

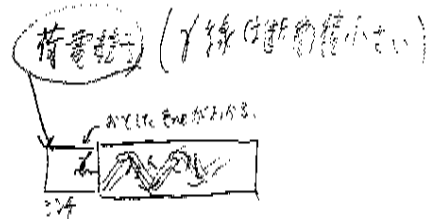
### 7. シンチレーション検出器

- 原理: 特定の物質に核物質や放射線が当たると微弱な光を発生する事を利用。  
シンチレーション。  
↑  
シンチレーション(光)を発生する物質をシンチレーターと呼ぶ。
- 通常、シンチレーションは弱く検出が難しいので photomultiplier (光電子増倍管, フォトマル, PM) 等の増幅器と組み合わせでシンチレーションを電気信号に変換して使う。

### 7.1 一般的特性

シンチレーション検出器の簡単な図: Fig. 7.1.

- もう少し詳しい原理: 放射線が原子や分子を励起(脱励起で光が出る) ← シンチレーター  
↓  
光効果で光電子の弱い電流に変換 ← フォトマル  
↓  
増幅して検出 ← electron-multiplier system



得られた電気信号が何が入れば何の事かわかる。

#### 1) エネルギー

- シンチレーターから放出される光のエネルギーは励起エネルギーに比例
  - 増幅も1:2で行われる
- 電気信号の振幅は励起エネルギーに比例した振幅の比例増幅をする。

⇒ シンチレーターはエネルギーと光子数の測定器として通してやる。

#### 2) 速い時間応答

シンチレーション検出器は他のタイプの検出器に比べて応答時間と回復時間が短い。

dead time が短く、高い count rate が期待できる。

← 増幅器 10<sup>-8</sup> ~ 10<sup>-9</sup> s

#### 3) Pulse shape Discrimination (パルス形状の区別)

特定のシンチレーターに入れば、放出される光のパルスの形を分析することで異なる粒子を区別できる。

粒子の持つ特性の違いから発生するパルスが異なるため区別できる。(7.6.3)

シンチレーター = luminescent 発光物質。

= エネルギー(形は問わない。光、熱、音)を吸収してそれを可視光として再放射する物質。

再放射が 10<sup>-8</sup> s 以内で起こる → fluorescence

遅く起こる → phosphorescence or afterglow (μs ~ h)

- 最初の近似: 光の再放出の時間発展が簡単な exp. の崩壊で表せるとする. (Fig. 7.2)

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad \dots (7.1)$$

$N$ : 時刻  $t$  で放出される光子の数,  $N_0$ : 放出される全光子数,  $\tau_d$ : 崩壊定数  
 - 瞬時に放出される光子数が  $N_{max}$  になると近似 (このほとんどの物質で成立)

- もう少し複雑に. 2つの exp. の component の和.

$$N = \underbrace{A \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right)}_{\text{fast or prompt component}} + \underbrace{B \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right)}_{\text{slow or delayed component}} \quad \dots (7.2)$$

それぞれの定数  $A, B$  は物質によって異なるが, 一般には fast component が dominant. (Fig. 7.3)

- 良いシンチレーター検出器の条件.

- 1) 励起エネルギーを光の放出に変換する時の効率が低い.
- 2) 放出される光の transparency (透明度?)
- 3) フォトマルチplierが応答できるエネルギーの範囲と無矛盾なエネルギーの範囲での光の放出  
↑ 400nm ~ 900nm      ↓ 400nm ~ 900nm
- 4) 崩壊定数  $\tau$  が小さい.

- 現在使われている 6 つのタイプのシンチレーター物質.

有機結晶, 有機液体, プラスチック, 無機結晶, ガス, ガラス

- Table 7.1 に基本的な特性がまとめられている.

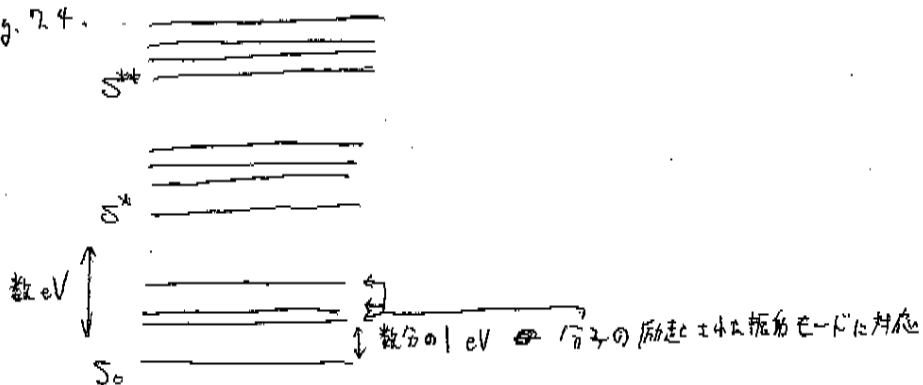
## 7.2 有機シンチレーター

- $\tau$ : ns のオーダーもしくは以下 ← 非常に速い崩壊 (good)

- シンチレーション光は分子中の自由な価電子の緩和から放出される。この価電子は元軌道 (反結合軌道) を占有している。

2電子はシンプレット or トリプレットに結合する。

エネルギー図は Fig. 7.4.



•  $S_0$  (+振動モード)

↓ 励起

$S^{**}$  (+振動モード)

↓ internal degradation (放射線の放出なし, 10ps以内)

~~$S^*$~~   $S^*$

↓  $\rightsquigarrow$   $z \rightarrow fL \rightarrow z \rightarrow$  光 (数 ns 以内) ← (7.2) の prompt component に対応

$S_0$  (+振動モード)

•  $T_0$  (+振動モード)

↓ 励起

$T^*$  (+振動モード)

↓ internal degradation

~~$T_0$~~   $T_0$

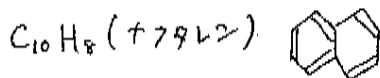
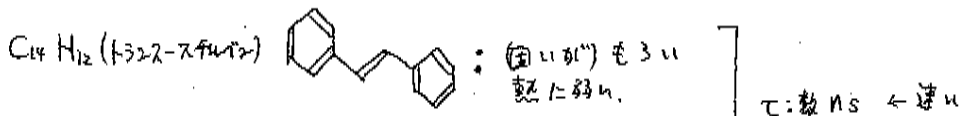
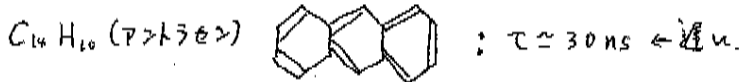
↓  $\rightsquigarrow$   $z \rightarrow fL \rightarrow z \rightarrow$  光 (数  $\mu$ ) ← (7.2) の delayed component に対応

$S_0, S^*$  ( $T_0 + T_0 \rightarrow S_0 + S^* + \text{photons}$ )

特定の有機物質では delayed component の寄与は重要になる

### 7.2.1 有機結晶

最もよく使われる結晶は 3 つ

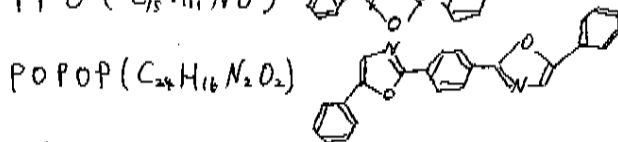
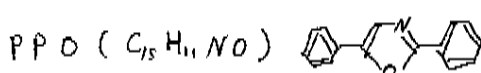
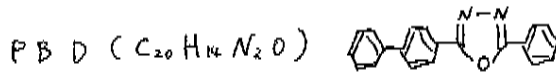
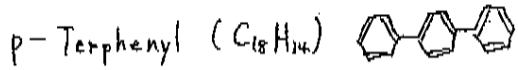


- アトラゼンは  $\tau$  が大きく、スチレンは弱いという理由からあまり使われない
- アトラゼンは全 2 の有機シンチレーターの中で最も高い light output (光子数) をもつので、比較して使われる
- 結局よく使うのは ナフタレン ?

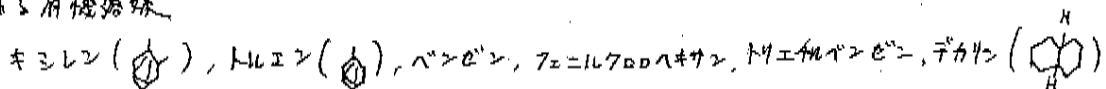
## ⑦.2.2 有機液体

4

- 有機液体シンチレーター検出器 = 有機溶媒に複数の有機シンチレーターが溶解している溶液。
- エネルギーの吸収のメカニズムが他と異なる。放射線のエネルギーは主に溶媒に吸収され、その後溶媒のシンチレーターにエネルギーの受け渡しが行われる。(この受け渡しが通常かなり速く効率的に行われる。このメカニズムの詳細はまだわかっていない。)
- 発光メカニズムは他と一緒。
- 最もよく使われる溶媒と有機シンチレーター。



- よく使われる有機溶媒



- 経験則として、溶媒の濃度を上げると液体シンチレーターの効率も上がり、飽和程度に大体最大値に達する。典型的な濃度は 1g の溶媒につき 3g の溶質。

- $\tau$ : 3 ns ~ 4 ns と速い。

- 液体シンチレーターの長所:

◦ 特定の効果に対して効率を上げるために他の物質を混ぜる事ができる。

(例:  $^{10}B$  は中性子の吸収断面積が非常に大きく、中性子の検出効率を上げるために  $^{10}B$  を加える事ができる。)

◦ wavelength shifter (ある種類の光を吸収して他の波長の光を再放射するもの) を加えて

光のスペクトルをより望ましいものに近づける事ができる。

※ 不純物を混ぜる事により、一般的には  $\tau$  は長くなり、更に light output は減ります。(quenching effect)

しかし、溶媒にナフタレンやフェニルメチルケトン等を加える事で quenching effect の多くは解消される事がわかっている。

- 液体シンチレーターの短所:

◦ 一般に、液体シンチレーターは不純物に敏感である。特に  $O_2$  は大きな効果があるので、

液体シンチレーターは ( $O_2$  が無い)  $N_2$  中においておく必要がある。

### ② 7.2.3 プラスチック

- 最もよく使われる有機インフレター:
- プラスチックインフレター検出器: 固体のプラスチックを溶媒として有機インフレターを溶解させたもの。
- よく使われるプラスチック: ポリエチレン, ポリフェニレン, ポリステレン
- 一般的な溶媒としての有機インフレター: PBD, p-Terphenyl, PBD
- 非常に小さい比率で wavelength shifter として POPPOP を混ぜる事がよくある。
- プラスチックインフレターの長所
  - $\tau$ : 2 ~ 3 ns (速い)
  - 様々な大きさ, 形状, 材料が使われる
  - 安価
- プラスチックインフレターの短所
  - 有機溶媒に弱い。
  - 醒れも早く, 素子と触らばコンタミネーションの恐れがある。

### § 7.3 無機結晶

- 無機インフレターの中には, 活性化のための少しの不純物が混ざったハロゲン化アルカリの結晶がある。
- 最もよく使われるのは NaI(Tl) (Tlは<sup>192</sup>Pb)
- 次に使われるのは CsI(Tl)
- 他は CsF<sub>2</sub>, CsI(Na), KI(Tl), LiI(Eu)
- non-alkali なもの: BGO (Bi<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>O<sub>12</sub>), BaF<sub>2</sub>, ZnS(Ag), ZnO(Ga), CaWO<sub>4</sub>, CdWO<sub>4</sub> (Table 2.1)
- 先のスライドの例: Fig. 7.6
- 一般的には, 無機インフレターの時間応答は有機インフレターよりも 2-3 桁速い。(例外: CsFは 5ns)
- しかし, 放射の時間発展はほとんどの場合 (→ 左は 2つの exp. の形で十分表現できる)
- 無機インフレターの短所
  - 吸湿性
    - 特に NaI は最大のものである。空気が入らないように密封して保護が必要がある。
    - 他は CsF, LiI (Eu), KI (Tl)。
    - (BGO や BaF<sub>2</sub> は吸湿性を持たず保護が必要ない)
- 無機インフレターの長所
  - stopping power が強い。(⇒ 高密度, 高原子番号)
  - light output 大きい (全2のインフレターの中で最も大きい)
  - エネルギー分解能が高い。
  - 無機インフレターは系統や高エネルギーの e<sup>-</sup> や e<sup>+</sup> の検出に適している。

• BGO と BaF<sub>2</sub> が最近注目されてる。

◦ BGO

- △ 大止る区 (stopping power ⊕)
- △ γ線 → 光電子の量較の効率が 높은. (NaIの3-5倍)
- △ 吸湿性をもちます.
- △ 2=3 の light output は NaI より小さく、分解能は約2倍悪い.
- △ 高価、大量には使えません.

→ 高エネルギー領域では NaI より利便性が低い.

◦ BaF<sub>2</sub>

- △ 禁帯領域で 非常に速い light component がある. (~500ps !!)
- △ 全 light output は低い.
- △ 主に調べる余地がある.

514  
GEO. PHYS. ...  
97)

• 発光メカニズム

結晶中の電子のバンド構造に特徴付けられる.

結晶に粒子が入る

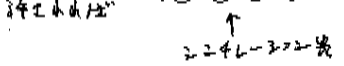
1. e<sup>-</sup> を価電子帯から伝導帯に励起して自由 e<sup>-</sup> と自由ホーレ E を作る (結晶を介して).
2. e<sup>-</sup> を価電子帯から励起帯 (伝導帯の下方) に励起して励起子 (e<sup>-</sup> とホーレの束縛状態) を作る. (Fig. 7.7)  
(励起子自身は自由な粒子で、e<sup>-</sup> とホーレは運動して動く)

もし結晶が不純物の原子を含んでいけば、エネルギーギャップの禁帯域に電子のレベルを作ることができる.

励起子のホーレが自由なホーレが不純物の中心に出ると、その原子核の電子は励起される.

もし 3= の級に電子が来ると、その電子はホーレによって開けられたレベルに落ち込む事ができる.

(この様な反応が存在すれば) 放射線を放出 (励起状態から基底状態へ転移) する.



もし放射線の放射線放出が伴わない場合、不純物の中心にはトラップとなり、そのエネルギーは他の反応に使用されて失われる.

## 2.4 Gaseous Scintillators

- 希ガスが封入されている。
- 1原子が放射線に当たって紫外領域の光を出す。
- PMTが真空管では、波長シフトを光電管に格納。(DPS)
- 主に、重い荷電粒子や分裂片を検出するのに使う。
- 3He 90%, 10% Xe などの混合ガスで200atm程度に加圧(700)
- 窒素でも使われている。
- 液体, 固体キセノン, ヘリウムも使われている。

## 2.5 Glasses

- セリウム + 活性シリカ, 有機素, 有機酸化化合物。  
↳ 使われる。
- 主に中性子検出に使われる。P, X線にも使える。
- 7-酸化水素以外の無機物, 有機物には不向き。
- 融点が高くて高い。
- 物理的, 化学的に比較的安定で、制限的环境下で使われる。
- 真空にかかる時間は700 < ガラス < 気体  
↳  
真空管
- 放射線による光の量はP2トランジスタの25~30%と低い。
- 他に環境中に存在する検出のために、6Liを足す必要がある。

## 7.6 Light Output Response

シグナルは、放射線のエネルギーと変換する効率を気にする。

- ↳ シグナルの効率と分解度を決定する
- ↳ 同じエネルギーであっても、放射線の種類によって変化する。
- ↳ 入射粒子に依って、線形性が良いものもある。

射電子や Photon を作るのに必要な平均エネルギー → Table 9.3

- ↳ 重い粒子ではより少ないエネルギーになる。 → Fig 9.8
- ↳ 一般に、アンチセンスを考慮して、ポジセンスの割合と形状で表す。 → Table 9.1

シグナルの効率 → PMT の効率 入らなければならない。

- ↳ 典型的には 30% 程度

## 7.6.1 Linearity

今のところ、放射線のエネルギー  $L \propto \Delta E$  (入射粒子が赤い点) と見られる。

厳密には、この線形関係は成り立たない。(多Lの場合には、良い近似である)

有機シンチの場合には、125 keV 以下の電子では良い線形が見られる。(1.5-1.1)

重い粒子の場合には、線形性が壊れる。

半経験式 (有機シンチ)

$$\rightarrow \frac{dL}{dx} = \frac{A \frac{dE}{dx}}{1 + kB \left(\frac{dE}{dx}\right)} \quad A: \text{放射線効率} \quad kB: \frac{dE}{dx} \text{ が増えるにつれて効率低下する (非線形)}$$

より良い近似

$$\rightarrow \frac{dL}{dx} = \frac{A \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx} + C \left(\frac{dE}{dx}\right)^2} \quad \text{or} \quad \frac{A}{2B} \ln \left(1 + 2B \frac{dE}{dx}\right)$$

1.5-1.1 の場合、 $\frac{dL}{dx}$  が小さい領域では、 $\frac{dL}{dx} \approx \frac{dE}{dx}$

光子増倍率 (GMP)

McVee

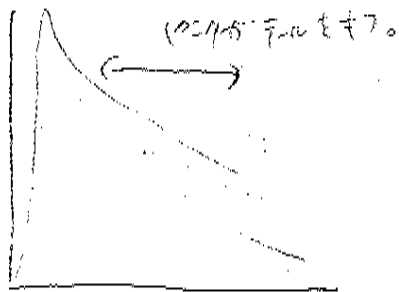
の式を使う。



NaIの増幅率は、400keV以上のエネルギーでは約1.1 → 図9.9

9.2 Temperature Dependence → Fig 9.10

9.3 Pulse Shape Discrimination → Fig 9.11



→ τが2倍になる。

なぜか、軌道電荷から中性粒子を区別するためpulseの落下で判別する。

9.9 一般に、224L-17-18 は どのような材料にも反応する。しかし、放射線のエネルギーが224のエネルギーの組み合わせになると、増幅率が低下する。

9.9.1 Heavy Ions

9.9.2 Electrons ← (エネルギー) ① 角で散乱される。(back scattering). ② 電子はエネルギーが低い。

9.9.3 検出器 ← Fig 9.5

○ 20インチ detector がよい。

○ 20インチ detector の断面積が 500cm<sup>2</sup> である。500 detector を使う。

20インチ detector  
断面積 ∝ 25  
検出率 ∝ 2

## 8. Photomultipliers

Photomultipliers(PM's) は微弱な光子を観測可能な電子(電気信号)に転換する装置。

しばしばシンチレータとともに用いられ、さまざまな種類がある。

この章では photomultiplier の基本的な構造と性質について説明する。

### 8.1 Basic Construction and Operation

テキスト図 8.1 が、photomultiplier の概略図。electron-optical input system(電子を集める部分)、cathode(陰極)、electron-multiplier section(電子増幅部、dynode string ともよばれる)、anode(陽極)の部分からなっていて、それらがガラス管の中に入っている。

まず最初に光子が photocathode にぶつかると、光電効果により電子がとびだす。その電子が HV により加速され、最初の dynode に向かう。次にその電子のエネルギーが dynode に移り、dynode 中の電子が加速され、次の dynode へと向かう。その繰り返しで電子の数が増え、最後に anode で集められる。集められた電子の数(電流)をみれば、粒子の存在に加えてそのエネルギーまで測ることができる。

それぞれの部分について詳しく見ていこう。

### 8.2 The Photocathode

photocathode は、光電効果によって光子を電子に転換する部分。光電子のエネルギーは  $E = h\nu - \phi$  による。

閾値  $\phi$  以上では光の周波数によって、光電子の数が異なる。その反応率を表すのに quantum efficiency  $\eta(\lambda)$  という値が用いられる。

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{number of photoelectrons released}}{\text{number of incident photons on cathode}(\lambda)}$$

$\lambda$  は入射光の波長。また、radiant cathode sensitivity という値も用いられ、それは以下のように定義される。

$$S(\lambda) = \frac{I_k}{P(\lambda)}$$

$I_k$  は cathode から放出された光電子の電流、 $P(\lambda)$  は入射光の放射電力。この値は以下の式によっても表わされる。

$$S(\lambda) = \lambda \eta(\lambda) \frac{e}{hc} = \frac{\lambda \eta(\lambda)}{1240} [A/W]$$

ほかに luminous cathode sensitivity という単位もあるが、あまりつかわない。

テキスト図 8.2 は、 $\eta$  と  $\lambda$  の表である。 $\eta$  のピークは photocathode の種類に依ってさまざまだが、図 8.2 に載っているものはだいたい  $\lambda = 400\text{nm}$  にピークがあるから、シンチレータと相性がいい。

いくつかの photocathode の表が図 8.1 に示されている。

現在最も一般に用いられている photocathode は、Sb(アンチモン) からなる半導体とアルカリ金属を混ぜたものである。金属よりも半導体を用いるのは、金属中では自由(と見做せる)電子によって光電子が妨げられるためである。光電子がポテンシャルに打ち勝って飛び出すことのできる厚さを escape depth という。quantum efficiency に関しては、多くの金属では  $\eta \leq 0.1\%$  であるのに対し、半導体では  $\eta = 10 \sim 30\%$  であり、段違いである。

最近開発された photocathode として、負の電子親和性をもつ物質、例えば GaP に、多量の Zn と少量の Cs を加えたものがある。

これらの物質中では、表面付近のバンド構造が曲げられているため、伝導帯の最低エネルギーレベルが真空のポテンシャルより上になる。そのため仕事関数が負の値をとり、ポテンシャルバリアーがないので光電子が飛び出すために必要なエネルギーが非常に小さくなる。quantum efficiency はなんと 80% にものぼる。しかし現段階ではいくつも問題点もあり、実用の場面は限られている。

### 8.3 The Electron-Optical Input System

photocathode から放出された光電子は、増幅部分へ移るときに一か所に集められなければならない。その役割をするのが electron-optical input system である。テキスト図 8.3 に概念図が掲載されている。ここでは電子加速のための電極と dynode の一番目のものが等ポテンシャルになっており、ガラス容器の内側面には電子収集用の電極がおかれている。

electron-optical input system に求められる性質は以下の二つである:

- 1) 光電子が、cathode 内の放出された場所に依らずできるだけ効率よく集められること
- 2) 光電子が 1 番目の dynode に到達するまでの時間が、光電子の放出された場所に依らないこと

上の 2) の性質は検出器の時間分解能にかかわってくるので、入射粒子に対する素早い反応が求められる実験では重要になってくる。

## 8.4 The Electron-Multiplier Section

electron-multiplier system は、最初は微弱だった電流を、並べた dynodes によって増幅し、観測可能な強度まで強めるシステムである。各電極の二次電子の増幅の割合は secondary emission factor ( $\delta$ ) とよばれる。

二次電子が放出される理論は、光電効果とほぼ同様の仕組みによって理解される。したがって photocathode のときと同様に、ここでも絶縁体や半導体を用いられる。

しかし光電効果と異なる点も存在している。multiplier 中で電子を加速し、dynode から次の dynode へ飛ばすために、dynode 間に一定の電場がかけられている必要がある。そのため、二次電子を放出する物質は伝導体の表面に被覆している必要がある。伝導体としては、アルカリ金属またはアルカリ土類金属と、貴金属の合金を用いられるのが一般的である。なお、混合の過程でアルカリ金属のみが酸化される。

現在の一般的な金属の組み合わせは、Ag-Mg, Cu-Be, Cs-Sb などである。それぞれに長所があるが、どれもが dynode に必要とされる以下の条件を満たしている。

- 1) 入射電子にたいする二次電子の放出の割合  $\delta$  が大きい
- 2) 大きな電流においても二次電子の放出の効果が安定している
- 3) 熱イオンの放出、すなわちノイズが少ないもっとも一般的な PM's においては、10~14stages の dynode をもち、電子の量は  $10^7$  程度まで増幅される。photocathode のときと同様に、負の電子親和性をもった物質、特に GaP が dynode として用いられることがある。これを使えば、従来の PM's では 14stages の dynode が必要だったところを、5stages の dynode で済ますことができる。stage 数が減れば当然ゆらぎも小さくなるため正確な測定が可能となる。

### 8.4.1 Dynode Configurations

dynode strings(一連の dynode の呼び名) の配置の仕方は一つではなく、配置の仕方によって、反応の仕方や電子の増幅の割合が線形性を示す領域が変わってくる。

現在では 5 種類の配置方法が用いられている。

- 1) Venetian blind
- 2) Box and Grid
- 3) Linear focused
- 4) Circular focused
- 5) Microchannel plate

最初の 4 つはより一般的なもので、その概形がテキスト図 8.4 に示されている。

Venetian blind は、平板状の dynode を電子シャワーの軸に対して 45 度に組

んだものである。これは広い範囲の入射粒子を拾えるという利点がある。欠点としては、入射してくる電子の一部が dynode を通らずまっすぐ通過してしまうのを防げないことがある。これは増幅率の低下と反応時間の大きなばらつきの原因となってしまう。

この欠点は、Box and Grid 方式や Linear focused 方式、Circular focused 方式を採用することによって軽減される。これはテキスト 8.4 b)~d) 図のように、入ってきた電子を次の anode へと次々に跳ね返していくような形をしている。これらの方法のその他の利点として、(1) 空間が有効的に使われる、(2) cathode と anode が分離しているので、feedback の効果が小さい ことなどが考えられる。

テキスト図 8.5 において、反応の線形性のグラフが示されている。(図 8.4 の (a)~(d) と対応しているわけではないので注意)

グラフより、線形性の点で言うと linear focused 方式が最も優れているように思われるが、ある限られた領域を考えるなら必ずしもそうとは限らないことに注意。

近年では、microchannel plate multipliers という新しい方式が開発されている。これは、たくさんの微小な穴(チャンネル)が鉛ガラスのプレートに平行にあげられているものである。チャンネルの内側表面は半導体物質であり、二次電子を放出することができる。一方プレート表面の端の部分は貴金属でおおわれており、穴の方向に沿ってポテンシャルの差がうまれる。

チャンネルに入った電子はそのため穴にそって加速され、チャンネル内の壁にあたるとより多くの二次電子を放出し、その電子が加速されるという繰り返しにより電子を増幅する。すなわち、各チャンネルが連続的な dynode としてはたらくことになる。

典型的な microchannel plate は  $10^4 \sim 10^7$  の穴があいており multiplication factor は  $10^3 \sim 10^4$  である。さらに増幅率をあげるために、このプレートを 2,3 枚組み合わせたものが用いられる。

組み合わせ方として一般的なものが chevron configuration という形であり、概形が図 8.7 に示されている。これは、お互いのプレートを少し角度をつけて配置されることで、陽イオンのノイズを小さくする方法である。

chevron configuration の増幅率は  $10^5 \sim 10^7$  と、他の一般的な dynode の構造と同じ程度だが、大きさが小さいので timing の性質がよいという利点がある。転移時間は一般的なタイプのものが  $\sim 10\text{ns}$  なのに対し、このタイプだと数 ns となり、これにより時間分解能は 100ps 以下となる。また大きさが小さいことにより、磁場に対する耐性が高く、2kG までの磁場に対する耐性が確かめられている。

このタイプの不利な点として、コストが高く、まだ安定性が確認されていない点などがある。特に、あるチャンネル内のカスケードが数  $\mu\text{s}$  の間、他のチャンネルに流れ出るといった問題がある。これによって、一秒間に数千カウ

ント以上の非線形を観測してしまうことになる。

### 8.4.2 Multiplier Response: The Single-Electron Spectrum

理想的には、electron-multiplier system は dynode に入ってきた電子のエネルギーに対して一定の増幅率を示すべきであるが、実際は二次電子の統計的な性質により不可能であり、増幅率にはゆらぎが現れる。

ゆらぎの程度をあらわすのに single electron spectrum という値が用いられる。これは、1 電子が multiplier に侵入してきたときに得られる分布である。これは PM に非常に微弱な光を当てると測定することができる。

統計的な性質により、output で得られるパルスの形は測定ごとに異なるが、それらのパルスを積分することで、入射電子に対する output が得られる。テキスト図 8.8 に、linear focused PM と Venetian blind PM に対する single-electron distribution の一例が描かれている。この分布は polya 分布 (もしくは negative-binomial 分布、compound-Poisson 分布ともよばれる) によって記述される。図 8.8 におけるパラメータ  $b$  は、完全な統一性をもった場合の二次電子の分布からのずれの平均二乗半径である。図から見て取れるとおり、venetian blind 方式は linear-focused 方式よりもゆらぎが大きい。つまり、output pulse の不統一さを小さくするためには linear-focused 方式のほうが優れていることがわかる。

## 8.5 Operating Parameters

### 8.5.1 Gain and Voltage Supply

PM による電子の増幅率は、dynode の数と secondary emission factor  $\delta$  により、入射電子のエネルギーの関数となっている。図 8.9 において、いくつかの種類 dynode における  $\delta$  が図示されている。

dynode 間のポテンシャル差を  $V_d$  とすると、

$$\delta = KV_d$$

とあらわされる。K は比例定数。各 dynode 間にかかる電圧差がどれも等しいとすると、PM 全体での増幅率は

$$G = \delta^n = (KV_d)^n$$

となる。この式から、最低限の電圧差  $V_b$  を供給したときの、ある G に対して必要な stage 数  $n$  を計算することができる。つまり、

$$V_b = nB_d = \frac{n}{K}G^{1/n}$$

を最小化するので、

$$\frac{dV_b}{dn} = \frac{1}{K} G^{1/n} - \frac{n}{K} \frac{G^{1/n}}{n^2} \ln G = 0, n = \ln G$$

と求めることができる。なるべく低い電圧を用いることは、ノイズを減らすためにも必要なことである。しかし一方、電圧を下げると移転にかかる時間が延びるなど、不利な要素も出てくることに気をつけねばならない。

供給された電圧に対して、増幅率のゆらぎがどの程度かをあらわす以下の式は重要である。

$$\frac{dG}{G} = n \frac{dV_d}{V_d} = n \frac{dV_b}{V_b}$$

この式は、例えば stage 数  $n=10$  の場合、 $V_b$  を 1% 変えればゆらぎは 10% も変化するということである。つまり、増幅率の安定性を 1% 以内に抑えるためには、電圧の供給は誤差 0.1% 以内に抑える必要があるということである。現在においては、供給される電圧の誤差は 0.05% 以内にまで抑えることが可能である。

### 8.5.2 Voltage Dividers

前節において、dynode に対する電圧供給を高い精度で制御することが重要であると述べた。電圧源としては、安定性からするとバッテリー (蓄電池) が理想的ではあるが、実際的ではない。もっとも一般に用いられているのが voltage divider と呼ばれる電圧源で、テキスト図 8.10 に回路図が描かれている。各 dynode に適正な電圧をかけるための抵抗がはさまれており、調整のために可変抵抗がおかれることもある。

この構造においては、PM 内の電流が変化することによって電圧が急激に変化することを防ぐ必要がある。そのために、つらな抵抗の部分に比較的大きな電流が流れることが必要とされる。この電流は bleer current とよばれる。

増幅率のゆらぎは以下のように計算される。

$$\frac{\delta G}{G} = \frac{I_{an}}{I_{bl}} \frac{n(1-\delta) + 1}{(n+1)(1-\delta)}$$

$I_{an}$  は anode current の平均、 $I_{bl}$  は bleeder current、 $n$  は stage 数、 $\delta$  は secondary emission factor をあらわす。

1% の線形性を得るためには、 $I_{bl}$  は  $I_{an}$  の 100 倍程度であることが必要となる。しかし、粒子のパルスを検出するときなどは、最後の数ステージで  $I_{an}$  が  $I_{bl}$  をこえることすらしばしばある。それを避けるために dynode の最後の数ステージにおいてはコンデンサーをとりつけることが有用である。これにより、anode current がピークのときは必要な電流を供給し、ピークでないときは充電するという仕組みを構成することができる。

他の解決法としては、抵抗の代わりに Zener diode(ツェナーダイオード)を用いることが考えられる。これにより閾値以下の電流に対しては一定の電圧を供給することができて、高電圧に対しては別途高圧電源を用いることが必要となる。

PM's の高圧源としては、dynode 間のポテンシャルが photocathode に対して負である限り、正のものも負のものも用いられる。正の高圧電源を用いる場合、photocathode のポテンシャルはグランドである必要がある。そうすることで photocathode とシンチレータや入れ物との間に放電が起きないようにすることができ、また他の不純なノイズも避けることができる。しかしこの利点は、anode が一定の正のポテンシャルに保たれていることによって打ち消されてしまう。このときパルス信号が 0 の直流電流で通過できるように、anode がコンデンサーを通して交流に組まれていることが必要となるパルス信号が 0 の直流電流で通過できるようにこれは、負の高圧電源を用いることで避けられる。このとき anode は検出器の回路に直接つながれることでグランドに保たれる。これは、PM からの信号がコンデンサーにより補正をかけられることなく得られるので、timing 実験においては利点となりうる。欠点としては、cathode が高い負のポテンシャルとなっていることである。このとき、PM から周囲の物質に漏電することを避けるためにガラスを絶縁状態に保つことが重要となる。



8.5.3 電極電流の線形性

PM (Photomultipliers) の線形性 ... ダイノドの形状, tube内の電流に依存  
 各ステージでの電流がすべ次々ステージに伝えられなければならない。  
 → 各ステージ間に電圧を十分にかけるなければならない。

チャイルド-ラングミュアの法則

(熱電子二極管を流れる電流は空間電荷により制限されている条件下で)  
 (陽極電圧の $\frac{3}{2}$ 乗に比例し, 電極間の距離の2乗に反比例する) ゴトバンクの

サ分るまでは、放出された電子が作る電子雲が電場を打ち消し、  
 後に放出される電子の加速を妨げる。

しかし、十分電圧をかけると、この空間電荷ははけて、全電流が次のステージ  
 に流れる。 → 図 8.11

(1 lm (ルーメン) = 1 cd (カンデラ) の点光源から  
 1 sr (ステラジアン) の立体角に放射される光束)

(光量)  $\propto$  (電流) のためには、高電圧を維持する必要がある。

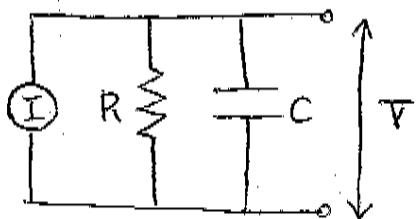
後に行くほど電流が増え、空間電荷を作りやすくなるので、  
 後ろのステージほど高電圧をかけてやる。

8.5.4 パルスの形状

最終的な出力信号は光電陰極から出た電子の数に比例している。

他のどんな検出器よりも PM は理想的な current generator である。

図 8.12 PM と等価な回路



シンチレーション光が exp で減衰しているとするときアノード電流は

$$I(t) = \frac{GNe}{\tau_s} \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right)$$

G: ゲイン, N: カソードから出た光電子数, e: 電気素量,  $\tau_s$ : シンチの減衰定数

$$I(t) = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt}$$

$$\text{解} \rightarrow V(t) = \begin{cases} -\frac{GNeR}{\tau - \tau_s} \left[ \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] & (\tau \neq \tau_s) \\ \left(\frac{GNeR}{\tau_s^2}\right) t \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) & (\tau = \tau_s) \end{cases}$$

ただし  $\tau = RC$

典型的な値としては  $G=10^6$ ,  $N=100$ ,  $C=10\text{pF}$ ,  $\tau_s=5\text{ns}$

- $\tau \ll \tau_s$  のとき current mode ← ほぼ抵抗  $R$  を通す → 図 8.13  
 信号は小さいが 入力信号の減衰時間も正確に再現できる。  
 立ち上がりの時間が速く、出力回路  $\tau$  で決まる。
- $\tau \gg \tau_s$  のとき voltage mode ← ほぼコンデンサ  $C$  を通す  
 信号の振幅は大きいが減衰時間が出力回路  $\tau$  で決まってしまう。  
 立ち上がりは  $\tau_s$  に依る。

一般に voltage mode が好まれる。

信号 ① でも減衰時間長いので  
 信号の数えられる数の限界  $\sim \frac{1}{\tau} [\text{回/s}]$  ②  
 (counting rate)

current mode counting rate ③

しかし 信号 ② で 光電極、小さな変動にも敏感すぎる

最適な働きをするために、PMの出力回路は使っているシンチに合わせて  
 変えてやる → アードの抵抗を変えて  $R$  を調整

$C$  は振幅を最大にするためにできるだけ小さくする。

## 8.6 時間応答・分解能

2つの要因

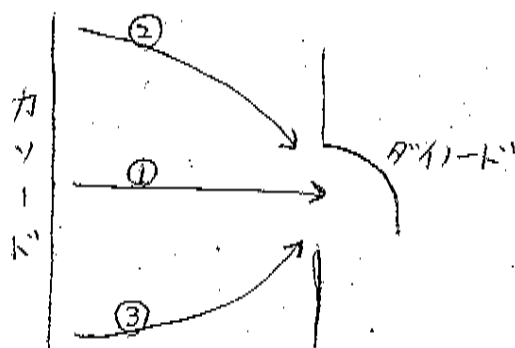
- 1) 輸送時間の差
- 2) 統計ノイズによるゆらぎ (・ 光電効果  
 ・ 二次電子放出)

この節では 1) を扱う。

輸送時間の差 ... 経路差 → 図 8.14

・エネルギー差

- 経路①は②, ③の約1/3の時間
- ダイオードの非対称性により
- ②より③の方が遠い



### transit time difference

球状の「カソード」にすれば、経路差は減るが、  
もっと効果的な方法は軸より端、電場を強くする。

形状による効果以外にも放射電子のエネルギーと方向による効果がある。

- 高エネルギーなほど速く着く
- カソードに垂直に飛び出したほど速く着く

### transit time spread

放射光電子の速度  $v = v_{\perp} + v_{\parallel}$  のとき

transit time spread は次の公式で近似される。

$$\Delta t = - \sqrt{\frac{2m_e W}{e^2 E^2}} \quad (8.14)$$

$m_e$ : 電子の質量  $e$ : 電気素量  $E$ : 電場の強度

$W$ : カソードに垂直な成分のエネルギー  $\frac{1}{2} m_e v_{\perp}^2$

典型的な値  $E = 4 \text{ kV/m}$ ,  $W = 0.4 \text{ eV} \rightarrow \Delta t \sim 0.5 \text{ ns}$

近年の速い PM では輸送時間  $0.2 \sim 0.5 \text{ ns}$  がらうとこの  $\Delta t$  は大きい  
 $\Delta t$  を減らすためには電場  $E$  を強くする。

→ 入カシステムを工夫した 図 8.15

## 8.7 ノイズ

### 8.7.1 Dark Current と Afterpulsing

PM に光が入っていないときも少し電流が流れている。

#### dark current

- 1) カソードとダイオードの熱電子放出
- 2) リーク電流
- 3) 放射性物質
- 4) イオン化現象
- 5) 光

・ 主なノイズは熱的なノイズ。リチャードソン<sup>1</sup>の式で記述

$$I = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (8.15)$$

A: 定数  $\phi$ : 仕事関数 T: 温度 k: ホルツマン定数

温度が低いほどこのノイズは小さい。

・ リーク電流もダークカレントの大きな要因 → 気圧を下げると減る

・ ガラス内の放射性物質から出た放射線が直接電極にあたりガラス中で光ったりする。

・ PM内の残留ガスが電離して正電荷になっている。

→ 電子とは逆走して Afterpulse を作る。数百 ns ~ 数  $\mu$ s (イオンの輸送時間)

真のパルスから 30 ~ 60 ns 遅れた afterpulse が見られる。

一般にダークカレントは数 nA 以下

### 8.7.2 統計ノイズ

光量を一定にしても光電子放出と二次電子放出の過程で統計的なノイズが存在する。

PM内の統計的変動は 2つ

1) フォトカソード --- 光電効果による統計的性質で物理的限界がある。

2) 電子マルチプライヤーシステム

・ 光量一定のとき、変動は、時間で内に入ってきた光の数のポアソン分布と光電子が放射された数の二項分布で計算でき

$$\langle \Delta I^2 \rangle = I \frac{e}{\tau} \quad (8.16)$$

I: カソードの電流

・ 電子マルチプライヤーからのノイズは二次電子放出の統計的性質だけでなく輸送時間の違いにもよる。

この変動の程度は単一電子のスペクトルから見積れる。

全統計ノイズの 10% 以下

## β, β 環境による要因

### β, β. 1 周囲の光からの影響

PMは電圧をかけている間もそうでないときも周囲の光にさらさない。

↳ 高電流が流れ、こわれることも  
ダークカレントが増加

### β, β. 2 磁場の影響

少々の磁場も電子をそらしてしまふ。→ダイノードに到達できなくなる。

1) 磁場が増えればアノード電流は減少

2) PMの軸方向にかかると磁場の影響が少ない → 図β.17

ミューメタル(鉄とニッケルの合金)でシールドするが、

全部おかしてしまふよりシールドの仕方を変えることが効果的

### β, β. 3 温度の影響

ダークカレントで出てきたリチャードソンの式 ... 温度Tの関数

カソードのスペクトル感度も温度に依存する。

抵抗も変わる  $\sim -0.5\%/^{\circ}\text{C}$  (25 $^{\circ}\text{C}$ ~50 $^{\circ}\text{C}$ の間)

ゲインと温度の関係が 図β.20に示されている。  $\sim 0.5\%/^{\circ}\text{K}$

### β. 9 ゲインの安定性, 計数率のシフト

1) drift ... 光量一定下での変動

2) shift ... 計数率の平均が突然変わった後の変動

PMの安定性のテスト

$^{137}\text{Cs}$  662 keV

#### Drift

1) 計数率が  $1000 \text{ s}^{-1}$  になるように線源の距離を調整する。

2) このまま3時間置いておく

3) その後約20時間 毎時間ピークの位置を測定する

$$\text{Drift} = \frac{\sum_i |\bar{P} - P_i|}{n \bar{P}}$$

$P_i$ : i番目に測定したピーク  $n$ : 測定回数

$\bar{P}$ :  $P_i$  の平均

Drift は 1% 以下が好ましい

## Shift

1) ドリフト。測定後すぐに PM と線源の距離を計数率が  $10000 \text{ s}^{-1}$  になるまで近づけた。

2) 10分おきにピークの位置を測定 (4.5回)

$$\text{Shift} = \sum_{i=1}^m \frac{|P_i - P_m|}{m P_m}$$

$P_m$  = ドリフト測定時 ( $\sim 1000 \text{ s}^{-1}$ ) の最後の測定値

$P_i$  =  $i$  番目に測定したピーク  $m$  = 測定回数

Shift も 1% を越えないのが良い。

PM を長期間使用していないとゲインが不安定になるが、

数時間すれば、安定する。

## 1 半導体の一般的性質

### 1.1 バンド構造

バンド構造は、荷電子帯、禁止帯、伝導帯の3つの部分からなる。半導体とは、エネルギーギャップの大きさが数 eV 程度のものを指す。荷電子帯の電子は、熱エネルギーによって時折伝導帯へ励起されるが、温度を低くするとほとんどの電子は荷電子帯に落ち込む。

### 1.2 半導体のキャリアとその密度

電子が伝導帯に励起されると、もともと電子のあった位置は、周囲に比べて相対的に正の電荷を持つ。(ホール)ホールも結晶中を移動することができ、あたかも正の電荷を運ぶキャリアのように振る舞う。純粋な半導体では、電子(負のキャリア)とホール(正のキャリア)が同数で、温度  $T$  におけるキャリアの密度は

$$n_i = AT^{-3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (1)$$

ゲルマニウムの場合、イオン化する原子の数は  $10^9$  に 1 個に過ぎない。

### 1.3 移動度

電場に対するキャリアの応答は

$$v_i = \mu_i E \quad (2)$$

で与えられる。電場が小さい時 ( $E < 10^3$  V/cm) の時は  $\mu_i$  は定数として良く、移動度は電場に比例する。電場が大きくなると線形性が成り立たなくなり、 $E > 10^4$  V/cm では飽和して移動度は一定になる。また  $\mu_i$  は温度依存性もあり、ゲルマニウムの場合  $T^{-1.66}$  (電子)、 $T^{-2.33}$  (ホール) である。ohm の法則より、半導体の電気伝導度は

$$\sigma = en_i(\mu_e + \mu_h) \quad (3)$$

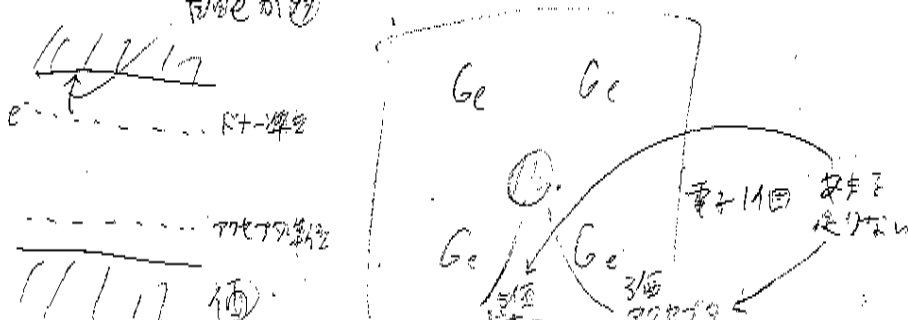
### 1.4 再結合とトラップ

電子-ホールが対生成するのは反対に、対消滅する過程も存在する。純粋な半導体ではこれは起こりにくい反応である。実際は、不純物の影響によって再結合中心とよばれる準位が形成され、再結合は比較的起きやすくなる。(ns-100 $\mu$ s のオーダー) 半導体を放射線検出器として利用する場合は、比較的純粋な半導体でなくてはならない。

## 2 不純物を含む半導体

真性半導体に微量の不純物を混ぜることにより、禁止帯に不純物準位が生じる。その結果、これらの半導体には真性半導体にはない性質を持つことになる。

n 型半導体



リンなど5価の元素（ドナー）を混ぜた半導体。禁止帯の中の伝導帯に近い側にドナー準位が形成されることにより、伝導帯への励起がし易くなっている。そのため電子が多数キャリア、ホールが少数キャリアとなる。

#### p型半導体

ホウ素など3価の元素（アクセプタ）を混ぜた半導体。n型とは逆に、ホールが多数、電子が少数キャリアとなる。

電子とホール密度の積は

$$np = AT^3 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (4)$$

で与えられる。また、不純物を含む半導体の電気伝導度は電荷の中性条件下で求めることができ、例えばn型半導体の場合

$$\sigma = eN_D\mu_e \quad (5)$$

である。

### 2.1 補償型半導体

ドナーとアクセプタが当量含まれる半導体を補償型半導体と呼ぶ。ドナーとアクセプタの効果が打ち消しあい、真性半導体に似た性質を示す。リチウムイオンドリフト法によって製造される。抵抗率が高めなのが特徴。

## 3 np 接合

n型とp型の半導体を接合すると、接合部近傍では伝導電子の密度が不連続になる。(n側が高密度でp側が低密度)そのため、n側からp側へ電子の拡散が起きホールと再結合して消滅する。ホールの拡散についてもまた同様である。拡散がある程度進行すると、今度は拡散を妨げる向きに電場が発生するため平衡状態に達する。このようにしてできるキャリアのない領域を空乏層という。空乏層は半導体検出器の要となる部分である。

### 3.1 空乏層の大きさ

空乏層の大きさはドーパントの密度に依存する。これらの密度が一様であると仮定すると、ポアソン方程式が計算できて

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon V_0 (N_A + N_D)}{\epsilon N_A N_D}} \quad (6)$$

となる。ただし  $V_0$  は接触電位である。

### 3.2 逆バイアス接合

単にpn接合しただけの半導体は、接触電位が低く空乏層が狭いので放射線検出器として使うことはできない。そこでn側に正、p側に負の電圧を印加して空乏層を広げて用いるのが普通である。



## 4 放射線検出器としての半導体

### 4.1 電子-ホール対の平均エネルギー

半導体は、比較的低いエネルギーで電子-ホール対を作ることができる。(液体窒素温度では Ge の場合 2.96eV)

### 4.2 線形性

空乏層が十分厚ければ、入射粒子を完全に止めることができ、出力電圧は入射粒子のエネルギーに比例する。基本的には粒子の種類に依らず線形性が成り立つが、重イオンの場合はプラズマが発生するなどの効果によって、線形性は必ずしも良くない。

### 4.3 ファノ因子とエネルギー分解能

一般に、エネルギー分解能はキャリアの数とファノ因子に依存する。5章によれば

$$R = 2.35 \sqrt{\frac{Fw}{E}} \quad (7)$$

### 4.4 リーク電流

半導体検出器には常に高い電圧がかかっているため、放射線が入射しなくてもある程度の電流が常に流れている。半導体表面においてリーク電流は最も大きい。

### 4.5 検出効率

半導体検出器は、粒子のエネルギーをほぼ完全に電流に変換することができる。ただし、常温ではリーク電流が大きすぎて信号を覆い隠してしまうので、常に液体窒素などで冷やして用いなければならぬ。

### 4.6 パルスの波形、立ち上がり時間

pn 接合型の検出器を例にとる。電子-ホール対が生成された位置を  $x_0$  とすると、パルスの波形は次のようになる。

$$Q_e = \frac{e}{d} x_0 \left( 1 - \exp \frac{\mu_e t}{d} \right) \quad (8)$$

$$Q_h = -\frac{e}{d} x_0 \left( 1 - \exp \frac{-t}{\tau} \right) \quad (9)$$

シリコンにゲルマニウム  
荷電粒子に 充てが

## 10.5 Silicon Diode Detectors

荷電粒子に対して最も広く使われる半導体。常温で使えるが、サイズが小さいのが欠点。

### 10.5.1 Diffused Junction Diodes

p型半導体の一端からn型の不純物を拡散させて作る。

長所: 表面が強くて露出OK。但し薄い窓が利用できるので、この検出器はあまり使われない。

短所: 不感帯が出来てしまい、ここで落としたエネルギーは検出されない。→検出限界が上がる。  
高温でdopeするのでキャリアの寿命が短くなってノイズが増える(?)。(下図)

### 10.5.2 Surface Barrier Detectors(SSB)

荷電粒子の検出で最も多く使われる検出器。半導体とある種の金属を接合させて作る(n型&Auとかp型&Alとか)。物質のFermi準位が違うので、Contact emf(?)が起こり、半導体のバンド準位が下がる。汚れに弱いので、表面は綺麗にする。  
*金属のFermiエネルギー*

長所: 薄い検出器なら全体を空乏層にできる→落としたエネルギーを測るのに使える。biasを大きくするとrisetimeを早く出来る。

短所: 光に対する感度が悪い(金の層で止まる)。

### 10.5.3 Ion-Implanted Diodes

半導体にイオンを打ち込んで作る。

長所: SSBより安定で窓を薄くしても良い。

短所: 500℃位に焼きなましてから使うので、やはりキャリアの寿命が短い。高価である。

### 10.5.4 Lithium-Drifted Silicon Diodes Si(Li)

Lithium-Driftingという課程を利用したもの。

長所: 空乏層が大きい。β線や低エネルギーのX線を検出するのに適する

短所: ノイズが大きいため冷やして使う。また、Liの拡散を抑えるために保管も冷所で。

## 10.6 Positron-Sensitive Detectors

*正電子分解型検出器*

位置の情報を異なる方法で得る2つのタイプの検出器がある

### 10.6.1 Continuous and Discrete Detectors

#### Continuous Detector

一次元連続検出器(→ Fig.10.14)。一枚の半導体に、抵抗を持つ電極と抵抗のない電極を貼り合わせる。位置xで荷電粒子が電荷を発生させると、Bに集まる電荷Bは粒子のエネルギーEと

抵抗に比例する。また、Cに集まる電荷は単にエネルギーに比例するので、

$$B \propto E \frac{x}{L}$$
$$C \propto E$$

ここから

$$x = L \times \frac{B}{C}$$

で1次元の位置情報を得られる (method of charge division)。

半導体と抵抗を持つ層が一様でないとき位置の1次に比例しないので注意。また、outputの信号の整形も必要。気をつければ、非線形性は1%未満に抑えることができ、位置分解能も250  $\mu$  m程になる(しかしこれが限界)。

### Discrete Detector

半導体の基板の上に電線を配置する(→ Fig.10.15)。matrix detector や strip detector とも、エレクトロニクスが複雑になり、電極の幅(0.2~0.4mm)までしか位置分解能は無いが時間・エネルギー分解能が高い。

#### 10.6.2 Micro-Strip Detectors

20  $\mu$  m 感覚で strip を配置する(→ Fig.10.16)。読みだすチャンネルを60  $\mu$  m ごとにすると各 strip の電荷の“重心”を取ることで5  $\mu$  m 程の位置分解能を得る。

薄いので時間の応答が良く、トリガーとしても使われる。読み出しの時間は10nsより短いので高い counting rate を可能にする。更に、全部のチャンネルを利用すれば2  $\mu$  m の位置分解能を得る。

しかし、放射線による劣化は問題。

#### 10.6.3 Novel Position-Sensing Detectors

### 10.7 Germanium Detectors

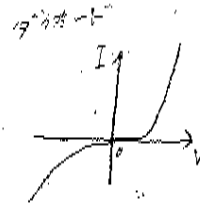
ZがSiより大きいので $\gamma$ 線の検出に向いている。ただ、使用時は冷却する必要がある。

#### 10.7.1 Lithium-Drifted Ge

Ge(Li)の厚さが15~20mmで限界なので、空乏層をできるだけ広くするために色々工夫される。→ coaxial Ge(Li)。室温ではLiイオンがGe中で動き回るので冷却が必要。不感帯や、冷却時に必要な窓によって、検出限界は30keVほど。窓を薄い金箔で作れば数keVまで下げられる。

#### 10.7.2 Intrinsic Ge

不純物の密度が $10^{10}$  atoms/cm<sup>3</sup>以下であるような高純度の半導体。このタイプは高電圧を掛ける時以外冷却する必要がない。放射線でのダメージにも強いらしい。



### 10.7.3 Gamma Spectroscopy with Ge Detectors

Ge 検出器は $\gamma$ 線に対して数 keV $\sim$ 10MeV までで最高のエネルギー分解能を持つ (0.15 %)。Fig.10.19 を見ると圧倒的。

正確にスペクトルを測るには、エネルギー分解能と S-N 比が重要。よって、鉛で遮蔽して Background を減らす。

キャリブレーションは full peak efficiency (光電効果の efficiency) が理想的。Compton は無視出来る。レートが高いと pile-up によってカウントしづらくなるので注意。

### 10.8 Other Semiconductor Materials

常温で使える検出器として、CaTe や HgI<sub>2</sub> がある。どちらも Z が大きいので $\gamma$ 線の検出に有利。しかしそれなりに問題もある。

### 10.9 Operation of Semiconductor Detectors

#### 10.9.1 Bias Voltage

空乏層の厚さを決める。高電圧は空乏層を広げてノイズを減らす。breakdown のおそれがある。SSB で 50 $\sim$ 300V、Ge で 4000 $\sim$ 4500V。電圧をかけるときはゆっくり。電圧が上がった時にノイズをオシロスコープで見ると良い。長い間使っていないものは、目標の電圧に達したら数時間ほっておくのが良い。掛けるべき電圧が分からないものについては、オシロスコープでノイズを見ながらゆっくり電圧を変えて最もノイズの小さい所の電圧で使用する。

#### 10.9.2 Signal Amplification

信号の処理系も、ノイズが乗らないように気をつける。とくにプリアンプはすべての操作の前に必要。半導体のキャパシタンスは温度によって変わるので charge-sensitive プリアンプを用いる。プリアンプのキャパシタンスは他の素子のキャパシタンス ( $\sim$ 10pF) より十分大きくなくてはならない ( $\sim$ 10nF)。

エレクトロニクス由来のノイズは equivalent noise charge で与えられる。 $V_{rms}$  を出力における平均のノイズの高さとする、これは

$$ENC = e \frac{V_{rms}}{w} C$$

$w$  は平均エネルギー  $\sim$  keV

で与えられる。 $C$  は検出器とプリアンプの全入力キャパシタンスであり、 $w$  は電子-ホールペアを作る平均エネルギー。これはまた、

$$ENC = \frac{FWHM}{2.35w}$$

とも書ける。 $C$  が小さければノイズは減るので、ケーブルによるキャパシタンスを減らすためにプリアンプはできるだけ検出器の近くに置く。低温で使う検出器の場合は DC coupling、常温で使う場合は AC coupling で十分。

### 10.9.3 Temperature Effects

冷やしたほうがノイズは減るが、材質が低温に耐えるかどうかには注意する。また、バンドギャップが温度で変わる可能性も考慮する。

### 10.9.4 Radiation Damage

放射線によって格子をなす原子がはじき出されて禁制帯に新たな準位を産んでキャリアを減らしてしまう。

また、リーク電流が増えてエネルギー分解能を下げる。ダメージが少なければ、Bias を上げることである程度分解能は修正される。

単位体積あたりに蓄積した入射粒子とリーク電流との関係は

$$J = qn_i dK \frac{\phi}{2}$$

$\phi$  は radiation fluence (単位面積あたりに蓄積した入射粒子の個数)、 $n_i$  は (10.1) から、 $d$  は空乏層の深さ、 $K$  は放射線やエネルギーに依る係数 (Table 10.3)。

### 10.9.5 Plasma Effects

重イオンなどが半導体に入射すると、高い密度で電子ホールペアが出来る。space-charge phenomena というものによって rise time やパルスの高さに影響が出る。エネルギーとパルスの高さの関係は

$$E(X, M) = (a + a_1 M)X + b + b_1 M$$

という公式で与えられる。  $a$  などは実験で決めるパラメータである。  $M$  はイオンの質量で、  $X$  はパルスの高さである。