

常用核电子技术

席德明 许廷宝 郭瑞琪 等编著

科学出版社

常用核电子技术

席德明 许廷宝 郭瑞琪 等 编著

科学出版社

1982

内 容 简 介

本书以总结核电子技术的实际经验为主,结合国外的近期动态编写而成。书中提供了较多的经过实际使用的电子学线路,全部采用国产元件设计,以便于引用。全书共分九章,第一章简要介绍与核电子技术有密切关系的核探测器及探测器常用电源,其它各章依次论述核信息的预放大、放大、处理、幅度甄别与分析、时间甄别与分析、计数及核能谱数据的自动获取与处理等技术。最后介绍了几种常用的测试信号产生器。

本书适合高等院校有关专业的师生以及科技人员参考之用。

常 用 核 电 子 技 术

席德明 许廷宝 郭瑞琪 等 编著

责任编辑 荣毓敏

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

★

1982 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1982 年 1 月第一次印刷 印张:21 3/4 插页:7

印数:0001—2,100 字数:504,000

统一书号:13031·1799

本社书号:2445·13—3

定 价: 4.85 元

前 言

实验核物理的主要研究对象是各种核辐射粒子。它们是人的感官所不能直接察觉到的微观粒子,因此必须借助于某些传感器即核辐射探测器,来探测核辐射粒子的各种性质和运动规律,例如它们的强度、能量、动量以及运动方向等。目前最常用的各种电探测器是将探测到的核信息先转化为电讯号。但为了便于人们直接观察、研究各种核信息,还必须对这些电讯号加以放大、处理、记录和分析。这就是核电子技术需要完成的基本任务。

核电子技术也是电子学的一个重要应用分支。由于不断引进电子学领域的新成就,如采用集成电路,工艺标准化和系列化以及应用电子计算机等,核电子技术获得了迅速的发展。但是,核电子技术处理的对象是核辐射粒子所产生的讯号,因而还有其本身的特殊要求。对核电子技术的特殊要求是:优越的幅度分辨、时间分辨和计数率分辨的能力;高线性度、高灵敏度、高速度、高稳定性和高可靠性等等。

目前,测量核辐射的核电子技术已经形成一套基本测量系统。一个物理量(如脉冲幅度、时间间隔、上升时间等)一般有两种表示方法,一种是表示成模拟量,它的大小可以由任何数值来表示;另一种是表示成数字,只用“0”或“1”,“是”或“否”两种状态来表示。从探测器出来的电讯号大多是模拟量,这种讯号一般都要经过放大和处理(例如成形、相加、延迟、展宽等),使它变成我们所需要的模拟量,然后再进行模拟-数字变换,把模拟量变换成数字量,以便送到数据处理系统中进行处理,才可得到所需的结果。

基于上述考虑,本书着重介绍模拟讯号的获取、放大、处理以及模-数变换等。至于数字讯号的处理技术,一般可在有关数据处理系统和数字电子计算机的著作中找到,本书只对多道分析器和电子计算机在线应用等作简要介绍。

全书共分九章。第一章主要介绍一些常用探测器及其偏置电源。第二、三、四章是模拟讯号的处理,分别阐述预放大、主放大和几种模拟讯号的处理技术。第五、六章属于模-数变换范畴,分别叙述讯号幅度和时间的甄别和分析技术。第七章介绍计数方法。第八章则简要介绍包括多道分析器在内的核能谱数据的获取与处理系统。这些内容可以说比较系统地反映了目前常用核电子技术的基本面貌。在第九章中还介绍了几种测试用的讯号发生器。为了便于读者在实际工作中参考,我们根据近年来国内一些成果给出了一些实用电路。

我们在总结过去经验的基础上编写了本书,希望本书的出版能对从事核电子技术工作的同志起到参考作用。参加本书编写工作的还有陆坤元、王光宇、杨惠民等同志。周和琦、杨钟汉、梁祺恺、庄志芳、罗英信、宋国瑞、黄桂珍、亓仲诚、刘德润、何德根、金余恒、倪鹤峰、蔡雍雍、乌如恭桑、金德义、张佩珠、邢静媛、王树德等同志为本书提供了有关资料。张淑英、张冬姑、赵光炬等同志承担了全部制图工作。我们还征求了有关工厂、学校、科研单位部分同志的意见,得到他们的热情帮助和指导,并提供了有关的技术资料,我们在此表示感谢。由于我们水平有限,经验不足,书中不妥和错误之处在所难免,请读者予以批评指正。

目 录

第一章 核辐射的探测	1
第一节 核辐射与物质的相互作用	1
一、重带电粒子	1
二、电子与正电子	2
三、 γ 射线和X射线	2
四、中子	3
第二节 气体电离探测器	5
一、气体的电离和放大	5
二、电离室	6
三、正比计数管	7
四、盖革-弥勒计数管	9
第三节 半导体探测器	10
一、基本原理	10
二、几种常用半导体探测器	12
三、半导体探测器的输出讯号	14
第四节 闪烁探测器	16
一、闪烁探测器原理简介	16
二、闪烁体	17
三、光的收集部件	19
四、光电倍增管	19
五、闪烁计数器的输出讯号	22
第五节 探测器的电源	24
一、直流-直流变换	24
二、直流电压的稳定	26
三、稳定高压电源实例	27
第二章 讯号的预放大	33
第一节 基本放大电路	35
一、单管放大电路	35
二、多管放大电路	37
三、放大器中的负反馈	37
四、常用多管放大节	38
第二节 能量分辨与噪声	39
第三节 预放大器中的噪声	42
一、场效应管的噪声	42
二、探测器的噪声	44

三、输入电阻的热噪声	44
四、预放大器输入端的总噪声	45
第四节 电压预放大器	46
一、电压预放大器的一般要求	47
二、电压预放大器的实例	48
三、指标的测量	50
第五节 电荷预放大器	52
一、电荷预放大器的基本原理及要求	52
二、进一步降低电荷预放大器中噪声的方法	57
三、具体电路及测试方法	59
第六节 电流预放大器	63
一、电流预放大器的基本要求	64
二、电流预放大器的结构和实例	64
三、宽频带,低噪声电流预放大器	66
第三章 讯号的放大	69
第一节 线性电压脉冲放大器	69
一、放大器的线性	69
二、放大器的放大倍数及其稳定性	73
三、放大器中的噪声	77
四、放大器中的幅度过载	78
五、放大器中的计数率过载	79
六、放大器中的成形电路	81
七、线性脉冲放大器实例	96
八、线性脉冲放大器的主要性能的测量	102
第二节 快放大器	104
第四章 讯号的处理	110
第一节 加减运算	110
一、基本方法	110
二、共基极相加电路	112
三、运算放大器相加电路	113
第二节 幂函数和对数函数转换	114
一、折线趋近法	115
二、对数转换	117
第三节 乘除运算	122
一、利用对数函数转换进行运算	123
二、利用幅度时间转换进行乘除运算	124
三、四象限乘法器	125
第四节 切割放大	127
一、对切割放大器的基本要求	128
二、电压切割技术	128
三、电流切割技术	129

第五节 线性门	132
一、线性门的基本形态	133
二、六个二极管线性门	134
三、利用负反馈改善线性门的性能	137
四、利用抵消的办法改善线性门的性能	138
第六节 脉冲展宽	138
一、基本方法	139
二、反馈脉冲展宽电路	139
第七节 基线恢复	142
一、原理和方法	144
二、电路实例	148
第八节 延迟	150
一、延迟电路的种类和实现的方法	150
二、利用电缆或人工延迟线进行延迟	151
三、利用电容器充放电进行延迟	152
第五章 脉冲幅度的甄别和幅度-数字变换	157
第一节 积分甄别电路	157
一、一般性能要求	158
二、几种甄别电路	159
三、实用电路一例	165
四、主要性能测试方法	167
第二节 微分甄别电路	167
一、基本原理	168
二、主要性能和指标要求	169
三、电路主要类型	169
四、改善稳定度的方法	170
五、提高反符合可靠性的方法	172
六、实用电路举例	174
七、性能测试方法	182
第三节 快甄别电路	182
一、快甄别的实现方法	183
二、实用电路	184
第四节 幅度-数字变换	188
一、线性法幅度-数字变换	189
二、两级线性放电法幅度-数字变换	192
三、逐次渐近法幅度-数字变换	194
四、再循环二进制渐近法幅度-数字变换	202
第六章 时间的甄别与分析	205
第一节 概述	205
第二节 定时技术	206
一、前沿定时技术	207

二、外插补偿前沿定时技术·····	208
三、电缆微分过零定时技术·····	209
四、恒比定时技术·····	210
五、定时电路时间位移的测量方法·····	213
六、定时电路实例·····	214
第三节 符合技术·····	218
一、符合电路的主要指标·····	218
二、符合电路的实现方法·····	219
三、符合电路实例·····	223
四、符合电路分辨时间的测量方法·····	227
第四节 时间间隔分析·····	228
一、游标尺原理·····	228
二、脉冲重叠原理时幅变换技术·····	229
三、起始、停止时幅变换·····	230
四、时幅变换器的主要指标·····	231
五、电路实例·····	231
六、时幅变换器主要指标的测量方法·····	238
第五节 上升时间分析·····	239
一、上升时间幅度变换器的主要指标·····	240
二、上升时间幅度变换器实现方法·····	240
三、上升时间幅度变换器的电路实例·····	241
四、上升时间幅度变换器的测量方法·····	247
第六节 波形甄别技术·····	248
一、粒子识别技术·····	248
二、入射粒子位置分析·····	249
三、锗(锂)探测器慢成份的去除·····	249
四、堆积拒绝技术·····	249
第七章 讯号的计数·····	254
第一节 讯号的计数效率和丢失·····	254
一、计数统计估算·····	254
二、多级定标电路使讯号脉冲时间间隔均匀化·····	255
第二节 二进制计数单元电路·····	256
一、晶体管电压饱和型双稳态触发器·····	257
二、晶体管电流型双稳态触发器·····	261
三、隧道二极管双稳态触发器·····	262
四、集成电路双稳态触发器·····	263
第三节 常用十进制计数单元·····	265
一、二十进制计数单元·····	265
二、环形计数单元·····	269
三、中规模集成电路计数单元·····	273
第四节 译码与显示·····	274
一、字体显示器件、驱动电路和译码器·····	275

二、分段字形显示器件、驱动电路和译码器·····	278
第五节 定标器·····	281
第六节 计数率表·····	286
一、线性计数率表·····	286
二、对数计数率表·····	293
第八章 核能谱数据的自动获取 ·····	297
第一节 多道分析器·····	298
一、多道分析器的结构·····	298
二、存储器·····	299
三、脉冲幅度分析器·····	300
四、取样分析器·····	301
五、多路定标器·····	302
六、数据的输出·····	303
七、稳谱·····	305
第二节 基于计算机的核能谱数据获取系统·····	305
一、系统结构·····	305
二、计算机的基本结构·····	307
三、直接选址型核能谱数据获取·····	312
四、数据缓冲型核能谱数据获取·····	313
五、一个多维多用户核能谱数据获取与处理系统简介·····	321
第九章 测试信号产生器 ·····	328
第一节 精密脉冲产生器·····	328
一、基本原理·····	328
二、几个实例·····	332
第二节 滑移脉冲产生器·····	336
第三节 随机脉冲产生器·····	338

第一章 核辐射的探测

常用核电子技术的任务主要是处理各种核辐射探测器提供的电讯号。通过对这些电讯号的处理来确定所探测核辐射的类别、强度、能量、方位等。要使我们设计的核电子仪器能更好地与相应的探测器配合,以得到预期的效果,就要对各种探测器的物理过程和它们的电性能有比较清楚的了解。本章就从这点出发,根据核辐射与物质的相互作用来简要地介绍气体探测器、半导体探测器及闪烁探测器等常用探测器的一般原理及相应的电性能,以供在设计核电子仪器时参考。至于一些与核电子仪器没有直接讯号联系的探测元件,如各种径迹探测器,以及一些专门用于高能物理的探测器件,如契伦柯夫探测器等,因限于篇幅,不准备在此介绍。

第一节 核辐射与物质的相互作用

探测粒子的基本原理是当粒子通过介质时,介质就要吸收粒子的一部或全部能量,而产生电离或激发作用。当带电粒子通过探测介质时,它的电磁场与介质原子的轨道电子直接相互作用而产生电离与激发,并分布在粒子径迹的附近。如果进入介质的不是带电粒子而是电磁辐射,如X射线与 γ 射线,那就先得经过一些中间过程:产生电子对、光电效应或康普顿效应等,把它的能量部分地或全部传给电子,然后由电子产生电离或激发。同样,对中子来说,也必须经过核反应,如与核子碰撞产生带电粒子,然后造成电离或激发。各种粒子按照它们与介质的作用性质来看,大致可分为四大类:重带电粒子、电子与正电子、X及 γ 射线、中子。

一、重带电粒子

重带电粒子进入探测介质后,由于与介质内的电子不断相互作用而损失其能量,使介质原子的电子激发或电离。电离损失包括两种过程:1. 初电离,即由粒子直接作用产生的电离。当电子在与质量为 M ,能量为 E 的粒子碰撞时能获得的最大能量为

$$E_{\max} \cong 4Em_0/M, \quad (1.1.1)$$

式中 m_0 为电子质量。2. 由初电离产生的较大能量的电子,一般称为 δ 电子,由于其能量大于电离电位,因而又可以进一步产生电离,称之为次电离,它是决定电离径迹宽度的因素。由式(1.1.1)可看出,由于每次碰撞,粒子只损失很小一部分能量,它造成粒子径迹的偏移也很小。粒子在探测介质中基本上是沿直线运动。最后,经过多次碰撞直到能量损失完了,然后停止。粒子在介质中走过的路程,即粒子在此介质中的射程一般可以相当准确地测得(误差1—5%)。

对于给定类型和能量的重带电粒子,如果已知它在密度为 ρ_1 、原子量为 A_1 的介质中的射程为 R_1 ,则它在密度为 ρ_2 、原子量为 A_2 的介质中的射程 R_2 ,可由简单的经验关系式估算出:

$$R_1/R_2 = (\rho_2 \sqrt{A_1})/(\rho_1 \sqrt{A_2}). \quad (1.1.2)$$

常见的重带电粒子有质子、 α 粒子、氦核、氘核及裂变碎片等。

二、电子与正电子

对能量在 10 MeV 以下的电子来说，在介质中损失能量的方式和重带电粒子类似，主要是由电离和激发所造成的。当电子能量更高时，轫致辐射变得十分明显。

由于电子质量远小于重粒子，故在每次碰撞时把大部分能量传给介质中的电子，造成很大的次级电离。如 0.1 MeV 的电子在空气中总电离量的三分之二是由次级电离造成的。由于每次碰撞损失大量能量，造成电子在介质中的径迹明显偏移，因而不易确定其射程。因为电子比同样能量的重带电粒子速度高得多，所以它在介质中能量的损失率和电离密度相应地也小得多，而电子的射程比同样能量的重带电粒子要大得多。在轫致辐射不起明显作用时，一般定义电子射程的方法是，把记录电子相对强度与吸收物质厚度 R 的关系曲线的直线部分延长，延长线与横轴交点处的 R 值 ($R_{外延}$) 定义为电子射程，如图 1.1.1 所示。^[1.01] 电子射程的涨落一般达到 10—15%。吸收体厚度以 mg/cm^2 表示。以这种单位表示的射程可以近似地认为与吸收物质的原子序数无关。

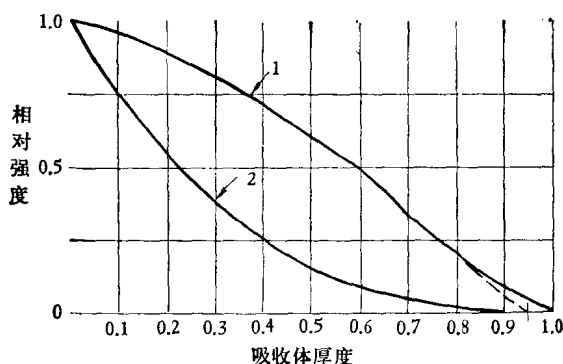
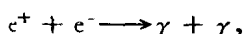


图 1.1.1 电子的吸收曲线

曲线 1 是单能电子(1.9 兆电子伏);曲线 2 是具有连续能谱的电子
(最大动能为 1.9 兆电子伏)

正电子与电子情况基本类似。不过，正电子还可以与附近的电子结合在一起而产生湮没现象，放出特征湮没辐射，即



产生两个各具有能量为 511 KeV 的 γ 光子，并向相反方向飞出。

三、 γ 射线和 X 射线

γ 射线和 X 射线本质上都是电磁辐射，在这个意义上可以把它们统称为光子。它们的差别主要在于产生方式不同。通常把原子核从激发态跃迁到低能量态时放出的射线叫做 γ 射线；把原子内层轨道电子的退激发或高能电子的轫致辐射所发出的电磁辐射叫 X 射线。此外，这两种辐射在能量范围上也有差别。由原子核跃迁放出的 γ 光子，其能量是断续的，经常是在几千电子伏到几兆电子伏之间。X 射线则既有断续的，也有连续的，通常是在小于 0.1 MeV 之内。

γ 射线与X射线在与物质作用时主要有三种过程：光电效应、康普顿效应和电子偶形成。

(1) 光电效应就是光子把自己的全部能量交给探测介质原子中内层轨道电子的过程。经光电效应后，电子得到的动能为 $h\nu - E_b$ ，这里 $h\nu$ 是入射光子的能量， E_b 是该轨道电子的结合能。这种过程在 γ 光子能量较低时 ($<0.1\text{MeV}$) 占有主要地位。

(2) 康普顿效应就是光子被探测介质中的电子散射，使其飞行方向发生偏转的过程。此时 γ 光子只损失一部分能量。由于光子散射的角度不同，给予电子的能量是在零和 $E_{\max}$ 之间连续分布的。 $E_{\max}$ 值可由下式给出：

$$E_{\max} = \frac{2(h\nu)^2}{m_0c^2 + 2h\nu}. \quad (1.1.3)$$

一般来说，当 $h\nu$ 处于 0.1 到 1 MeV 范围内时，这种过程的几率最大。

(3) 电子偶形成是光子形成一对正负电子，而光子本身完全消失。这过程是正负电子湮没时形成两个光子的逆过程。显然，产生这种效应的条件是：1. 光子能量必须超过 $2m_0c^2$ (1.022 MeV)。这时光子消失，而电子偶带走了超过 $2m_0c^2$ 那部分能量；2. 电子偶形成必须有第三者来接受光子的部分动量。因此光子只有在原子核和核外电子的电场中或两个光子对头碰时才能发生这种转化。这种过程在光子能量大于 2 MeV 时起主要作用。

应该指出，光电效应、康普顿效应、电子偶的有效截面，与探测介质的吸收系数有关，而后者又与探测介质的性质以及探测器的几何形状有关。设 ξ_{Ph} 、 ξ_{Co} 、 ξ_{Pa} 分别代表某种探测介质对 γ 光子的光电吸收系数、康普顿吸收系数及电子偶形成吸收系数，则它们与 γ 光子能量和探测介质的性质有如下关系^[1.02]：

$$\left. \begin{aligned} \xi_{\text{Ph}} &\propto NZ^5(h\nu)^{-3.5}, \\ \xi_{\text{Co}} &\propto NZ/(h\nu), \\ \xi_{\text{Pa}} &\propto NZ^2(h\nu - 2m_0c^2), \end{aligned} \right\} \quad (1.1.4)$$

式中 Z 为原子序数。图 1.1.2 及图 1.1.3 表示 ξ_{Ph} 、 ξ_{Co} 、 ξ_{Pa} 与光子能量对不同介质的曲线^[1.02]。

此外，与探测器的几何形状也有很大影响。例如当探测器的体积足够大，以致使光子在探测介质中经过多次康普顿散射后，其能量完全损失时，就等效于一个光电效应。亦即相当于增加了光电效应的几率。

在 γ 及 X 射线能谱测量中，人们往往希望尽量提高光电峰而压低康普顿效应的影响。当我们了解这些过程后，除了要合理地选用探测器外，还可以利用核电子仪器经过符合或反符合方法进一步减弱康普顿效应的影响来提高谱仪的峰康比。

四、中子

中子是不带电的中性粒子，不会直接使探测介质中的原子电离和激发，只能通过核反应产生带电粒子或 γ 射线，在探测介质中引起电离和激发作用。根据带电粒子的能量、强度以及核反应的形式，间接推出被探测中子的能量、强度和方位等。

通过核反应作用来探测中子的方法较常见的有以下几种：

(1) 记录与中子弹性散射的带电粒子，例如 $p(n,n)p$ ， $d(n,n)d$ 等反应中的带电反

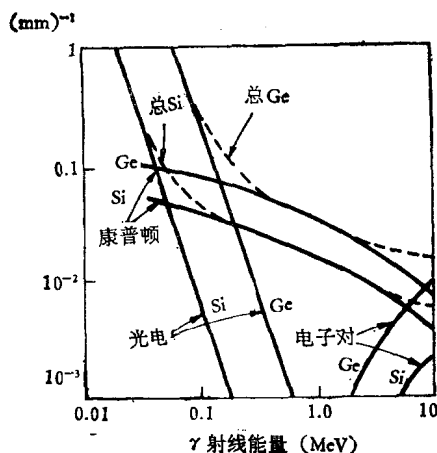


图1.1.2

硅和锗对γ射线总吸收系数与各部分吸收系数图

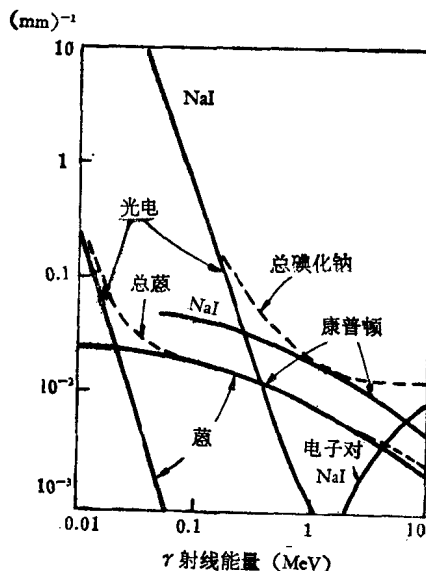


图1.1.3

碘化钠和铯对γ射线的总吸收系数和各部分吸收系数

冲核 P 和 d。这种方法亦称反冲核法。由于在一定能量下反应数目与中子流强度成正比,而且反冲核的动能和飞行方向是中子能量的单值函数,所以用这种方法,从反冲核的测定既可求得中子流强度,也可求得中子能谱。最普遍的探测快中子与中能中子的方法之一,就是探测含氢吸收体中的反冲质子。这种反应对这能量范围的中子有相当大的反应截面。根据散射角度的不同,中子传给质子的能量可从零到百分之百,而且在中子能量小于及等于 10 MeV 时几乎是均匀分布的,如图 1.1.4 所示。所以,根据质子能量分布,经过一定计算即可推出中子的能量分布。

(2) 记录中子与探测介质作用后反应核放出的带电粒子,例如质子、氘核、α 粒子等或者记录核的裂变产物。主要有以下几种反应:

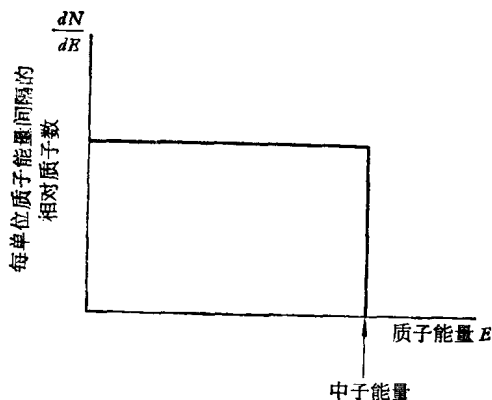
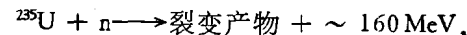
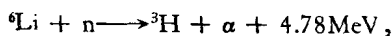
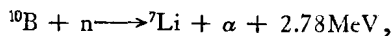
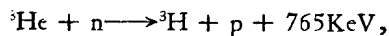


图1.1.4

单能中子所产生的反冲质子的能量分布

被称为活化法。

(5) 根据中子的飞行时间来确定中子的能量。用这种方法可以直接测量中子的能



(3) 记录中子被吸收后放出的 γ, 即 (n, γ) 反应放出的 γ。这种方法一般只用于探测中子流强度而不能探测入射中子的能量。由于快中子的 (n, γ) 截面很小, 因此快中子在被吸收前常需要慢化。

(4) 先用中子照射某种靶元素, 使它变成放射性核, 然后通过测量此放射性核的强度来推算中子的强度, 此法亦

谱,而且具有较高的精确度。

第二节 气体电离探测器

一、气体的电离和放大

气体电离探测器是以气体做为探测介质的探测器。带电粒子穿过气体时,与气体分子的轨道电子发生库仑碰撞,使气体分子电离而产生电子-正离子对。其中一些电离电子能量较大,还可以使气体分子进一步电离而产生新的电子-正离子对。这两种电离产生的电子-离子对的数目之和称为总电离。实验证明,在很宽的能量范围内,带电粒子所产生的总电离与粒子所损耗的总能量成正比。这表示产生一个离子对所需要的平均能量 w (并不是气体分子的平均电离电势)基本上与入射粒子的性质和能量无关。对同一种气体, w 几乎是一个常数。表 1.1.1 给出了几种气体的 w 值(对电子和 5MeV 的 α 粒子)^[1.02]。

表 1.2.1 几种气体的 w 值

介 质	w 值		平均电离电势
	电 子	5 兆电子伏 α	
氢	36.9eV	36.6eV	15.4eV
氩	26.3eV	26.3eV	15.8eV
空 气	34.2eV	35.2eV	—
甲 烷	28.1eV	29.1eV	13.1eV

气体分子电离后,可能发生以下几种情况: 一是电子和正离子从大密度处向小密度处扩散;二是电子被中性分子俘获形成负离子;三是正负离子复合形成中性分子。此外,当有外加电场时,电子(或负离子)与正离子会被电场拉开,沿电场方向漂移。气体电离探测器主要是利用最后一种情况进行工作。在外加电场的作用下收集电荷,提供我们所需要的电讯号。

在气体电离空间加进两个电极,并保持一定的电位差。收集到的电荷与外加电压的关系如图 1.2.1 的曲线所示。图中两曲线分别表示 α 粒子和 β 粒子的情况, N_{α} 和 N_{β} 表示 α 和 β 产生总离子对的数目。从图 1.2.1 看到,可以把曲线分成四段。在第 I 段中,即当外加电压小于 V_a 时(V_a 是电离室的起始工作电压),收集电荷随电压的增大而增加,离子复合则逐渐减小。当电压增至大于 V_a 后,离子复合基本消失,此时总离子对的数目全部被电极收集。如继续增加电压,则在一定范围内,收集到的电荷不再增加。这段范围称为收集电荷的饱和区。即图 1.2.1 中曲线的第 II 段。在电压大于 V_b 后,这时由于电场加强,因而产生次级电离,甚至次级电子又产生次级离子对。如此不断继续下去,最后收集到的电荷远大于初始总电离数。这就是所谓气体放大作用,亦即进入曲线的第 III 段。在这一范围内,气体放大倍数随电场的增强而增大,即所谓正比区。但次级电离随电场的增强而增大,并不是无止境的。当电场强度大到一定程度时,由于放大后的次级离子数足够多,电离电荷所产生的电场抵消一部分外加电场,即所谓空间电荷效应。这效应实际上在第 III 段的右边部分(即 III_b 段)已经有所表现。因为在这一部分,对初始总电离大的 α 粒子来说,放大倍数较小;而对于初始总电离小的 β 粒子,放大倍数较大,因此通常把这一

段叫做限制正比区。而且对 α 粒子来说要比 β 先进入限制正比区,如图 1.2.1 所示。当继续增加电压时,光子开始起作用,收集到的总电荷再一次达到饱和。这就是图 1.2.1 中第 IV 段的情况。这时,放电电荷与初始总电离数和初始粒子性质无关。

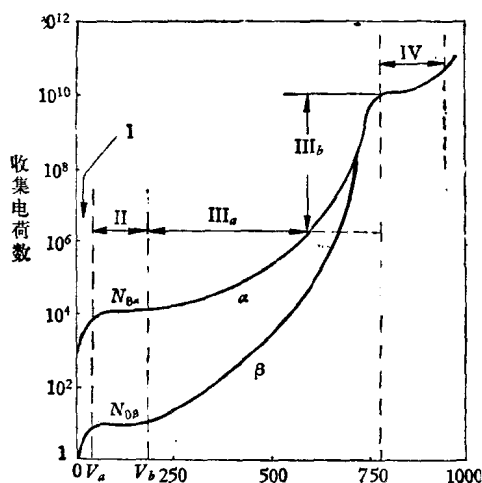


图 1.2.1 收集电荷与外加电压的关系:
I—复合区, II—电离室工作区, III_a—正比计数管工作区, III_b—限制正比区, IV—盖革-弥勒计数管工作区

图 1.2.1 上曲线的不同区域,体现在气体电离探测器上,就是三种不同类型的探测器: 第 I 段是非工作区域,第 II 段是电离室的工作区域,第 III_a 段是正比计数器的工作区域,第 IV 段就是盖革-弥勒计数管的工作区域。

二、电离室

电离室的基本工作原理就是全部收集由带电粒子所引起的离子。在电离室中应该既不存在离子复合,也没有气体放大。

为了收集到初始总电离的离子,在电离室的两极间施加的电压应在图 1.2.1 中第 II 段范围内。对于不同大小和不同结构的电离室来说,饱和区工作电压也相差很大,低的只需几十伏,高的甚至达到几千伏。但从图 1.2.1 中也可看出,对于某一固定条件的电离室,饱和和工作电压有一相当宽的范围,因此电离室并不要求很高稳定度的电源。

最简单的电离室电路如图 1.2.2 所示。阴极 K 与阳极 A 之间加上电位 V_0 。假定入射粒子在 r_0 处形成 N_0 对离子,电荷为 $+N_0e$ 和 $-N_0e$,正离子向阴极漂移,电子向阳极漂移。电离电荷的运动在电极上将产生感应电荷,堆积起来使电极产生瞬间的电压变化,从而给出一个电讯号由核电子仪器记录下来。

电离室按其工作状态可以分为脉冲电离室和电流电离室两大类。脉冲电离室是记录单个粒子的电离室,每进入一个粒子可以给出一个电脉冲,有的脉冲电离室其输出脉冲幅度还可正比于入射粒子能量。电流电离室则是记录由大量带电粒子所引起的总电离效应,而给出的是一个相应的平均电流讯号,常用作剂量仪表的探头等。现分别介绍如下:

1. 脉冲电离室探测单个带电粒子是通过记录电离电荷在阳极上引起的电压脉冲来实现的。不同用途和选用不同参数的电离室得到不同形状的脉冲。通常要求输出脉冲能满足以下几个条件: a. 脉冲幅度必须大大超过电子电路输入端的噪声,以使记录仪器能甄别出讯号和噪声; b. 在高计数率时,要求脉冲延续时间(即电离室的分辨时间)尽量小, c. 在探测粒子能量时,要求脉冲幅度与能量损耗成正比。

由于电子与离子的迁移率不同,二者对总感应电压的贡献不是同时的。在不含负电性气体(电子可以附着于这种气体的分子上而形成负离子)的电离室中,电子的迁移率比正离子的迁移率大二至三个数量级。所以在最简单的平板型电离室中,给出的电脉冲形

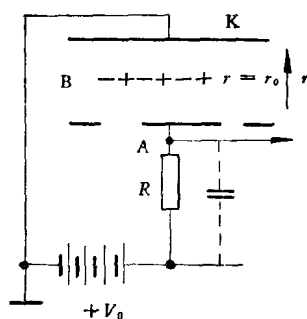


图 1.2.2 电离室收集电荷的电路

状是和电离的位置有关的。在图 1.2.3 中表示了单个粒子由于产生电离的位置不同而造成输出脉冲形状的改变。前面上升较快的一段主要为电子的作用；而后面上升很慢的一段则为正离子的作用。形成离子对的位置离阳极越远，快上升部分就越大。但是最后电压脉冲的最大值是由总电离量决定的，而与位置无关。但这需要很长时间（毫秒数量级）。假设 N_0 为总离子对数， C 为系统总电容，则最大输出脉冲电压为

$$V_0 = N_0 e / C, \quad (1.2.1)$$

e 为电子电荷。

探测器工作在高计数率时，就只能得到收集电子引出的那部分电压，它的收集时间比离子收集时间短 10^2 到 10^3 倍。这可用适当短时间常数的脉冲成形电路来实现。但是由于收集电子引出的那部分电压与入射粒子的位置有关，从而损失了输出脉冲幅度与粒子能量的正比关系。所以在设计用于能量测量的电离室时，必须设法使电离室既有较小的分辨时间，同时还要设法使输出讯号幅度不受电离位置的影响。

测量粒子能量比较好的方法是，用一个带屏栅的电离室，即在阳极与阴极间加一栅网，并使栅网靠近阳极。如图 1.2.4 所示。由于栅极的屏蔽作用，在阳极上的感应讯号只有当电子通过栅极以后才形成。只要产生电离的地点在栅极、阴极间的空间内，脉冲幅度就与电离位置无关。而且它的收集时间较短，约 $1 \mu s$ 左右。但是应该指出，由于栅极屏蔽作用不完全和部分电子可能被屏栅收集而损失掉。其脉冲形状仍与离子产生地点有关，而且从粒子入射到产生脉冲之间存在一段延迟时间。脉冲电离室的另一个缺点是由于它输出的讯号小，在探测低能量粒子或电离本领小的粒子时，讯号幅度只有微伏级，受放大器噪声影响，能量分辨就很差，甚至讯号与噪声无法分开。因此脉冲电离室较多地用来测 α 粒子及裂变碎片，而不宜于测量 β 及 γ 射线。

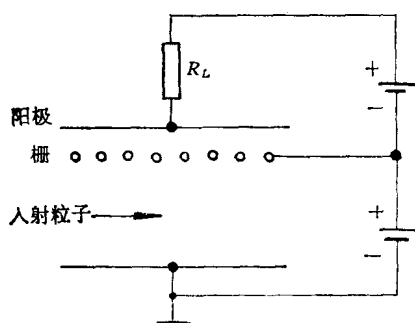


图 1.2.4 栅网电离室原理图

2. 电流电离室是记录在确定时间间隔内进入电离室的大量粒子的总电离的设备。它所测量的是稳定的电离电流或者变化十分缓慢的电流。电流电离室往往与测量微小电流的装置（即微电流放大器）配合起来用以探测辐射强度或剂量。电离电流变化的范围很广，一般在 10^{-6} 到 10^{-16} 安培之间。所以有时为了使仪表覆盖较大的量程范围，需要采用对数式电流放大器。

为了探测不同的粒子，在电离室内壁上还可以涂上一层易与被测粒子起反应的物质，如探测中子时可涂以含氢材料、含硼材料或裂变物质。

三、正比计数管

在图 1.2.1 中曾看到收集到的电荷数 N 与外加电压 V 的关系曲线。在 III₀ 段中，由于

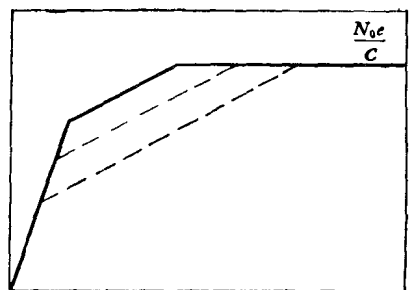


图 1.2.3

单个离子对初始位置与感应电压形状的关系

气体放大作用, N 比初始总电离要大得多, 而且输出电压脉冲幅度与初始总电离保持正比关系, 因此把在这一段区域工作的计数管叫做正比计数管。

为了使气体放大倍数尽可能不受起始电离位置的影响, 正比计数管一般由一个细中心丝阳极和一个与它同轴的圆筒形阴极所组成。这样气体放大作用主要在靠近阳极的强电场处产生。正比计数管的脉冲形状和延续时间与气体性质、气压、负载电阻及系统总电容有关。其输出电压脉冲幅度与初始总电离成正比而与初始电离发生的地点无关, 即电压脉冲幅度

$$V = -Ne/C = -MN_0e/C, \quad (1.2.2)$$

式中 C 为系统总电容, M 为气体放大倍数, N_0 为原初总离子数, N 为阳极收集到的电离数。但应该指出, 这一电压脉冲的幅度是在经过一段时间(即正离子收集时间)才达到的。当计数管系统总电容一定时, 其脉冲形状主要由负载电阻决定, 如图 1.2.5 所示。从图上可以看出, 如果要求将正比管用于高计数率, 就需选用较小的负载电阻以提高计数管的时间分辨本领。最短可使脉冲延续时间小于 $1\mu s$ 。严格来说, 正比计数管的固有分辨时间小于它的脉冲延续时间。在脉冲延续时间内, 正比计数管对随后的人射粒子仍然是灵敏的, 并且将叠加在原先的脉冲上。这个性质与电离室相似。可用放大器中的微分电路把已叠加的脉冲分开。微分时间常数一般选得大于电子收集时间而小于正离子收集时间。

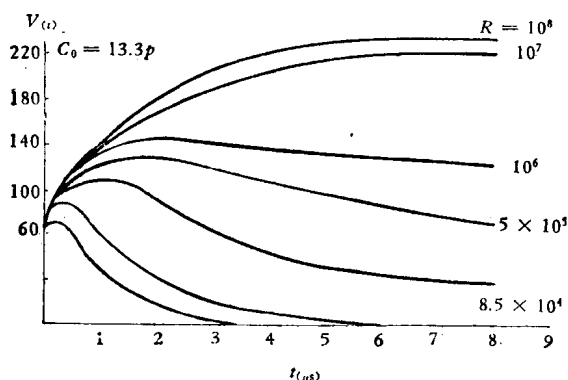


图 1.2.5 不同负载电阻值 R 时正比计数管输出电压脉冲 $V(t)$ 与时间的关系

正比计数管具有气体放大作用, 可以用来测量低能粒子与射线, 如低能 β 及软 X 射线等。优点是能输出较大的幅度, 而且对其附属电子仪器灵敏度的要求比电离室的要求低。分辨时间短, 计数率可达每秒几万次。但是, 它的脉冲幅度受很多条件影响, 涨落较大。故能量分辨不如电离室, 一般在 10% 以上。并且放大倍数受外加电压影响较大, 对电源稳定性要求高。

正比计数管可以用来测量 α 、 β 、中子、X 射线等。测量中子时, 对快中子用充氢或含氢气体。对热中子用三氟化硼、 ^3H 等中子反应截面较大的元素气体。与电离室一样, 正比管也可以用于电流工作状态。

近年来, 在正比计数管的基础上, 还发展了各种定位正比计数器: 如各种定位正比管、多丝正比室、漂移室等。它们与相应的电子线路配合起来, 可以精确地对入射粒子进行一维或二维定位。它们不但可以做成有很大的灵敏面积, 同时还可以给出入射粒子的