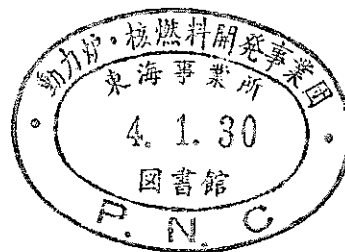


放射線位置検出器による放射性粒子粒径測定法の開発

立教大学との共同研究にあたっての報告書 1

The measurement of the radioactive aerosol diameter by Position sensitive semiconductor detectors 1

1979年1月



動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

Tokai Works

Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation

複製あるいは入手については、下記にお問い合わせください。

茨城県那珂郡東海村 〒 319-11

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所技術部研究管理課 ☎ 東海(02928)2-1111

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Enquiries about copyright and reproduction should be addressed to ;

Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation,

Tokai, Ibaraki, Post No.319-11, Japan.

放射線位置検出器による放射性粒子粒径測定法の開発

立教大学との共同研究にあたっての報告書 1

The measurement of the radioactive aerosol diameter by position sensitive semiconductor detectors 1

中 田 啓*

金 盛 正 至*

期 間 1978年10月1日～1978年12月28日

目 的 放射性粒子粒径測定法に放射線位置検出器が利用できないか検討する。

要 旨

放射性物質が粒子状になっている場合に、放射線位置検出器によりその個別の放射能を測定できる。そこで、放射線位置検出器の性能・種類・設計方法など技術的に必要な点について検討した結果を報告する。なお放射性粒子粒径測定装置の開発を立教大学と共同で行なう。

The measurement of the radioactive aerosol diameter by
position sensitive semiconductor detectors 1

Abstract

The measurement of the diameter of radioactive aerosol, in particular plutonium aerosol, is very important for the internal dose estimation.

Determination of the diameter of radioactive aerosol is performed by using position sensitive semiconductor detector (PSD). The filter paper with the radioactive aerosols is contacted to the PSD which is connected to the data processor so that the diameter of the aerosol is calculated from the measured radioactivity.

This investigation was performed in cooperation with Rikkyo University.

目 次

はじめに	1
1 放射線位置検出器の種類	3
2 半導体検出器	7
2-1 電荷分割方式	8
2-1-1 電荷分割機構	8
2-1-2 位置決定誤差及び雑音	11
2-2 半導体位置検出器の例	17
2-2-1 イオンインプランテーション法	17
2-2-2 サーフェスバリア法(その他)	18
2-3 チェッカーボード方式	26
2-3-1 短冊型電極方式	26
2-3-2 多半導体検出器方式	27
3 比例計数管	34
3-1 立ち上がり時間方式	34
3-1-1 立ち上がり時間と位置の関係	34
3-2-2 位置決定誤差	36
3-2 比例計数管位置検出器の例	51
3-2-1 立ち上がり時間方式	51
3-2-2 電荷分割方式	52
3-2-3 ディレイラインを利用した検出器	53
3-2-4 イオンのドリフトを利用した検出器	53
4 検出方法相互比較	54
4-1 半導体検出器と比例計数管	54
4-2 電荷分割法と立ち上がり時間法	55
5 放射性粒子径測定への応用	56
6 参考文献	59

はじめに

放射性物質を取り扱う作業環境での内部被曝の主な原因は空気中の放射性物質の吸入によるものである。

作業者が放射性物質を体内に吸入した場合の被曝線量はその吸入量、物理的性状、化学形、半減期、放射線の種類とエネルギー、体内での生物学的な挙動、などによりきまる。

このうち吸入による肺部沈着量は主として粒子の大きさに関係し、したがって作業環境の空气中に存在する多くの異なった粒子サイズからなる粒子群の粒度分布の把握が肺負荷量や内部被曝線量の評価上重要となる。

エアロゾル粒子の粒径分布を求める方法として粒径に応じて直接選別捕集する方法としてアンダセンサンプランやその他分粒装置があるが吸引量の制御が面倒なことやサンプラとしてやや大型となること、放射能検出器が直接各段の口紙に取り付けられないことなどから放射性物質の空気汚染の監視のような定常的な連続モニタリングには適さない面がある。

実際、放射性物質を取扱う作業環境の粉塵中の粒子径を求めることの必要性の判断は紙固式ダストサンプラやモニタの口紙上に、一定量の集塵を行ったりその他の情報等により必要に応じ、口紙上の全放射能を測定して後、行なうのが普通である。

これら口紙上に集塵された粉塵の粒子径分布を調べる方法として光学顕微鏡や電子顕微鏡で直接測定する方法と、口紙を写真用感光紙に密着させその像の黒化点の径を測定する方法等があるが、各種顕微鏡による方法では一枚の口紙の測定だけでも非常に時間と労力が必要であり、多くの口紙を測定することは現実的には無理である。写真による方法ではかなり改善されて現在では最もよい方法ではあるが、露出時間の調整の困難性、放射能粒子の粒形の大きさの違いによる決定精度の問題などまだ改善の余地が多い。この方法でも結果が得られるまでには、数日～数週間に及ぶことがある。しかしダストモニタ等の口紙上の放射性粉塵の粒径分布についての情報が必要となってくるのは急がれる場合が多い。

そこで現在前処理に要する時間が少なく、迅速かつ簡便な粒径測定の方法を検討している段階である。

そのような目的に適應できる検出器として最近急激に発達してきている。半導体検出器による位置検出器に着目し、性能、使用方法等の調査を行なった。

放射線位置検出器は、原子核物理学（テレスコープ等）・核医学（シンチグラム等）における有用な検出器として数多く使用されてきた。しかし放射線管理の分野への応用例は見られない。

これは発想方法が放射線に目を向けるあまり放射能をも直接的に定量し得るという面が見落されていたことに原因がある。そこで、上記の放射性粒子の粒径測定が放射能を測定しているのと同義であることに着目し、第1の応用例として検討することにした。フィルムのかわりに半導体位置検出器を使用すれば、位置分解能がある程度良ければ、エネルギー弁別が可能であるとか、データの加算・オンライン処理が可能であるなど有利な点が多い。

なお、これらの調査にもとづいて具体的な検出器の製作・検討を、これまで半導体検出器の分野に長く関係されている立教大学理学部佃研究室との間で、共同体研究として昭和53年12月～昭和54年6月までに行うことにしている。

1. 放射線位置検出器の種類

放射線位置検出器は、まず単一の検出器を用いるか、あるいは、多数の検出器を用いるかで大きく

- 1) 単検出器型
- 2) 多検出器型

の2種類に分類することができる。これは放射線位置検出器として利用可能な検出器すべてに共通する分類方法である。

1)の単検出器型というのは、位置検出器に、必要な位置決定精度に比較して十分大きい検出器を1つ用いる方法である。2次元の放射線位置検出器を例に説明すると、概念的には、平面的な単一の位置検出器に放射線が入射した場合に、それぞれの入射位置に対応して取り出される出力信号が何らかの意味で2次元の位置情報を含んだものになっているというものである。一般的には、X方向、Y方向と別々に信号を処理する形式になっている。この場合それぞれの一次元位置検出用端子が検出器の両端にもうけてある。出力信号に含まれている位置情報としては、以下にあげる3つが主である。

- イ) 出力波高あるいは総電荷量
- ロ) 出力パルスの立ち上がり時間
- ハ) 両検出端子に発生する出力信号の時間差

これらの情報は、検出器の性格上必然的に出てくる場合もあるが、人為的にディレーライン等を使用して作り出す場合もある。イ)の出力波高あるいは総電荷量は、例えば、電荷を収集するタイプの検出器の場合には、放射線が検出器内で失ったエネルギーに相当する電荷が、抵抗体により位置に反比例するかたちで分割されて検出端子に取り出されるという過程で生じてくる位置信号である。またロ)の立ち上がり時間は、出力信号が均一に分布する抵抗Rと容量C中を伝達する間に位置により信号の立ち上がり時間の差を生じてくるということである。さらにハ)の両検出端子に発生する出力信号の時間差の含む情報は、文字通り信号の到達時間が距離によってくることが生じるものである。これらイ)、ロ)、ハ)のうちの1種類の情報あるいはそれらの情報を組み合わせて解析することにより放射線がどの位置に入射したかということを決定できる。単検出器型を利用する場合には、信号処理系の電子回路を比較的単純なものにできるという特徴を持っているが、反面原理的にこの方式を利用するのが困難な検出器の種類もある。また次に述べる多検出器型と比較する意味においては、位置に関する情報がアナログ量である

という点考慮しておく必要がある。

次に、2) の多検出器型の検出器について説明する。この方式は、必要な位置決定精度程度の大きさの検出器を多数並べるというものである。2次元の位置を検出する場合には、平面上 X-Y方向にそれぞれ番地を付けて検出器を並べ、放射線の入射した場所が、X-Y番地という形式で位置信号に関しては初めからウディスクリートな情報が得られる。この方式は多数の検出器を並べさえすれば、位置検出器を構成することができるから、あらゆる種類の検出器に利用できるという長所を持っている。また位置情報とエネルギー情報は、パルスの計数値及び波高値という様に独立した情報として評価が可能となっている。しかし反面、多数の検出器にそれぞれ別の信号処理系を準備する必要があり、これは装置全体を複雑で高価なものにすることになり欠点となっている。このため多検出器型の位置検出器においてはこの信号処理系をいかに簡略化していくかということが1つの大きな研究テーマとなっている。そのために、検出器の形態、配置方法、回路系の集合等が試みられている。

いる。

以上のように、多検出器型を用いればあらゆる種類の検出器を利用することができるし、単検出器型でもやり方によっては殆どの検出器を利用可能ということで、実際には測定対象となる放射線の種類等からいかなる検出器を選択したら良いか、あるいはその検出器の性能はどうかという問題が重要になってくる。そこで放射線位置検出器が満足すべき条件のいくつかを上げてみると

- 1) 位置決定精度
- 2) 分解時間
- 3) エネルギー分解
- 4) 全体の大きさ
- 5) 測定可能放射線の種類
- 6) 費用

という6項目に集約できる。この中で現在十分に性能の評価の上で統一されていないのが位置決定精度の項目であるが、これについては、単一検出器型及び多検出器型ともそれぞれの項目の中で説明する。他の5項目に関しては、どういう種類の検出器を用いるかでほぼ決定されてくるし、また実際に検出器を選択する場合にはある程度検出対象の放射線がある場合が多く、その意味で利用可能な検出器の種類もしぼられてくる。そこで表1には、現在利用されている放射線位置検出器について、検出器の種類という面から分類しその概略を上げた。

表1の中で、半導体検出器を利用したものと、比例計数管を利用したものについては、両者とも放射線による電離現象を利用しているという共通点があり、そのためにほぼ同一の考え方で取り扱うことができる。また、通常利用しなれた検出器である半導体検出器についてはエネルギー分解能もすぐれているという点から利用範囲が広い。

シンチレーション現象を利用した位置検出器は、単一検出器型、多検出器型ともに、位置決定精度が±数mm以上であり精度の良い実験には適しない。位置決定精度を上げられない理由は、それぞれ別のものであるが、多検出器型に関しては検出器の複雑さを度外視すればさらに±1mm程度の分解能も得られないことは無い。しかし装置自身はとても実用的なものにはならないであろう。しかし核医学の分野では、測定装置の動作の安定性及び検出効率の両面から数多く利用されている。殆どは多検出器型の位置検出器であり、装置自身は人体を囲める程度の大きさを持ったものもあるが、位置決定精度が数mmで、蔵器の中のどの部分かということの大略把握できる程度のものである。しかしその有効性から現在も各種の改良が重ねられている。

表1. 各種位置検出器と位置決定精度

検 出 器	検 出 器 方 式	位 置 決 定 精 度 (概 数)
半 導 体 検 出 器	一様R-C分布伝達線方式 チェッカーボード方式	30 μ m 200 μ m
比 例 計 数 管	一様R-C分布伝達線方式 多心線式比例計数管	30 μ m 300 μ m
ドリフトチェンバー	マルチワイヤー式	100 μ m
シンチレーション検出器	単検出器・多検出器型	数 mm
G M 計 数 管	放電伝播型	数 mm
放 電 箱	スパークチェンバ型	1 mm

その他にも、ドリフトチェンバー、GM計数管、放電箱を上げてある。この中でドリフトチェンバーについては後に比例計数管の中でふれることにする。

GM計数管の位置決定方式は、中心線に沿った放電の伝播時間を利用したものであり、検出

端子に取り出される信号の時間差から位置を決定する，位置決定精度はあまり良くなく，土数程度である。また分解時間もGM計数管の特性上良くない。そこで今回の調査では，表1にあげるにとどめる。

放電箱についても，回復時間が $\sim 1 \text{ mm sec}$ 程度とわるいし，放電用高圧電源のトリガーに原因する電氣的ノイズが発生するという欠点を持っており，位置決定精度はまだしも実際の利用面では用途も限定されてくると考えられるので特に表1以外には取り上げない。

2. 半 導 体 検 出 器

半導体検出器を使って放射線位置検出器をつくる方法は、表1にもあるとうり2種類に分類することができる。1番目の一様伝達線方式とは、単検出器型に分類されるが、検出器全体を一様に抵抗Rと容量Cが分布した伝達線と考えて出力パルス処理する方式である。2番目のチェッカーボード方式とは、多検出器型に分類されるべき構造を持っている。この場合には1枚の半導体素材にチェス板の様な形態で多数の検出器を並らべて製作し、そのそれぞれの検出器から入射放射線の信号を取り出す形式になっている。

ここで、一様伝達線方式についてさらにその内容を分類すると、信号処理の仕方から2種類になる。第1は、検出器の中に発生した電荷が、検出器自身の抵抗により2つに分割されそれぞれの位置検出用電極に収集されるのを利用して、そのときに位置検出電極に収集された電荷総量から位置を判断する方法で、これを仮に電荷分割方式と呼ぶ。第2は、その際収集される電荷の収集量の時間的変化（立ち上がり時間）が放射線の入射位置に依存していることを利用する方式があり、これを立ち上がり時間方式と呼ぶ。

さらに、半導体検出器を製作する場合のその製作方法の違いによる分類も考えられる。（実際問題としては、殆どの論文がそれぞれ特徴のある検出器を作っており、この面からの分類も必要となる。）製作上の違いには、大きく3種類ある。

- 1) サーフエスバイアー法
- 2) リチウムドリフト法
- 3) イオンインプランテーション法

3種類の方法とも、一様伝達線方式による検出器を製作することができる。その中では安定した抵抗層を作り得る方法が最も良いことになるが今のところ優劣は明確でない。文献的にはイオンインプランテーション法によるものが良い成果を上げているが、実際に製作する場合にはインプランテーションを行なう装置・技術の問題が生じてくる。それに対してチェッカーボード方式は、サーフェスバリアー法によってのみしか製作することができないが、安定した性能が期待できるという側面を持っている。

そこでまず、一様伝達線方式の電荷分割方式から順に原理・機能・長所・短所等について説明してゆく。（立ちがり時間方式については比例計数管の項で紹介する。）

2-1 電荷分割方式

半導体検出器を利用して、位置検出器を構成する場合には、上にも述べたとおり、一様伝達線方式として1)電荷分割方式と2)立ち上がり時間方式の2種類が考えられる。この分類は比例計数管を利用した検出器の場合も同様に扱えるので、始めに半導体検出器について電荷分割方式について説明し、立ち上がり時間方式については比例計数管のところでも詳しく説明する。まず第1に、均一な抵抗体中で生成電荷が分割される場合の機構について見てゆく。

2-1-1 電荷分割機構

W, MELZER at al¹⁾ の論文は、半導体検出器を例に電荷が分割される機構について述べている。まず第1に一次元的な分割機構について説明する。この場合は、Fig 1-1のように、半導体検出器の表面あるいはその近傍を均一な抵抗層とみなし、かつ検出器中のディプレッションレイヤーを均一に分布した容量Cとみなしている。Fig 1-1上面は金蒸着面でこの電極からは検出器中で放射線が失った全エネルギーに相当する信号が得られる。下面はビスマス蒸着による均一抵抗層となっており、両端にあるアルミニウムの位置検出用電極 P_1 及び P_2 から位置に関する信号を取り出すようになっている。Fig 1-2及びFig 1-3には信号処理システムの概略を示してある。エネルギー信号、位置信号ともチャージセンシティブのプリアンプに入れられさらに増幅して分析するシステムになっている。

W, MELZER^{1), 3), 7)}は、電荷の収集機構についていくつかの仮定をして解析している。つまり、数MeVのアルファ線が上面から検出器に垂直に入射し、初期電離範囲は、直径 $10\mu\text{mm}$ 程度以下に限定されるというのが1つめの仮定である。これは無視できる程に小さいということで、デルタ関数で近似を行うための仮定である。放射線により内部に発生した電子・ホールペアは、外部に印加されているバイアス電圧により収集される。そして抵抗層中(下部ビスマス電極)を拡散し、それぞれ P_1 、 P_2 電極に収集され、かつ P_1 、 P_2 の位置電極の接触抵抗及び内部抵抗は拡散抵抗層の抵抗に比べ無視できる程小さいという仮定をおいている。その後上述モデルに従って微分方程式を解き以下の結論を得ている。 $Q_{p_1}(x, t)$ 、 $Q_{p_2}(x, t)$ 、 $Q_E(x, t)$ をそれぞれ P_1 、 P_2 及びE電極に収集される電荷とすると、粒子が位置Xに入射した後の時刻tにおける電荷について、

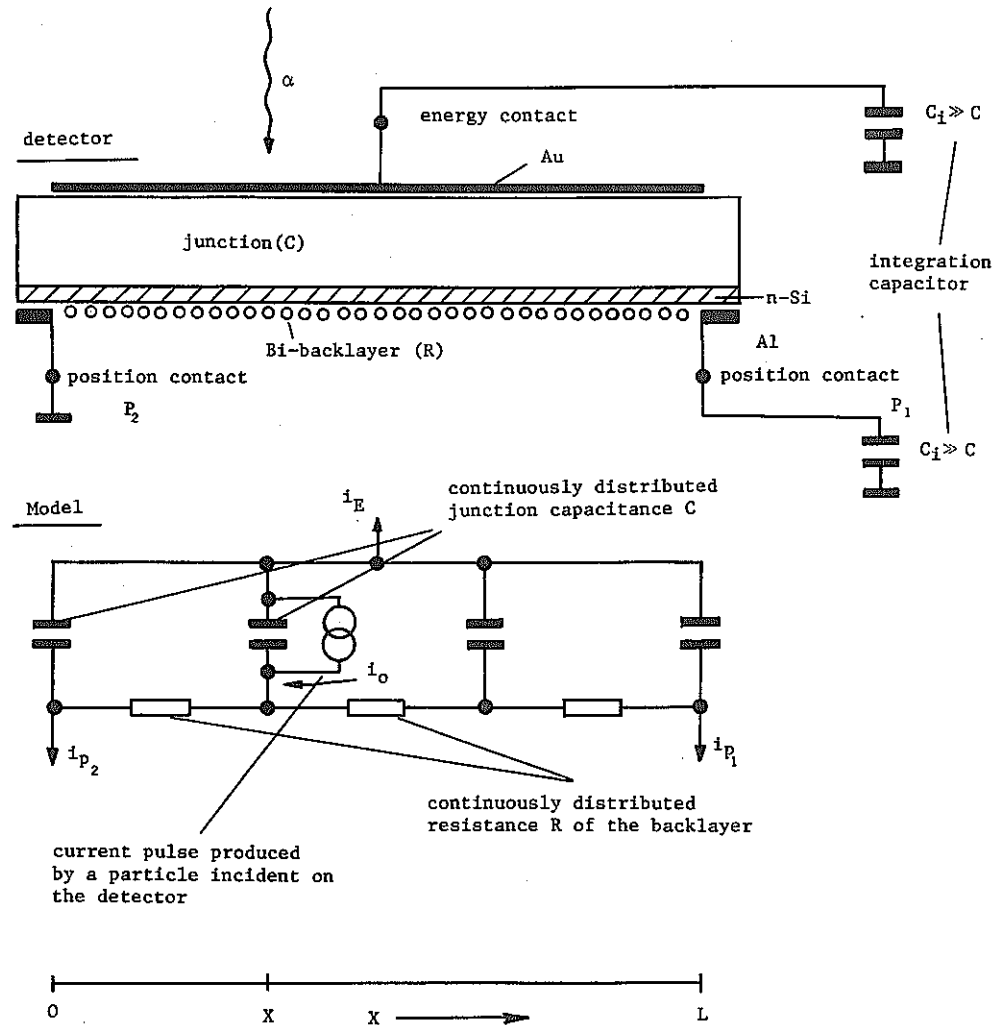


Fig.1-1 The structure and the equivalent circuit of a one dimensional position sensitive surface barrier detector. A particle incident at X is represented as an instantaneous current source discharging a corresponding local capacitor.

$$Q_{p1}(x, t) = (2Q_0/\pi) \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin \left\{ (n\pi/L) x \right\} \times \left[1 - \exp \left\{ -n^2 \pi^2 t / (RC) \right\} \right] \quad (1)$$

$$Q_{p2}(x, t) = (-2Q_0/\pi) \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin \left\{ (n\pi/L) x \right\} \times \cos(n\pi) \left[1 - \exp \left\{ -n^2 \pi^2 t / (RC) \right\} \right] \quad (2)$$

$$Q_E(x, t) = (-2Q_0/\pi) \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin \left\{ (n\pi/L) x \right\} \times \left\{ 1 - \cos(n\pi) \right\} \times \left[1 - \exp \left\{ -n^2 \pi^2 t / (RC) \right\} \right] \quad (3)$$

という式が成立する。ここで得られた電荷をそれぞれ、無限大の時間まで積分すると、

$$Q_{p1}(x) = \left\{ 1 - (x/L) \right\} Q_0 \quad (4)$$

$$Q_{p2}(x) = (x/L) Q_0 \quad (5)$$

$$Q_E(x) = Q_0 \quad (6)$$

という結果が得られる。この結果からわかるとおり、 P_1 、 P_2 電極に収集される電荷は入射位置と直線関係のある情報になっている。実際には、収集電荷 $Q_{p1}(x)$ 、 $Q_{p2}(x)$ を $Q_E(x) = Q_0$ で割ることにより、位置情報 x を得ることができる。このとき、後に比例計数管のところでも詳しく述べるが、(2)式において $Q_{p2}(x, t)$ の電荷は、時間的に見てどのように変化しながら位置電極 P_2 に収集されるかということを見る為に、横軸に時間軸、縦軸に収集電荷量をとってプロットして位置ごとと比較してみるとFig 2に示す図になる。ここでわかるように総電荷量は位置に比例しているが収集形態が位置によって異っている。この点に関してはさらにFig 3-1に、 Q_E がどのように変化するかを示した図を示すが、ここでも Q_E/Q_0 は x/L によって変化しているのがわかる。また Q_{p2} 、 Q_E のパルスの立ち上がり時間という点から見ても、Fig 3-2に示すとおり位置による違いが明確である。

電荷分割を行なって信号を処理する上で問題となってくることは、Fig 2-1からわかるように相当の時間電荷収集をしなくては完全に電荷が収集しきれないとい

う点である。実際問題として無限大の時間積分することは困難であり、ある時間で電荷収集をやめることになる。この場合誤差が生じてくるがこの点について以下で述べる。

2-1-2 位置決定誤差及び雑音

実際の電子回路においては、検出器からの出力パルスを適当な時定数で波形整形することになる。この場合の誤差は発生電荷をすべて収集できないことによる誤差で、電荷収集欠損とも呼ぶべきものである。

この問題についても W, MELZER at al^{2), 7)} が取り扱っている。彼らは、波形整形を、単一 R・C 微・積分 (RC-RC) によって行なう場合と、単一 R・C 積分・ディレイラインクリッピング (RC-D) によって行なう場合について別々に評価している。この場合の電荷収集機構は 2-1-1 と同様なモデルを利用している。結論としては、Fig4 に示すとおり放射線が検出器上の位置 $x/L = 0.5$ に入射した場合に上述電荷収集欠損が最大となるのがわかる。図中点線が理想的な場合で、実線が欠損のある場合である。

ここで、 $x/L = 0.5$ という欠損が最大の場合でもこの値を 1% 以下にあさえる条件として、

RC-RC フィルターについて

$$RC/\pi^2 \leq 0.19t \quad (7)$$

RC-D フィルターについて

$$RC/\pi^2 \leq 0.17t \quad (8)$$

R：検出器抵抗層抵抗

C：検出器容量

τ ：電子回路波形整形時定数

を求めている。この値はあくまで電荷収集欠損の値であるから、これによって影響を受ける因子は、位置決定時の入射位置・検出位置の直線性であり、これは系統誤差として取り扱えるものである。そこで直線性はそれ程重要ではないというような利用方法の場合（例：立教との共研の場合）それ程決定的な因子と考える必要はない。

また抵抗層 R の値と電荷収集欠損の値と位置決定積度の値との間には、抵抗を小

にすると前者が小さく、後者が大きくなり、抵抗を大きくするとその逆になるという関係が存在する。そこでその場合の用途にあわせて抵抗Rの値変化させて用いるのが良い。

入射粒子が検出器に斜めに入射する場合は、発生電荷がピークを中心にある分布を持つことが予測されるが、これはW, MELZER^{1), 2), 4)}が行なった仮定に反している。そこでこの場合の位置決定精度は別に考える必要があるがおおむね、電荷分布の重心を入射位置xと考えてよい。(次に述べる位置決定精度についてはこの限りでない。)

次に位置決定上の雑音について考えてみる。この場合についても、粒子の垂直入射を仮定すれば、検出器の分割抵抗の熱雑音が主な成分となることがわかる。この場合の位置分解能(FWHM) ΔX は

$$\Delta X \propto (T\tau/R)^{\frac{1}{2}} \cdot L/E \quad (9)$$

T: 周囲温度

τ : 回路時定数

R: 検出器抵抗

L: 検出器長さ

E: 粒子エネルギー

と表わされる。さらには、一般には $\tau = RC/K$ (Kは定数) という関係があり、この条件を(9)式に代入することにより

$$\Delta X \propto (Tc)^{\frac{1}{2}} \cdot L/E \quad (10)$$

となる。ここでTは周囲温度であり、変化させ得るパラメータはこれだけであるから、さらに位置の分解能を向上させるためには検出器部を冷却することが必要となることがわかる。

そこで次には、実際の検出器の例を紹介するが、検出器の製作上、一様伝達線方式で良いデータを上げているものとして、イオンインプランテーション法があるのでその例を上げる。

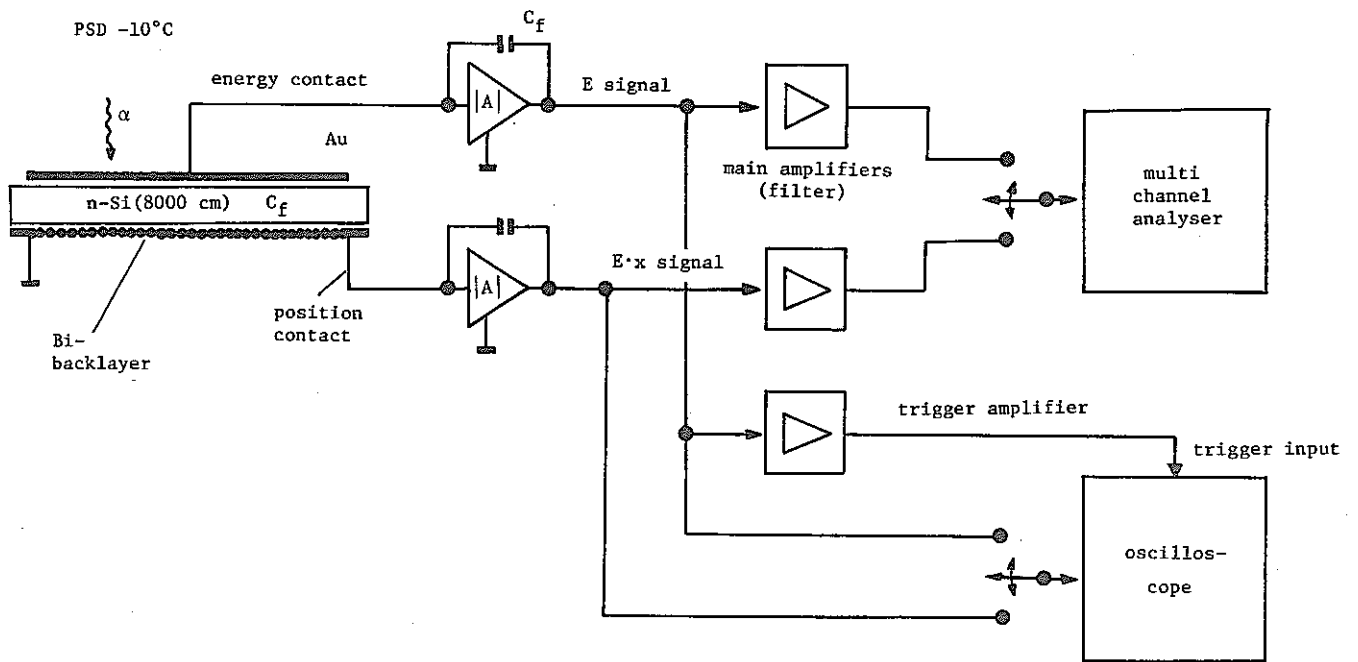


Fig.1-2 The block diagram shows the electronics used for testing the position sensitive detector (PSD).

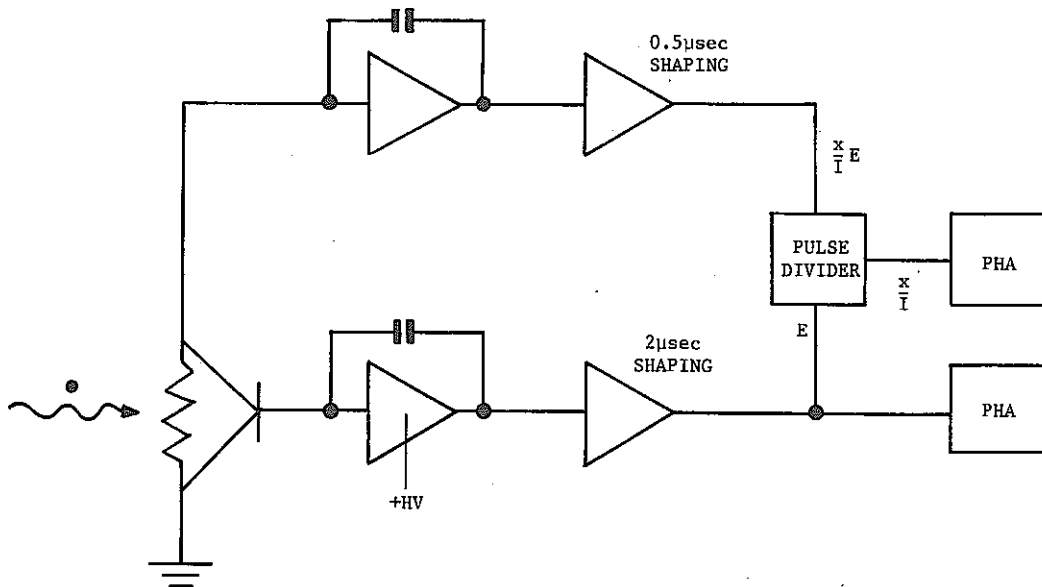


Fig.1-3 Instrumentation block diagram for the ratio method.

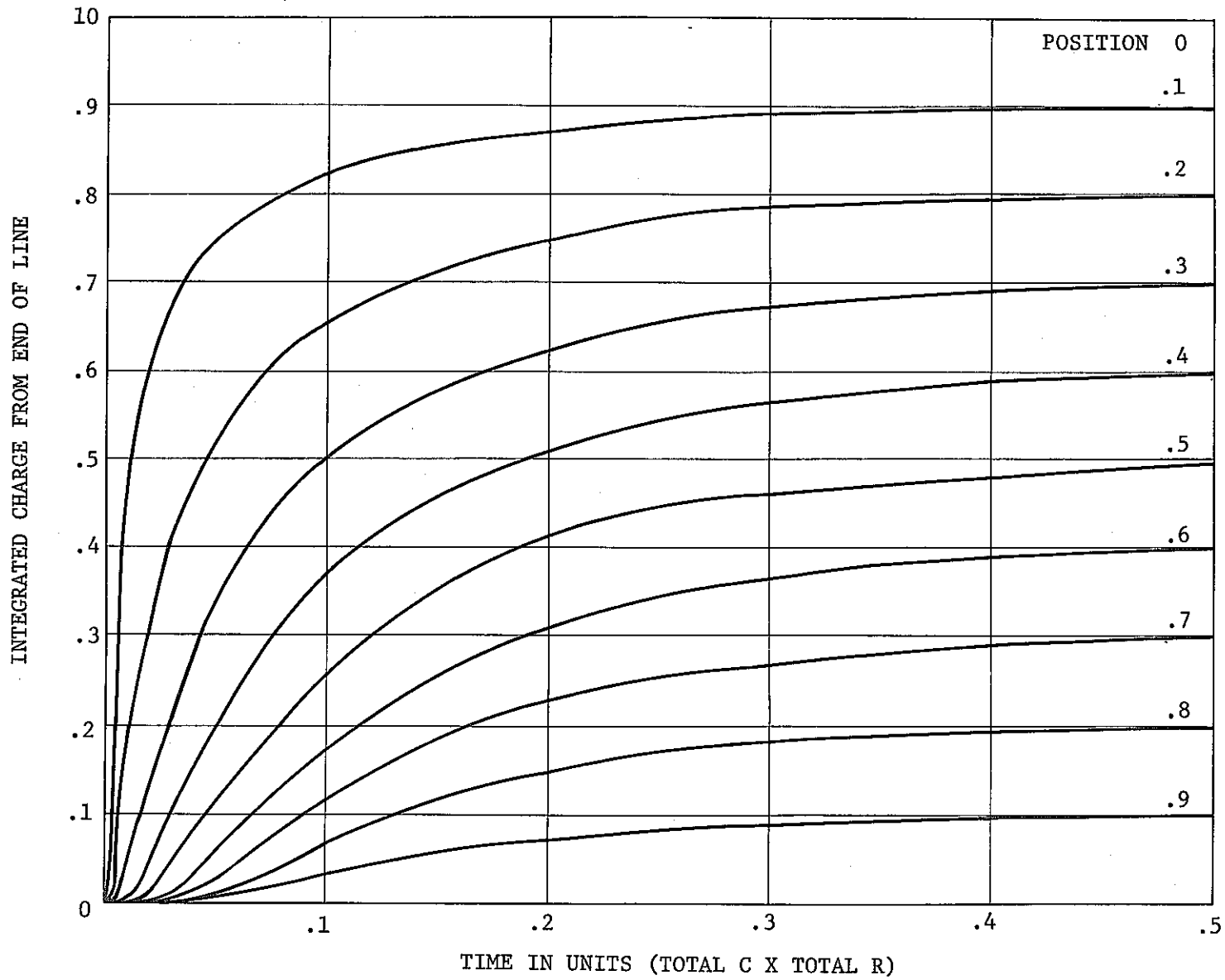


Fig. 2 INTEGRATED CHARGE FROM ONE END OF A DIFFUSIVE LINE SHORTED AT BOTH ENDS DUE TO A CHARGE IMPULSE AT VARIOUS POSITIONS ALONG ITS LENGTH

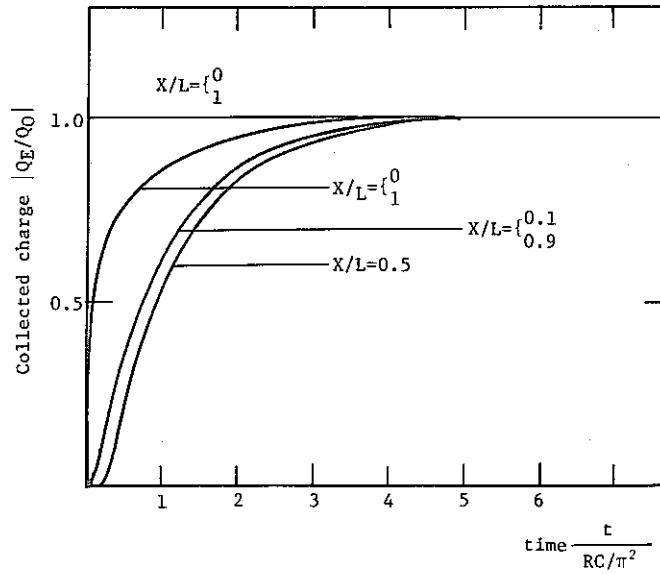


Fig.3-1 The charge collected at the energy contact as a function of time for various positions of incidence. The kinetics of charge collection are the same for points equidistant from the center of the RC-line at 0.5L.

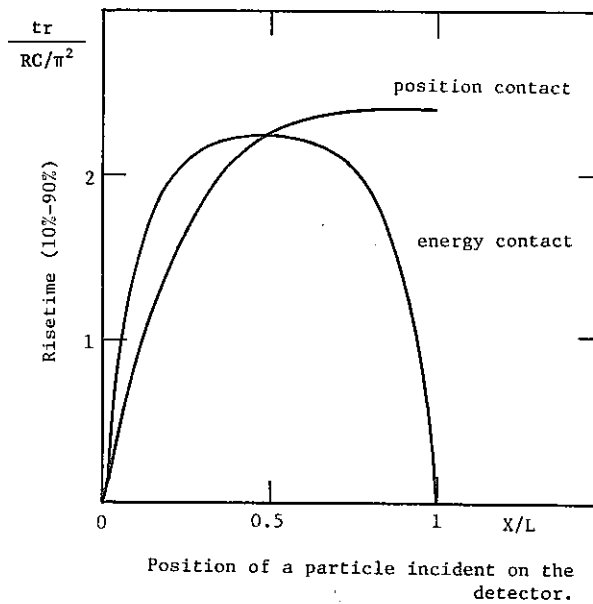


Fig.3-2 The rise time in units of the fundamental time constant for both energy and position contacts as a function of the position of incidence.

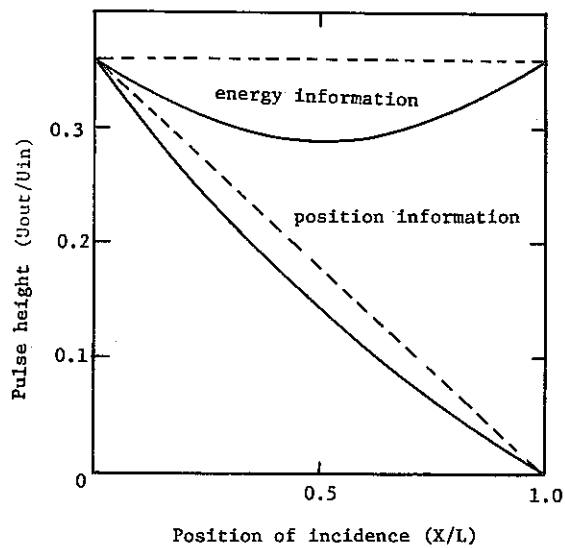


Fig. 4 The characteristics of the PSD, i.e. the relations between pulse heights and positions of incident particles were computed for a RC-RC filter with a time constant of $\tau = RC/\pi^2$ (solid line). The ideal characteristics are represented by the dashed lines. The deviations between the real and the ideal characteristics are due to ballistic deficits of the position and energy measurements.

2-2 半導体位置検出器の例

2-2-1 イオンインプランテーション法

ここでは、F. W. MARTIN at al^{9), 10)}による論文と、E. ELAD at al¹¹⁾による論文を取り上げる。F. W. MARTLN at al^{9), 10)}は4000 ohm-cmのn型シリコンウェハーを素材に、60 KeVのボロンによるイオンインプランテーションを行って検出器を製作している。Fig5にその断面図を上げるが、上面がボロンのインプランテーション域になっている。アニーリングは400℃で10分間行なっている。検出器部分の性能を逆バイアス電圧を変化させることにより試験しているが、その結果144mm²の大きさの検出器においてバイアス電圧100~200Vを印加した場合にノイズが最小となり25 KeVとなっている。

位置決定の直線性及び、雑音を測定するためには、²⁴¹Amのアルファ線を青銅のスリットを通して検出器にあてる方法を用いている。スリットには、2mm間隔で1mm幅の長方形スリットがあげられている。このスリットを用いて測定されたデータをFig6における。図からわかるようにピーク中心を結んだ線の直線からの偏差は1%程度となっている。さらに同様に検出器面積144mm²で、逆バイアス電圧170Vのときに、空欠乏層400μm、容量40PF、抵抗層全抵抗6.5KΩという条件で位置信号の雑音はFWHMで0.2mmとなり、これは検出器有効長の0.65%に相当する。

次にE. ELAD at al¹¹⁾の実験例を紹介する。雑音に関する理論的な予測の中で明らかになったが、同一の検出器でより良い位置分解能を得るためには検出器を冷却する必要がある。(Fig 7) この考え方に従って行なわれたのがこの論文で、彼らは半導体検出器を77°Kに冷却して実験している。この論文は調査した範囲内では最も良い位置決定精度を示している。

しかし中心的な調査内容として、インプランテーションの手法の違いによる分解能の差、あるいはインプランテーション後のアニーリング温度の違いによる抵抗層の違いについて詳しく議論されている。ここでは全体の結論である“なるべく低い有効アニーリング温度を利用するのが最善”ということのみを紹介する。実験の結果として、10mm長の検出器を用いて実験を行ない、位置決定精度として、液体窒素温度(-195.8℃)で30μmという値を得ている。また50mmの長さの検出器を用いた実験では、同様の条件で150μmという値を得ている。このとき位置雑音と検出器温度がどのような関係にあるかを実験的に確認したデータを得ているので

Fig7に示す。この結果彼らは室温における位置雑音の主原因は半導体検出器の抵抗によるものと推測している。

ここで位置決定精度の試験方法についてまとめておく。

- 1) パルサー法
- 2) スリット法
- 3) LED法

の3種類が考えられる。1)のパルサー法は検出器の部分を取り外した状態で回路系だけの試験をするのに用いる。2)のスリット法は、放射線源を用いて試験する方法だが、線源の上に鉛、ステンレス等で作ったスリットをおいて放射線をコリメートして検出器にあて雑音を検査する方法である。この方法は線源が相当の強度を持っていないと測定に時間がかかるという欠点があるが、実際の放射線で測定するので標準的な検査方法と考えられる。次にLED法であるが、これは半導体検出器の場合のみについて可能な方法である。LEDの発光をコリメートして検出器に導き、検出器が光に感度があることを利用して測定するものである。スリット法の検査結果の例をFig9-2に、LED法の例をFig8に示す。

2-2-2 サーフェスバリアー法, その他の方法

イオンインプラレーション法に比較すると、サーフェスバリアー法は検出器製作方法が簡単だという利点がある。また2-3で述べるチェッカーボード方式を利用できるという利点も持っている。

サーフェスバリアー法により検出器を製作する場合には、n型シリコン素材であれば金を蒸着し、P型素材であればアルミニウムを蒸着するというように表面障壁を作る上でシリコン素材と合う物質を蒸着する必要がある。ところが、この物質の選択は、位置検出器として用いる場合には蒸着物質が抵抗層としての役目もはたす必要があるという点から言って難しい。この点に関しては、P. SIFFERT et al¹²⁾の論文を参考にすることができる。彼らはシリコン素材に各種の物質を蒸着し、逆バイアス電圧をかけ、接合部抵抗値を測定することによりサーフェスバリアー型検出器として使用可能かどうか調査している。Table 1及びFig9-1にその結果を上げる。現在、パラジウム、ビスマス金、アルミ等を使用している実験例があるが、他の金属についてもP-n接合を形成し、かつ適当な抵抗値を持つという観点

から選択し使用する必要がある。

1例として、W. MELZER et al⁵⁾が、着物質として金とビスマスを用いて実験した例を紹介する。Fig1-1, Fig1-2に検出器部分の図を上げておいたが、この場合には、シリコンウェハー下面にビスマスの抵抗層を作り、1次元の位置検出を行なっている。抵抗層の抵抗値は7.2 K Ω 、接合部容量は150 pFである。位置決定精度を、スリット法により測定し（線源は²⁴¹Am）、位置分解能0.57mm (FWHM)を得ている。直線性についてもあわせてFig9-2に示す。

その他にも、製作上の容易さから、サーフェスバリアー法を用いて検出器を製作した例は多いが、^{13), 14), 15)}位置分解能は0.25~0.6mm位の値となっている。

さらに別の検出器製作方法として、リチウムドリフト型がある。E. J. LUDWIG¹⁷⁾によって行なわれた例を紹介する。(Fig10)この場合にはリチウムドリフト面にさらにニッケルを蒸着し、また反対面には金蒸着の上にニッケルを蒸着し抵抗層の安定化を計っている。検出器の性能としては、位置分解能1mm程度となっている。

その他の検出器の製法としては、抵抗層としてシリコン素材そのものの抵抗層を利用するという方法も試みられている。^{15), 16)}これは一次元の位置検出のみしか行なうことができない方式であり、P-n接合をつくる上でも金蒸着を利用しているので、サーフェスバリアー型の変形とも言える。

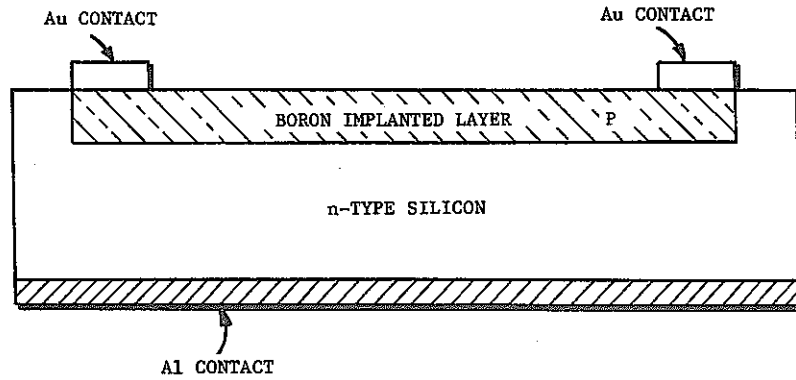


Fig. 5 Cross section of an ion implanted position sensitive detector.

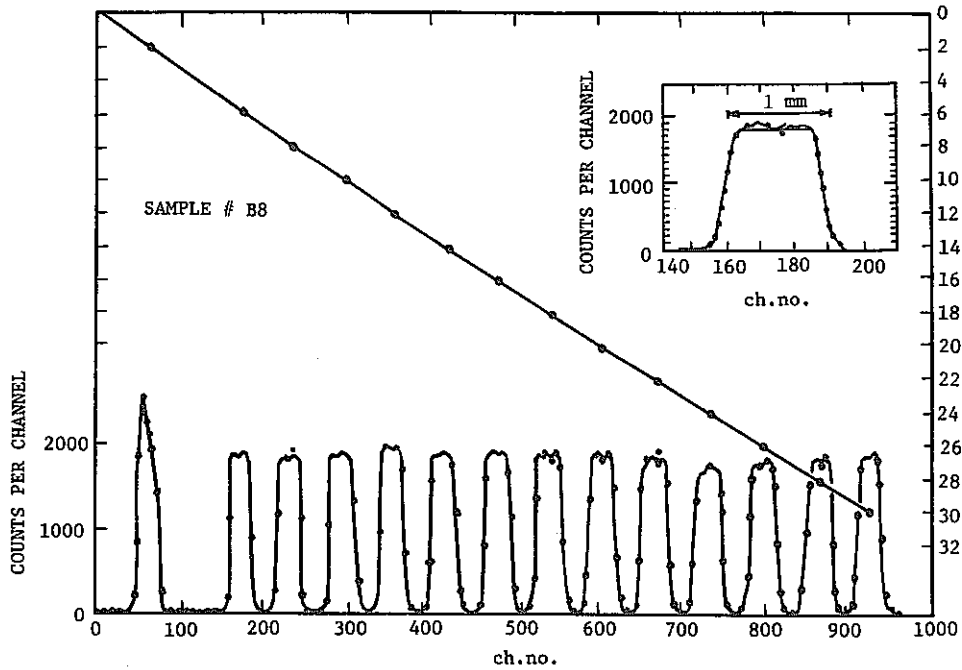


Fig. 6 Typical position spectrum for a 4x32 mm² detector. Am²⁴¹ alpha particles are incident through a mask containing 15 slits, each 1.00 mm wide separated 2.00 mm on centers. The second hole is covered with tape. The solid diagonal line shows the positions as measured from the pulse height distribution vs the true position as determined by the mask. The insert shows the position pulse height distribution for hole number three in detail.

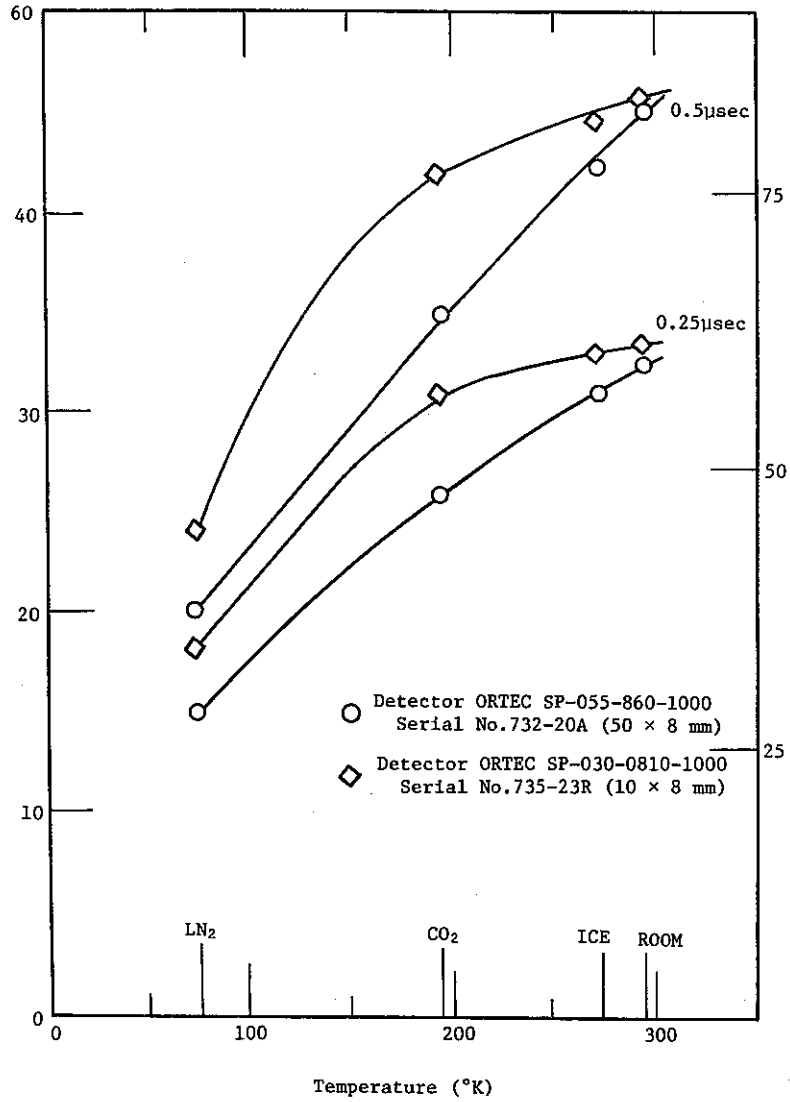


Fig. 7 Position noise for two position sensitive detectors at low temperatures. The scale in microns (µm) good only for the 10 mm detector. For the 50 mm detector it has to be multiplied by 5.

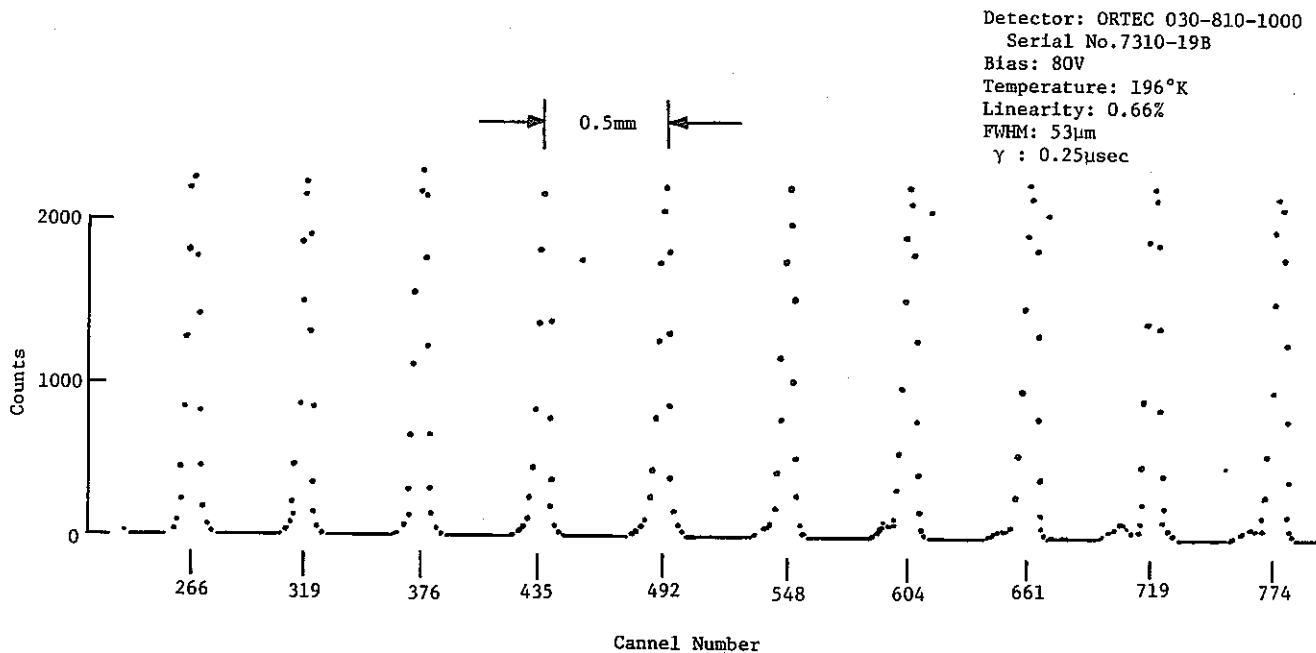


Fig. 8 Position spectrum taken with a light pulser and a 10 mm position sensitive detector at 196°K

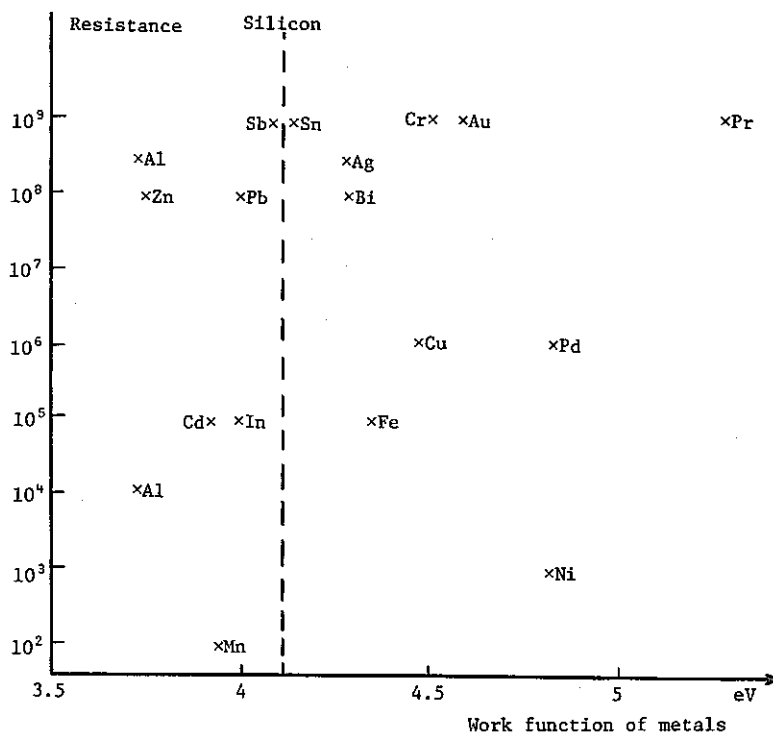


Fig.9-1 Resistance of surface barrier diodes at 10 volts bias vs. work function of the used metals (There are two points for aluminium, surface barriers with this metal as rectifying contact gives sometimes high resistances, sometimes low resistances).

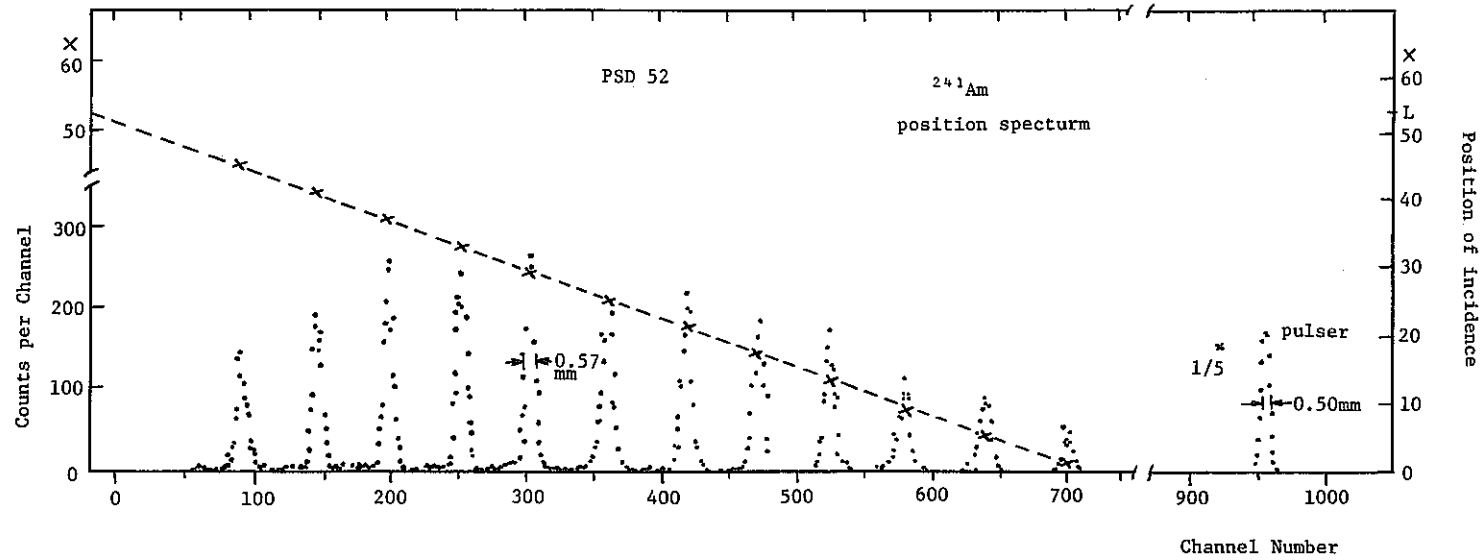


Fig.9-2 Position spectrum of the PSD:the detector being irradiated by ^{241}Am α -particles through 12 equidistant slits in a brass sheet. The width of the slits was 0.4mm and their separation 4mm. The detector was operated at 75 V bias (junction capacitance 150 pF). The pulse shaping network consisted of a 0.7 μsec RC integration and 0.7 μsec single delay line clipping filter.

Table 1

RESISTANCE OF SURFACE BARRIER DIODES AT
A REVERSE BIAS OF 10 VOLTS, FOR
DIFFERENT METALS

RESISTANCE	METAL
10^9	Au, Sb, Sn, Cr, Pt Al, Pb, Ag
10^8	Bi, Zn
10^7	
10^6	Pd, Cu, Cd Fe, Eu, In
10^5	
10^4	Ho Ni
10^3	Mg, Dy, Sm
10^2	Mn

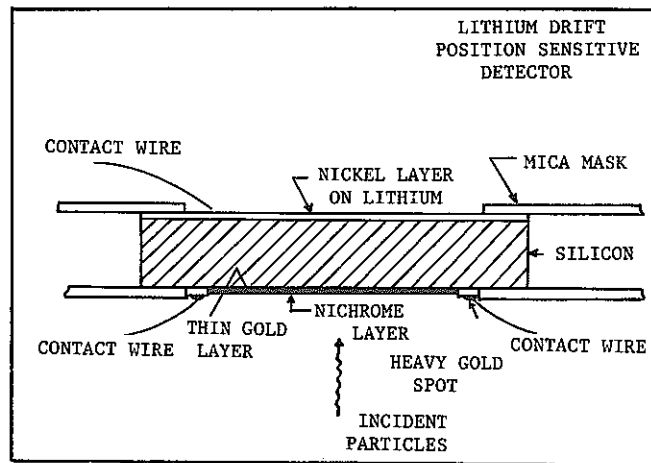


Fig.10 A cross section of a completed lithium-drifted position sensitive detector.

2-3 チェッカーボード方式

チェッカーボード方式とは、検出器の形状が一見チェス板に似ているところからつけられた各称であり、本来はFig11. に示す様な形式の短冊型の電極を直交させて多数の検出部を構成する方法に対してつけられたものである。

ここでは、さらに広い意味に解釈し単一の一樣検出体（半導体検出素材）を、電極等の形式により多数の小検出器に分割し、多検出器を製作しているものすべてを含むものとする。この中には、上でもふれた、短冊状の電極を半導体素材の両面に直交する様に配置し電極の交差部分が1つの検出器をつくる形式のもの（短冊型電極方式）と、CCDデバイス）等を利用し、電極それ自身が小さな長方形あるいは正方形をしているものについて個々別々に信号を収集する形式にしたもの多半導体検出器方式（マルチブロックセンシング方式）の2種類がある。

2-3-1 短冊型電極方式

ここでは、W. K. HOFKER. et al²⁰⁾ の論文と、M. S. GERBER. et al²¹⁾ の論文を取り上げる。

短冊型電極方式の半導体検出器は、Fig11. のように、半導体検出器の電極をシリコンウェハの上面にX方向に一定巾、一定間隔でつくり、シリコンウェハの下面には上面とは直角・Y軸方向に矢張一定巾の電極をつくるというものである。この場合に上下それぞれの電極により区分された正方形の領域が1つ1つ検出器として動作する。それぞれの小区画で発生した電離電子及びホールのペアは上下の電極に収集され、それぞれのX方向、Y方向用のプリアンプへと導かれる。基本的には、それぞれの電極について1個ずつの電子回路をつくるので、電極数に等しい数の回路が必要となる。

この方式における問題点は、1つには、電子回路の簡略化を上げることができる。また、デジタル化された信号はX方向、Y方向別々であるから2次元の情報処理機能を持つ処理装置が必要になる。もう1つの問題としては位置決定精度に影響を及ぼすクロストーク（電極間での信号の干渉）がある。実際に検出器を製作する上から言っても、素材自身すべて空欠乏状態としておけば問題ないが、素材自身の抵抗の問題、蒸着物質の問題等いくつかの難点が存在する。

W. H. HOFKER. et al²¹⁾ の場合には素材としてnタイプのシリコンウェハ

を用い、上下電極として金蒸着及びアルミ蒸着を用いている。蒸着間隔は、 $100\ \mu\text{m}$ のワイヤーを用いた蒸着用マスクで決定し、直径 $1.6\ \text{mm}$ の検出体の中に12本の電極をつくっている。その結果、 $1.37\ \text{mm} \times 1.37\ \text{mm}$ の有感検出器が88個できている。

(Fig12)これらの検出器からの読み出し用として、リングコアトランス及び電流有感型増幅器を用いている。これによりクロストークを低下させる効果があるとしている。Fig-13はその概念図で、この場合には dE/dx に関する情報を取り出すために、下部に電荷有感型の増幅器を接続し信号を処理する仕組である。X・Yの読み出しにはコーダレジスタを用いている。

M. S. GERBER. et al²²⁾はチェッカーボード方式の検出器としてFig14に示すものを製作している。彼らの場合は特に位置信号の読み出しについて苦心している。Fig14でわかるとおり、短冊型電極のそれぞれの間を外部抵抗を取り付け、一種の抵抗性電荷分割方式としているのが特徴である。彼らは外付けの抵抗配線について、一様電荷分割方式と同様の分析を試みている。

外付け抵抗をもうけることにより信号処理を行なう回路系を簡略化することが可能となり、短冊型電極方式の安定した性能と合わせて利用しやすい検出方式となることが予想される。一般的にも、それ程早いパルスが必要でなく、位置分解能も $1\ \text{mm}$ 程度で良いという場合には良く利用されている。この場合に位置決定精度を支配する要因としては2通りを考えることができる。第1には、短冊型電極の幅が位置決定精度の主要な因子となるが、2番目の要因として考えておかななくてはいけないのは、抵抗性電荷分割における熱雑音の問題で、電極及び電極間隔が狭くなるにつれて重要な問題となってくる。2つの要因は条件により大小が異ってくる。

2-3-2 多半導体検出器方式

半導体を素材として用い、かつ検出器が多数の小検出器から構成されている位置検出器の例として、半導体素材に多数個のダイオードを並べて用いるものが考えられる。W. L. BROWN²³⁾らによるビデコン方式のものとC. W. TALOR²⁴⁾あるいはE. I. Gordon²⁵⁾によるCCD方式によるものがある。

W. L. BROWN²³⁾らは、Fig15, Fig16にみられるような、TVカメラ用に開発された多数個のダイオードの集合体による粒子の位置検出を試みた。(Fig16-1, 16-2)それは $10\ \text{ohm-cm}$, nタイプのシリコンウェハーで約 $1/2$ インチ四角のものに、

70万個のシリコンダイオードをつくったものである。ダイオードのリーク電流の関係から300Kev以上のエネルギー付与のある粒子が検出可能とされている。実際の荷電粒子の場合1Mev程度のエネルギー付与のある粒子に対して、30 μ m程度のスポット径として観測されている。シリコンダイオードの直径は7 μ mであり、位置決定の精度は30 μ m程度と結論されている。しかし電子・ホール拡散の問題、エネルギー付与に対する定量性の問題、つまりは信号の取り出し方式に対する問題が多く利用に際しては十分な注意が必要と考えられる。

次にE. I. GordonのCCD²⁴⁾(Charge Coupled Device)に関する調査を紹介する。この場合は、基本的にはビデコン方式とはデータの読み出し方式が違うだけと考えてよい。(Fig16-3)ビデコン方式では電子ビームによるスキャンを行っていたのに対し、CCDの場合はシフトレジスタとしてデータの読み出しができる点を利用して、アナログ量のシフトレジスタとして利用し後にADコンバータ等でデータを収集するという方式が考えられている。

この文献では実際の試験が行なわれていないのでなんとも言えないが、CCD中の電荷転送損失等を考えると定性的な性能はまだしも定量的にどの程度の性能が得られるかは疑問な点が多い。

以上ビデコン方式及びCCD方式について紹介したが両方式とも、電子ビームのスキャン時間、シフトレジスタの読み出し時間を考えると入射粒子に対するリアルタイム処理ができないという問題、あるいは有感層をそれ程厚くとれない(数百ミクロン程度)という問題もあり利用されている例は少ないのが現状である。

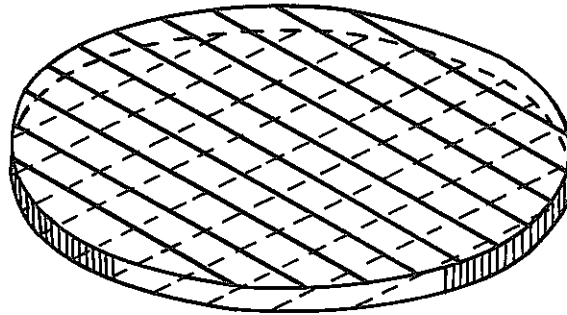


Fig.11 Semiconductor slice with perpendicular electrode patterns on front and back.

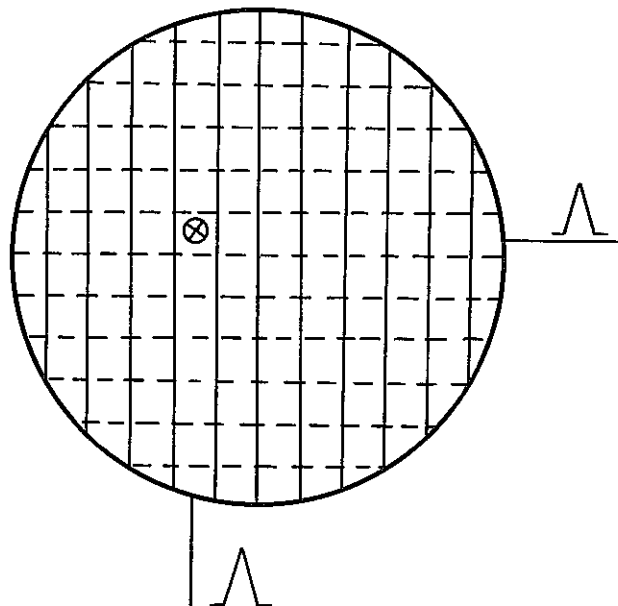


Fig.12 Position of incidence indicated by electrode pulses.

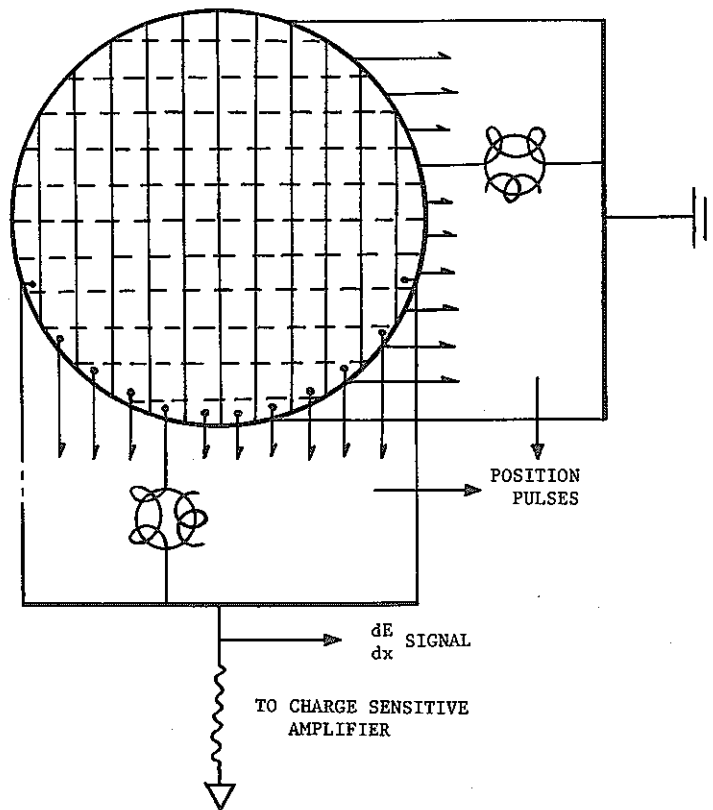


Fig.13 Principle of the read-out system.

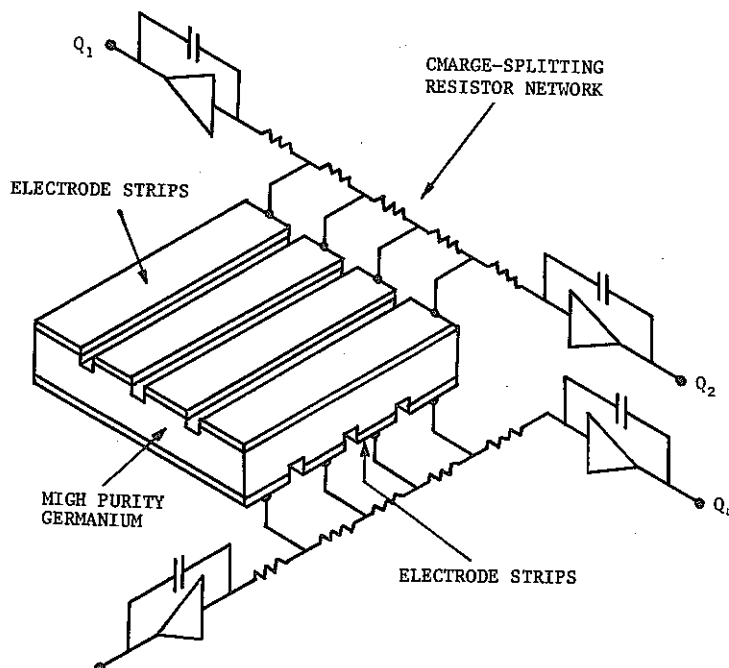


Fig.14 Schematic of the orthogonal strip, charge splitting detector.

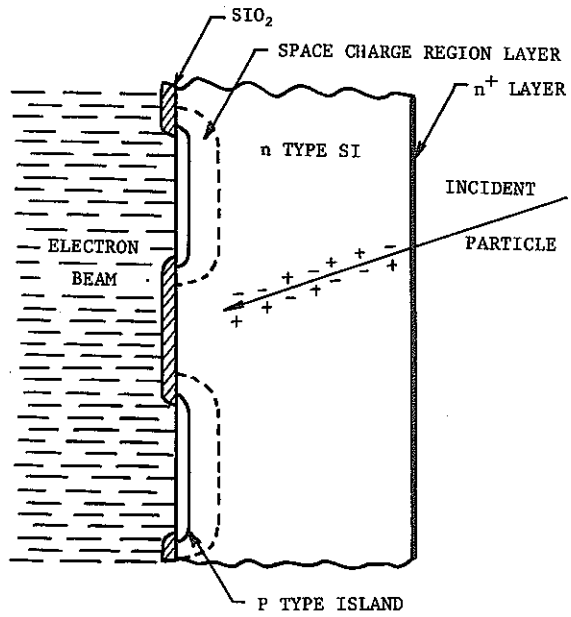


Fig.15 The ionization track of a charged particle. Collection of holes by the diodes is primarily by diffusion with a characteristic time less than 10^{-7} sec.

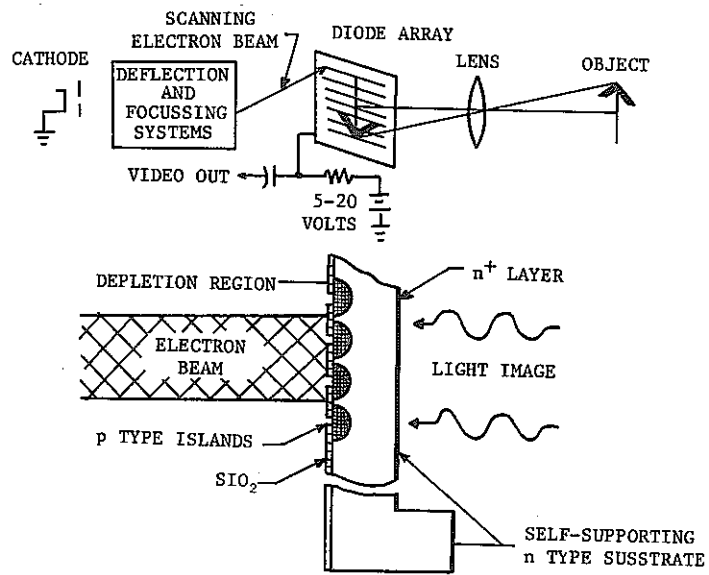


Fig.16-1 A schematic of the vidicon-type read out system and a section of a multiple diode array.

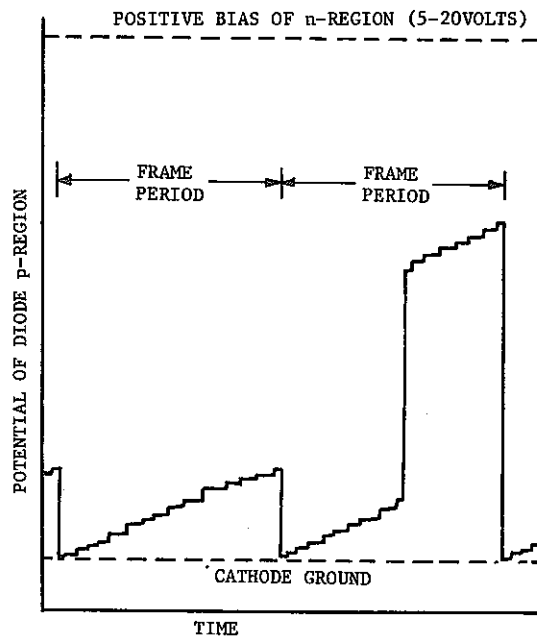
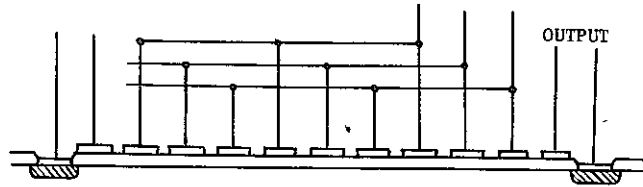


Fig.16-2 Schematic indication of the potential of a single diode as it is discharged by leakage current in two scanning frames and additionally in one frame by a charged particle at t₁.



THREE - PHASE CCD

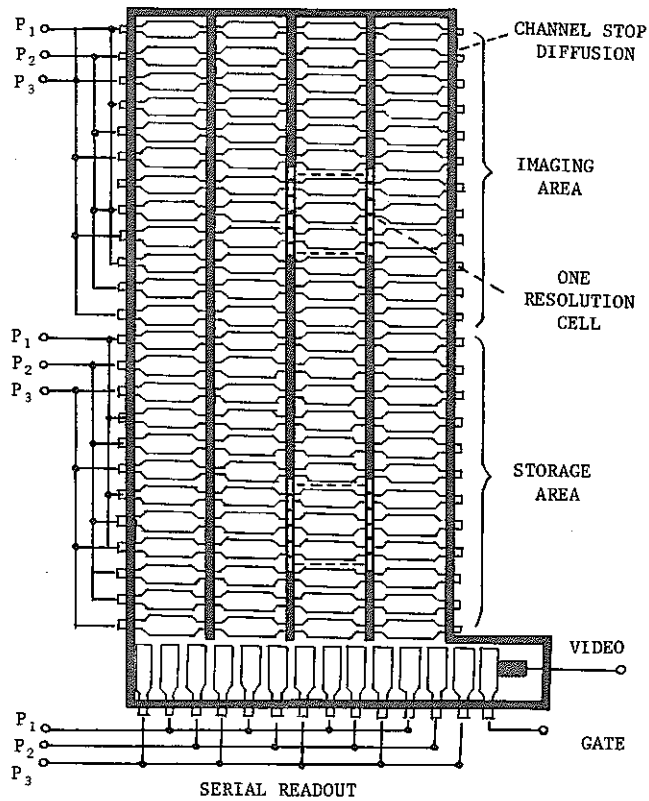


Fig.16-3 CHARGE COUPLED AREA IMAGING DEVICE
FRAME TRANSFER PRINCIPLE

3. 比例計数管

比例計数管を用いた放射線位置検出器は、原理的には半導体位置検出器とよく似た性格を持っている。これについては半導体検出器の項でも述べたが、似ている内容として一次元検出器の場合は Fig17 に示すように、検出部が信号を収集する抵抗性電極と、それに電荷収集用のバイアス電圧を加える電極との2電極から構成されているという点について同一構造というわけではない。つまり半導体検出器の場合は、空乏層の部分に半導体素材を用いているし、検出器へのバイアス電圧が低く、また平行板電極を用いることにより単なる電離箱として動作させているにすぎないからである。それと比較して比例計数管の場合は、バイアス電圧を上げ、細い中心電極を用いることにより電子雪崩による内部増幅を行なっているという点に重要な違いが存在する。この差異は、後に述べるが、両者の位置分解能の性格に重要な違いを生じさせる原因となっている。

位置分解能に重要な違いを生じさせる原因となっている。

比例計数管による位置検出器は、半導体検出器のものと同様に電荷分割方式及び立ち上がり時間方式を利用することが可能だが、半導体検出器の場合 2-2-1 で紹介した電荷分割方式を利用するケースが多いのに反し、比例計数管の場合には、立ち上がり時間方式を用いている例が多い。そこで以下、比例計数管における立ち上がり時間方式の原理及びその問題点について述べ、さらに比例計数管を利用したチェッカーボード方式とも言える多線型比例計数管について述べる。さらに多線型比例計数管の場合は中心電極間をドリフトスペースとして使用するドリフトチェンバーが実用化されているのでこれについてもふれることにする。

3-1 立ち上がり時間方式

3-1-1 立ち上がり時間と位置の関係

ここでは主に、C. J. BORKOWSKI et al^{31), 32)}によるOak Ridge National Labでの実験に沿って説明する。

Fig17は、BORKOWSKI et al, が一次元放射線位置検出器の説明に使用しているモデルである。電荷分割方式の動作を解析するときと同じように、検出器全体に抵抗Rと容量Cが分布しているものとするが、この比例計数管の場合には中心電極が単位長さ当たり C_0 の容量及び R_0 の抵抗を持っているとする。これを長さLの1線R-C分布伝導線と見做し、両端に $Z_c (= \infty)$ のインピーダンスが

結合されているとして、初期にQ(s)の電荷が検出器の左端よりXの位置に入射したと仮定して計算している。そのときの出力電圧は、

$$V_{(x_1)}(s_1, x) = Q(s) Z_c \frac{\cosh n(L-x) + Z_o Y_c \sinh n(L-x)}{(Y_c Z_o + Y_o Z_c) \sinh nL + 2 \cosh nL} \quad (11)$$

$$V_{(x_2)}(s_1, x) = Q(s) Z_c \frac{\cosh nx + Z_o Y_o \sinh nx}{(Y_c Z_o + Y_o Z_c) \sinh nL + 2 \cosh nL} \quad (12)$$

ここで $n = (R_o s C_o)^{\frac{1}{2}}$

$$Z_c = 1 / Y_c$$

$$Z_o = 1 / Y_o = [R_o / (s C_o)]^{\frac{1}{2}}$$

L = 検出器全長

x = 入射位置

Q(s) = 初期電荷

となる。この場合電荷分割機構の説明からもわかるように、出力パルスの立ち上がり時間が放射線の入射位置によって異ってくる。そこで次に電圧パルスの立ち上がり時間を見る手法としてしばしば使用されている方法の1つを例にとって説明する。それはパルスを2回微分(+1回積分)のフィルターを通過させ、出力パルスの立ち上がりからゼロ交差点までの時間を測るという方法である。この方法を利用したとすると、出力パルスのゼロ交差点までの時間 t_{x_1} t_{x_2} は近似的に

$$t_{x_1} = K - \frac{1}{2} R_o C_o (L-x)^2 - C_c R_o (L-x) + t_o \quad (13)$$

$$t_{x_2} = K - \frac{1}{2} R_o C_o x^2 - C_o R_o x + t_o \quad (14)$$

t_{x_1} :

t_{x_2} :

K : フィルター, 検出器の定数

t_o : 検出時間

CC : 電荷有感増幅器ロードインピーダンス

と表わされる。ここでKはフィルターの特性和検出器の長さに関係する定数である。

次に t_{x_1} 及び t_{x_2} の差を考えると。

$$\Delta t = t_{x_1} - t_{x_2} \cong R_o(C_o L + 2C_c) x - \frac{1}{2} R_o C_o L^2 + R_o C_o L + t_d \quad (15)$$

となりこの時間差について、 t_{x_1} からの時間を t_d だけ遅延させてやることにより、

$$\Delta t = R_o(C_o L + 2C_c) x \quad (16)$$

という関係が得られる。これは時間差 Δt と、入射位置 x との直線関係である。

ここで x の係数

$$K_s = R_o(C_o L + 2C_c) \quad (17)$$

は、位置検出の感度を表わす。そこで R_o と Δt 、 x の関係ということから考えると

$$\Delta t \propto R_o x \quad (18)$$

となり、 R_o を大きくとることにより位置の決定精度を上昇させることができると推測される。

3-1-2 位置決定誤差

次に、立ち上がり時間方式による位置決定の場合の位置決定誤差についてまとめる。矢張り、C. J. BORCOWSKI et al^{31), 32)}の論文を参照すると、電氣的雑音の寄与は少なく、熱雑音の主成分であると考えることにより、位置のゆらぎ Δx が、

$$\Delta x \propto \frac{C_{GT}}{Q} \times \left(\frac{KTR_n}{\pi R_o C_o} \right)^{\frac{1}{2}}$$

と表わせることがわかる。ここで $V_i \cong Q/C_{GT}$ 、 Q は電子雪崩によって生じる総電荷である。このことから、位置決定精度を向上させるためには、 Q を増せば良いことがわかる。 Q を増すということは、とりもなおさず、比例計数管の内部増幅度を上げるのだが、当然のことながら内部増幅度を大きくとるために高圧を上昇させすぎると、イオン増殖により生じた空間電荷のために初期電離数と出力電圧の比例性が悪化してくる。この場合のイオン対数の上限としては $10^8/E$ という値が得られている。(アルゴンの場合で $\sim 4 \times 10^6$ 個位、 E は1回のイオン化でイオンが

失う平均エネルギー) ここで浮動容量を15 pF程度と仮定すると、出力信号の上限は～40 mV程度となる。さらに比例性を無視して絶縁破壊ぎりぎりの電圧を印加すれば100 mV程度出力電圧まで可能だとしている例もある。

3-1-1, 3-1-2 が一様伝達線方式において、出力パルスの立ち上がり時間の差異から放射線の入射位置を決定する方法の概要である。次に比例計数管が半導体検出器と異っている点として、電場の問題があるとしたが、この点について考えてみる。半導体の場合には平行平板型電離箱とみなせるが、比例計数管においては、中心電極付近の電場が強くなる。これは設計の仕方によっても大幅に変化するので、設計に際しては形状の条件を明確にする必要がある。例えば電極が平板電極に対して対称であるのか、あるいは非対称なのかとか、外側電極を平板にするのかどうかといった問題である。Fig19には、中心電極の配置の仕方に関する例をいくつか上げてある。ここで、平行平板型電極のの中央部に上下対称になる様に中心電極を配置するとしても、Fig19におけるパラメータ

- a : 電極直径 μm
- s : 中心電極の間隔 mm
- L : 外側電極と中心電極の距離 mm

を変化させることにより電場の状況は変化する。この例をFig20にあげる。

Fig20ではSとLを2通り変化させたものについて、中心電極付近の拡大図及び全体図という2種類をあげている。(a), (b)及び(c), (d)を比較することにより、(c), (d)を比較することにより、(c), (d)の組が、電極間隔を相対的に広くすることにより中心電極付近の電位勾配が急になっているのがわかる。

ここで比例計数管の位置分解能を左右する要因についてまとめてみる。

- 1) 中心電極直径 d
- 2) 中心電極間隔 S'
- 3) 平板電極間隔 L
- 4) ガス増幅度 A

のそれぞれの因子について考える。1)の中心電極直径は機械的強度から言って可能な限り細くすることによりガス増幅度Mを上昇させることができるのでそれ程問題はない。現在のところ20 μm 程度のもものが多く用いられている。また平板電極間

隔Lも短くすることにより \sqrt{L} で増幅度Aを上昇させることができる。ところが中心電極間隔S'に関しては対立する2つの条件を考慮する必要がある。第1に電極間隔S'を小さくすることは、電極線一本の受け持つ有効体積の減少を意味するから、その意味からS'を小にするにこしたことはない。(1mm以下の間隔にする場合には工作上的問題がでてくる。)ところが、 $y \geq S/2$ では電場は平行平板電極のそれに近くなり、それ以内での電場

$$V \cong \frac{g}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{\pi}{s} r\right)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

x : 全中心線を通り紙面上の軸上の位置

y : xに直角である中心線を通る軸上の位置

が中心電極1本の電場とほぼ10%以内で近似できるのに対して、印加電圧Vの相当部分を降下させてしまう。つまり中心電極の間隔をS = 3mm, 2mm, 1mmとするに従って、印加電圧を1 : 1.3 : 2.2と変化させなければ同じ増幅度を得られないことになる。

以上の条件の他に混合ガスの条件もあるが、詳細は関係論文31), 32)を参照されたい。

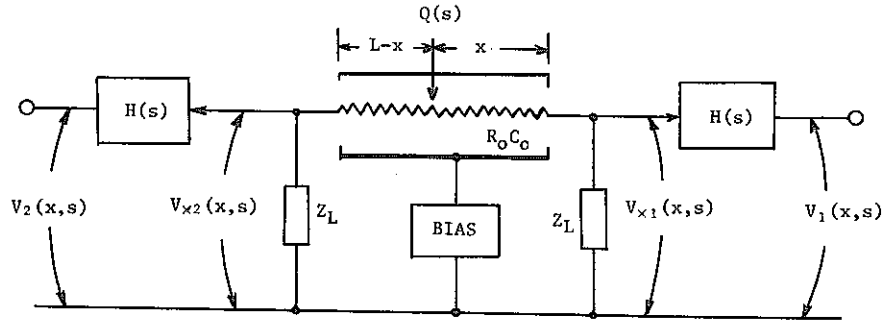


Fig.17 Basic configuration of the position-sensitive detector.

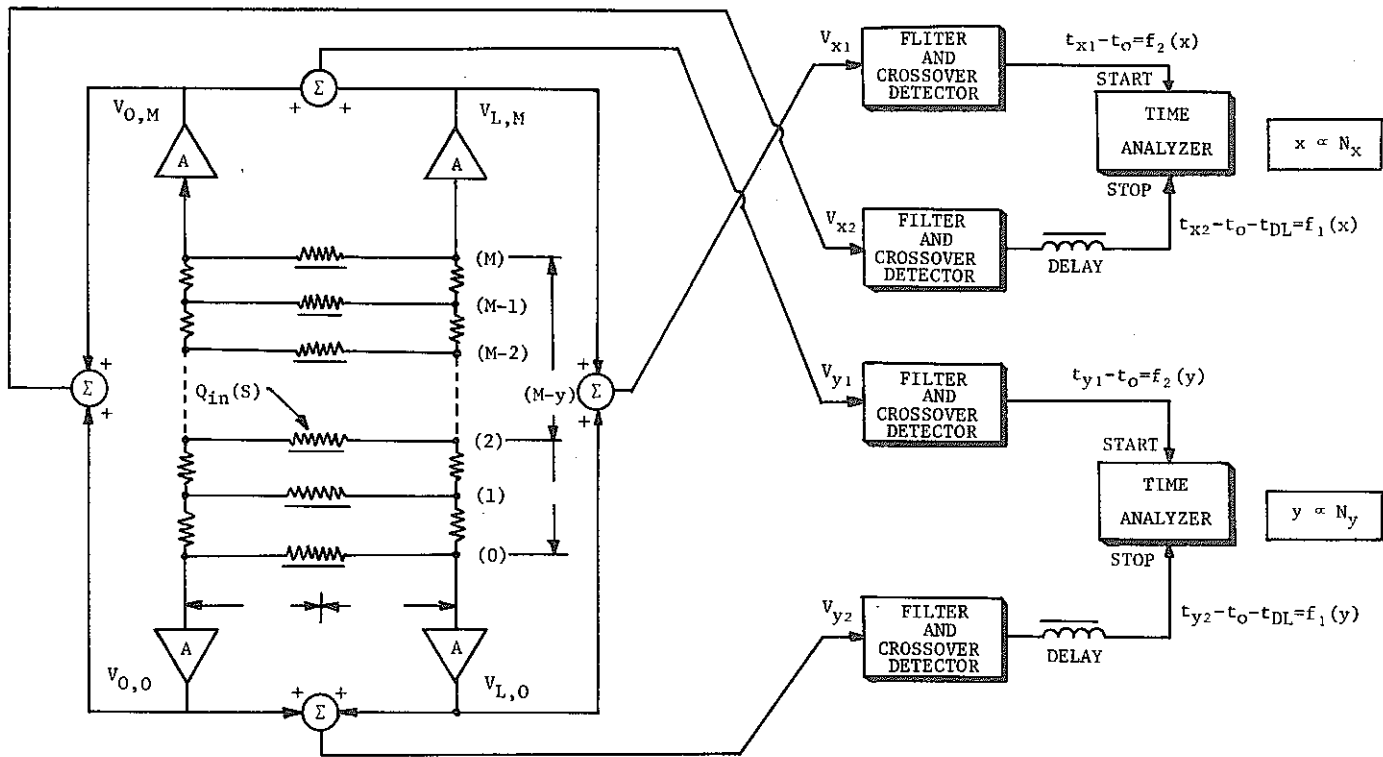


Fig.18 Signal processing circuit for the two-dimensional position-sensitive detector.

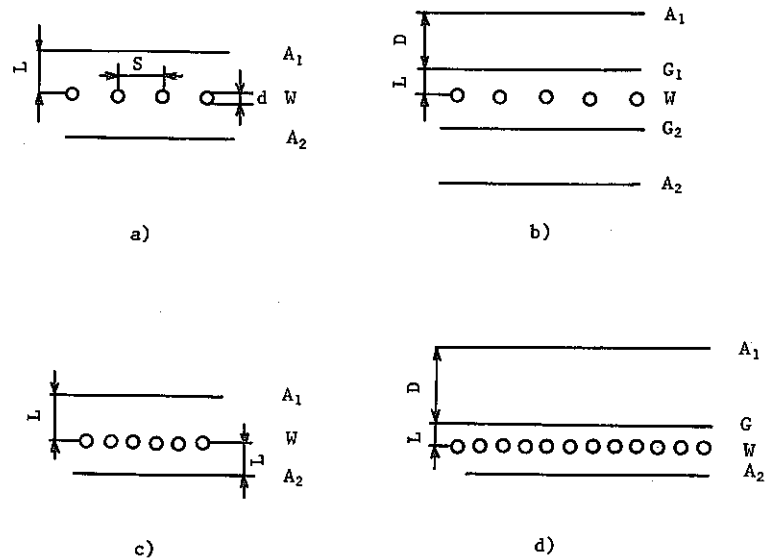
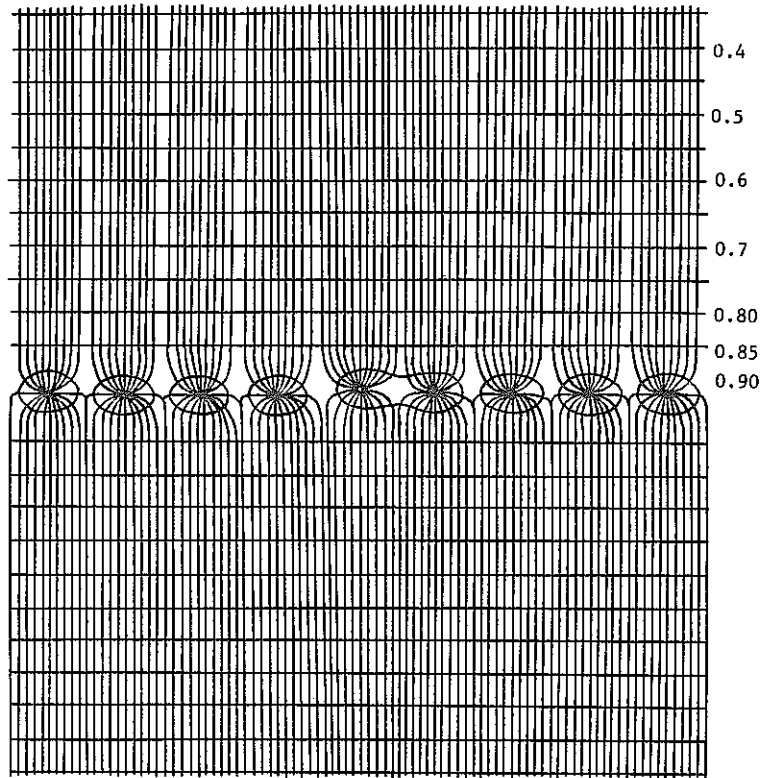
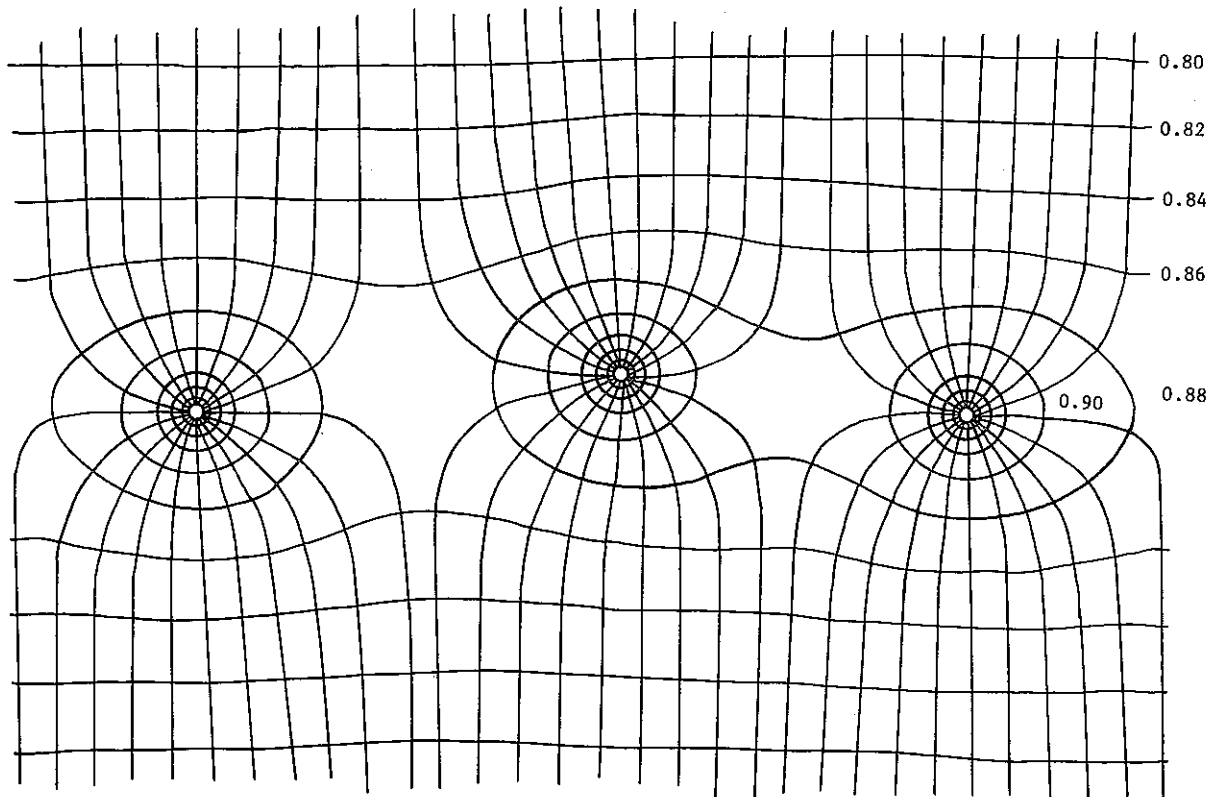


Fig.19 Construction parameters of the chambers used in this work:
 a) the symmetrical bi-electrode chamber, b) the symmetrical bi-triode chamber, c) the asymmetrical bi-electrode chamber, d) the drift chamber. The outer electrodes A_1A_2 are made of mesh of $50\mu\text{m}$ stainless steel, with 82% transparency. The grids G are made of mesh of 82% or 90% transparency, or of wires of 0.1mm, 1mm apart, parallel or orthogonal to the central wires W .

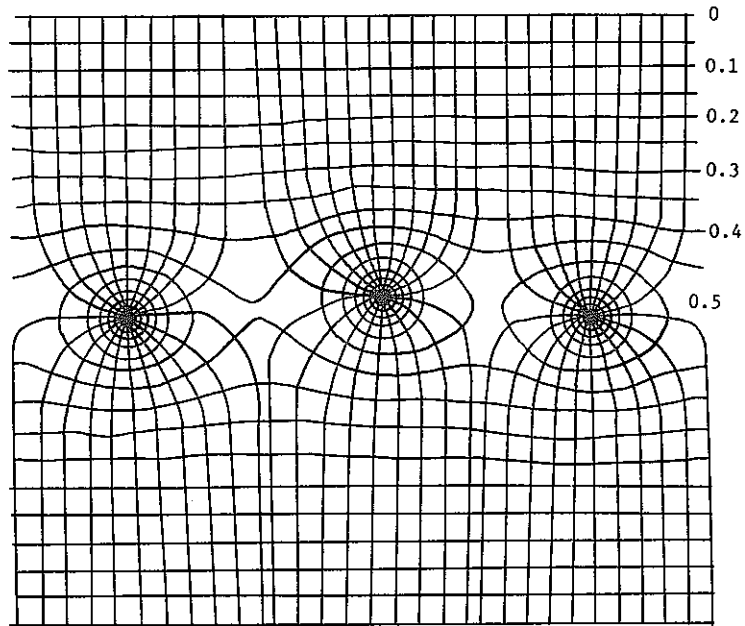


(a)

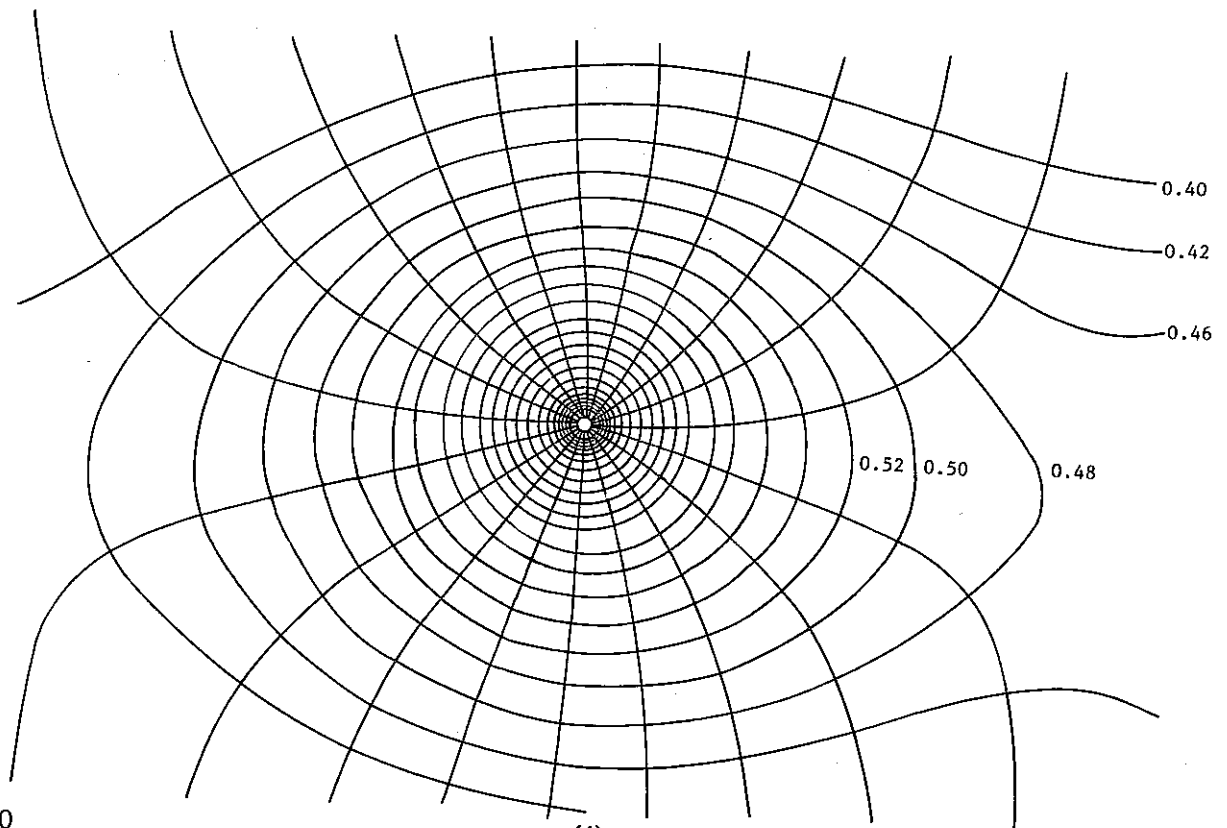


(b)

Fig. 20



(c)



(d)

Fig.20

Equipotentials in a wire chamber. The distributions have been obtained by solving the Laplace equations. Potential 1 on the wires, 0 on the outer electrodes. (a) Wires of $40\ \mu\text{m}$, $s=1\text{mm}$, $L=8\text{mm}$. One wire is displaced by 10% in the X and Y directions. (b) Same parameters. Enlarged view of potentials around the displaced wire. (c) Wires of $40\ \mu\text{m}$, $s=3\text{mm}$, $L=4\text{mm}$. One wire is displaced by 10% in the X and Y directions. (d) Same parameters. Enlarged view around the displaced wire.

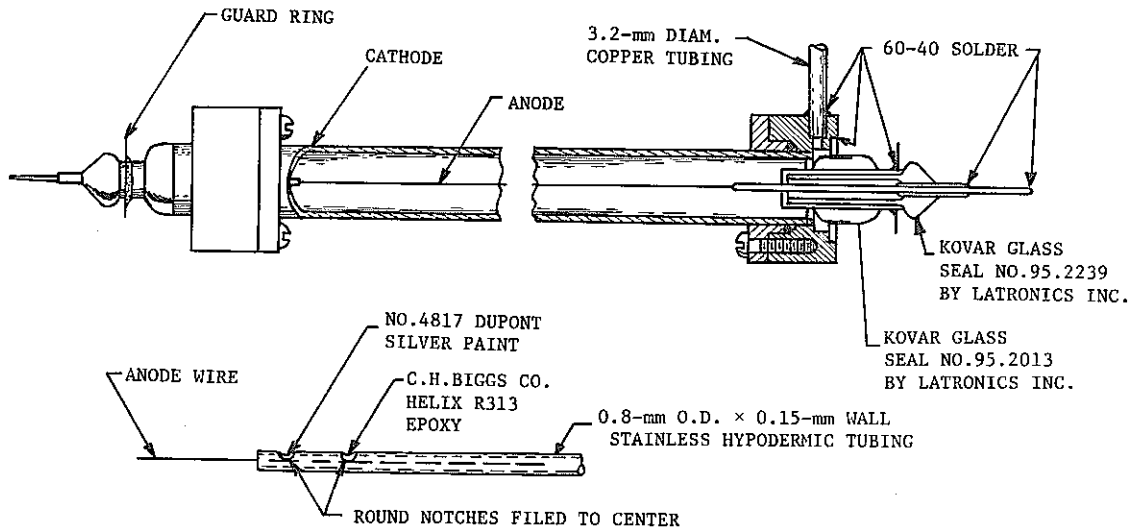


Fig.21 Construction details of a linear position-sensitive proportional counter used in laboratory experiments (courtesy of R. E. Zedler, ORNL).

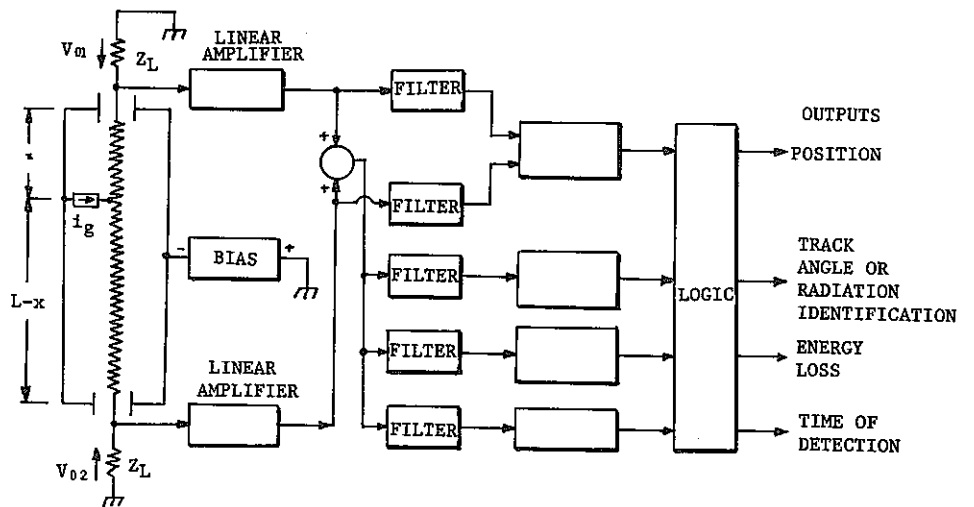


Fig.22 Signal processing circuit for a typical linear PSPC.

Table 2. Available anode and cathode resistance values and materials used in the experimental PSPCs.

Wire resistivity (Ω /mm)	Material	Diameter (μ)	Source
8000	carbon ^a	25	Zvanut Co. ^b
1500	carbon ^a	75	Zvanut Co.
1000-8000	carbon ^c	25	Zvanut Co.
50-1500	carbon ^c	75	Zvanut Co.
30	Moleculoy	7.3	Molecu-Wire Corp. ^d
18-6	304 SS	7.3-13	California Fine Wire Co. ^e
0.3	Nichrome	75	Sigmund Cohn Corp.

^a Pyrolytic-carbon-coated quartz fiber.

^b Carl M. Zvanut Co., 14 Chetwynd Road, Paoli, PA 19301.

^c C.J. Borkowski and J.A. Williams decreased the fiber resistance by resistive self-heating the pyrolytic carbon film in an atmosphere of propylene at 4-cm Hg pressure, thus depositing additional carbon and increasing the pyrolytic carbon film thickness.

^d Molecu-Wire Corp., P.O. Box 495, Farmingdale, NJ 07727.

^e California Fine Wire Co., P.O. Box 446, 338 S. 4th St., Grover City, CA 93433.

Sigmund Cohn Corp., Mt Vernon, NY.

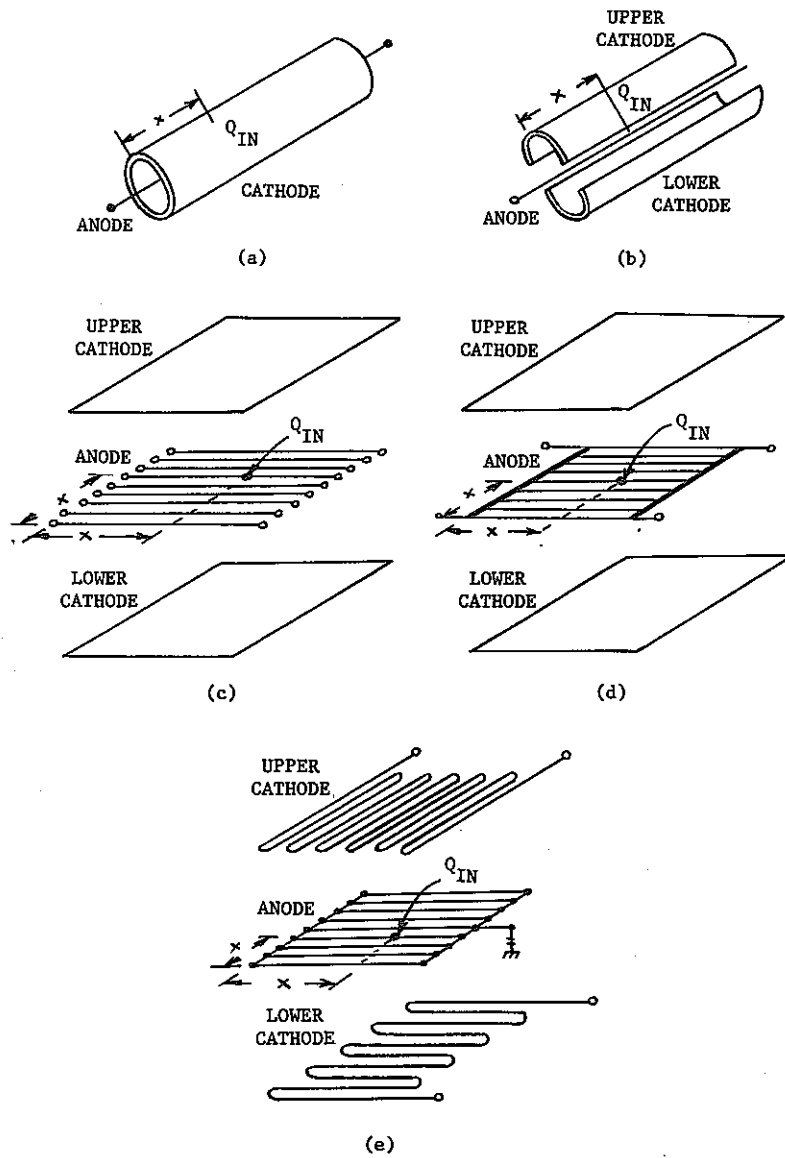


Fig.23-1 Diagram of the principal steps in the evolution of an area PSC. (a) Linear PSC, (b) Linear PSC with split cathodes, (c) multianode area PSC, (d) multianode area PSC with four anode output connections, (e) multianode, all-metal wire area PSC with grounded anode two orthogonal cathode RC lines, and continuous wire construction of the anode and cathode planes.

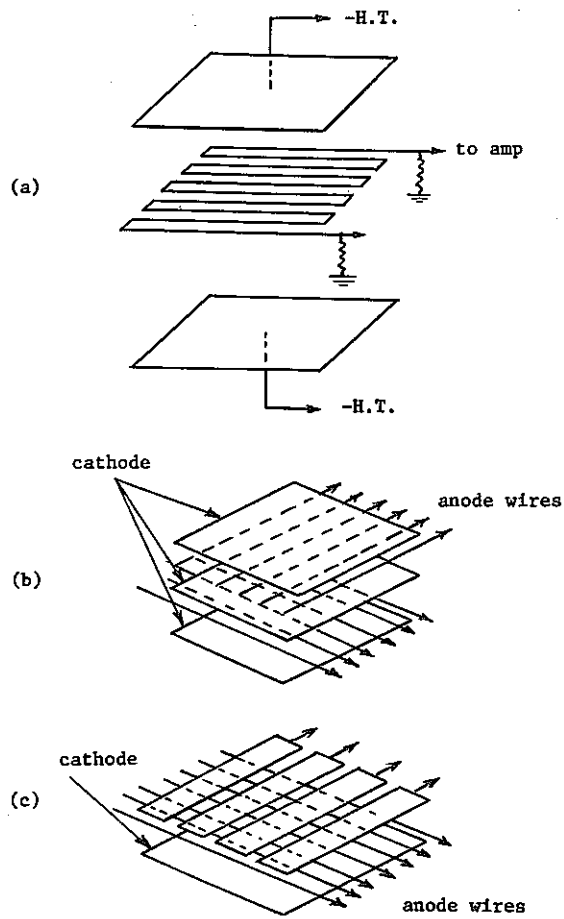


Fig.23-2 Diagram of anode wires.

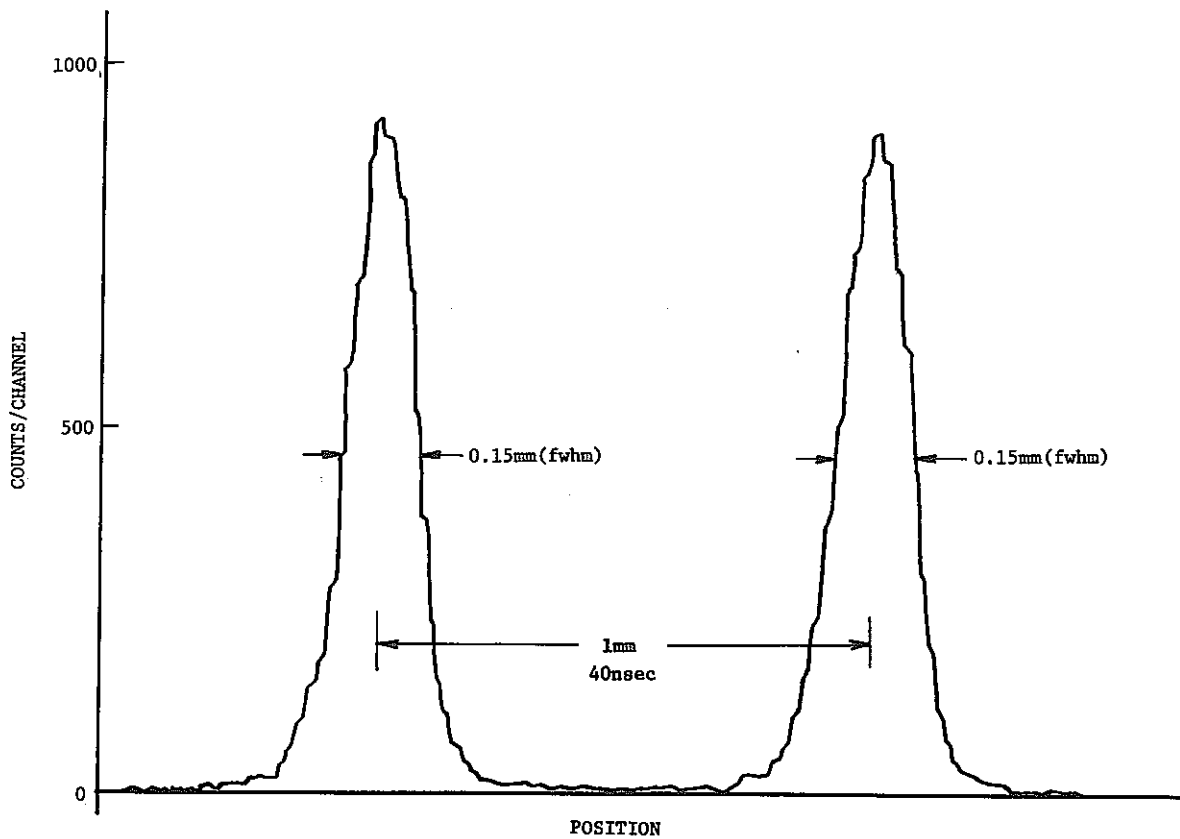


Fig.24 Spatial uncertainty for collimated ^{210}Po alpha particles obtained with a 200-mm-long proportional detector.

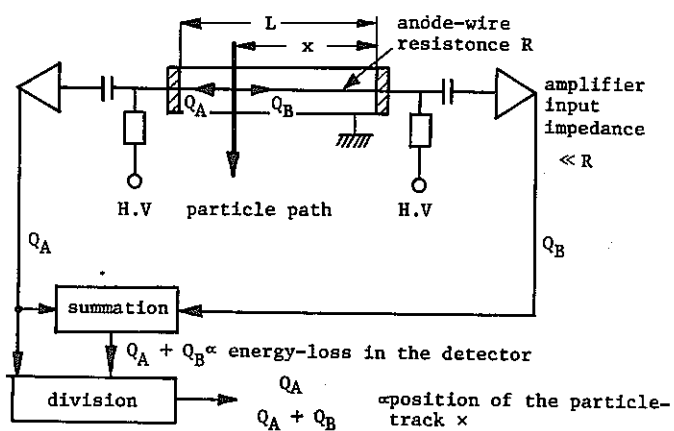


Fig.25 1. Principle of position measurements by the charge-division method.

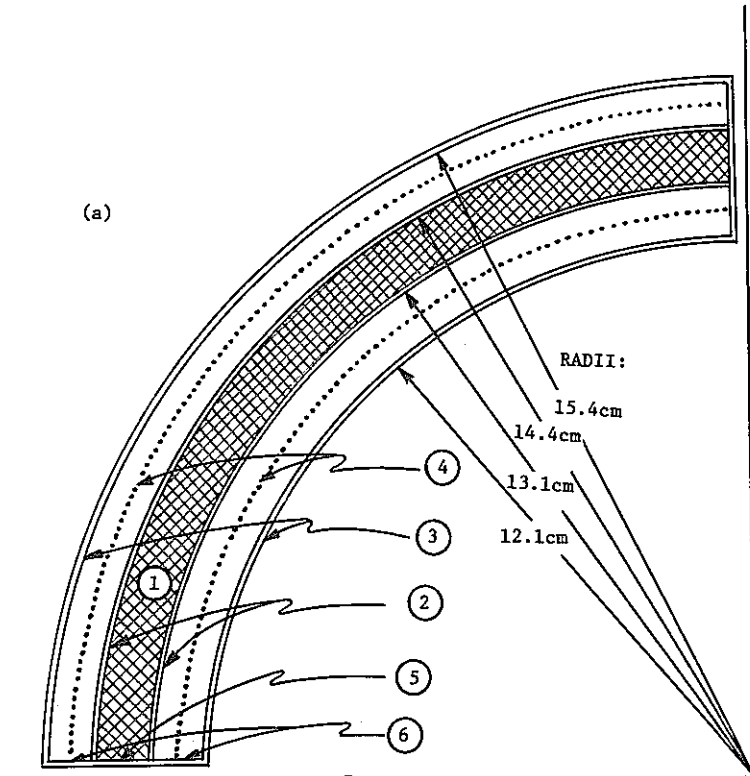


Fig.26 1. (a) Cut of double chamber orthogonal to cylinder axis:
 (1) styrofoam support, (2) 0.25mm aluminized mylar cathodes,
 (3) 0.8mm aluminized lucite windows, (4) sense wire planes,
 (5) phenolec strip, (6) 0.8mm lucite side windows.

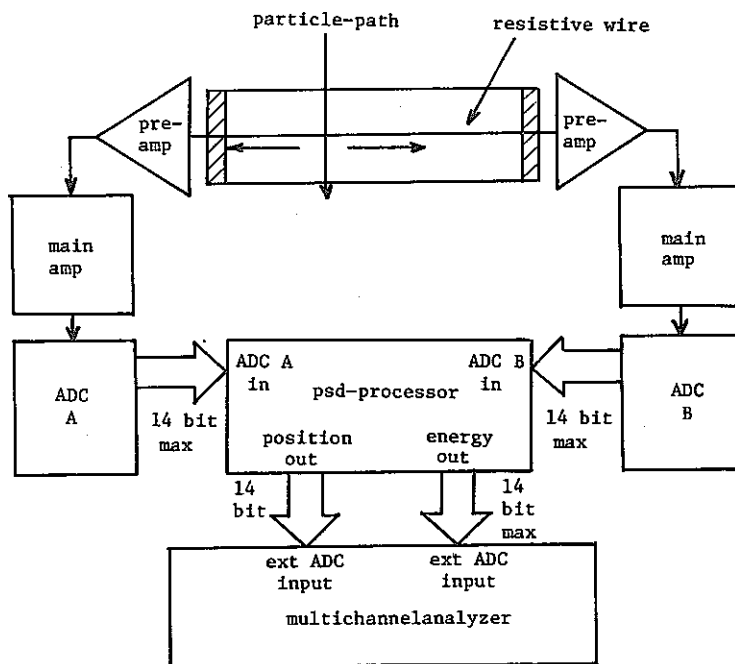


Fig.27 Block diagram of a system using the digital processor.

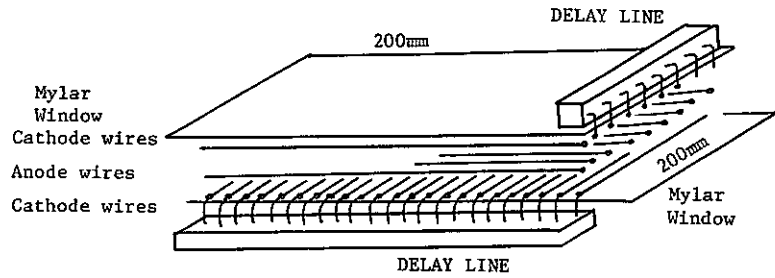
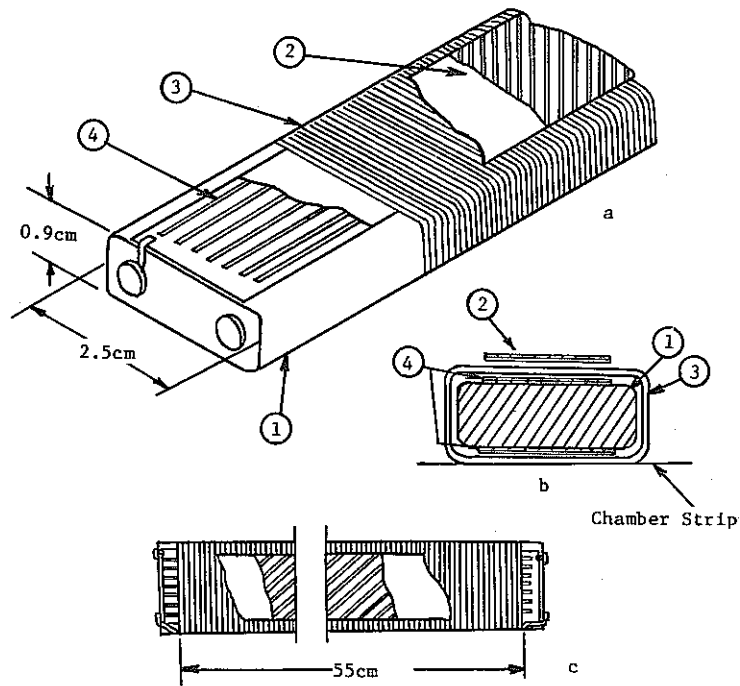


Fig.28 Two-dimensional position-sensitive detector.



- 1 Plastic Core
- 2 Flating Metal Strips On Mylar Base: Strips = 1.8mm Wide; Gaps = 0.3mm Wide; Mylar = 25 Microns Thick
- 3 Winding = #30 Formvar Wire
- 4 8 Copper Strips On Mylar Base: Strips = 1.8mm Wide; Gaps = 0.3mm Wide; Mylar = 25 Microns Thick

Fig.29 Details of rectangular cross-section delay line with floating patch, phase-compensation.

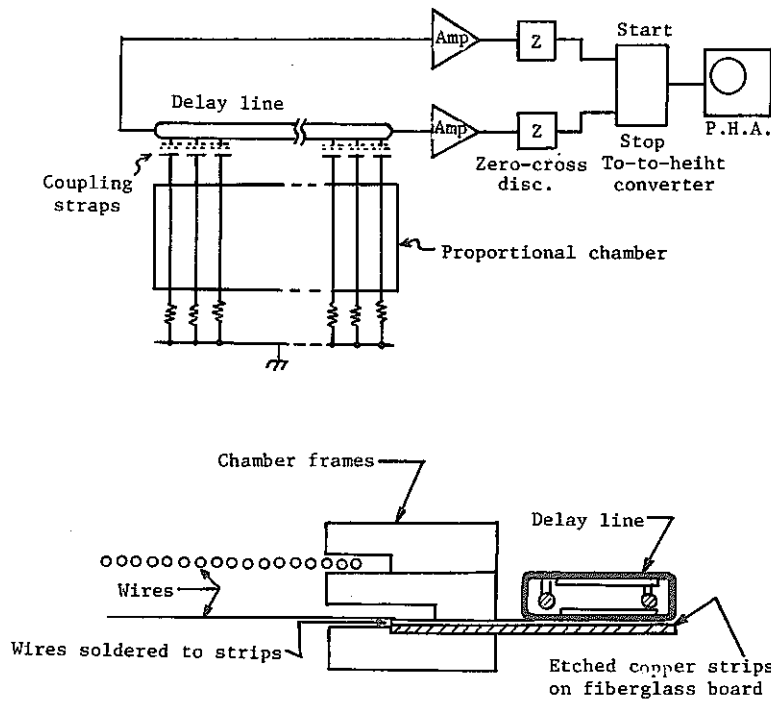


Fig.30 1. (a) Basic block diagram of the proportional chamber and associated electronics used for the pulse time determination. (b) Cross section of chamber showing rectangular delay line, capacitatively coupled to chamber leads.

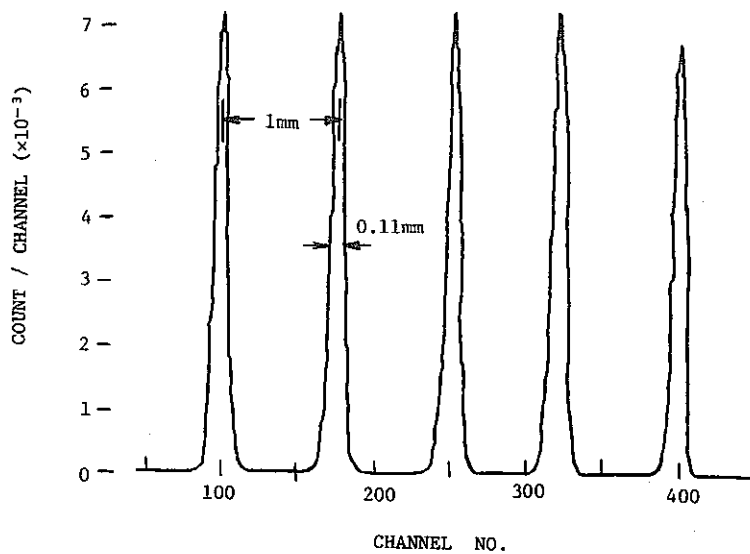


Fig.31 Showing the spatial resolution of the position sensitive counter operated with xenon 90%+carbondioxide 10% at 2280 torr. Space-to-time conversion gain 10 ns/1.7mm. Sensitive length 30mm. Probing X-ray beam width 50 μ m.

3-2 比例計数管位置検出器の例

比例計数管を利用した位置検出器としては、先に述べた様に、

中心線に沿った方向の位置決定をする場合

- 1 時間で決定する方式^{31), 32)}
- 2 電荷で決定する方式^{31), 32)}

の2種類の方式が考えられる。またこれらの応用としてディレイラインを積極的に用いている例もある。^{36)~40)}

心線と直角方向に対しては、

- 3 多線式にして空間を分割する方式^{26)~33)}
- 4 中心線間をドリフトスペースとする方式^{41)~47)}

の2種類が考えられるが、これらは、それぞれ多線式比例計数管方式、ドリフトチェンバー方式と呼ばれ実際に利用されている。この中で、1)の時間で決定する方式（立ち上がり時間方式）と3)の多線式比例計数管方式とは併用されている例が多く、さらに4)のドリフトチェンバー方式をも併用されることがある。そこで、以下に立ち上がり時間方式を用いた多線式比例計数管を中心に実際の例を紹介する。

3-2-1 立ち上がり時間方式

C. J. BORKOWSKI et al^{31), 32)}による論文を紹介する。彼らのもっぱら、比例計数管を利用した立ち上がり時間方式の位置検出器に取り組んでいる。

単一の中心線を用いての一次元位置検出器の場合には、Fig21 に示す形式の計数管を使用している。図からもわかるとおり検出器の形状は一般の比例計数管と同一である。しかし位置検出を行なうために中心線に抵抗線を用いている。抵抗線としてはTable 2 に示すものを用いている。検出系全体はFig22 に示すように、中心の抵抗心線の両端から信号を取り出しその立ち上がり時間を測定する形式になっている。図中でfilter とあるのが、R-Cによるフィルターで、2重微分を行なっている。その後にはロジック信号処理系が接続されており、位置、エネルギー損失等の情報を読み出すことができる。

次に位置検出を一次元から2次元に拡張する場合には、検出器の組み合わせ方により何種類かの場合が考えられるので、種類別に整理すると

- 1) 多線式比例計数管1枚で行なうタイプ

ドリフトチェンバー方式を併用するもの

一様伝達線方式を併用するもの

2) 多線式比例計数管 2 枚で行なうタイプ

という場合が考えられる。彼らは実際的なモデルとして Fig23-1 に示すものを考えているがこの中で c), d) がそれぞれ 1) のドリフト併用方式と、一様伝達線併用方式にあたり、さらに e) は 2) の形式に属する。2 の形式の他の形のものとしては Fig23-2 をあげることができる。この中で Fig23-2 の b) 図は 2 枚同じものを重ねて 2 次元の位置検出を行なうわけで、発想としては最も基本的なものだが複雑になりすぎるといふ欠点を持っている。

C. J. BORKOWSKI et al³¹⁾ の発表した文献に用いられている方式は 1) の一様伝達線併用方式であるが、装置全体の構成図として Fig18 のようになっている。それぞれサムアンプを通した後に時間差を測定し位置を決定するようになっている。この場合は立ち上がり時間から位置決定をしているのが当然電荷分割方式を利用することも考えられる。位置の決定精度は Fig24 に示すように FWHM で 0.15mm (0.08%) となっている。

最近発表されたデータとしては³²⁾、²⁴¹Am の α 線源をコリメートして使用して、FWHM で 28 μ m という値を得ている。この値は 25mm 長の検出器を用いているので相対値としては 0.1% 程度である。

3-2-2 電荷分割方式

Fig25 を見ればわかるとうり、比例計数管における電荷分割方式も、半導体検出器におけるそれと比較して検出器の部分のみの違いでまったく同じ原理で動作する。一般には、中心線を抵抗体として用いるという意味で、立ち上がり時間方式と同じ検出器を使用できるが、同時に抵抗体の抵抗値が適当なものを選択するという意味で難点がある。

A. FAINBERG et al³³⁾ の論文では、位置分解能が 0.5% と報告されている。彼らの場合検出器全長が 48.8cm あり、曲面状の Fig26 に示す形態の検出器を製作している。この例に限らず比例計数管を用いた位置検出器には特殊な形態をしたものが多いが、半導体検出器と比較して加工性に優れているという利点を持っている。

B. E. FISCHER et al³⁴⁾の論文は電荷分割方式の比例計数管用のデジタルプロセッサを製作した例である。この場合ADCの分解能として14bitまで可能であり、位置を検出するADC2台からの情報を処理する能力を持っている。(Fig 27)。

その他ベータ線スペクトルメータへの応用例なども考えられている。³⁵⁾

3-2-3 ディレーラインを利用した検出器

この形式のものは時間の取り扱いやすさからか、利用されている例が多い。

検出器部分は2次元の検出器でFig28のような構造を持たせるのが普通である。つまり中心線をFig29のようなディレーラインの中間に接点をもうけて多点接続し、それぞれの位置の違いが時間の違いに表われるようにして最終的にはTACを用いて時間を位置アナログ信号に変換してやるという手法が多い。Fig30はその例である。

3-2-4 イオンのドリフトを利用した検出器

イオンのドリフトを利用する比例計数管は、検出器のどの部分をドリフトスペースとして利用するかで多数の種類を考案することが可能だが、^{41)~47)}ここではそのうち1・2の例にふれるにとどめる。

そもそも、ドリフトを利用する方式は、多心線型の比例計数管において、中心線間の空間がそのままでは単なる中間領域として位置の分解ができないのに比較して中心線間のどこの部分に入射したかということを見出す意図をもって製作するものであるから、一般の多線式比例計数管に比較して分解能が向上する筈であるが、実際には、それ程良い結果が得られてるというわけではない。これは、現在まで行が多いためと思われるが、さらには、そのままではドリフトスペースの左右の見分けがつかないという根本的な欠点も有している。(現在では、何段か同一の検出器をかさねて使用することにより解決している例もある。)

4. 検出方法相互比較

4-1 半導体検出器と比例計数管

今までのそれぞれの項目での説明からもわかると思われるが、第1に位置分解能についての違いからまとめる。両方の検出器とも1次元の位置検出器という意味においては精度も良く、安定した結果を得ているようだが、ほぼFWHMで50~200 μm 程度の位置分解能が得られるという点については大差はなく、良くも悪くも1桁以上の違いはない。ただ2次元の位置検出器というとそう簡単にはいっていない様である。半導体の場合には上下に短冊状電極を蒸着してチェッカーボード方式で位置を決定する方式は比較的安定した性能を示すと思われるが、この場合も短冊状電極を狭くしてゆくと個別の実験例に待つ以外なく、どこまで可能かと明確に規定することはできない。それと比較して、半導体素材の片面（あるいは両面）を抵抗層とする抵抗性電荷分割方式の場合には、抵抗層の均一性を得る技術がなかなか難しい。次に比例計数管を利用する場合も、中心電極の抵抗層を作る上で均一性を十分に得ることは注意を要するポイントとなっている。また検出器を2次元にする場合においては、検出部を多線式比例計数管一段とするのか、あるいは2段にするのか、ドリフトチェンバー方式を採用するのかなど等考慮すべき点は多い。その結果によっては検出系の複雑さ、回路系の複雑さが相当に違ってくる。

検出対象となる粒子について考えてみると、半導体検出器、比例計数管ではおのずから対称粒子が異っている。半導体検出器の場合は、検出器内部での放射線のエネルギー損失が比較的大きいものでないと検出できない。これは検出器自身の容積が大きくなると比エネルギー損失の小さい粒子でも検出できるが、空欠乏層が1mm以下程度であれば、 α 線のような荷電粒子でないと検出できないということを意味している。それに反して比例計数管の場合は、内部増幅度が高く、その点に関して半導体検出器より有利である。逆に α 線のような dE/dx が大きい粒子でエネルギーが10MeV以下というような場合には、有感領域に入射する前に外壁の導体部分で吸収され検出できなくなる可能性があり十分注意する必要がある。これらの点を考慮すると、重荷電粒子の位置検出のためには半導体検出器が適し、 γ 線・X線のような光子の検出に関しては比例計数管が適していると言える。 β 線のような場合には、比例計数管を用いるのが一般的である。

検出器自体の大きさの面から考えてみる。この場合には、半導体検出器はどうしても、素材自身の大きさに制限があり大きな面積のものは製作されていない。大きいもので、有

感領域が40~150cm²程度と思われる。空欠乏層の厚さも、位置検出器として用いる場合には数mmというのが現在の限界である。それに対して比例計数管の場合には、中心線の長さが200mm程度のものからメートルオーダーのものまで製作されており、半導体検出器に比較してはるかに大面積のものが得やすい。

詳細については、それぞれの項目を参照していただきたいが、概して、大面積の位置検出をするという場合には必然的に比例計数管を利用せざるおえないが、小面積の位置検出で良い場合には、検出対象粒子及びエネルギー分解能の条件から検出器を選択することになる。

4-2 電荷分割法と立ち上がり時間法

一様な抵抗体により、発生した電荷を分割し位置を決定する電荷による位置弁別法は、入射粒子の位置検出に用いる情報が入射位置の両側の抵抗比によってのみ決定される。それゆえ、抵抗層が一様であり、電荷の収集が完全であれば粒子入射位置と検出位置に対する比例性が正確に成立する。それと比較して、立ち上がり時間の差から放射線の入射位置を決定する場合にはそれが近似的にしか成立していない。

双方の位置分解能に関しては本質的な差異はない。位置分解能を決定する主要な要素はむしろ、抵抗体Rを大きくとるか、小さくとるかであり、Rを大きくすると、位置分解能は向上するが時定数が大きくなり分解時間が劣化する。ひいては、電荷分割方式におけるように電荷収集欠損を大きくする原因となる。

内的、あるいは外的な変化に対しての検出系の安定度という点に関連して考える。内的な条件に関しては、抵抗R、容量Cの不均一性がいかに検出系の誤差に結びつくかという意味から考えると、抵抗体の均一性にのみしか依存しない電荷分割方式と、抵抗と容量の積の影響を受ける立ち上がり時間方式とでは、おのずから安定度が異ってくる。外的条件特に振動・温度等の影響を受けやすい比例計数管は、容量に依存しない電荷分割方式の方がより安定な動作を期待することができる。

回路的な測面から両方式をとらえてみる。電荷分割方式の場合には、位置信号を取り出すために、位置検出用電極からの信号を総エネルギー損失に対応する信号で除する除算回路が必要となり、この回路のダイナミックレンジが系全体のダイナミックレンジを制限することになる例が多いようである。これと比較して、立ち上がり時間方式では、時間計測の回路、遅延線を必要とし、時間測定の精度が全体の精度を左右するという特徴を持っている。

5. 放射性粒子粒径測定への応用

放射性粒子の粒径測定方法としては、現在まで各種の方法が試みられている。それらは大別すると

- 1) 放射能測定法
- 2) 分級法
- 3) 直接法
- 4) 組み合わせ法

のいずれかに属する。それぞれの項目の内容を説明する。1)の放射能測定法とは、粒子の個別の放射能を測定し、粒子密度、構成物質を仮定して粒径を計算により算出する方法である。2)の分級法は、放射性粒子を通常の粒子と同様な分級方法（アンダーセンサンプラー等）により分級し粒径を測定する方法である。3)の直接法とは、電子顕微鏡等で直接粒径を測定する方法であり、4)の組み合わせ法は、1)及び2)あるいは3)を組み合わせ用いる方法である。

それぞれの方法の長所・短所をまとめてみる。1)の放射能測定法の長所は、問題としたい放射性粒子から直接情報が得られる。場合によっては核種まで決定することができるという点を上げられる。逆に言えば、放射性でない粒子は除外することができる方法でもある。短所としては、物質・密度等を仮定するので、その仮定が実際に適合していないと誤差を生じるということがある。2番目の方法である分級法の長所としては、第1に直接空気力学的質量中央径に相当する情報が得られるという点がある。さらに粒子の粒度の校正等が比較的簡単にできるといえる。欠点としては、一般粒子と放射性粒子との弁別ができないという点がある。さらに感度が低く粒子数が多くないと利用できないという欠点もあるが、この欠点を補うために、放射能測定を行ない、4)の組み合わせ法とすることも可能である。さらにこの場合には、一般粒子の粒度分布と放射性粒子の粒度分布の相互比較を行なえる可能性もある。3)の直接法の長所としては、直接測定であるので粒径、形状が実際に確認できるという重要な点がある。しかし欠点として、実験的な粒子を扱っている場合にはそれ程ではないが、特に実際の現場試料等では、どの粒子が放射性粒子かを確認するのが非常に困難だという点があり、直接観察の長所が必ずしも十分に生かしきれない。そこで、これら3種類の粒径測定方法を考えてみた場合それぞれの場合に応じて最も良い方法を選択する必要がある。

粒径を測定する場合には、

- i) 実験で純粋な粒子を用いている場合

ii) 各種の粒子・粒径のものが混入している場合

の2種類の場合を想定することができる。1)の場合には粒径の測定方法は実験条件を整備してやることにより、3種類のどの方法でも測定可能であり、むしろ3種類の粒径測定法の相互比較をすることが望ましい。ii)の場合には、一般の粒子が多数個あり、その中に少数の放射性粒子が混入しているというのが殆どである。そこで分級法を単独で用いるわけにはいかず、また直接法でも放射性粒子を確認することが困難であるから、必然的に放射能測定法を利用することが必要となる。

次に、放射能測定法として現在利用されているものについて整理すると。最も実用的で広く利用されている方法としてオートラジオグラフィ法⁵¹⁾を上げることができる。これは何らかの形で感光性のあるフィルムに放射性粒子のある面を密着させ、その黒化度から放射能を測定しようというもので、粒子がある程度隔れている場合には個別の粒子の放射能を測定することができるという利点もあり、 α 線放射性核種の測定に多く利用されている。ただ改良すべき点もいくつかある。例えば、エネルギー弁別性能がないので、測定に際しては自然環境中の放射能の減衰を待たねばならないという点と、適当な曝写時間を決定するのに時間がかかるという点を上げることができる。

そこで、今回半導体位置検出器を用いて以上の点を改良した粒径及び粒度分布測定装置を試作することにした。詳細については、別途報告書に記すが、ここに計画の概要を述べる。

オートラジオグラフィ法については既知のものとして説明するのが、⁵¹⁾装置はオートラジオグラフィ法における感光板を、半導体位置検出器におきかえたものである。つまりオートラジオグラフィ法ではフィルムがスポット状に感光するが、半導体位置検出器では、特定の位置に存在する放射能を測定するということになる。その放射能から放射能相当径を算出する方法についてはオートラジオグラフィ法と同じである。この場合、半導体検出器を用いるメリットとして以下の点を上げることができる。

- 1) エネルギー弁別ができるので、環境中放射能の減衰を待つ必要がない。
 - 2) 半導体検出器と計算機を直結することにより、データのオンライン処理ができる。
 - 3) エネルギー弁別により核種を同時に決定できる。またベータ線の測定の可能性がある。
- という3点を上げることができる。また欠点としては、これはオートラジオグラフィ法においても存在するが、位置分解の不可能な程接近している粒子については弁別することができないという点を上げられる。その他には半導体位置検出器の技術自身がまだ確立したものではないという点を考えておかねばならない。

今回は、技術的な能力から判断して、立教大学との共同研究により測定装置で開発することにした。開発の手順として、

- 1) 短冊型電極方式の半導体位置検出器での実験を行なう。第1段階として短冊型電極幅を5 mmから始め、段階的に電極幅を狭くし位置分解能の向上をはかる。
- 2) 一様伝達線方式による検出部を試作し、連続的な検出器での測定を行なう。
- 3) 全体をオンライン処理システムとし、インターフェース、プログラムを開発する。

という各項目を考えているが、本年度は初年度として5 mm幅の短冊型電極方式（チェッカーボード方式）の検出器を試作し、その分解能の範囲内で半導体検出器により個別放射性粒子を検出する試験を行ない全体の可能性について判断したい。

最後に放射性粒子径測定以外への放射線位置検出器の応用の可能性についていくつか項目を上げてみる。

- 1) 放射能汚染位置測定装置

（衣服・手・床など）

この場合は多線式比例計数管が適している。

放射線管理以外の分野への応用として

- 2) 燃料ペレットの均一性測定装置

この場合はエネルギー弁別能の良い半導体検出器を用いた方がよい。

6. 参 考 文 献

電荷分割に対する理論的取り扱い

- 1) On the charge dividing mechanism in position sensitive detectors
NIM 56 (1967) 301, by S. KALBITZER, et al.
- 2) On the ballistic deficit and the signal to noise ratio of semiconductor spectrometers for energy and position resolution
NIM 59 (1968) 40, by S. KALBITZER, et al.
- 3) Position sensing by charge division
IEEE, NS-23, No.1 (1976) 251, by V. REDKA. et al.
- 4) A nomogram for the design of position sensitive silicon detectors
NIM 77 (1970) 300, by S. KALBITZER et al.
- 5) Linearity and resolution of a one dimensional position sensitive detector
NIM 60 (1968) 201, by W. MELZER et al.
- 6) Linearity and noise consideration for position sensitive detectors
NIM 97 (1971) 171, by E. MATHIESON et al.
- 7) One and two dimensional position sensing semiconductor detectors
IEEE. NS-15, No.3 (1968) 290, by R. B. Owen et al.
- 8) Position readout by charge division in large two dimensional detectors
IEEE. NS-24, No.1 (1977) 188, by J. L. Albert

イオンインプラネーション

- 9) Position sensing semiconductor particle detectors fabricated by ion implantation
IEEE. NS-15, No.3 (1968) 239, by E. LAEGSGAARD et al.
- 10) Position sensitive detectors made by ion implantation in silicon
NIM, 60 (1968) 24-26, by E. LAEGSGAARD et al.
- 11) Low temperature characteristics of ion implanted silicon position sensitive detectors
IEEE, NS-21, No.1 (1974) 75, by E. ELAD et al.

サーフェスバリアー法

- 12) New results on the rectifying process in surface barrier counters
IEEE. NS-12, No.1 (1965) 284, by P. Siffert et al.

- 13) Nuclear reaction polarimeter using position sensitive particle detectors
NIM. 40 (1960) 45-53, by T. B. CLEGG et al.
- 14) The response of position sensitive detectors to fission fragments and other heavy ions
NIM. 82 (1970) 117-121, by S. B. KAUFMAN et al.
- 15) An array of position sensitive surface barrier detectors for use in a broad range magnetic spectrograph
NIM. 41 (1966) 190-194, by W. MELZER et al.
- 16) An X-Y position sensitive detector
NIM. 54 (1967) 323-324, by W. MELZER et al.

リチウムドリフト法

- 17) Lithium-Drifted Position Sensitive Detector
RSI 36 No.8 (1965) 1175, by E.J. LUDWIG

シリコン抵抗層の例

- 18) Grenzschichtzaehlea fuer orts-und energiebestimmung
NIM 22 (1963) 117, by K. H. LAUTERJUNG et al.
- 19) Utilization of web silicon for position-sensitive detectors
IEEE. NS-12, No.1 (1965) 247, by E. J. LUDWIG et al.

チエツカーボード方式

- 20) A large area circular position sensitive Si detector
NIM, 134 (1970) 71-76, by J. E. LAMPORT et al.
- 21) The checker board counter
IEEE, NS-13, No.3 (1966) 208, by W. K. HOFKER
- 22) Position sensitive gamma ray detectors using resistive charge division read out
IEEE, NS-24, No.1 (1977) 182, by M. S. GERBER et al.
- 23) Position sensitive particle detection by means of multiple diode arrays
IEEE, NS-17, No.3 (1970) 329,

- 24) Characteristics of large area ccd imaging systems
IEEE, NS-24, No.1 (1970) by G. N. TAYLOR et al.
- 25) Charge coupling; an all electronic approach to position sensitive particle detection
IEEE NS-19 No.1 (1972) by E. I. GORDON

比例計数管

- 26) Some applications and properties of one and two dimensional position sensitive proportional counters
IEEE, NS-17 (1970) 340, by C. J. BORKOWSKI et al.
- 27) Design and properties of position-sensitive proportional counters using resistance-capacitance position encoding
Rev. Sci, Instr, 46 No.8 (1975) 951, by C. J. BORKOWSKI et al.
- 28) The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles
NIM, 62 (1968) 262-268, by G. CHARPAK et al.
- 29) A system for kinetic xray diffraction using a position sensitive counter
NIM 152 (1978) 199-203, by H. HASHIZUME et al.
- 30) Some developments in the operation of multiwire proportional chambers
NIM, 80 (1970) 13-34, by G. CHARPAK et al.
- 31) High accuracy, bidimensional read out of proportional chambers with short resolution times
NIM, 143 (1977) 29-39, by G. CHARPAK et al.
- 32) On some factors controlling high accuracy measurements of xray quant a positions with multiwire proportional chambers
NIM, 152 (1978) 185-190, by G. CHARPAK et al.
- 33) A position sensitive proportional counter for a betaray spectrometer
NIM, 154 (1978) 261-264, by Y. YOSHIDA et al.

立ち上がり時間方式の比例計数管

- 34) Some applications and properties of one and two dimensional position sensitive proportional chambers
IEEE, NS-17, No.3 (1970) 340, by C.J. BORKOWSKI et al.

- 35) Design and properties of position sensitive proportional counters using resistance-capacitance position encoding
R. S. I. 46 (1975) 951, by C. J. BORKOWSKI et al.

電荷分割方式を用いた比例計数管

- 36) A frameless, cylindrically shaped, multiwire proportional chamber using charge division read out
NIM 141 (1977) 277, by A. FAINBERG et al.
- 37) A digital processor for position sensitive detectors
NIM 141 (1977) 173, by B. E. FISCHER
- 38) A position sensitive proportional counter for a beta ray spectrometer
NIM 154 (1978) 261, by K. TSUJI et al.

遅延線を用いた比例計数管

- 39) The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles
NIM 62 (1968) 262, by G. CHARPAK et al.
- 40) Phase compensated electromagnetic delay lines for wire chamber read out
NIM 99 (1972) 381, by R. GROVE et al.
- 41) A low pressure proportional chamber with a high space resolution
NIM 145 (1977) 437, by V. GOLOVATYUK et al.
- 42) Linear, circular and two dimensional position sensitive detectors
NIM 152 (1978) 191, by A. GABRIEL et al.
- 43) A system for kinetic xray diffraction using a position sensitive counter
NIM 152 (1978) 199, by K. MASE et al.

ドリフトチェンバー利用した検出器

- 44) Some properties of spherical drift chambers
IEEE, NS-24, No.1 (1977) 200, by G. CHARPAK et al.
- 45) The multiwire drift chamber a new type of proportional wire chamber
NIM, 92 (1971) 373-380, by A. H. WALENTA et al.

- 46) A two dimensional drift chamber
IEEE, NS-24, No.1, (1977) 195, by M. Atac et al.
- 47) A two dimensional drift chamber
NIM, 140 (1977) 461-465, by M. Atac et al.
- 48) Flat helical delay lines for position read out
IEEE NS-24, No.1 (1977) 213, by H. Okuno et al.
- 49) Some developments in the operation of multiwire proportional chambers
NIM 80 (1970) 13. by G. CHARPAK et al.
- 50) A two dimensional gas-scintillation drift chamber for heavy ion detection
NIM 154 (1978) 245. by P. WASTYN et al.

日本語での放射線位置検出器概説

- 51) 半導体を用いた Position Sensitive Detector
応用物理 44 (1975) 1215 著者 中本 淳 等
- 52) 高性能放射線位置検出器
物理 33 (1978) 215 著者 道家 忠 義
- 53) 比例計数管マルチワイヤーチェンバー
応用物理 40 (1971) 402 著者 近藤 都 登
- 54) ZnS(Ag)増感オートラジオグラフ法による α 放射性粒子の粒子径測定
N841-78-47