

第 4 章 带电粒子测量方法

4.1 核辐射探测器概述

用于核辐射探测的探测器（传感器），是利用探测器内的物质与入射射线的相互作用而产生某种信息（如电、光脉冲或材料结构的变化），从而实现对入射射线加以捕获的装置。核辐射探测器产生的信号经相应电子学电路放大后被记录、分析，可以确定射线的数目、位置、能量、动量、飞行时间、速度、质量等物理量。核辐射探测器是核物理、粒子物理研究及辐射应用中不可缺少的工具和手段。按照记录方式，核辐射探测器大体上分为计数器和径迹室两大类。

4.1.1 计数器

计数器是以电脉冲的形式记录、分析辐射产生的某种信息的一类探测器。计数器的种类有气体电离探测器、多丝室和漂移室、半导体探测器、闪烁计数器和切伦科夫计数器等。

气体电离探测器，通过收集射线在气体中产生的电离电荷来测量核辐射。主要类型有电离室、正比计数器和盖革计数器。它们的结构相似，一般都是具有两个电极的圆筒状容器，充有某种气体，电极间加电压，差别是工作电压范围不同。电离室工作电压较低，直接收集射线在气体中原始产生的离子对。其输出脉冲幅度较小，上升时间较快，可用于辐射剂量测量和能谱测量。正比计数器的工作电压较高，能使在电场中高速运动的原始离子产生更多的离子对，在电极上收集到比原始离子对要多得多的离子对（即气体放大作用），从而得到较高的输出脉冲。脉冲幅度正比于入射粒子损失的能量，适于作能谱测量。盖革计数器又称盖革-弥勒计数器或 G-M 计数器，它的工作电压更高，出现多次电离过程，因此输出脉冲的幅度很高，已不再正比于原始电离的离子对数，可以不经放大直接被记录。它只能测量粒子数目而不能测量能量，完成一次脉冲计数的时间较长。

多丝室和漂移室，这是正比计数器的变型。既有计数功能，还可以分辨带电粒子经过的区域。多丝室有许多平行的电极丝，处于正比计数器的工作状态。每一根丝及其邻近空间相当于一个探测器，后面与一个记录仪器连接。因此只有当被探测的粒子进入该丝邻近的空间，与此相关的记录仪器才记录一次事件。为了减少电极丝的数目，可从测量离子漂移到丝的时间来确定离子产生的部位，这就要有另一探测器给出一起始信号并大致规定了事件发生的部位，根据这种原理制成的计数装置称为漂移室，它具有更好的位置分辨率（达 50 微米），但允许的计数率不如多丝室高。

半导体探测器，辐射在半导体中产生的载流子（电子和空穴），在反向偏压电场下被收集，由产生的电脉冲信号来测量核辐射。常用硅、锗做半导体材料，主要有三种类型：

①在 n 型单晶上喷涂一层金膜的面垒型;②在电阻率较高的 p 型硅片上扩散进一层能提供电子的杂质的扩散结型;③在 p 型锗(或硅)的表面喷涂一薄层金属锂后进行漂移的锂漂移型。高纯锗探测器有较高的能量分辨率,对 γ 辐射探测效率高,可在室温下保存,应用广泛。碲化镓、碲化镉、碘化汞等材料也有应用。

闪烁计数器,通过带电粒子打在闪烁体上,使原子(分子)电离、激发,在退激过程中发光,经过光电器件(如光电倍增管)将光信号变成可测的电信号来测量核辐射。闪烁计数器分辨时间短、效率高,还可根据电信号的大小测定粒子的能量。闪烁体可分三大类:①无机闪烁体,常见的有用铊(Tl)激活的碘化钠 NaI(Tl)和碘化铯 CsI(Tl)晶体,它们对电子、 γ 辐射灵敏,发光效率高,有较好的能量分辨率,但光衰减时间较长;锗酸铋晶体密度大,发光效率高,因而对高能电子、 γ 辐射探测十分有效。其他如用银(Ag)激活的硫化锌 ZnS(Ag)主要用来探测 α 粒子;玻璃闪烁体可以测量 α 粒子、低能 X 辐射,加入载体后可测量中子;氟化钡(BaF₂)密度大,有荧光成分,既适合于能量测量,又适合于时间测量。②有机闪烁体,包括塑料、液体和晶体(如蒽、苣等),前两种使用普遍。由于它们的光衰减时间短(2~3 纳秒,快塑料闪烁体可小于 1 纳秒),常用在时间测量中。它们对带电粒子的探测效率将近百分之百。③气体闪烁体,包括氙、氩等惰性气体,发光效率不高,但光衰减时间较短(<10 纳秒)。

切伦科夫计数器,高速带电粒子在透明介质中的运动速度超过光在该介质中的运动速度时,则会产生切伦科夫辐射,其辐射角与粒子速度有关,因此提供了一种测量带电粒子速度的探测器。此类探测器常和光电倍增管配合使用;可分为阈式(只记录大于某一速度的粒子)和微分式(只选择某一确定速度的粒子)两种。

除上述常用的几种计数器外,还有气体正比闪烁室、自猝灭流光计数器,都是近期出现的气体探测器,输出脉冲幅度大,时间特性好。电磁量能器(或簇射计数器)及强子量能器可分别测量高能电子、 γ 辐射或强子(见基本粒子)的能量。穿越辐射计数器为极高能带电粒子的鉴别提供了途径。

4.1.2 径迹室

径迹室是通过记录、分析辐射产生的径迹图象来测量核辐射的一类核辐射探测器。主要种类有核乳胶、云室和泡室、火花室和流光室、固体径迹探测器。

核乳胶能记录带电粒子单个径迹的照相乳胶。入射粒子在乳胶中形成潜影中心,经过化学处理后记录下粒子径迹,可在显微镜下观察。它有极佳的位置分辨本领(1 微米),阻止本领大,功用连续而灵敏。

云室和泡室使入射粒子产生的离子集团在过饱和蒸气中形成冷凝中心而结成液滴(云室),在过热液体中形成气化中心而变成气泡(泡室),用照相方法记录,使带电粒子的径迹可见。泡室有较好的位置分辨率(好的可达 10 微米),本身又是靶,目前常以泡室为顶点探测器配合计数器一起使用。

火花室和流光室这些装置都需要较高的电压,当粒子进入装置产生电离时,离子在

强电场下运动，形成多次电离，增殖很快，多次电离过程中先产生流光，后产生火花，使带电粒子的径迹成为可见。流光室具有较好的时间特性。它们都具有较好的空间分辨率（约200微米）。除了可用照相记录粒子径迹外，还可记录电脉冲信号，作为计数器用。

固体径迹探测器 重带电粒子打在诸如云母、塑料一类材料上，沿路径产生损伤，经过化学处理（蚀刻）后，将损伤扩大成可在显微镜下观察的空洞，适于探测重核。

由许多类型的探测器、磁铁、电子仪器、计算机等组成的辐射谱仪，可获得多种物理信息，是近代核物理及粒子探测的发展趋势。

本章仅讨论对带电粒子测量常用的下述三类核辐射探测器。

- 1) 以气体为探测介质，利用电离作用的气体探测器；
- 2) 以闪烁晶体为探测介质，利用闪烁效应的闪烁探测器；
- 3) 以半导体为探测介质，利用电离作用的半导体探测器。

4.2 气体电离探测器

气体电离探测器是早期应用最广的核辐射探测器，五十年代后逐渐被闪烁和半导体探测器代替，但至今在工业上仍广泛应用。其主要原因是：(1)制备简单；(2)成本低廉；(3)较好的特性：低噪声、高能量分辨率。

气体电离探测器是以气体作为带电粒子电离或激发的介质，在气体电离空间置有两个电极，外加电场并保持一定的电位差，当带电粒子穿过气体时与气体分子轨道上的电子发

生碰撞，使气体分子产生电离而形成离子对，在电场中电子向正极移动，正离子向负极移动，最后到达二极而被收集起来，使电子线路上引起瞬时电压变化（电压脉冲）而由后续的电子仪器记录。气体中电子与离子的运动规律决定探测器的基本特性。

在相同射线的照射下，脉冲的大小（又称脉冲的高度）使随着二极间的电压大小而改变的，它们间的变化关系如图4.1所示。它们具有形状相似的曲线，曲线分为6个区域。气体电离探测器是早期应用最广的核辐射探测器，根据其所处的工作状态，通常可分为三类，即电离室、正比计数器和盖革计数器等。

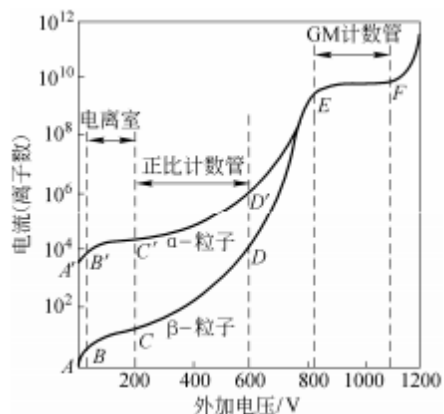


图 4.1 外加电压与电离电流曲线

4.2.1 电离室

电离室是最早应用于射线探测的气体探测器，在核物理发展的早期，特别是20世纪初叶，电离室曾起过重要的作用。1911~1914年间，Hess等从电离室测量中发现了宇宙射线；1932年，Chadwich利用电离室探测反冲质子，从而证明了中子的存在。1939年，

Frish 利用电离室证实了核裂变时释放大量的能量等。

时至今日， 电离室在核物理研究与核技术应用领域仍然发挥着作用。例如， 传统的射气仪测量氦气， 利用 α 杯法进行氦气测量等， 仍然采用电离室。

根据电离室的功能， 可以将其分成两大类： 脉冲电离室， 电流电离室和累计电离室。

脉冲电离室是可以记录单个辐射离子的电离室。主要用于测量重带电粒子的能量和强度， 可以测量 α 、 β 、 γ 射线和中子。按输出回路可将这类电离室进一步分为： 离子脉冲电离室和电子脉冲电离室

这类电离室目前已较少使用。

电流电离室和累计电离室则是记录大量辐射粒子平均效应的电离室， 这类电离室不能测量能量射线的能量。主要用于 X、 β 、 γ 射线与中子的强度、 通量、 剂量或剂量率。

它是剂量监测和反应堆控制的主要传感元件， 是射线测量所用的主要传感器之一。

一、 电离室的结构

两类电离室的基本构造基本相同。主体由两个处于不同电位的电极组成， 电极之间用绝缘体隔开， 并密闭于充有一定气体的容器内。

电极的形状原则上可以是任意的， 但一般做成平行板形成圆柱形， 这是因为这样安排电极， 能使电极间电场均匀分布。

平行板电离室的结构以及圆柱形电离室的结构， 见图 4.2。

电离室的大小和形状， 壁厚和电极的材料、 充气成分、 电压强度等， 根据辐射的性质、 实验的要求而确定。

例如， 用于 α 粒子测量时， 要求电离室的容积要大， 充较高气压的气体。

而测量 γ 射线时， 则要求电离室具有较厚的室壁， 以阻隔住 β 射线、 X 射线等。

在电离室的高压电极上一般都加有

几百到几千伏高压， 尽管使用了高绝缘体， 漏电流总是存在的， 尤其是表面的漏电流。为此， 在电离室高压电极和收集电极之间一般都要加一保护环。保护环由导电金属制成， 与地之间电位差为 0。使用保护环后， 由于其电位与地相同（收集电极的电位与地相同）， 故漏电流从保护环流过达到地回路上， 而在电阻上几乎无压降。这保证了使收集电极边缘的电场不被畸变， 使高压到地的漏电流不通过收集电极。

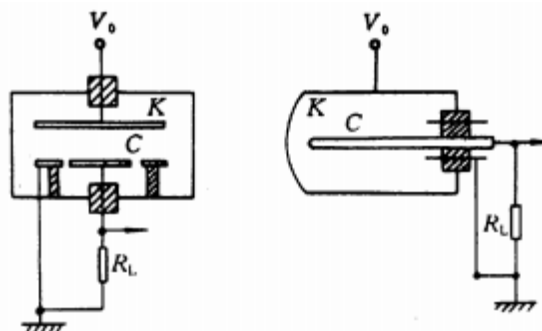


图 4.2 电离室的结构简图

4.2.2 正比计数器

正比计数器是一种充气型辐射探测器， 工作在气体电离放电伏安特性曲线的正比区（图 4.1 中的 CD 区）。为获得好的能量分辨率， 大多数采用圆筒形、 鼓形结构， 以便有均

匀的电场分布，可使射线入射窗作得很大。阳极丝加正高压，金属壳为阴极，面对入射窗设置一个出射窗，好让未被气体吸收的光子穿出。

正比计数器接收一个 X、 γ 光子后就输出一个电脉冲，幅度与光子能量成正比，输出脉冲的大小正比于入射产生的电子和正离子对数目，电子和正离子对数目正比于气体吸收的放射线的能量。放射线能量越大，电离电子获得能量大，碰撞产生的离子对越多。

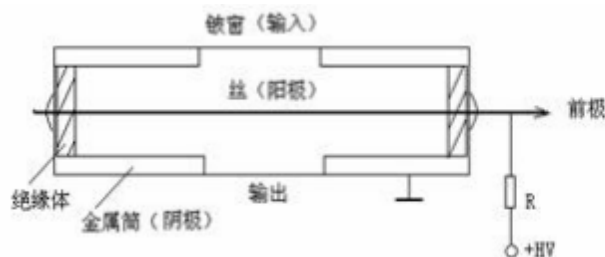


图 4.3 正比计数器内部结构



图 4.4 正比计数器外形

4.2.3 G—M 计数管

盖格-弥勒计数管简称盖格计数管或 G-M 计数管，它是应用较广泛的核辐射探测器。主要用于测量 β 粒子，只有计数管的底窗极薄 ($2\text{mg}/\text{cm}^2$) 时，才可探测 α 粒子。盖格计数管对 γ 射线的探测效率极低，只有 1%~2%。

一、G—M 计数管构造和种类

根据外形可以分为钟罩形 (如图 4.5a) 和圆柱形计数管 (图 4.5b)。圆柱形计数管为圆柱形玻璃外壁，内衬一金属圆筒或涂一层导电物质 (Hg 或 ZnCl_2) 作为阴极。计数管内沿轴心穿一根细钨丝作为阳极。钟罩形计数管外观象一个扣着的钟罩，供射线进入的底窗是云母片制成的。

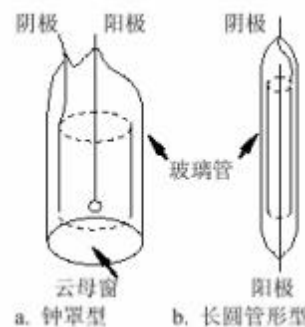


图 4.5 G-M 计数管

G—M 计数管内充工作气体 (惰性气体: 氩、氖、氮) 猝灭气体 (乙醇、二乙醚、溴、氯等)。惰性气体的作用是射线照射后引起气体的电离，产生放电; 猝灭气体的作用是防止计数管在一次放电之后，发生连续放电。主要是因为猝灭气体的电离电位较低，正粒子与之相遇很容易夺走一个电子，复原成中性分子，猝灭气体分子本身称为正离子向阴极移动，到达阴极被中和时主要通过自身的解离而释放能量，极少在阴极打出继发电子，因而抑制了连续放电。根据猝灭气体的种类，计数管又可分为有机计数管 (猝灭气体为有机气体) 和卤族计数管 (猝灭气体为卤族元素气体) 两种。

二、工作原理

计数管的正负极接在稳定的高压电源上，使两极间维持一定的电位差 (几百伏到 1000V

以上)。射线离子进入计数管内，引起管内惰性气体电离，形成正负离子对。在电场作用下，正离子向负极，负离子向正极（钨丝）移动。射线引起的电离称为原电离。当负离子靠近阳极电场强度越大，受到作用也大，运动速率加快，又碰撞到阳极附近的惰性气体分子引起次级电离。多次的新的次级电离，使得阳极附近在极短时间内，产生大量次级电子，这种现象称为雪崩。

沿整个阳极金属线引起雪崩的结果，大量的负离子跑到阳极上，阳极产生放电，两极间电压发生瞬间降落，这种电压的瞬间改变称为脉冲电压，把电压的微小变化输送到定标器上，经过电子学线路整理、甄别、放大，被特殊的记录装置记录下来，即可测得射线的放射线活度。

4.3 α 粒子闪烁计数器

用于探测 α 粒子的闪烁计数器一般由硫化锌（银）闪烁体、或者碘化铯（铯）闪烁体与光电倍增管组成。

1. 硫化锌（银）ZnS（Ag）闪烁体

硫化锌（银）的化学式是： $ZnS(Ag)$ 。 $ZnS(Ag)$ 是一种多晶粉末，其透明度较差，用于探测 α 粒子时，一般做成质量厚度小于 $80mg/cm^2$ 的晶体，此时，对于自身所发出的闪烁光才是透明的。

与其它闪烁体一样， $ZnS(Ag)$ 是通过将入射射线能量转变成闪烁光光强来探测入射粒子能量和数量的。不过，由于其透明度较差，能量分辨率也差，因此不适合于作为 α 粒子的能谱测量。

当 $ZnS(Ag)$ 的原子与分子从入射 α 粒子获得部分能量后，将被激发，在其原子与分子退激的过程中，其从 α 粒子获得的能量将以一定波长的光的形式释放出来。这种光，波长较长，处于可见光波长范围，被称为闪烁光。

如果入射的 α 粒子的能量越高，并将能量全部损耗在闪烁体内，则被激发的原子与分子越多，退激时发射的闪烁光光子越多，最终从光电倍增管输出的电荷越多，形成的电信号幅度将越大。

2. 碘化铯（铯）CsI（Tl）闪烁体

碘化铯（铯）的化学式是： $CsI(Tl)$ 。对 α 粒子 $CsI(Tl)$ 的发光效率很高，在早期常作为 α 闪烁谱仪的闪烁晶体。它对于 ^{210}Po 的 $5.3MeV$ 能量的 α 粒子，其能量分辨率可以优于 4% ，最好的可以达到 1.8% 。

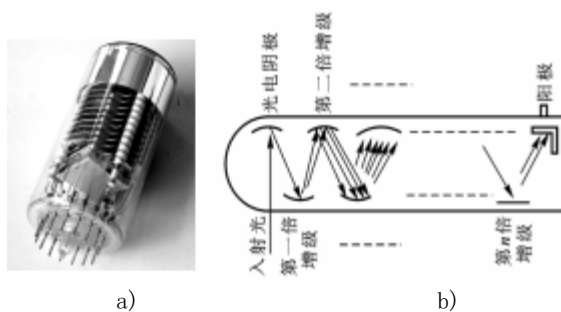


图 4.6 光电倍增管外形与工作原理

a) 外形; b) 工作原理示意

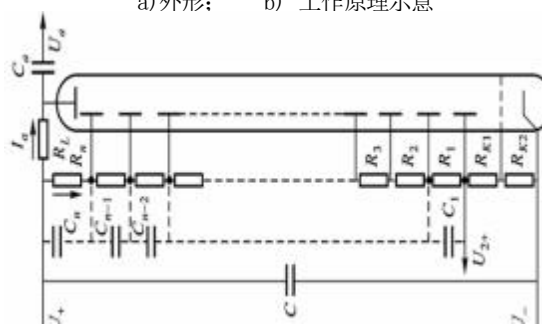


图 4.7 光电倍增管倍增极加压电路

CsI (Tl) 发光的机理与 ZnS (Ag) 相同, 故不赘述。

3. 光电倍增管

光电倍增管由光阴极 K、阳极 A、倍增极 (通常为 12~14 级, 多的可达 30 级) 以及高压 (*HV*) 组成。光电倍增管的作用是将 ZnS (Ag) 闪烁体发出的闪烁光转换成光电子, 并进行倍增。光电倍增管的外形如图 4.6a) 所示, 其工作原理如图 4.6b) 所示。

光电倍增管通常工作在几百~上千伏的高压下, 一般电压为 1000~2500V, 光阴极最低, 阳极最高。每个相邻倍增极间分别加有 100~200V 电位差, 通过分压电阻向各倍增极提供电压 (如图 4.7 所示)。

闪烁体发出的光子通过光导照射到光阴极 K 上, 通过光电效应产生光电子发射。在电场的加速下, 光电子打在金属倍增极上, 通过电离引起倍增极的二次电子发射。每个电子能从倍增极上打出 3~6 个次级电子, 倍增极使电子再次加速倍增, 电子流逐渐升高, 最后到达阳极的电子流增益在 $10^5 \sim 10^6$ 数量级, 相当于一个电子激发出 10 万个到百万个电子。因此, 光电倍增管可将阴极的光电流放大几万至几百万倍。

4. 光电倍增管主要参数

光电倍增管的放大性能用倍增系数 K 衡量, 倍增极外加电压 U_d 与增益 G 关系近似为

$$G = K U_d^N \quad (4.1)$$

式中, N 是光电倍增管倍增极数, N 个倍增极的电压 U_d 都相同。

光电倍增管的增益变化量可表示为

$$\Delta G / G = N (\Delta U_d / U_d) \quad (4.2)$$

由式 (4.2) 可见, 外加电压 U_d 的变化会引起光电倍增管增益的变化, 如果外加电压波动, 增益也要产生波动, 这对输出的影响很大, 因此系统对供给光电倍增管的工作电源电压要求较高, 必须有极好的稳定性。

特别要注意的是, ZnS (Ag)、CsI (Tl) 的发光时间较长, 一般达 $10 \mu\text{s}$ 。在受强光照射后, 余晖时间长, 影响发光效率, 故应避光存放, 严禁暴晒。而光电倍增管增益很大, 更不允许将裸露的光电倍增管器件在加高压的情况下暴露在日光下测量可见光, 以免造成损坏。为此需要将光电倍增管放置在密闭的金属容器中作避光和磁场屏蔽处理。

4.4 半导体探测器

4.4.1 半导体探测器概述

半导体探测器是一类高性能的核辐射探测器, 半导体带电粒子谱仪对辐射信号的采集就是通过半导体探测器来完成的。为此, 本节主要讨论半导体探测器的探测原理。

半导体探测器是利用辐射与物质之间的电离相互作用实现对射线的探测的。不同类型

的半导体探测器可以实现对不同射线的测量。半导体探测器具有许多优越性能，最突出的是能量分辨本领高，脉冲上升时间短，结构简单。半导体探测器的种类很多，根据结构可分为PN结型和PIN结型。按制造工艺可分为面垒型，扩散型、离子注入型、锂漂移型。根据所用主要材料可分为锗、硅和化合物(如GaAs、CdTe、HgI₂等)型。按外形可分为平面型，同轴型。

目前常用的半导体探测器主要有三种。

1)在锗或硅单晶中制造PN结，在反向电压下工作，使PN结形成“耗尽层”，自由载流子浓度很低。

2)在P型和N型的锗或硅单晶之间形成一层PIN型本征区，电阻率很高，作为探测器的灵敏区。

3)利用高纯锗材料，其中受主和施主原子的浓度已可降低至 10^{-10} 个/cm³，即平均每 10^{12} 个锗原子中仅有杂质原子1个。

此外近年来化合物探测器，如CdTe、HgI₂、GaAs等探测器的研究一直受到重视；但目前性能还不够理想。

半导体探测器可以被看作是一个带平面电极、“填充”以半导体晶体(而不是气体)作介质的电离室。固体半导体探测器的阻止本领比电离室中所充气体的大好几倍。当被测的初始基本粒子进入由硅或锗晶体制成的半导体时，它在很短时间内(10^{-11} s)损失其能量。它将自己的能量、传递给半导体原子的电子(电离)，电子则可获得足够的能量去诱发次级电离。

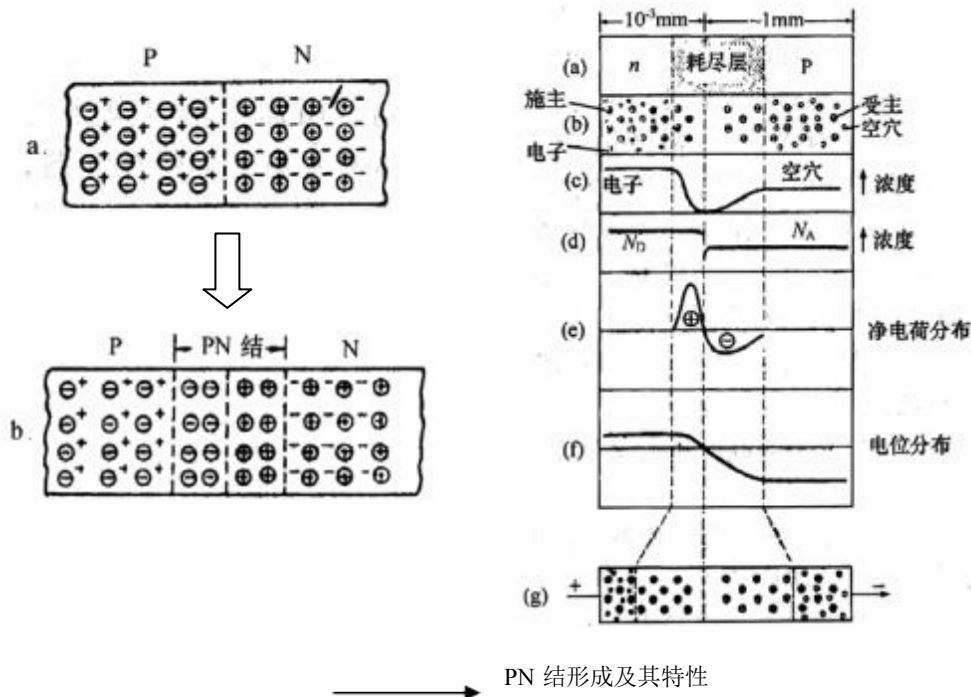


图 4.8

a—PN 结形成过程示意图； b—PN 结特性示意图

(a)耗尽层(阴影区)；(b)受主、施主、电子、空穴分布；(c)电子和空穴浓度；(d)施主和受主浓度；

(e)净电荷分布；(f)静电电位分布；(g)外加反向偏压时受主、施主、电子和空穴的分布

辐射(α 和 β 辐射)在半导体中直接产生载流子(电子和空穴)对; 而对于中子、 γ 或 X 射线, 这样的电子—空穴对是依靠与半导体相互作用而通过次级带电粒子间接产生的。 γ 或 X 的直接电离非常少。产生一个电子—空穴对所需的平均能量, 硅为 3.6eV, 锗为 2.8eV。而在气体中产生一对离子对, 需要电离能量 36.5eV 左右。闪烁探测器, 从射线进入 NaI(Tl)产生荧光到光电子倍增一系列能量转换, 这样计算产生一个光电子需要 1000eV。比较来看, 射线消耗相同能量, 在半导体探测器中产生的电子—空穴对数要多得多, 因而形成脉冲幅度的相对涨落要小得多, 所以半导体探测器的能量分辨率好得多。

4.4.2 PN 结型半导体探测器

在 P 型半导体中空穴浓度较高, 在 N 型半导体中电子浓度较高。两者结合在一起时, 载流子将由高浓度区向低浓度区扩散, 结果在两者附近形成一个结区, 如图 4.8 所示。在结区基本上不存在自由载流子, 只有施主和受主的离子, 形成一个空间电荷区, N 型一侧带正电, P 型一侧带负电, 构成一个内部电场, 电场将阻止载流子继续扩散。如果在空间电荷区产生电离形成自由载流子, 将立即把电子拉向 N 区, 空穴拉向 P 区。不可能存在自由载流子, 所以 PN 结区称为“耗尽层”。

当给 PN 外加电压, 反向偏置时, 即电源正端接 N 区, 负极接 P 区, 使空间电荷电场增强。

电子和空穴分别向正端和负端扩散, 结果使“耗尽层”的宽度增大。

耗尽层即为探测器的灵敏区。在电压反向偏置下, 耗尽层电阻率极高, 相当于外加电压全加在耗尽层端; 而 P 区和 N 区, 自由载流子浓度很高, 电阻率很低, 相当于两个电极。

探测的射线进入灵敏区(耗尽层), 产生电离, 生成大量电子—空穴对。在电场作用下, 电子和空穴分别迅速向正、负两极漂移、被收集, 在输出电路中形成脉冲电信号。

金硅面垒半导体探测器就是以 N 型硅单晶作基片。将基片经酸处理后形成一氧化层, 并在氧化层上镀一层金膜(约 10nm 厚)。在靠金膜的氧化层具有 P 型硅特性, 在基片背面镀镍接电源正极, 金膜与铜外壳接触接电源负极, 氧化层构成 PN 结耗尽层为金硅面垒探测器的灵敏区。目前金硅面垒探测器灵敏区厚度最大可做到 2mm。一般做成圆片状。

金硅面垒探测器, 由于耗尽层厚度较薄, 主要用于探测带电重粒子(如 α 、P 等), 亦可用作能谱测量, 探测效率近于 100%。也可用于 β 射线测量, 对 γ 射线不灵敏。

几种常用金硅面垒探测器特性列于表 4.1。

4.4.3 PIN 结锂漂移型半导体探测器

PN 结金硅面垒型半导体探测器, 2 mm 厚度灵敏区仅相当于 1.1MeV β 射线的射程。为了探测高能射线而采用锂漂移技术, 在 P 型和 N 型半导体材料之间形成一个本征半导体区, 可获得厚度大于 10mm 的灵敏区。称为 PIN 结锂漂移型半导体探测器。

表 4.1 几种金硅面垒探测器主要特性

型号	灵敏区直径/mm	外形尺寸直径×高度	在 300V 时的反向电流, μA	能量分辨率, % 对 ^{210}Po α	探测效率, %		脉冲上升时间, ns
					对 α	对 ^{238}U β	
GM -5	5	12mm×6mm	~1	<1	100		<10
GM -8	8	16mm×6mm	~1	<1	100		<10
GM -12	12	19mm×6mm	~2	~1	100		<10
GM -16	16	24mm×6mm			100		<10
GM -20	20	29mm×6mm	1.5~5	1~1.5	100		<10
GM -26	26	37mm×7.5mm	3~8	1~1.5	100		<10
GM -30	30	42mm×7.5mm	3~10 5~15	1.5~2.5 2~4	100	40~50	

如图 4.9 所示, 在 P 区电子是少数载流子, 空穴浓度比电子多很多; 在 N 区空穴是少数载流子, 电子浓度比空穴浓度多得多。在 I 区, 电子和空穴浓度相等, P、I 和 N 型三者连接后, 电子和空穴扩散结果, 在 P、N 和 I 区的界面附近分别形成正、负空间电荷区(见图 4.9)。形成 I 区内电场 E_i 。

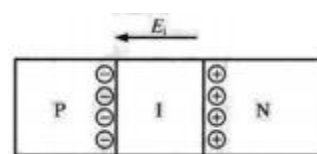


图 4.9 PIN 结探测器结构示意图

在 PIN 结两端加上反向电压, 内电场 E_i 将得到增强。

与 PN 结类似, I 区即为探测射线产生电离的灵敏区, 厚度较大, 可以探测高能射线。

锂在硅和锗中的电离能很低(在硅中为 0.033eV, 在锗中为 0.093eV), 很容易电离而且离子半径仅有 0.06nm。在 P 型硅或锗表面镀一层锂, 而锂很快穿过硅或锗的晶格, 处于晶格之间成为施主杂质。在 PIN 结所加反向电压作用下, 锂电离成锂离子与受主结合成中性分子, 使 I 区内电子和空穴大大减少, 起到“补偿”作用, 形成电阻率很高的本征区。

硅和锗加上锂作为漂移材料制成锗锂漂移探测器——Ge(Li); 或硅锂漂移探测器——Si(Li)。锗锂漂移探测器有两种: 即平面型和同轴型。目前平面型为圆片状只能获得 15~20mm 厚的本征区。同轴型为圆柱状, 中心小圆柱为 P 区, 外层为 N 区, 中间为 I 区(本征区)。目前 Ge(Li)灵敏区可达 150cm³ 左右, 体积较大。Ge(Li)探测器主要用于 γ 能谱测量, 能量分辨率很好。必须在低温下(液氮 -196°C)工作和保存。

Si(Li)探测器, 主要用于 X 射线能谱测量, 在 1~100keV 范围有很高的能量分辨率; 也可用于 β 射线测量。必须液氮温度下工作, 可以在室温下保存。

4.4.4 高纯锗半导体探测器 (HPGe)

HPGe 是用高纯度锗制成的 PN 探测器。在一定工作电压下 PN 结的耗尽层厚度与材料的电阻率的平方根成正比。当锗晶体中杂质的原子浓度小于 10¹⁰ / cm³ 时, 即可满足制造 HPGe 探测器的要求。

目前的工艺水平已能制造体积比较大的探测器，可以分别满足低能 X 射线和高能 γ 射线的能谱测量要求。与 Ce(Li)和 Si(Li)能量分辨率相当。它的优点是可以常温下保存。

4.5 半导体带电粒子谱仪

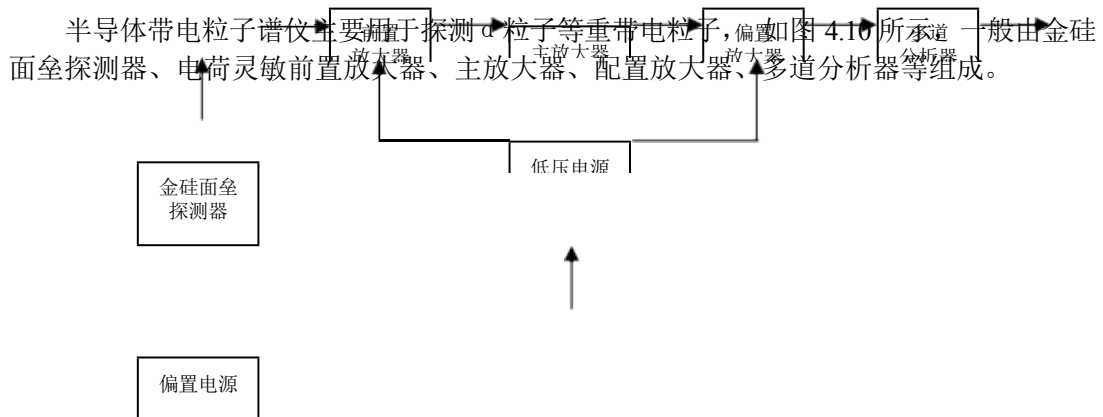


图 4.10 半导体带电粒子谱仪的系统示意图

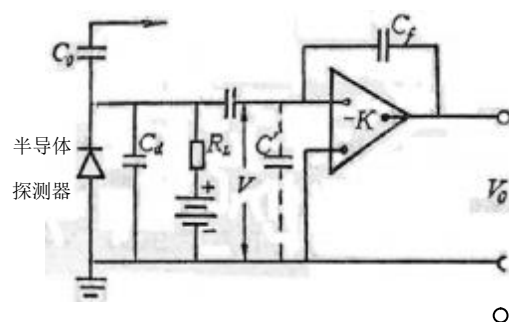
金硅面垒探测器是用一片 N 型硅，蒸上一薄层金($100-200 \times 10^{-10} \text{m}$)，接近金膜的那一层硅具有 P 型硅的特性，这种方式形成的 PN 结靠近表面层，结区即为探测粒子的灵敏区。探测器工作时加反向偏压。 α 粒子在灵敏区内损失能量转变为与其能量成正比的电脉冲信号，经放大并由多道分析器测出幅度的分布，从而给出带电粒子的能谱。偏置放大器的作用是当多道分析器的道数不够用时，利用它切割、展宽脉冲幅度，以利于脉冲幅度的精确分析。为了提高谱仪的能量分辨率，探测器要放在真空室中。另外金硅面垒探测器一般具有光敏的特性，在使用过程中，应有光屏蔽措施。

金硅面垒型半导体 α 谱仪具有能量分辨率高、能量线性范围宽、脉冲上升时间快、体积小和价格便宜等优点，在 α 粒子及其它重带电粒子能谱测量中有着广泛的应用。

带电粒子进入灵敏区，损失能量产生电子空穴对。形成一对电子空穴所需的能量 w ，与半导体材料有关，与入射粒子的类型和能量无关。对于硅，在 300K 时， w 为 3.62eV，77K 时为 3.26eV。对于锗，在 77K 时 w 为 2.96eV。若灵敏区的厚度大于入射粒子在硅中的射程，则带电粒子的能量 E 全部损失在其中，产生的总电荷量 Q 等于 $(E/w)e$ 。 E/w 为产生的电子空穴对数， e 为电子电量。由于外加偏压，灵敏区的电场强度很大，产生的电

子空穴对全部被收集，最后在两极形成电荷脉冲。通常在半导体探测器设备中使用电荷灵敏前置放大器。它的输出信号与输入到放大器的电荷量成正比。

探测器的结电容 C_d 是探测器偏压的函数，如果核辐射在探测器中产生电荷量为 Q ，那么探测器输出脉冲幅度是 Q/C_d 。因此，由于探测器偏压的微小变化所造成的 C_d 变化将影响输出脉冲的幅度。事实上，电源电压的变



化就可以产生偏压的这种微小变化。此外，根据被测粒子的射程调节探测器的灵敏区厚度时，也往往需要改变探测器的偏压。要减少这些变化对输出脉冲幅度的影响，前置放大器对半导体探测器系统的性能起着重要的作用。图 4.11 表示典型探测器的等效电路和前置放大器的第一级。其中 K 是放大器的开环增益， C_f 是反馈电容， C_1 是放大器的总输入电容，它等于 $C_d + C'$ ， C' 是放大器接插件电缆等寄生电容。前置放大器的输入信号是 Q/C_d ，它的等效输入电容近似等于 KC_f ，只要 $KC_f \gg C_1$ ，那么前置放大器的输出电压为

$$V_0 = \frac{KQ}{C_1 + (1+K)C_f} \approx -\frac{Q}{C_f} \quad (4.3)$$

这样一来，由于选用了电荷灵敏放大器作为前置放大器，它的输出信号与输入电荷 Q 成正比，而与探测器的结电容 C_d 无关。

1. 确定半导体探测器的偏压

对 N 型硅，探测器灵敏区的厚度 d_n 和结电容 C_d 与探测器偏压 V 的关系如下：

$$d_n \approx 0.5 \sqrt{\rho_n V} \quad (\mu m) \quad (4.4)$$

$$C_d = \frac{2.1 \times 10^4}{\sqrt{\rho_n}} \quad (\mu F / cm^2) \quad (4.5)$$

式中 ρ_n 为材料电阻率 ($\Omega \cdot cm$)。因灵敏区的厚度和结电容的大小决定于外加偏压，所以偏压的选择首先要使入射粒子的能量全部损耗在灵敏区中和由它所产生的电荷完全被收集，电子空穴复合和陷落的影响可以忽略。其次还需考虑到探测器的结电容对前置放大器来说还起着噪声源的作用。电荷灵敏放大器的噪声水平随外接电容的增加而增加，探测器的结电容就相当它的外接电容。因此提高偏压降低结电容可以相当地减少噪声，增加信号幅度，提高信噪比，从而改善探测器的能量分辨率。从上述两点来看，要求偏压加得高一点，但是偏压过高，探测器的漏电流也增大而使分辨率变坏。因此探测器的偏压应选择最佳范围。实验上最佳能量分辨率可得，图 4.12 所示。并由此实验数据，分别作出一组峰位—偏压曲线

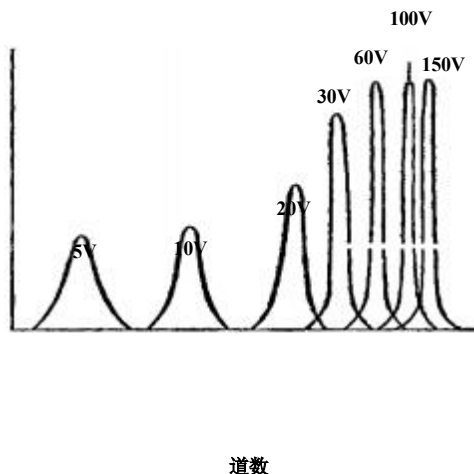


图 4.12 同一能量不同偏压下的 α 射线谱

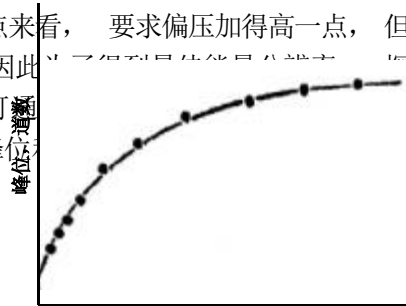


图 4.13 峰位—偏压曲线

线，如图 4.13、图 4.14。分析以上结果，确定出探测器最佳偏压值。

2. α 谱仪的能量刻度和能量分辨率

谱仪的能量刻度就是确定 α 粒子能量与脉冲幅度之间对应关系。脉冲幅度大小以谱线峰位在多道分析器中的道址表示。 α 谱仪系统的能量刻度有两种方法：

(1) 用一个 ^{239}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm 混合的 α 刻度源，已知各核素 α 粒子的能量，测出该能量在多

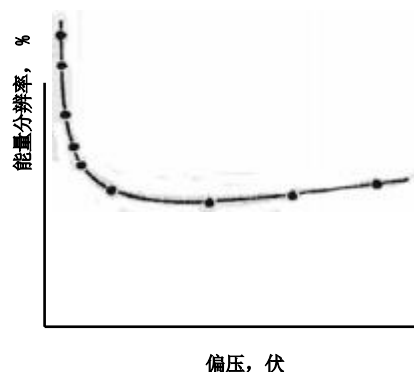


图 4.14 能量分辨率—偏压曲线

道分析器上所对应的道址，作能量对应道址的刻度曲线，并表示为：

$$E = E_0 + a \cdot Ch \quad (4.6)$$

式中， E 为 α 粒子能量(keV)； Ch 为对应 E 谱峰所在道址(道)； a 是直线斜率(keV / 每道)，称为刻度常数； E_0 是直线截距(keV)，它表示由于 α 粒子穿过探测器金层表面所损失的能量。

(2) 用一个已知能量的单能 α 源，配合线性良好的精密脉冲发生器来作能量刻度。这是在 α 源种类较少的实验条件下常用的方法。

一般谱仪的能量刻度线性可达 0.1% 左右。

在与能量刻度相同的测量条件下(如偏压、放大倍数、几何条件等)，测量未知能量 α 谱。根据能量刻度曲线就可以确定 α 粒子的能量。常用 α 谱仪的刻度源能量可查核素常用表。

α 谱仪的能量分辨率也用谱线的半宽度 FWHM 表示。FWHM 是谱线峰最大计数一半处的宽度，以 keV 表示。在实用中，谱仪的能量分辨率还用能量展宽的相对百分比表示。例如本实验采用金硅面垒探测器，灵敏面积为 50mm^2 ，测得 ^{241}Am 源的 5.48MeV 的 α 粒子谱线宽度为 $17\text{keV}(0.3\%)$ 。

半导体探测器的突出优点是它的能量分辨率高，影响能量分辨率的主要因素有：

- ① 产生电子空穴对数和能量损失的统计涨落(ΔE_n)；
 - ② 探测器噪声(ΔE_D)；
 - ③ 电子学噪声，主要是前置放大器的噪声(ΔE_e)；
 - ③ 探测器的窗厚和放射源的厚度引起能量不均匀性所造成的能量展宽(ΔE_S)。
- 实验测出谱线的展宽 ΔE 是由以上因素所造成影响的总和，表示为

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_n^2 + \Delta E_D^2 + \Delta E_e^2 + \Delta E_S^2} \quad (4.7)$$

3. 用偏置放大器来扩宽能谱

在实际应用中，常常需要降低系统的 a 值。由于半导体探测器的能量分辨率比较高，一般可达千分之几。当多道分析器的道数不够时，道宽对 α 能谱测量的影响就很大。例如，若实验使用的多道分析器为 256 道，对于 6MeV 的峰位于满道址刻度情况下，得到最小 a 值为 $25\text{keV} / \text{每道}$ 。如果我们要观察能量相差只有 50keV 的两个 α 峰(例如 ^{241}Am)，而这

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。
。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/768031037015006060>