

核电子学概要

原子能出版社

核 电 子 学 概 要

唐兆荣
邝忠谦 编 译
陈伯显

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书第一部分是核辐射探测器，包括充气探测器、半导体探测器、闪烁探测器、切伦科夫探测器、核乳胶与固体径迹探测器、热释光探测器及自给能探测器。

第二部分是核电子学，包括放大器、甄别器、符合与反符合电路、计数系统、多道分析器及标准系统。

本书可供从事实验核物理、核技术应用和核电子学研究的科技工作者参考。也可供高等院校有关专业的师生参考。

核电子学概要

唐兆荣
邝忠谦 编译
陈伯显

责任编辑 袁祖伟

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

海洋出版社印刷厂印刷

(北京市西城区阜外大街40乙)

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售



开本787×1092_{1/32} 印张4.5字数90千字

1988年2月北京第一版·1988年2月北京第一次印刷

印数1—1000

统一书号：15175·855 定价：1.15元

ISBN 7-5022-0001-0/TN·1

前 言

当前，核辐射测量技术已不仅仅应用于核研究，而且成为其他许多部门（例如医学、生物学、化学、考古学、地质学及其他学科）的辅助手段。本书所涉及的核电子学，拟就核辐射探测器及电测量仪器，向广大的核技术应用工作者作一简略介绍。

本书是在联邦德国T. Friese所著《核电子学》(1981. 9)一书的基础上编译而成的。补充的几个章节，从内容上有所扩充，有所深化。我们尽量以一些较新的资料，反映当前这一领域内新的进展。

这本书的特点是文字比较简练，没有复杂的理论计算和推导，而侧重于介绍基本原理和实际使用中经常用得着的结论。虽然文字不多，但不少章节在同类书中还是有新意的。为帮助核测量技术工作者使用好一些比较复杂的测量系统，书中还提供了一些有用的知识。

我们希望这本书不仅对从事核测量技术工作的科技人员会有所帮助，而且对从事核电子学研究的专业工作者和大专院校核专业的师生也会起到参考作用。

编译者

目 录

前言

第一部分 探测器

第一章 充气探测器	(1)
1.1 原理	(1)
1.2 电离室	(3)
1.3 正比计数器	(6)
1.4 盖革-弥勒计数管	(8)
1.5 自猝灭流光(SQS)探测器	(12)
1.6 气体多丝室	(14)
第二章 半导体探测器	(19)
2.1 原理	(19)
2.2 硅带电粒子探测器	(20)
2.3 硅和锗光子探测器	(21)
第三章 闪烁探测器	(25)
3.1 原理	(25)
3.2 光电倍增管	(25)
3.3 闪烁体	(30)
第四章 切伦科夫探测器	(34)
4.1 原理	(34)
4.2 辐射体	(34)
4.3 分类及应用	(35)
第五章 核乳胶及固体径迹探测器	(38)
5.1 概述	(38)

5.2 核乳胶	(38)
5.3 固体径迹探测器	(41)
第六章 热释光探测器	(44)
6.1 原理	(44)
6.2 材料与器件	(45)
6.3 特点及应用	(46)
第七章 自给能探测器	(48)
7.1 原理	(48)
7.2 自给能中子探测器	(49)
7.3 自给能 β 探测器	(51)
附表 探测器汇总表	(插页)

第二部分 核电子学

第八章 核脉冲测量系统	(53)
8.1 探测器信号的信息量	(53)
8.2 测量系统的组合单元	(53)
8.3 典型的测量系统	(57)
第九章 脉冲放大器	(59)
9.1 前置放大器	(59)
9.2 脉冲放大器	(67)
9.3 同轴电缆的信号传输	(78)
第十章 甄别器	(83)
10.1 幅度甄别器	(83)
10.2 定时甄别器	(86)
10.3 脉冲形状甄别器(PSD)	(87)
第十一章 符合与反符合电路	(88)
第十二章 计数系统	(92)
12.1 率表	(92)

12.2	计数器、定时器和数字率表	(95)
12.3	计数系统中的死时间	(99)
第十三章 多道分析器		(101)
13.1	原理	(101)
13.2	模拟-数字变换器(ADC)	(104)
13.3	稳谱	(107)
13.4	数据处理	(108)
13.5	γ 谱分析.....	(108)
第十四章 标准系统		(113)
14.1	NIM系统	(113)
14.2	CAMAC系统	(124)

第一部分 探测器

第一章 充气探测器 [1、2、5、6、13~20]

1.1 原理

充气探测器一般为内部充有气体的平板形或圆柱形的电容器，其中气体作为工作介质。加到电极（阳极和阴极）上的直流电压产生强度恒定的或双曲线式的电场。若有致电离粒子（ α 、 β 、重离子等）通过，则将因造成气体电离而损失其能量。这时所产生的带电粒子（离子、电子）将分别向两电极漂移。最初产生的电荷载流子对数 $n = E_{\text{abs}} / E_i$ ，其中 E_{abs} 是吸收能量， E_i 是气体的平均电离能量，约为 30eV 。平均漂移速度为

$$V = \mu \frac{F}{p}$$

式中： F 是电场强度； p 是气体压力； μ 是与 F 和 p 紧密相关的迁移率。（在正常的温度和压力下， $F = 1\text{kV/cm}$ 时，电子的漂移速度约为 $10^6 \sim 10^7\text{cm/s}$ ；离子的漂移速度约为电子的千分之一。）

当 F 值较小时（ $0 \sim 50\text{V/cm}$ ），所产生的电子和离子中

将有一大批因复合而损失掉，输出电荷脉冲 q_0 也将小于最初产生的电荷 $n \cdot e$ ， $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{As}$ 。如果电场强度增强，则所有离子和电子都将到达各自的电极。 F 值再增加到一定程度，输出信号 q_0 保持不变（见图1.1）。

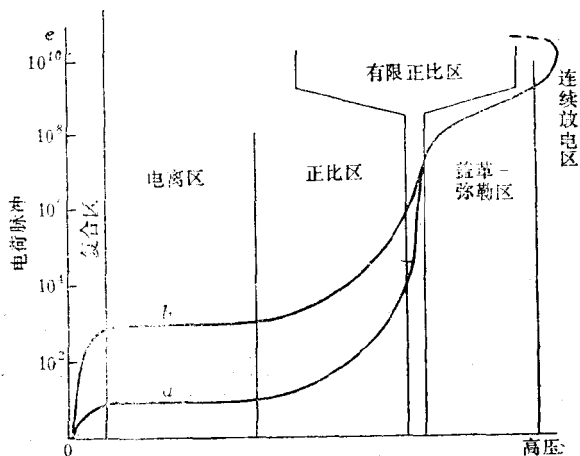


图1.1 脉冲幅度与充气探测器所加电压的关系曲线

a——初始电离低；b——初始电离高。

这个区域称为电离区。直流电流 $I = n \cdot e$ 。

当 F 值明显增加时（在使用中可将一根细金属丝作阳极，形成强双曲线电场来实现这一点），电子的能量在它们的平均自由程上也增大，以致它们能够通过碰撞和光电发射而使其他分子电离。这种“汤逊”雪崩效应引出一个与 F 密切相关的气体放大倍数 M ，而输出电荷脉冲 $q_M = M \cdot n \cdot e$ 。 M 与 n （即 n 的实际值）无关的区域称为正比区。随着 F 值的进一步增加，初始电子多的倍增较小，而初始电子少的倍增较大。

这是因为在大信号时，沿金属丝产生了正离子鞘，电场强度因此而降低了。这个区域称为有限正比区。其后是盖革-弥勒(G-M)区。在这一区域内，初始电离沿金属丝引起全面雪崩放电，输出电荷信号的大小与初始电离完全无关。在该区内，气体倍增的相对增量比在正比区内的要少。

实际上G-M区与电晕放电区是相同的，只有采用一种特殊的猝灭方法以避免连续放电，G-M计数管才能工作。

在G-M区之后，曲线又回到辉光放电区。除电场强度 F 外，气体放大倍数 M 还受气体或混合气体的类别、温度 T 、气体压力 p 和探测器室的几何形状等的制约。 p 高要求 F 也高。

1.2 电离室

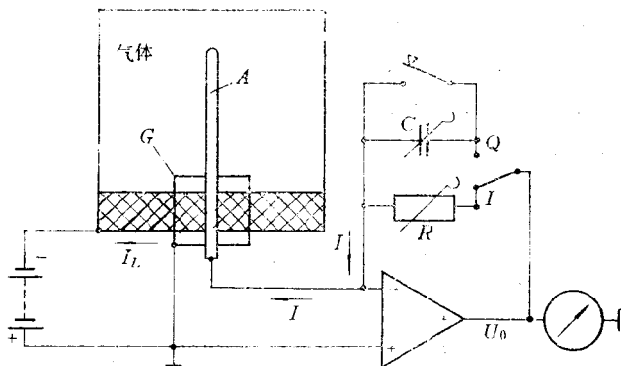


图1.2 电流电离室的原理

G ——保护环； A ——阳极； $I = \frac{U_0}{R}$ ； $Q = U_0 C$ 。

图1.2表示一个典型的带有电流或电荷测量电路的圆柱

形电离室，在中心电极（阳极）上收集到的电子以小电流（典型值 $10^{-14} \sim 10^{-8}$ A）的形式流向灵敏的电流-电压变换器。漏电流 I_L （它可以通过绝缘体从阴极的负电位流出）由一个保护环接地。由于阳极电位也接地（通过放大器实际接地），实际上漏电流并不流向阳极。测到的电流正比于剂量率。将电容器上的电流积分就得到正比于剂量的读数。

由于电离室角落处的电场强度弱而形成的复合现象，使这种简单电离室的有效体积不能确切得知。作为剂量监测，使用的是有效体积能确定的电离室。

在有 γ 辐射存在的情况下测量中子注量率，可以使用补偿电离室，如图1.3所示。两个大小相等的电离室以差分方式工作。其中一个只对 γ 灵敏，另一个既对 γ 灵敏，并通过 ^{10}B 的 (n, α) 反应对中子也灵敏。通过机械调节或电场调节可以实现对 γ 的精确补偿。

当电离程度极高时，电子-离子对的数目极大，因而可以把所产生的电流脉冲 $i(t)$ 或电荷脉冲 q 用来计数单个事件。电流脉冲包含一个时间短的高强度电子部分和一个时间长的

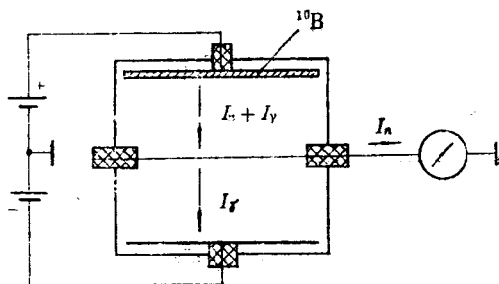


图1.3 测量中子注量率用的补偿电离室

低强度离子部分（电子漂移大约比离子漂移快1000倍）。电流脉冲的形状和收集时间依赖于电离径迹的位置和长度，如图1.4所示。

时间长的离子部分可以通过微分加以抑制。余下的电子脉冲幅度不仅依赖于吸收能量，而且依赖于电离的位置。在弗利希（Frisch）电离室中有一个栅极将有效电离体积与电子漂移空间分开，后者用于产生正比于吸收能量的电子部分的输出电流信号。

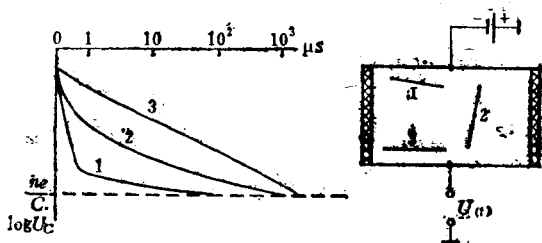


图1.4 脉冲电离室的电压输出信号

1、2、3——各种电离径迹。

在核反应堆启动或堆芯中子注量率测量等场合，常用一种裂变电离室。它是一种涂裂变物质的脉冲电离室，用于测量中子注量率。裂变物质大多使用 ^{235}U ，也有使用 ^{238}U 、 ^{239}Pu 等的。裂变物质涂覆在电离室极板表面。中子射入后，与裂变物质发生裂变反应，产生两个具有极大电荷及能量很高的裂变碎片，它们在气体中引起强烈电离，使电离室输出较大幅度的脉冲信号，远比其他 α 、 β 、 γ 辐射产生的信号幅度大得多。采用电子学甄别电路，极易去除 α 、 β 、 γ 本底。加之它们能耐高温和强辐照，所以已成为核反应堆中不可缺

少的探测器。

1.3 正比计数器

正比计数器中有一根很细的金属丝作阳极。因此，在紧靠阳极的地方电场相当强，基本上所有由汤逊雪崩引起的二次和二次以上的电离都产生在金属丝附近。由于这个区域的体积与全室的总体积（产生初始电离的地方）相比是很小的，所以输出信号实际上与电离位置无关。

气体放大倍数为

$$M = f + \alpha f^2 + \alpha^2 f^3 + \dots = \frac{f}{1 - \alpha f}$$

式中： f 是最初雪崩的倍增系数； α 是次级电子通过光电发射产生第三级电子的几率， $\alpha f < 1$ 。

在严格的正比区内（图1.1）， M 与初始电离无关。只要金属丝周围的正离子引起的空间电荷不是很大，这就成立。实际上，这个区的限量大约是 10^6 个离子。因而，对于有着 $10^3 \sim 10^4$ 电子-离子对的初始电离来说，其最大 M 值局限在 $10^3 \sim 10^2$ 。 M 对电源电压（典型值 $2 \sim 4 \text{ kV}$ ）的依赖性极大，电压只要变化1%就可引起输出脉冲幅度变化 $10 \sim 30\%$ 。

金属丝的质量必须很好，以确保沿金属丝的放大倍数不变。因过压引起的放电通常会损坏金属丝，这是由于在它的表面局部地烧出了一些斑点所致。在流气式计数器中，样品可以放入室内（ 2π 或 4π 几何形状），气体从中连续通过，金属丝可以更换（见图1.5）。

在测量计数率随电源电压变化的关系时，只要各类粒子（如 α 和 β ）的初始电离足以区别，就可以得到各自的坪曲线。

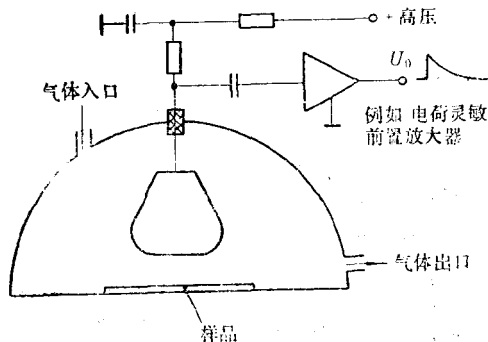


图1.5 2π流气式正比计数器

图1.6中假定有一种样品，能发射具有几乎相同能量的单能 α 和 β 粒子，由于 $n_{\alpha} \gg n_{\beta}$ （初始电离），故 α 的相对统计涨落 $\sigma = 1/\sqrt{n}$ 比 β 粒子的要小。由于气体放大倍数统计涨落的关系，输出脉冲幅度的涨落仍然很大。

在起始电压 V_1 时，只有幅度足够的一些 α 脉冲通过甄别器。在 V_2 时，实际上所有 α 脉冲都被计数。在 V_3 时，一些 β 脉冲的计数加进了 α 计数率中。在 V_4 时， α 和 β 脉冲都被计数。由于 β 能量通常分布较宽， β 坪不像 α 坪那样平缓。提高放大器增益或降低甄别阈可得到类似的坪。不良的金属丝常常导致坪特性变差。

正比计数器的分辨时间主要依赖于所加电压和气体压力。为了获得较好的能量分辨率，应考虑长的正离子收集时间（约为 $100\mu\text{s}$ ）。随着正离子从紧挨金属丝的地方向外离开，其影响迅速减小，因此可以获得大约 $1\mu\text{s}$ 的分辨时间，同时其能量分辨率还相当好。若只要求作粒子计数，分辨时

间可为 $0.1\sim 0.5\mu\text{s}$ 。

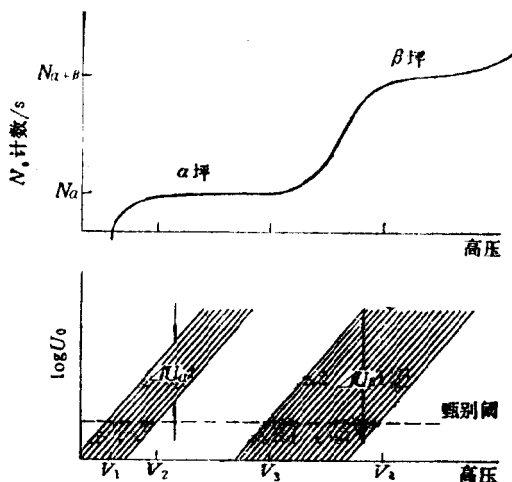


图1.6 正比计数器的 α 坪和 β 坪

1.4 盖革-弥勒计数管

1.4.1 原理

盖革-弥勒(G-M)计数管通常为直径约2mm到几cm、长1cm到约50cm(或更长)的圆柱形管。内充惰性气体和少量猝灭性气体的混合气体,压力通常约为 $1.33\sim 26.66\text{kPa}$ ($10\sim 200\text{Torr}$)。 β 灵敏计数管在一端有云母窗。

在G-M计数管内,每次初始电离之后阳极丝周围有一次全面放电。放电之后,正离子缓缓地向阳极移动。在这里,离子的电离电位与阴极功函数之间的能量差可以用于释放一个电子或辐射一个光子,后者又可进一步释放出一个光电子。

至此，一次新的放电又将开始。为了防止这种连续放电效应，添加了一种合适的猝灭气体。

1.4.2 有机猝灭管

充的典型气体是12.00kPa (90Torr) 氩和1.33kPa (10Torr) 乙醇。由于乙醇的电离电位低于氩的电离电位，故经过碰撞后，氩离子的电荷转移给乙醇分子。在阴极，乙醇分子能量的释放是靠解离而不是靠进一步电离。这种解离造成乙醇分子的耗尽，这类管子的寿命只限于大约 10^8 次放电。因此，即使是由于过压引起的一次持续时间极短的辉光放电，也会毁坏管子。另外，用紫外吸收的办法可以改进猝灭。

1.4.3 卤素猝灭计数管

充的典型气体是氩、0.1% 氩和0.1% 溴。溴的猝灭效果与乙醇的相似，而它的优点是卤素分子在解离以后还会复合。这种管子的寿命大约是 10^{11} 次放电。以氩作杂质气体，氩的亚稳态的能量可以用来电离氩，因此总的气体放大倍数就加大了，而且只需要较低的电场强度。

为了维持猝灭效应和限制放电电流，这类G-M计数管

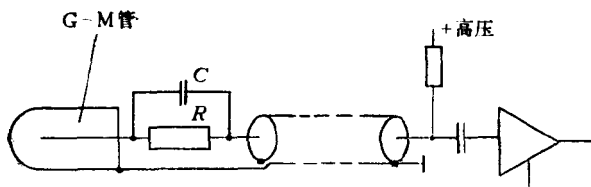


图1.7 正确的卤素猝灭G-M计数管的负载电路

R ——约 $10\text{M}\Omega$;

C —— $2\sim 5\text{pF}$.

必须工作在下述电路中（见图1.7），这里，有约 10^9 电子的大电荷脉冲在阳极引起一个足够的电压降。若以卤素猝灭管代替乙醇猝灭管，则必须在G-M管近旁加这种RC电路（反过来也成立）！

1.4.4 死时间，恢复时间，分辨时间

在紧跟放电之后的死时间 t_d 里，由于存在正离子鞘，G-M管的电场低于G-M区。管子死时间之后即使立即触发，也只产生一个很小的电荷脉冲。死时间之后脉冲大小的完全恢复所需的时间称为恢复时间 t_r 。（有时把这里定义的 t_d 和 t_r 的总和定义为恢复时间。）分辨时间（或双脉冲分辨时间）依赖于计数装置的脉冲幅度灵敏度。假如灵敏度为正常G-M脉冲幅度的0.1，则分辨时间只比死时间稍大一点。

需要注意，死时间依赖于管子的电压，也依赖于所连接的电路（ R, C ）。

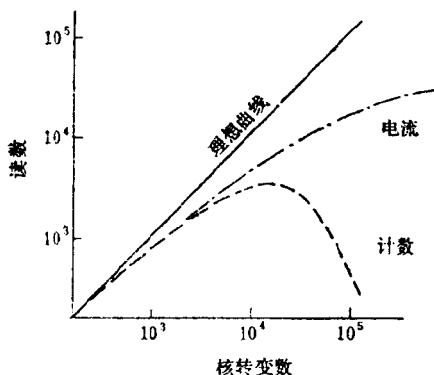


图1.8 G-M计数管在高计数率下的性能

当核转变率很高时，几乎所有输出脉冲的幅度都很小，