

FANGSHEXING WUTAN YIQI

$\alpha\gamma\beta$

放射性物探仪器

奚大顺 何为民 编著
原子能出版社

放射性物探仪器

奚大顺

编著

何为民

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了九种具有一定代表性的集成化的放射性物探仪器。

全书分为基础和仪器两篇。基础篇主要介绍核辐射探测器、逻辑电路、逻辑代数、基本数字电路和线性集成电路等基础知识。仪器篇介绍了九种放射性物探仪器及它们特有的一些电路。书末附有常用 CMOS 器件参数表和七种仪器的整机电路图。

本书的内容系统、完整。叙述循序渐进、由浅入深。适合于从事铀矿地质、物探、水文、仪器方面的人员以及环境监测人员自学，亦可供地质院校有关专业的师生参考。

放射性物探仪器

奚大顺 何为民 编著

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

昊海印刷厂印刷

(海淀操场73号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092¹/₁₆·印张26.625·字数649千字插页20

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数1—1100·统一书号：15175·823

定价：6.60元

前 言

随着放射性地球物理勘探方法和电子技术的迅速发展,集成化、数字化、能谱化的放射性物探仪器日益普及。本书就是为了适应这一形势,为着推动这些新型仪器的使用与维护而编写的。

目前野外地质人员关于仪器方面的知识急待更新,他们获取知识的主要方式是自学,可是却不易获得比较对口的专业书籍。针对这种情况,本书把着眼点放在利于自学上,因此在内容上注意了由浅入深、循序渐进,在叙述上力求详尽,并着重介绍定性的物理概念,适当补充了少量必要的晶体管电路知识。

本书分为基础篇和仪器篇两大部分。基础篇主要介绍核辐射探测器,逻辑电路,逻辑代数,基本数字电路,线性集成电路等基本知识,为学习整机奠定基础。仪器篇介绍了九种具有一定代表性的放射性物探仪器及仪器特有的一些电路。这些仪器均已集成电路化,其中大多数已开始在生产中使用,少数即将投入使用。书末附有常用 CMOS 器件参数表和七种仪器的电路图。

本书适合于已具有晶体管电路初步知识的从事铀矿地质、物探、水文、仪器方面的人员以及环境监测人员阅读,亦可供地质院校有关专业的师生参考。

本书第一、二、三、六章分别由翟葆华、刘玉方、周航慈、邓道源编写。第四、五、七章由何为民、第八章由奚大顺编写。全书由奚大顺主编定稿。其中第一章的部分内容取材于复旦大学、清华大学、北京大学合编的《原子核物理实验方法》一书。

在编写过程中得到了核工业部地质局,北京第三研究所,上海电子仪器厂,重庆地质仪器厂等单位 and 潘梓榕、李学颜、王贯虹等同志的大力支持。严育才、盛留息、王德林、周启甲、陶甫金、于振涛、汤三星等同志审阅了部分内容,贾文懿同志审阅了第一、七、八章,所以本书实际上是集体劳动的结晶。对上述的支持和帮助,在此一并致谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者指正。

编 者

一九八三年六月

本书常用符号表

A	放大器的符号 放大器的增益
A_f	反馈放大器的增益
A_v	电压增益
A_v	运算放大器开环增益
C_f	反馈电容
C_i	输入电容
C_L	负载电容
CMOS	互补金属-氧化物-半导体集成电路
C_o	输出电容 正比计数管极间电容
CP	时钟脉冲
d	有源滤波器的衰减系数
D_c	锁定触发器的控制端
D_{fi}	译码器显示驱动脉冲输入端
D_{fo}	译码器显示驱动脉冲输出端
DTL	二极管-晶体管逻辑集成电路
E	直流电源电压 能量
E_b	晶体管基极电源
E_c	晶体管集电极电源
F	PMT 的光通量 反馈系数 法诺因子 触发器符号
FET	场效应管
F_M	CMOS 最高工作频率
FWHM	能谱曲线的半高宽
G	门电路符号
g_m	场效应管跨导
$H(t)$	阶跃函数
Hz	频率单位, 赫
$i_a(t)$	PMT 阳极电流脉冲
I_B	运算放大器偏置电流

I_{b_s}	基极临界饱和电流
I_D	CMOS 静态电流
I_{DSS}	JFET 饱和漏电流
I_{iH}	TTL 高电平输入电流
I_{IN}	CMOS 输入电流
I_{is}	TTL 输入短路电流
I_{oi}	运算放大器输入失调电流
I_p	隧道二极管峰点电流
J	石英晶体符号
JFET	结型场效应管
L_o	闪烁体最大发光强度
$L(t)$	闪烁体发光强度
M	电离室气体放大系数 PMT 电流放大系数
N	电子-空穴对数 TTL 扇出系数 总计数
n	PMT 倍增极数目
$\overline{N}$	总计数的平均值
N_p	计数器累积脉冲数
PMT	光电倍增管
PMOS	P 沟道 MOS 集成电路
P_{o11}	TTL 空载截止功耗
P_{ON}	TTL 空载通导功耗
P_r	锁定触发器控制端
R	电阻符号 数字电路的置 0 (复位) 端
R_C	晶体管集电极负载电阻
R_D	数字电路直接置 0 (复位) 端
R_{GS}	JFET 直流输入电阻
R_{ON}	JFET 通导电阻
S	PMT 阳极灵敏度 数字电路置 1 (置位) 端
S_D	数字电路直接置 1 (置位) 端
t_{D1}	CMOS 前沿延迟时间
t_{D2}	CMOS 后沿延迟时间
t_f	下降时间
t_{fd}	截止延迟时间

t_k	PMT 的脉冲响应宽度
t_p	PMT 电子渡越时间
t_{pd}	TTL 平均延迟时间
t_r	上升时间
t_{rd}	TTL 导通延迟时间
$T(s)$	有源低通滤波器传递函数
TTL	晶体管-晶体管逻辑集成电路
t_w	脉冲宽度
U_{bi}	施密特电路的回差电压
U_{DT}	二极管导通阈电压
U_T	阈电压
U_i	输入电压
U_{im}	输入电压的最大值
U_o	输出电压
U_R	参考电压
U_{WT}	窗放大器阈 值
U_r	全能峰脉冲幅度
V_a	G-M 计数管起始电压
V_{DD}	CMOS 的电源电压
V_{NH}	CMOS 高噪声容限
V_{NL}	CMOS 低噪声容限
V_{off}	PMOS 关门电平
V_{OH}	输出高电平
V_{OL}	输出低电平
V_{on}	PMOS 开门电平
V_{oi}	运算放大器输入失调电压
V_p	G-M 计数管工作电压
	JFET 夹断电压
	隧道二极管峰点电压
V_{SH}	标准高电平
V_{SL}	标准低电平
V_{ss}	CMOS 衬底电压
V_T	MOS 的开启电压
V_{tr}	CMOS 转移电平(阈 门 槛 电 平)
W	电子漂移速度
	电位器符号
w	平均电离能
Z	阻抗
β	晶体管共发交流小信号电流放大系数

β_F	TTL 寄生三极管电流放大系数
β_R	TTL 反向三极管电流放大系数
γ	PMT 光阴极灵敏度
$\Delta 0$	低电平抗干扰能力
$\Delta 1$	高电平抗干扰能力
ΔE_s	谱线展宽
Δf	运算放大器开环增益带宽
$\Delta V_{os}/\Delta T$	运算放大器温度漂移
δ_t	渡越时间分散
ε	闪烁体探测效率
	能量分辨率
	介电常数
η	自稳负反馈系数
ν_N^2	电子-空穴对的相对方差
ρ	运算放大器共模抑制比 (CMRR)
ρ_n	N 型硅的电阻率
σ_N	电子-空穴对数的方差
τ	时间常数
τ_D	计数管死时间
τ_R	计数管恢复时间
$\tau_{\text{荧光}}$	闪烁体荧光的衰减时间常数
ϕ	磁通
ω	角频率

目 录

基 础 篇

第一章 核辐射探测器	3
1.1 气体探测器	3
1.2 闪烁探测器	9
1.3 半导体探测器	24
第二章 基本逻辑集成电路	35
2.1 基本逻辑电路	35
2.2 DTL 与非门电路	41
2.3 TTL 与非门电路	42
2.4 扩展器与驱动器	50
2.5 与非门的应用举例	52
第三章 逻辑代数	56
3.1 逻辑函数及其与逻辑电路的关系	56
3.2 逻辑代数基本定律及其应用	59
3.3 卡诺图及其应用	61
第四章 场效应管及 CMOS 数字集成电路	74
4.1 结型场效应管的原理及其应用	74
4.2 MOS 场效应管	79
4.3 MOS 数字集成电路	84
4.4 CMOS 数字集成电路	86
4.5 CMOS 器件特点及其使用注意事项	94
第五章 触发器、基本脉冲电路及基本数字部件	100
5.1 触发器	100
5.2 集成门组成的脉冲单元电路	108
5.3 寄存器	114
5.4 计数器	117
5.5 数码显示器	129
5.6 译码驱动器	133
5.7 数-模和模-数转换器	143
第六章 集成运算放大器	156
6.1 集成运算放大器及其主要参数	156
6.2 集成运算放大器的线性运用	162
6.3 集成运算放大器的非线性运用	170
6.4 集成运算放大器使用中的一些问题	175

仪 器 篇

第七章	放射性物探仪器中常用的功能电路	183
7.1	探测器电路	183
7.2	线性脉冲放大器	192
7.3	脉冲幅度分析器	204
7.4	定时控制系统	217
7.5	运算器	230
7.6	直流变换电路	237
7.7	自动稳谱电路	245
第八章	常用放射性物探仪器	252
8.1	FD-3007 液晶显示袖珍辐射仪.....	252
8.2	FD-802 数字闪烁辐射仪	256
8.3	FD-3013 数字式 γ 辐射仪	264
8.4	FD-3014 数字两用 γ 辐射仪	286
8.5	FD-3003 野外能谱仪.....	304
8.6	FD-840 四道自动能谱仪	340
8.7	FD-3002 测氚仪.....	358
8.8	FD-3005 低本底 α 测量仪	371
8.9	FD-3012 α 卡仪.....	382

附 录

附录 I	常用 CMOS 集成电路	389
I.1	半导体集成电路型号的组成.....	389
I.2	半导体集成电路的外形.....	390
I.3	常用集成电路的图形符号.....	391
I.4	部分国产 CMOS 集成电路性能表.....	391
附录 II	参考书	416
附录 III	仪器电路图 (附袋)	416
III.1	FD-802 数字闪烁辐射仪电路图	416
III.2	FD-3013 数字式 γ 辐射仪电路图	416
III.3	FD-3014 数字两用 γ 辐射仪电路图.....	416
III.4	FD-3003 野外能谱仪电路图	416
III.5	FD-840 四道自动能谱仪电路图.....	416
III.6	FD-3002 测氚仪电路图	416
III.7	FD-3012 α 卡仪电路图	416

基 础 篇

第一章 核辐射探测器

用于测定核辐射的种类、能量及强度的仪器，称为核辐射探测仪器。它大体上可分为两大部分：一部分是将射线转换为探测信号的能量转换器，称为核辐射探测器；另一部分是测量电路，它将探测器给出的信号加以处理和记录。

近一个世纪以来，人们根据不同的要求和探测的对象，制成了多种不同类型的探测器。常见的核辐射探测器按其工作原理可分为以下几种。

1. 气体探测器

它是根据带电粒子通过气体时，引起气体电离来探测辐射粒子的。早期，该种探测器曾广泛应用。它的优点是制备简单，性能可靠，成本低廉，使用方便，因而至今仍在应用。随着探测技术的不断发展，七十年代以来，在高能物理和重粒子物理实验中它又获得新的应用。

2. 闪烁探测器

它是根据射线与物质相互作用产生的荧光现象来探测射线粒子的。它以比气体探测器高得多的探测效率而被广泛地采用。在不少仪器中已取代了气体探测器。

3. 半导体探测器

这是自六十年代以来迅速发展起来的一种新型探测器。主要优点是：能量分辨率高、线性范围宽、体积小。半导体探测器是近年来发展极为迅速的一种核辐射探测器件。

用于核辐射测量的还有原子核乳胶，固体径迹探测器，威尔逊 (Wilson) 云室 和 气泡室，火花放电室，多系正比室，切伦科夫计数器，热释光探测器等。

本章将讨论前面三种类型的探测器。

1.1 气体探测器

1.1.1 气体探测器中的电离现象

在气体探测器中带电粒子通过气体时与气体分子发生电离碰撞，使气体分子电离或激发，并在粒子通过的途径上生成大量的离子对；或者这些入射的带电粒子与气体分子中的核外电子之间产生的库仑力将气体分子的核外电子拉出来，这些电子离开原来的分子而独立运动，从而使原来的中性气体分子形成离子对（一个带负电的电子和一个带正电的正离子）。以上统称为气体的电离现象。因为辐射粒子射入气体后将前进一段路程，在它经过的途径上由于电离效应将产生大量的电子-正离子对，直到辐射粒子能量逐渐消耗到低于气体分子的电离电位时，电离作用才告结束。收集这些电离电荷，就可以了解辐射的情况。因此，气体探测器也就是离子的收集器。它通常是由高压电极和收集电极组成，常见的是两个同轴的圆柱形电极，两个电极由绝缘体隔开并密封于容器内。电极间充入一定气体并加一定电压，使气体中有一定电场存在。辐射使两电极间的气体电离时，生成的电子和正离子在电场作用下漂移，

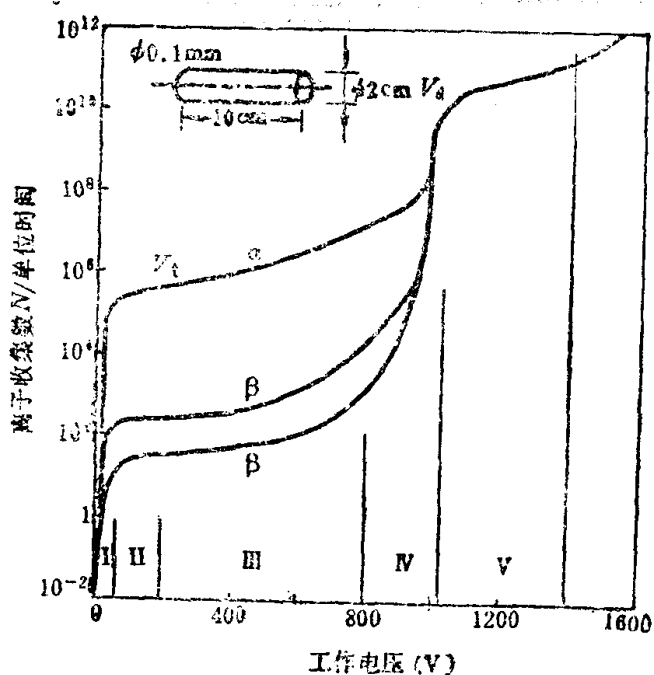


图1.1.1 离子收集的电压电流曲线

最后收集到电极上。电子和正离子生成后，由于静电感应，电极上将产生电荷，并且随离子的漂移而变化，从而在输出回路中形成电离电流。电离电流的强度取决于单位时间被收集的离子对数，与辐射强度一般是正比关系，而与外加电压或气体中电场强度呈现如图1.1.1所示的比较复杂的关系。该曲线是在辐射强度固定不变的情况下，改变两电极上所加的电压，即改变气体中的电场强度与测得的电离电流的关系曲线。曲线明显地分为五个区段。在第I区中，电离电流随电压增大而增加。这是因为复合损失随电压升高而减小。继续增加电压时复合逐渐消失，电流趋向饱和。曲线的第II区称为饱和区或电离室区。该区内离子可全部被收集，电流强度等于单位时间内产生的原电离电荷数。图中曲线的标记对应于 α 和 β 射线。电压超过 V_1 以后电流又开始上升而进入第III区。这时的电场强度使电子加速，进一步引起电离。离子对数将倍增至原电离的 $10\sim 10^4$ 倍。此种现象称为气体放大。倍增的系数称为气体放大系数，它随电压增高而增大，但电压固定时气体放大系数恒定。因为电流正比于原电离的电荷数，所以第III区称为正比区。电压继续增大时由于气体放大系数过大，空间离子密集，抵消了部分场强，使气体放大系数相对地减小，这称为空间电荷效应。显然，原电离越大这种影响也越大。这时气体放大系数不是恒定的，而是与原电离有关，所以第IV区称为有限正比区。进入第V区后倍增更加剧烈，电流猛增，形成雪崩放电。此时，电流强度不再与原电离有关，图中的 α 和 β 两条曲线重合。而原电离对放电只起“点火”作用，在这种情况下每次放电后还必须使其“猝灭”，猝灭作用由猝灭气体或猝灭电路未完成，工作在该区的射线探测器称为盖革-弥勒(Geiger-Müller)计数器，或称为G-M计数器，故该区称为G-M区或盖革区。

综上所述，气体探测器，不论是电离室、正比计数器或G-M计数器，它们的基本结构和组成部分都是相似的，只是由于工作区域不同而在性能方面有所差别，因而使用于不同的场合。下面介绍这几种计数器。

1.1.2 电离室

电离室有两种类型：一种是记录单个辐射粒子的脉冲电离室，另一种是记录辐射粒子平均效应的电流电离室和累计效应的累计电离室。它们在构造上基本相同。常见的有圆柱状电离室和平行板状电离室。图1.1.2(a)是圆柱状电离室的结构示意图，其结构主体由两个处于不同电位的电极组成。在两个电极之间由绝缘体相隔，两电极之间的空间为有效灵敏体积。在该范围内产生的电离离子，电极能有效地加以收集。和测量仪器相连的电极叫收集电

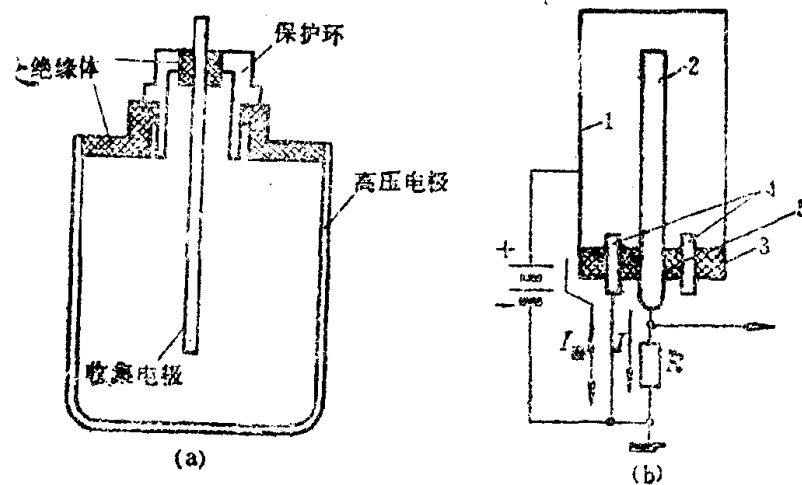


图1.1.2 电离室

(a) 电离室的结构示意图；(b) 加保护环的电离室。

1. 高压电极；2. 收集电极；3. 高压绝缘体；4. 保护环；5. 优质绝缘体。

极，另一电极则加上数十伏至上千伏电压，称为高压电极。两电极之间的绝缘体其绝缘性能应当很好，绝缘电阻应当很大，绝缘体应该光洁无伤痕，不吸收水份。常用琥珀或聚苯乙烯等高级绝缘材料做成。

电离室输出的电离电流是相当微弱的，当高压电极加上相当高的电压时，若绝缘体的绝缘程度稍有降低，则漏电影响就很大。为此在收集电极和高压电极之间加有一金属做的保护环，并使其电位与收集极的电位接近。这样即使出现高压漏电也只是在保护环与高压电极之间发生，不会影响到收集电极，对测量结果不产生干扰。图 1.1.2 (b) 为采用了保护环后使漏电不再成为干扰的示意过程。从图上可以看出，加入保护环后，其漏电电流将直接通过保护环接地形成回路，而流过电阻 R 的电流 $I \approx I_{\text{电离}}$ 。

电离室内可以是 1atm 的空气，也可以充填不同压力的其他气体。因它工作在饱和电流区，所加的电压在相当范围内变动时并不影响电离电流，故电离室不必用高稳定性的电源。

当前野外地质工作中使用的射气仪 FD-103 和 FD-105 都是电离室仪器。利用电离室做探测器的仪器对 α 、 β 、 γ 三种射线都能进行观测，这一点与闪烁探测器不同。另外电离室内的气压改变时，对电离室的爱离电流影响较大，工作时应予以注意。

1.1.3 正比计数器

气体探测器工作于正比区时，在离子收集的过程中将出现气体放大现象，即被加速的爱离电子在电离碰撞中逐次倍增而形成电子雪崩。于是，在收集电极上感生的脉冲幅度 V 将是原电离感生的脉冲幅度的 M 倍，即

$$V = - \frac{MN_e}{C}$$

式中 M 称为气体放大系数，可达 $10 \sim 10^4$ 。 N_e 为原电离离子对数。 C 为两电极之间的电容。式中负号表示负极性脉冲。处在这种工作状态下的气体探测器就是正比计数器。

与电离室相比，正比计数器有如下优点：

①输出脉冲幅度一般约为 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{V}$ ，比电离室脉冲大 $10^3 \sim 10^4$ 倍，故后接电路不需用高增益的放大器。

②灵敏度较高。对于电离室，原电离数目必须大于 2000 对左右才能分辨出来，而正比计数器原则上只要有一对离子就可被分辨。因此正比计数器适合于探测低能或低比电离粒子，如软 β 、 γ 和 X 射线以及高能快速离子等。探测下限可达 250eV。由于正比计数器的空间电荷影响很小，所以它的分辨时间比 G-M 计数管要短得多，甚至可达 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{s}$ 。故通常无需考虑漏计的影响。

③输出脉冲幅度几乎与原电离地点无关。

此外正比计数器尚具备一些独特的优点，例如没有噪声和暗电流，可看成是一个没有噪声的理想的放大器。因此正比计数器在测量低能粒子的能量时，性能突出。

正比计数器的主要缺点是脉冲幅度随工作电压变化较大，且容易受外来电磁干扰，当用它作能谱测量时，高压电源应相当稳定。

1.1.4 G-M 计数器

1. G-M 计数器的工作原理

G-M 计数器在核辐射探测中一直得到广泛的使用。目前虽然出现了闪烁计数器、半导体探测器等部分性能比 G-M 计数器优越的器件，但在一些仪器中仍使用着 G-M 计数器。这主要是因为它具有以下优点：轻便可靠，使用方便，制造容易，价格便宜，输出信号大，附属设备简单，可以制成多种形状，可以探测多种射线、灵敏度高。它能记录不同类型、不同能量的粒子，只要入射的粒子在灵敏区内电离产生一对离子，就能使计数器发生放电现象，这个粒子就可以被记录下来。因此 G-M 计数器对带电粒子的探测效率可达 100%。

G-M 计数器的主要缺点是：①不能鉴别粒子的类型和能量；②分辨时间长，约 $10^3 \mu\text{s}$ ，故不能进行快速计数；③正常工作的温度范围较小（卤素管略大些）；④有乱真计数。

G-M 计数器按不同情况可分成以下几类：

①按用途可以分为 γ 计数器、 β 计数器、X 射线计数器。

②按所充猝灭气体可分为有机计数器和卤素计数器。

③按形状可分为圆柱形、钟罩形和 4π 形计数器。

G-M 计数器所加工作电压均在盖革区，有气体放大作用，所以输出信号幅度较大，约为几伏到几十伏。当工作电压一定时输出信号幅度一定且与入射粒子的能量无关，这也是 G-M 计数器的主要特点。

一般 G-M 计数器多充填惰性气体，常用的气体有氖、氩等。其原因是它们不易形成负离子。为了能使放电自行猝灭，还充有猝灭气体。如果所充气体是酒精、石油醚等有机气体，则称为有机计数器。当充有溴这一类卤素气体时，则称为卤素计数器。

在 G-M 计数器中，气体放大系数将随电压的增加而急剧上升，高达 10^7 以上，并失去与原电离的正比关系。管内产生雪崩放电，增殖的离子对总数与原电离无关。因而，不论

原电离情况如何，计数器均输出幅度相同的信号。其输出信号幅度仅随外加电压的变化而改变。

为保证 G-M 计数器正常工作，必须对计数器加以猝灭，方法有两种外猝灭和内猝灭。外猝灭是在计数器的阳极输出端加一猝灭电路，而另一种常用的内猝灭方法是在单原子或双原子分子气体中加入少量的猝灭气体，如酒精、石油醚、甲酸乙酯等有机气体，或充少量的 Br_2, Cl_2 等卤素气体。这些猝灭气体在第一次气体电离后能将正离子在能量转换过程中放出的光子吸收掉，多余的能量则引起多原子气体超前分解，而不发射光子，使计数器在第一次放电输出一个脉冲后立即终止，从而消除了连续放电，完成了猝灭作用。

表 1.1.1 为有机计数管和卤素计数管的主要参数

主要参数 计数器	所充气体	猝灭气体	寿命(次)	阈电压	坪斜	坪长
卤素计 数器	氖(Ne)	溴(Br)	$10^9 \sim 10^{10}$ 次	300V	10%/100V	80V
有机计 数器	氩(Ar)	酒精	10^8 次	700V~1000V	5%/100V	300V

2. G-M 计数管的特性参数

(1) 坪曲线

在辐射强度不变的情况下，测量计数率随工作电压的变化，所得曲线称为计数管坪曲线，如图 1.1.3 所示。曲线的特点是当工作电压超过起始电压 V_s 时，计数率由零迅速增大。工作电压继续升高，当超过 V_0 时，计数率随工作电压增大仅略有增加，即有一段明显的坪区出现。工作电压再继续升高，计数率又急剧增大，此时计数管失去猝灭作用，形成连续放电。坪曲线是衡量 G-M 计数管性能的重要标志。其主要参数如下。

①起始电压。计数管坪起始电压 V_s 相当于计数管的阈电压，当工作电压超过起始电压后，输出脉冲幅度不再与原电离有关。起始电压与气体的成分、气压和电极的直径以及温度有关。一般地说，管内气压越高，管径越大或温度越低，起始电压越高。有机管的起始电压约为 1000V，卤素管充 Cl_2 时约为 600V，充 Br_2 时约为 300V。

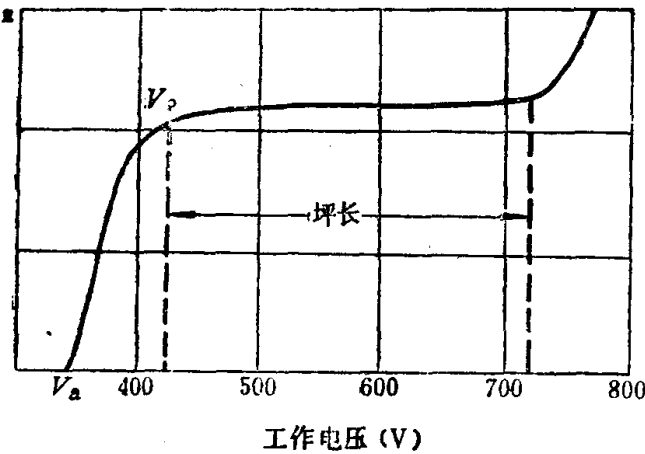


图1.1.3 G-M计数管的坪曲线

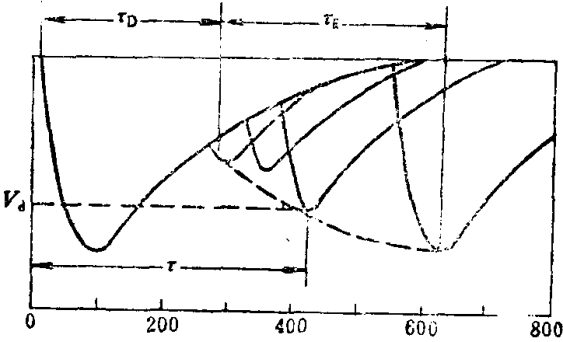


图1.1.4 死时间和恢复时间的示意图