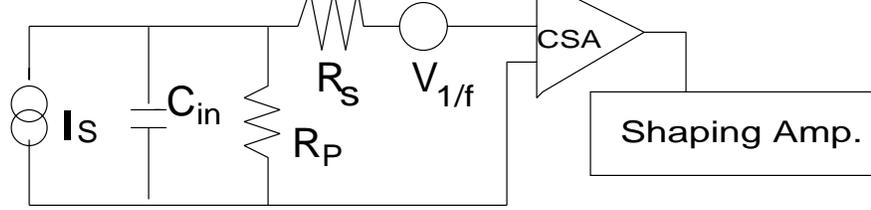


図 2.3: 半導体検出系の雑音に対する等価回路

失ったとしてエネルギー分解能を考える。まずキャリア数 N は、 $N = E_0/\epsilon$ 個生成される。それぞれの電荷キャリアの形成がポアソン過程であると仮定して考えると、統計的変動の標準偏差は \sqrt{N} になる。

電荷キャリアの数の統計的変動のみ考えたエネルギー分解能を $\Delta E_{\text{統計}}$ とする。ここで、多くの検出器の応答は線形なので平均パルス波高は $H_0 = KN$ (K ; 比例定数) となり、またパルス波高スペクトルのピークの標準偏差 $\sigma = K\sqrt{N}$ となる。

よって、エネルギー分解能は $\Delta E_{\text{統計}} = \frac{FWHM}{H_0}$ なので、

$$\Delta E_{\text{統計}} = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{2.35K\sqrt{N}}{KN} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \quad (2.9)$$

となる。

測定結果によると、電荷キャリアの総数は簡単なポアソン統計では表されず、そのずれを定量化するためにファノ因子 (F) が導入され、

$$\Delta E_{\text{統計}} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} * \sqrt{F} = \propto \frac{b}{\sqrt{E_0}} \quad (2.10)$$

となる。

半導体検出器や比例計数管ではファノ因子は実際に 1 よりかなり小さくなり、シンチレーション検出器などではポアソン統計と一致しており、ファノ因子は 1 となる。この値はシリコンのとき、 $\epsilon = 3.63\text{eV}$, $F \sim 0.08$ であり、

$$\Delta E_{\text{統計}} = \frac{1.27}{\sqrt{E_0(\text{eV})}}$$

と小さい値が予想される。

しかし、半導体検出器はシンチレーション検出器とは違い、光子によって作られたキャリアは光電子増倍管などの増幅器によって増幅されないので電氣的に扱う信号レベルが弱く、電気回路系雑音の影響を受けやすくエネルギー分解能はこれよりも悪くなる。

次に、検出器に起因する電気系回路雑音について考える。

- 抵抗で発生する熱雑音
- リーク電流によるショット雑音
- 半導体に特有な $1/f$ 雑音

があげられる。

ここで、図 2.3 のように半導体検出器系の雑音に対する等価回路について考える。

C_{in} 等価入力容量

R_p 等価並列抵抗

I_n 回路全体のリーク電流

R_s 等価直列抵抗

$V_{1/f}$ 1/f 雑音による電圧源

$C_{1/f}$ 1/f 雑音の大きさを表す比例係数

とする。

この等価回路からの信号を、時定数 τ_s の波形整形回路において波形整形を行ったとし、ノイズを雑音等価電荷 (Equivalent Noise Charge) ΔE_{ENC}^2 で表すと、

$$\Delta E_{ENC}^2 = 4k_B T R_S C_{in}^2 \frac{A_2}{\tau_s} + \frac{4k_B T}{R_P} A_1 \tau_s + 2e I_n A_1 \tau_s + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} A_3 \quad (2.11)$$

となることが知られている。最初の2項は等価直列抵抗と等価並列抵抗における熱雑音、3項目がリーク電流によるショット雑音、最後の項が 1/f 雑音によるものである。

ここで、 A_1, A_2, A_3 は波形整形回路のフィルター特性で決まるものであり、理想的なガウス整形 ($CR - RC^n, n \rightarrow \infty$) に対しては、 $(A_1, A_2, A_3) = (0.6267, 0.6267, 0.5)$ である。 ΔE_{ENC}^2 を最小にする τ_s を求めると、その最適値は、

$$\sqrt{\frac{A_2(4k_B T R_S C_{in}^2)}{A_1(4k_B T R_P^{-1} + 2e I_n)}} \quad (2.12)$$

となる。式 2.11 を見ると、 C_{in} で決まる容量性雑音が大きくなると τ_s を大きく、逆にリーク電流による雑音が大きくなると小さくすればいいことが分かる。

電気回路雑音によるエネルギー分解能を $\Delta E_{雑音}$ とすると、

$$\Delta E_{雑音} = \frac{\sqrt{\langle \Delta E_{ENC}^2 \rangle}}{E} \propto \frac{a}{E} \quad (2.13)$$

となる。

これより実際のエネルギー分解能 ΔE は式 2.10 と式 2.13 の2乗平均和と考えられるので、

$$\Delta E = \sqrt{\frac{a^2}{E^2} + \frac{b^2}{E}} \quad (2.14)$$

となる。

これより、半導体検出器の分解能を向上させるためには、電気回路系雑音の寄与を出来るだけ小さくすることが重要であることが分かる。

2.4 光子応答の位置依存性

半導体の X 線応答は以下に述べるような位置依存性が知られている。これら位置依存性のため、X 線の入射位置により光子応答が変化することになる。天体の観測において、X 線の入射位置によりスペクトルが変化することは好ましくないことであり、スペクトルの fitting などの値に変化を与えてしまう。

以下に、杉保 昌彦さんの論文に書いておられる事例を上げて位置依存性の特徴を説明する。

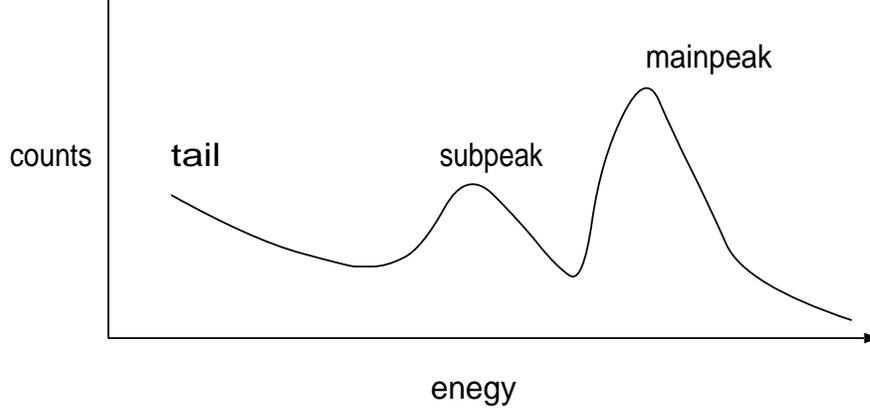


図 2.4: スペクトル

2.4.1 空乏層の厚さの非一様性

§2.3.2 (空乏層の厚さ) で述べたが、空乏層の厚さは半導体の不純物濃度により変化する。その不純物濃度はどうしても非一様性を持つことになり、空乏層も一様ではなくなる。この非一様性により、X線の入射位置により検出効率が変化することになる、

2.4.2 サブピーク成分

単色X線を入射したときのスペクトルで、メインピークよりも低エネルギー側にサブピークが見えることがよくある(図2.4)。特徴として、サブピークはガードリング付近にX線を入射したとき顕著に現れることが知られている。また、逆バイアス電圧の増加とともにカウント数が増えることも知られていて、これは空乏層領域の横方向への広がりによる影響だと言われている。

この成分のパルスハイトはメインピークのパルスハイトの $\sim 2/3$ という特徴的な値を持っていることから、ガードリング付近の反応で生じた電荷の一部がガードリング電極に吸収されているのではないかと考えられる。

2.4.3 テール成分

テール成分とはスペクトルの低エネルギー側が、直線状にのびる現象である。この成分も、ガードリング付近で顕著である。また、検出器を n^+ と p^+ から照射した場合を比べてみると、 n^+ からの照射した場合のほうがテール成分が顕著になったことから、半導体検出器の n^+ 層(裏面)に近い側で生じていると言われている。この場合電氣的グラウンドは p^+ 層であり、 n^+ 層に電圧を加え信号を読みだしている。逆バイアス電圧を変えて空乏層の厚みを変化させると、完全に空乏層化した場合テール成分は減少するので、空乏層領域と不感層領域との境界上で生成されていると考えられる。

2.3 本研究の目的

以上で述べたように半導体検出器の X 線応答には位置依存性があり、それは半導体検出器の種類や構造によって異なる。こうした性質は、半導体検出器としての性能の劣化につながることもあり、よく理解する必要がある。その結果によっては、素子の構造を改善するなどの必要がある。

そのため本研究では、半導体検出器の光子に対する反応の位置依存性を調べるために、自動精密 XY ステージを用いた測定セットアップを立ち上げた。そして、フォトダイオードの X 線や LED に対する位置依存性を簡単に測定した。

第3章 フォトダイオードの光子応答の位置依存性の測定

3.1 XYステージによる自動制御の意義

今回の実験は、光子応答の位置依存性の測定が目的であり、出来るだけ位置決め精度が精密である必要があるとともに、測定位置の再現性や細かいステップでのスキャンが必要である。そのために、XYステージによる自動制御の実験セットアップを組んだ。この実験系の特徴により、 $100\mu\text{m}$ 以内の間隔で位置依存性の自動測定ができるようになり、測定自体も自動で行えるので実験の効率化と簡素化ができる。また、多チャンネル検出器のキャリブレーションなどにも用途があるために、この実験セットアップを組むことになった。

3.2 実験のセットアップ

3.2.1 フォトダイオード

今回の実験では浜松ホトニクス株式会社製の *SPL PD typeA* を使用した (図 3.1)。また、写真を図 3.2 にのせる。このフォトダイオードの特性を表 3.2 に示す。逆バイアス電圧は、空乏層の厚さが 30V ぐらいから変化しないようなので、 40V の逆バイアス電圧をかけて測定した。この場合、このフォトダイオードの端子間容量は 11.6pF であると測定されてる。。厚さを計算してみると、 $C = \epsilon \frac{S}{d}$ より $d \simeq 0.227\text{mm}$ となる。

表 3.1: フォトダイオード SPL PD typeA の特性

[ht] 最大印加 (逆バイアス) 電圧	100V
動作温度	0 ~ + 60 度
保存温度	0 ~ + 80 度
感度波長範囲	320 ~ 1100nm
最大感度波長	960nm
受光感度 ($\lambda = 420\text{nm}$)	280 mA/W
暗電流 (逆バイアス電圧 = 70V)	2nA
端子間容量 (逆バイアス電圧 = 70V)	12pF

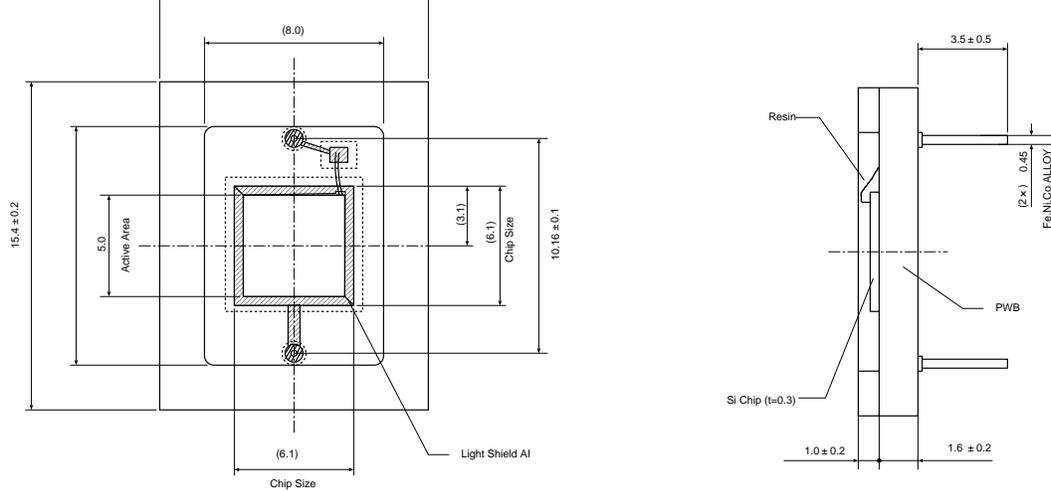


図 3.1: フォトダイオード

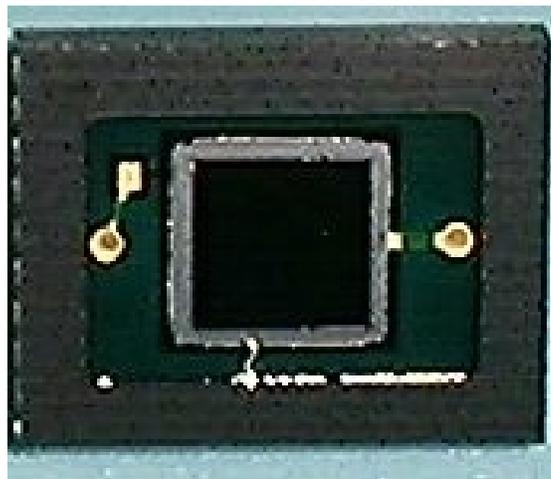


図 3.2: フォトダイオードの写真

3.2.2 XY テーブルと制御系

ステージは神津精機株式会社製 XA16 - 01 を使用した。このステージの特性を表 3.2 に示す。

最小分解能は、 $1\mu\text{m}/\text{step}$ (ドライバの分割数を 1/2 に設定) である。また、使用モータは 5 相ステップモータオリエンタル PK566-B(500p/rev) である。

ステージを動かすドライバも神津精機株式会社製 MD - 501A を使用した。

図 3.3 にステージの制御の概略図を示す。今回は、ステップモータのモーションコントロールを行うために、モーションコントローラ (PCI-7334) を使用した。プログラムは、LabVIEW に用意されているサンプルプログラミングを利用して行い、これによりステージの自動制御が可能になった。

- LabVIEW

LabVIEW とは、*National Instrument* 社製で、テキスト行ではなくアイコンを使用してアプリケーションを作成するグラフィカルなプログラム言語のことである。LabVIEW プログラムは、その外観と動作状態が実際の計測器に似ているためバーチャルインスツルメンツ (仮想計測器)、つまり VI と呼ばれ、特別な言語について

表 3.2: ステージの特性

テーブル面	160mm × 124mm
移動範囲	± 25mm
送り法式	研削ネジ リード 1.0mm
繰り返し位置決め精度	± 0.5 μ m 以内
バックラッシュ	2 μ m 以内
ロストモーション	2 μ m 以内
水平耐荷重	30kg
材質	アルミ合金
自重	3.6kg
最高速度	10mm/sec

の知識もいらず構成しやすいのが特徴である。

- モーションコントローラカード (PCI-7334) とインターフェース (UMI-7764)
 今回使用したモーションコントローラカード (PCI-7334) は *National Instrument* 社製であり、LabVIEW のソフトに含まれている *Measurement&Automation* を使用することにより、モーションコントロールを簡単に構築することが出来る。このコントローラはステッピングモータ用であり最大 4 軸まで制御できる。またインターフェース (UMI-7764) は、軸ごとの分割やドライバとの接続に用いる 64 のピンがある。

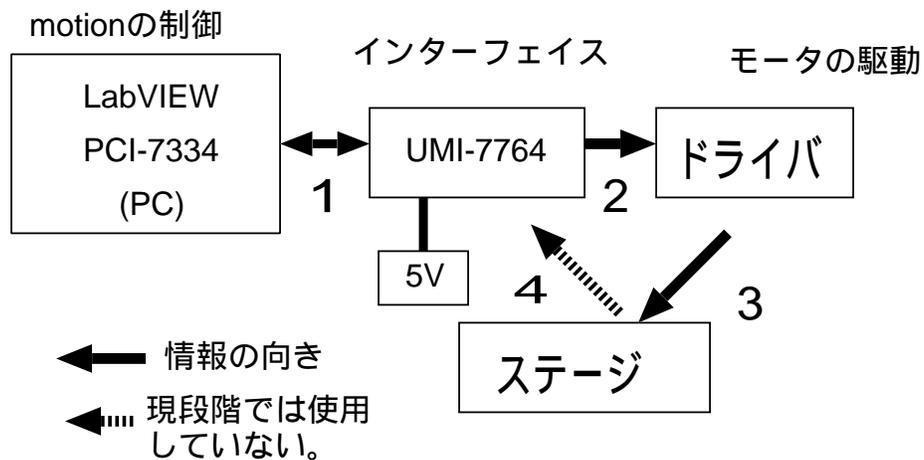


図 3.3: モーションコントロールの概略図

このモーションコントローラはステッピングモータ専用であり、サーボモータのようなフィードバック信号と言われるモータからの信号は得られない。これを、open 回路と呼ぶ。この場合、コントローラとドライバは一方向的な信号の送信なので、ドライバの入力パルス特性に合うようにコントローラの信号を調節する必要がある。また、モータの回転数などの情報は、コントローラの出した信号からしか得ることができないのも特徴である。コントローラの信号の設定は *Measurement&Automation* を使用して行うことが出来る。

以下で、図 3.3 の矢印が何の情報かを説明する。

1. LED 駆動回路プログラム (12) を実行し、LED にパルス信号を送り、パルス信号の強度を測定し、パルス信号の強度を Display に表示する。この信号パルス特性は、*Measurement & Automation* で設定したものである。
2. PC からの信号をステージモータごとに分割する。また、5V の電源を供給することにより、PC からの信号をドライバに伝える。
3. PC からの信号を受け、その動作を行うようにモータに信号を送る。また、モータの回転方向や回転角の分割数は、ドライバの設定によって変えることができる。
4. この矢印はモータについているセンサーからの信号であり、原点 (home) 信号や禁止 (Limit) 信号などをコントローラに伝える。

3.2.3 固定治具とコリメータ

測定は図 3.2.3 のように LED や線源を固定して、ステージの上に半導体検出器をのせ、ステージを動かして行った。上部の素材はアクリル板であり、スペーサーもプラスチック製のものを使用した。これは金属製のものとノイズの原因になってしまったからである。コリメータは図のように、上部に固定をしている。フォトダイオードは、基板にハンダで固定しスペーサーを用いてステージに固定した。また、フォトダイオードを固

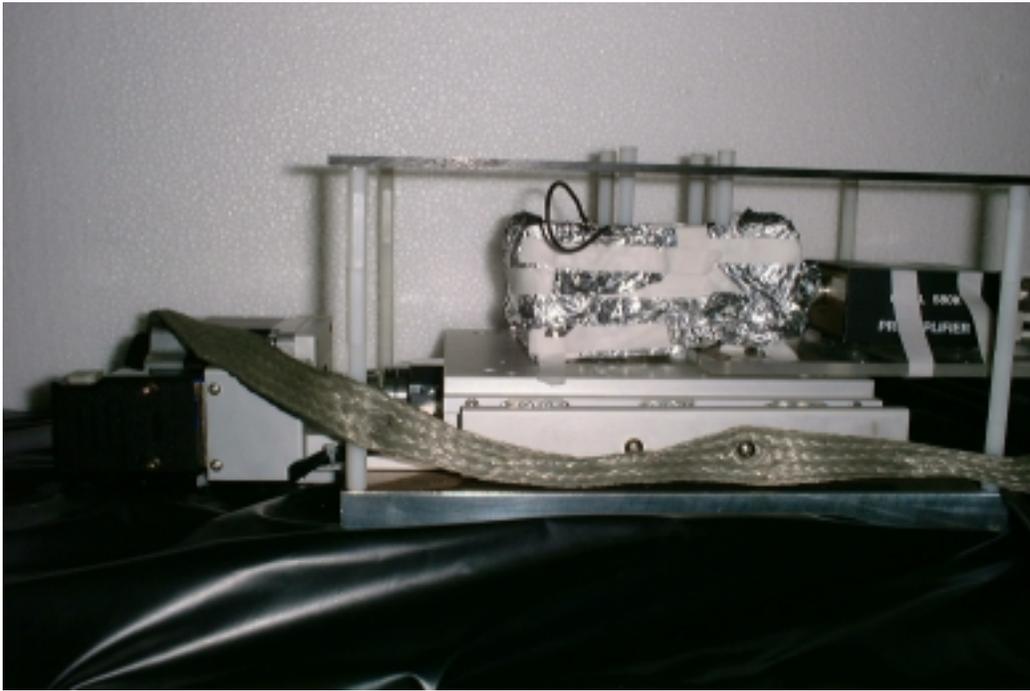


図 3.4: 治具の写真

定した場所もアルミホイルを巻いたアクリルの箱で囲んでいる。これも、周りからのノイズを拾わないようにするためである。コリメータは、東レ・プレジジョン株式会社に製作を依頼した。素材はタングステンで、ひとつの穴の大きさは $\phi 0.5\text{mm}$ 。厚さ 2mm である (図 3.5)。厚さ 2mm のタングステンの場合について、今回測定で利用した ^{109}Cd の $24.9\text{keV}(\text{Ag-K}\beta)$ の透過度を考えると、 $\frac{I}{I_0} = e^{-\rho\kappa_i t}$ (I, I_0 : 透過した後と前の X 線の強度、 ρ : 質量密度 (19.3g/cm^3) κ_i : 質量吸収係数 (24keV で $7.9 \times 10^2\text{cm}^2/\text{g}$) t : 厚さ (0.2cm)) という式から $\frac{I}{I_0} \cong 5.7 \times 10^{-14}$ となり完全にコリメートしていることが分かる。

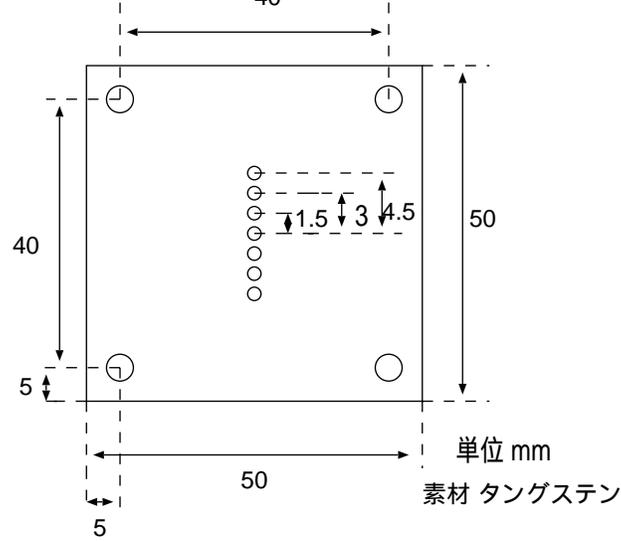


図 3.5: コリメータ

3.2.4 データ取得系

データ取得系のブロック図を図 3.6 に示す。また、それぞれの機器については以下の通りである。

表 3.3: 測定に用いた機器

Shaping Amp	ORTEC 571
ADC	Labo 2201A
MCA	NETWORK MCA (LN-6400)
高圧電源	クリアパルス E6625
CSA	クリアパルス CP580H

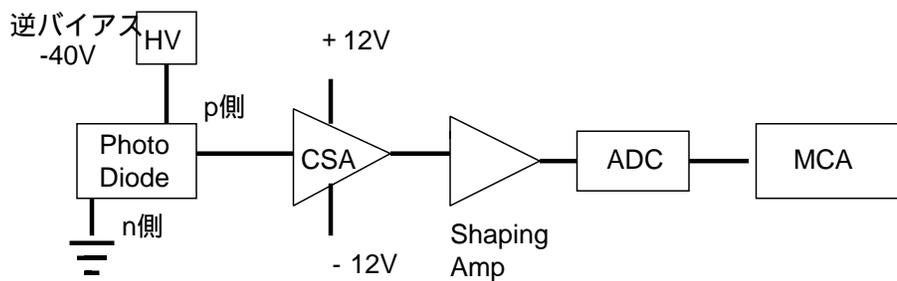


図 3.6: 取得系のブロック図

位置依存性の測定は、NETWORK MCA(LN-6400) の jobcon 機能を使い図 3.7 のような動かしかたで行った。

jobcon 機能とは、図 3.7 のようにデータを取得 (Acquire) する時間と待つ (Wait) 時間を設定することにより、それを設定回数繰り返してくれる機能である。ここで気をつけないといけないのは、MCA の時間設定はデータ取得の際の DT(Dead Time) により実際の時

同じ実験系でも、測定系と制御系が完全に同期がとれていないので、将来的には LabVIEW で制御できる DAQ カードを用いてデータ収集することにより、LabVIEW で完全に全制御できるようにしたい。

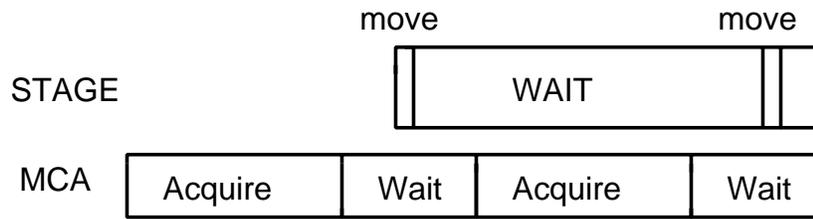


図 3.7: 位置依存性の測定の制御シーケンス

3.3 実験装置の動作試験

前述のようなデータ取得系で実験を行ったが、最初はノイズが多くのもってしまいノイズを落すのが大変であった。ここで、データ取得のグランド配線図を図 3.8 に示す。このように、デジタル機器とアナログ機器は別の ground に落すようにした。また、タングステンも金属性であり、アンテナのようになりノイズの原因になるため CSA (PreAmp) の ground に落してある。ここで約 2mV にノイズ落しができたので、LED を用いて動作確認を行っ

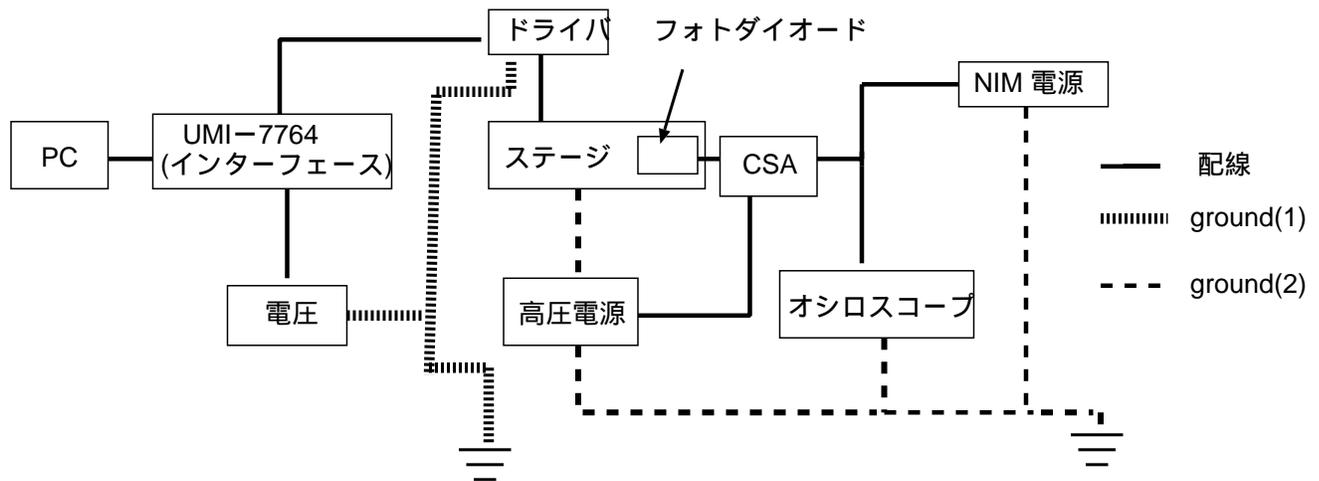


図 3.8: ground 配線図

た。ステージが動いているときには 10mV ぐらいのノイズがのってしまうが、測定中は静止させているので測定には関係がないことから、きちんと測定できることを確認した。

3.4 LED を用いた感度領域の測定

動作確認が出来たので、LED を用いてフォトダイオードの端から端までの全面スキャンを行うことにより、フォトダイオードの感度領域の測定を行った。逆バイアスは 40V に設定し、測定時間は各点 1 分間。ステップ間隔は 0.5mm である。また、コリメートは

3.9.10で述べたように、フォトダイオード(直径 $\phi=0.75\text{mm}$)を用いて、中心の入射位置は、ステップでとめて光がでないようにして測定した。また、フォトダイオードとコリメータの距離は約 2mm である。各場所で得られたスペクトルは図3.9のようになった。また、スペクトルのピークパルスハイトと入射場所の関係を図3.10に示す。

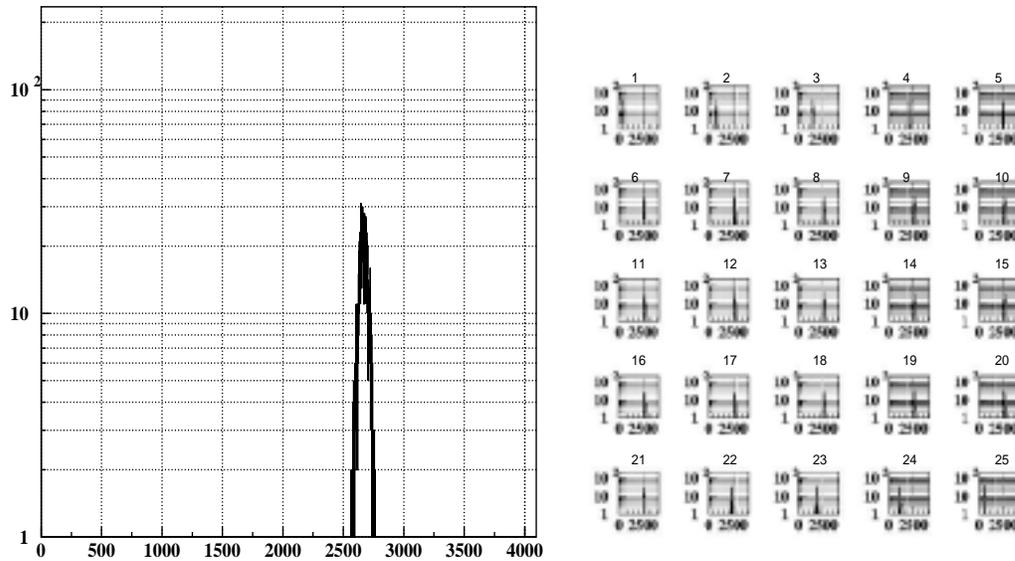


図 3.9: LED をあてたときの各場所のスペクトル (拡大してあるものは10番目のスペクトル)

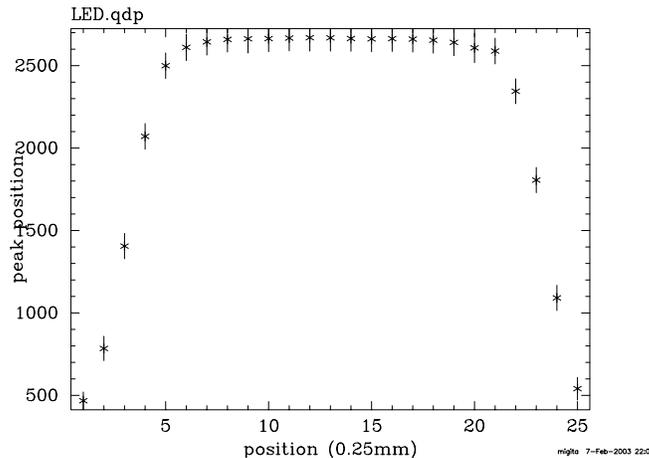


図 3.10: LED を用いたスキャンによるフォトダイオードの反応。各光入射場所におけるパルスハイトで示してある。

図をみると、6~21の位置で2500chのパルスハイトになっている。また、両側の端では 0.75mm ぐらいかけて減少していつている。ここでその原因について考える。LEDのパルスハイトは、感度領域に入射した光子の数で決まるので、真ん中ではすべての光子が入射していると考えられる。ステージを動かして端のほうにきた場合、感度領域に入射

する。つまり、結果から LED の光は約 0.75mm ぐらいの間隔に広がっているのではないかと考えられる。このことから感度領域は、6~21 までの移動距離と LED の光の広がりを考慮したもので、 $(21-6+1) \times 0.25\text{mm} + 0.75\text{mm}=4.75\text{mm}$ となり、図 3.1 と比べると感度領域が 0.25mm 小さくなっている。

3.5 X線 線を用いたフォトダイオードの位置依存性の測定

3.5.1 X線を用いた位置依存性の測定

次に、感度領域が 4.75mm と確認できたので、実際に X 線を照射し位置依存性の測定を行った。今回の実験では、 p^+ 層に電圧を加え信号を読みだし、 n^+ 層を電気的グラウンドとした。また、読みだす電荷は正孔である。使用した線源は ^{109}Cd であり、22.2keV と 24.9keV の X 線を出している。またステップ間隔は 0.2mm であり、測定時間は 2 時間である。図 3.5.1 に各位置でのスペクトルを示す。

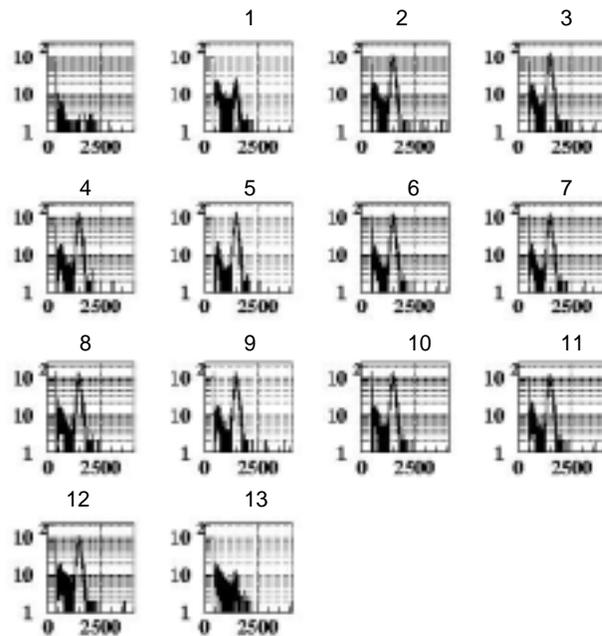


図 3.11: ^{109}Cd の各場所のスペクトル

これを見ると、メインピークの他に §2.4.3 で述べたようなテール成分が見られるがサブピークは見えていない。サブピークが見えていない理由は、今回使用したフォトダイオードにガードリングというものが使用されていないからだと思われる。フォトダイオードの形式によっては、ガードリングでフォトダイオードの周りを囲んであるものもあり、それ

に、テール成分とピーク成分についてのカウント数を求めた。図 3.12 に各場所でのピークとテールのカウントを示す。またその和を図 3.13 に示す。

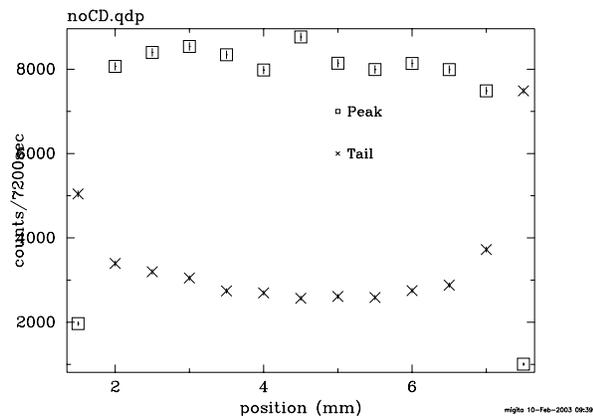


図 3.12: テールとピーク成分のカウント数

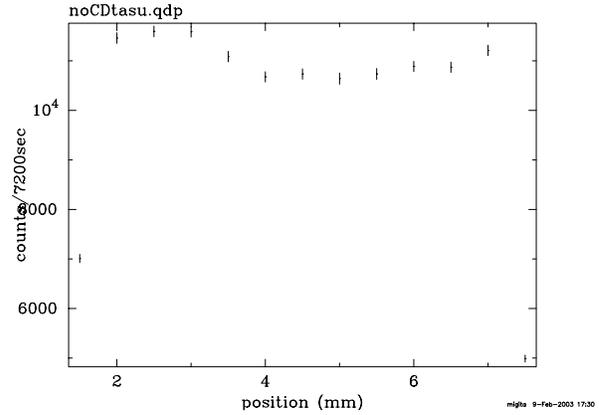


図 3.13: テール成分とピーク成分の和

また、メインピークを $K\alpha$ と $K\beta$ の 2 ラインを考慮したガウシアンでフィッティングをしてパルスハイトと分解能を求めた (図 3.15 と図 3.16)。この図をみると、X 線は端のほうでパルスハイトはが少し下がっている。また、エネルギー分解能はほぼ一定の値である。

図 3.12 のテール成分とピーク成分のカウント数をみると、カウント数は一定の領域が 5.5mm であり、端のほうにいくと減少している。LED の測定結果では 4.75mm だったが、5.5mm になっている。この理由は、X 線は光よりも透過力が強いので端のほうで表面に現れていない空乏層と反応することが出来るが、光は表面で止まってしまうために生じると考えられる。一方、テール成分が端のほうにいくと僅かだが増加しているのが確認できる。これを詳しく調べるために、図 3.12 の 12 番目の点から 0.2mm ずつ動かして端の部分を細かくスキャンして測定した。図 3.16 にテール成分とピーク成分のカウント数を示し、図 3.17 にその和を示す。

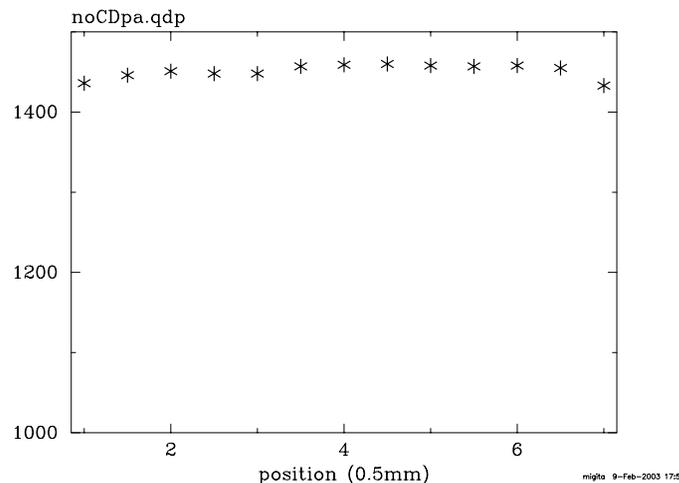


図 3.14: 各場所のパルスハイト (単位は ch)

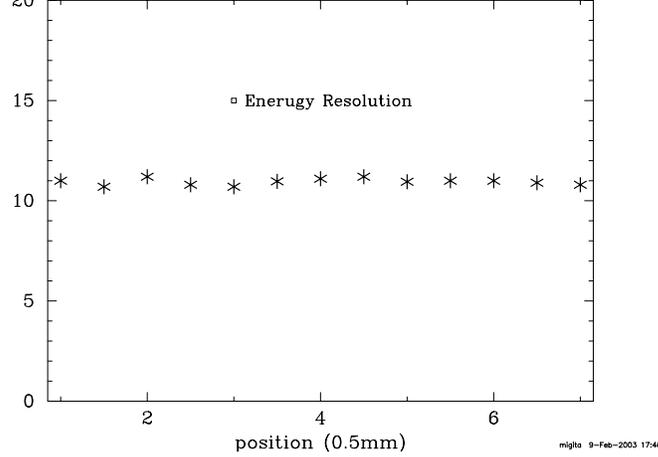


図 3.15: 各場所のエネルギー分解能 (単位は%)

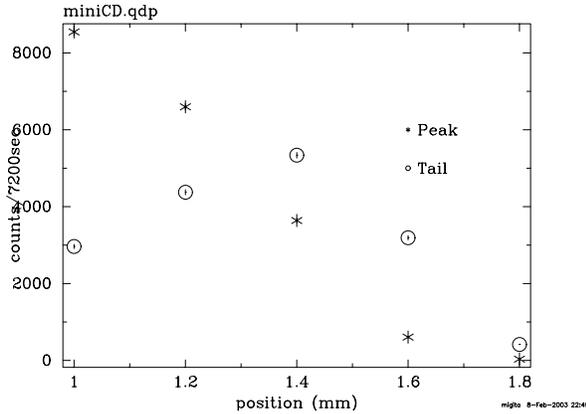


図 3.16: 0.2mm ずつ動かした時の、テール成分とピーク成分のカウント数

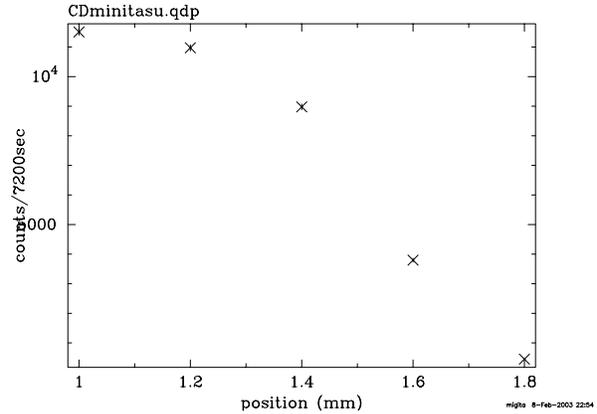


図 3.17: 0.2mm ずつ動かした時の、テール成分とピーク成分のカウント数の和

この図からわかるように、確かにテール成分は端のほうにいくと増加している。また最後のほうで、テールとピーク成分も小さくなっているのは線源が感度領域からはずれてしまったことを示している。また、ピーク成分が減少し始める端のところは、カウント数の和がまだ減少していないことが分かる。これはピーク成分として生成された。正孔が収集される前に、端の影響を受けテール成分になってしまっているのではないかと考えられる。

3.5.2 線を用いた位置依存性の測定

今回は、放射線源²⁴¹Amの線を用いて端の部分のスキャンを行った。線のエネルギーは5.4MeVであるが、空気0.2cmを通過すると、 $\approx 5.17\text{MeV}$ となりシリコンでは $\approx 20\mu\text{m}$ で止まる。これは、ほとんど表面で反応を起こし電荷キャリアは表面で生成されることになる。よって、表面でのテール成分の生成について調べられる。また、高エネルギーなので生成されるキャリアが多く、テール成分についての多くの情報を得られるはずである。今回のステップ間隔は0.4mm、測定時間は5時間である。各個所のスペクトルは図3.18に示し横軸 position、縦軸ピークとテール成分のカウント数として図3.19に示す。

線の場合、ピーク成分は 10^4 以上増加しているが、テール成分にはあまり変化が見られなかった。また、ピーク成分よりもテール成分のほうがカウント数が多いという特徴がみられた。この特徴について考えてみる。 ^{109}Cd を用いた測定から、テール成分は端のほうで多く生成されることが分かっている。今回の結果では、テール成分は端のほうであまり変化を示していない。また、ピーク成分のカウント数が 50 以下になってもテール成分は 10000 以上とカウント数が多いところがある。このことから、テール成分は表面でも生成されていると考えることができる。

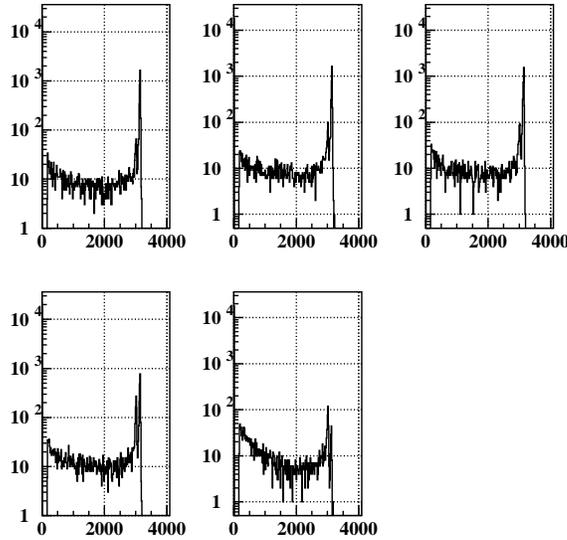


図 3.18: 線の各場所のスペクトル

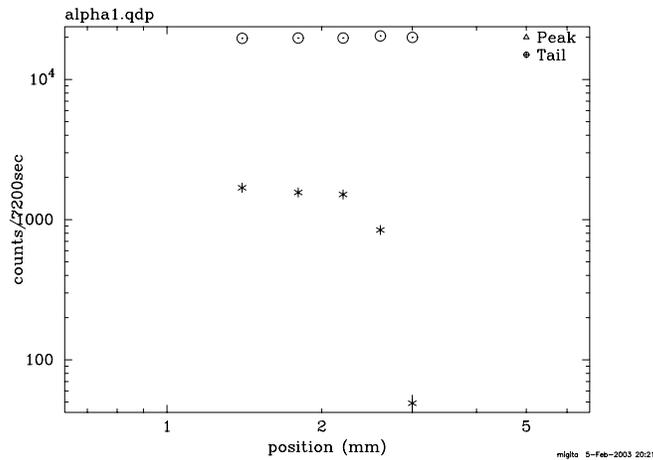


図 3.19: 線の各場所のピーク成分とテール成分

3.5.3 逆バイアス電圧を変化させた場合の測定

テール成分は、半導体検出器の裏側 (n^+) に近い側で生じ、それは、空乏層領域と不感層領域との境界面上で電荷の収集が不完全であるからだと言われている。空乏層は p^+ 側から広がっていき、フォトダイオードは上側が p^+ 側になっているので、空乏層領域と不

感層領域は1% 程度の平衡に上る。逆バイアスによる空乏層の電気容量の変化を図3.20に示す。

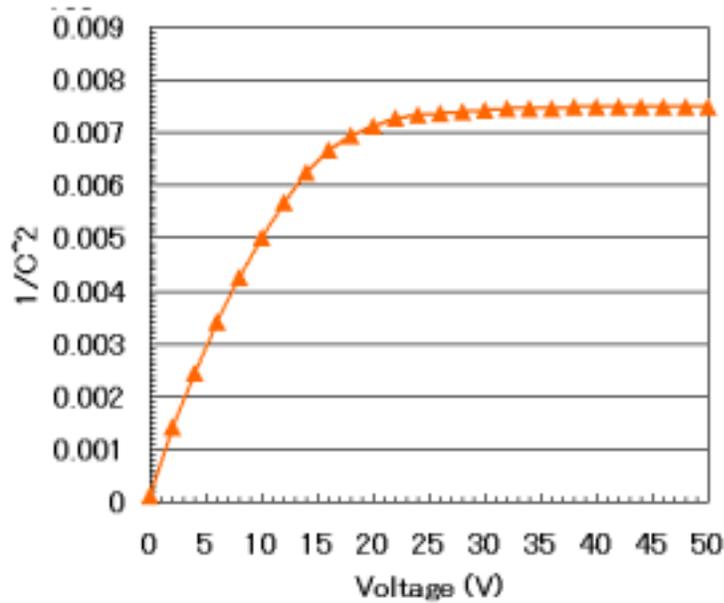


図 3.20: 逆バイアスとフォトダイオードの電気容量の関係

逆バイアスを弱くしていくと、電荷容量が減少していつている。これは、空乏層の大きさが減少しているためであり、20V から空乏層は小さくなっていつていることが確認できる。15V の逆バイアス電圧をかけたときは、空乏層は完全に広がっていないことがわかる。本当に、空乏層領域と不感層領域との境界面上で電荷の収集が不完全なためにテール成分が生成されているとすると、逆バイアスを 35,15V と変化させて測定するとテール成分は増加すると予想することができる。

以下に、35V、15V のピーク成分とテール成分のカウント数と、入射場所の関係をそれぞれ 35V(図 3.21),15V(図 3.22) に示す。また、スペクトルを図 3.23 と図 3.24 に示す。入射場所は全部同じ場所であり、ステップ間隔は 0.2mm である。

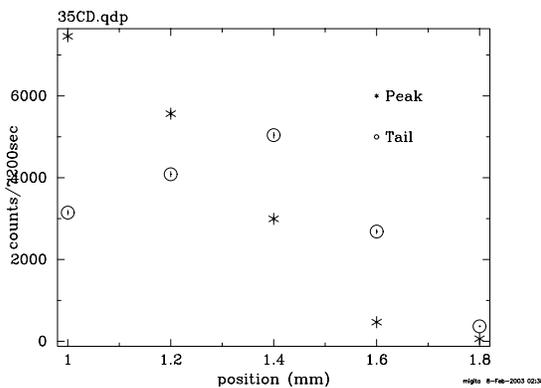


図 3.21: 逆バイアス電圧 35V の時のピーク成分とテール成分

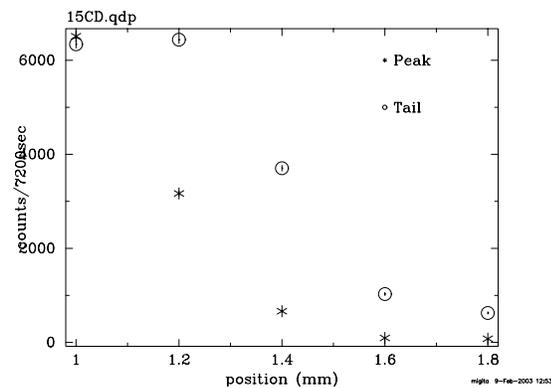


図 3.22: 逆バイアス電圧 15V の時のピーク成分とテール成分

まず、ピーク成分について考える。35V と 15V では、図の 2 番目と 3 番目の場所でカウント数が大きく変化していることが分かる。これは、逆バイアス電圧 15V のときに空乏層が完全に広がっていないために検出される X 線イベントが減少したからだと考えられる。

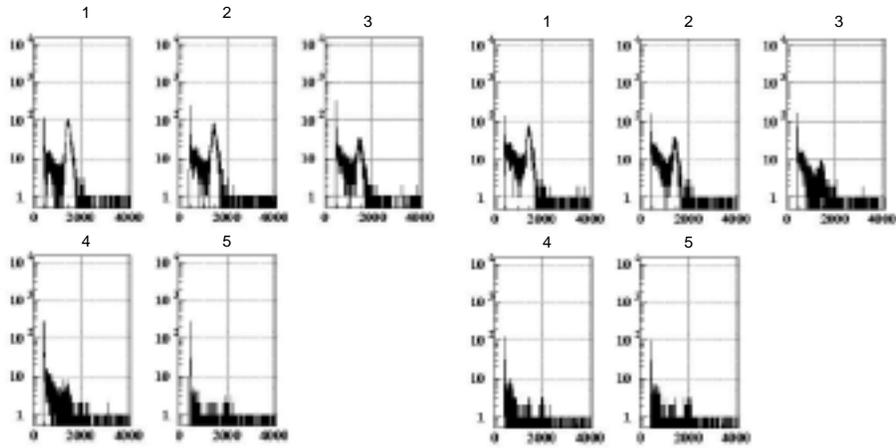


図 3.23: 逆バイアス電圧 35V の時の各場所のスペクトル
 図 3.24: 逆バイアス電圧 15V の時の各場所のスペクトル

次に、テール成分について考える。図 3.21 と図 3.22 を比べると、15V のテール成分が減少し始める場所が 35V に対して 0.2mm 中央側に変化しているが、これも空乏層の広がりが小さくなり感度領域を超える場所が変化したためだと考えられる。このようにテール成分は、端の空乏層領域が小さくなるとテール成分が増加することが分かる。図 3.25 にその模式図を示す。この図のように空乏層が変化をし、空乏層の端で形成されていることが分かった。

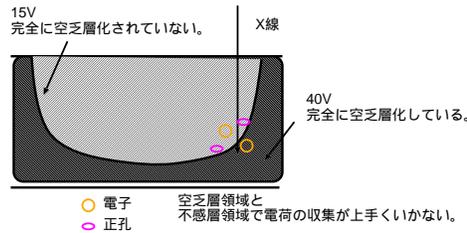


図 3.25: 逆電圧による空乏層の変化の模式図

3.6 考察

今回の測定で、テール成分は、 ^{109}Cd の場合フォトダイオードの端のほうにいくと増加することが確認できた。また 線を入射させた場合、テール成分が多く生成された。線は $20\mu\text{m}$ と表面で反応を起こすことから、テール成分は表面でも形成されることが分かった。このことから、テール成分が形成されている場所を図 3.6 に示す。

このように、空乏層領域の周辺でテール成分は形成されていると言える。次にテール成分の原因について考える。

空乏層

空乏層の表面上で電荷の収集が上手くいかない。

図 3.26: テール成分が形成されている部分

そのために、オシロスコープで波形を確認した。 ^{109}Cd をあてオシロスコープで波形を確認すると、端のほうでは立ち上がりが遅い波形が見られた。図 3.27 に示す。波形の立ち



図 3.27: オシロスコープで見た波形の違い

上がりは、生成された電荷が生じた点から空乏層の両端に完全に移動する時間によって決まる。これは、生成された電荷キャリアが上手く収集されずにいることを示しており、テール成分の原因は電荷の収集が上手くいってないことを意味する。

3.7 今後の課題

- LabVIEW で制御できる DAQ カードを用いて、自動測定を MCA も含め全自動化する。
- ノイズを減らすために治具を見直す。
ステージにフォトダイオードを載せたために、ノイズが大きくなっているのではないかと思うので、線源をステージに固定して測定を試みる。
- 今回の測定で出来なかった全面スキャンや、裏側から線源をあてた位置依存性の測定を行う。
- 立ち上がりが遅い波形を、装置で取りこむ。
- 他の半導体検出器についても測定を行いたい。

謝辞

本論文の作成にあたり、研究室の大杉教授、深沢助教授に深く感謝致します。特に、ご指導頂いた深沢助教授には、ご多忙のなかでご指導頂きお世話になりました。X線検出器についてほとんど無知だった私に、指導するのは大変だったと思いますが、統計誤差についての授業や、宇宙についてのゼミ、そして卒論と、とてもご苦勞をかけ感謝しております。また実験の際の装置の破壊や、日々の生活でもご迷惑をおかけしたこともお詫びしつつ、感謝しております。

そして、研究室の皆様にも感謝しております。中本さんには、半導体検出器についての多くの助言と、ご指導をして頂きありがとうございました。また、実験装置を独占していた時もあり、迷惑をおかけしてすみませんでした。また、普段の日常生活においても、ご指導を頂いてる小部屋の川本さん、富永さん、上田さんにも感謝しております。富永さんにはパソコンについて、大変お世話になり感謝しています。ご指導のおかげで、なんとかパソコンを扱えるようになったと思います。卒論にあたって、多くのお手伝いをして頂きました。また川本さんは、物理は自分で考えるからおもしろいんだと言い、本を貸して頂いたり個人授業をして頂き、ありがとうございます。上田さんには、吸収係数の検索方法などについて教えて頂きました。

最後に、卒業論文を書くにあたり、色いろな人のお力添えで卒論を書くことが出来たと思っています。これまで、授業して頂いた先生や、お世話になった人々や友達、両親にとっても感謝しております。

2003年2月10日 右田 雄二

参考文献

- [1] S.M. ジー, 南日, 川辺, 長谷川, 訳
'半導体デバイス'
- [2] GLEEN F.KNOLL 木村逸郎, 坂井英次 訳
'放射線計測ハンドブック 第二版' (日刊工業新聞社)'
- [3] ASTORO-E HXD team 2001.3.25 'ASTORO-E 硬X線検出器への道'
- [4] 中本 達也 2001 年度 広島大学 卒業論文
'高阻止能結晶シンチレータとフォトダイオードを用いたガンマ線検出器の開発'