

核信号数值分析 与数字模拟

周建斌 周 伟 王 敏 著

中国原子能出版社

核信号数值分析与数字模拟

ISBN 978-7-5022-6520-5



定价：52.00元

核信号数值分析与数字模拟

周建斌 周 伟 王 敏 著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核信号数值分析与数字模拟 / 周建斌, 周伟著. —
北京: 中国原子能出版社, 2015. 2
ISBN 978-7-5022-6520-5
I. ①核… II. ①周… ②周… III. ①核电子学-脉
冲信号发生器-数值分析 IV. ①TL822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 032302 号

内 容 简 介

全书共分 7 章, 第 1 章核辐射探测器知识, 第 2 章常用信号的模拟, 第 3 章信号处理电路的数值分析与数字模拟, 第 4 章数字脉冲成形的分析与模拟, 第 5 章核谱数据处理方法, 第 6 章虚拟核仪器设计, 第 7 章数字化核仪器系统的构建与测试实验。

核信号数值分析与数字模拟

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 王 丹
装帧设计 崔 彤
责任印刷 潘玉玲
印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 11.5
字 数 287 千字
版 次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-6520-5 定 价 52.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

随着计算机技术的飞速发展,核脉冲信号数字化处理所需的大量计算工作变得越来越快速而便捷。此外,得益于众多计算机仿真软件的涌现,使得在不进行放射性实验的情况下,核脉冲信号的模拟仿真、滤波成形和幅度分析等诸多处理流程也能顺利地完成。

20 世纪 90 年代开始,作者的研究团队开始从事核方法与核仪器仪表的研究工作。经过 20 多年的科研教学和实际操作的工作积累,在核方法理论、核脉冲处理和核仪器仪表研制上,研究团队积累了丰富的实际经验。本书内容是研究团队从事核脉冲信号处理和核仪器仪表研制工作的总结与归纳,书中提供的数据均是作者通过实际工作测量获得或运用计算机仿真计算得出的,部分内容已在相关专业学术期刊上公开发表,并且也被引入到相关专业的研究生培养方案中。

全书共分 7 章。第 1 章核辐射探测器知识,介绍了几种常用的核辐射探测器基本知识和应用特性。第 2 章常用信号的模拟,介绍了负指数信号、正弦信号以及噪声信号等常用信号的数字模拟技术与实现方法。第 3 章信号处理电路的数值分析与数字模拟,介绍了 $R-C$ 积分成形、 $C-R$ 微分成形以及 *Sallen-Key* 低通滤波器高斯成形(后续章节简称 *S-K* 滤波器)等成形电路的数值分析方法,并阐述了基于 VBA 软件平台实现成形电路数字模拟的方法。第 4 章数字脉冲成形的分析与模拟,介绍了核脉冲信号的数字梯形(三角)成形方法,并分别通过标准负指数信号和实际探测器输出信号进行了数字梯形成形的计算机模拟仿真,进而总结了对于不同成形时间的核脉冲信号数字梯形成形时间常数的确定方法。同时,采用 256 点和 512 点数字三角成形方法测试了 Si-PIN 半导体探测器的性能,并与模拟电路成形方法进行了对比测试。第 5 章核谱数据处理方法,介绍了几种常用的核谱数据处理方法,包括多点平滑法,*S-K* 滤波平滑,卡尔曼平滑、小波平滑及 FIR 滤波器平滑等。并比较了不同平滑方法的处理效果。第 6 章

虚拟核仪器设计,介绍了虚拟核谱仪器的设计方法。随着计算机技术的高速发展,原来许多需要昂贵的仪器,实际设备来做的实验,特别是有一定危险的放射性实验逐步采用计算机模拟来代替。我们直接借助计算机进行数字模拟计算得到了比较好的脉冲数据以及谱数据效果。同时,介绍了基于数字存储示波器的DPP设计。第7章数字化核仪器系统的构建与测试实验,介绍了基于数字成形技术的核谱测量系统的构建方法,并针对不同的核辐射探测器进行了基本的性能测试。

本书第1、3、4、6、7章由周建斌完成;第2章由周伟完成;第5章由王敏完成;书中插图由洪旭绘制;全书由周伟负责统稿。此外,马英杰、童运福、刘易、周靖、赵祥和徐晓娜等老师和研究生也参与了书中部分内容的写作和实验数据的测试。最后,写作过程中得到了四川新先达测控有限公司、成都理工大学、东华理工大学核技术应用教育部工程研究中心的领导和老师,以及中国原子能出版社王丹编辑的支持和帮助,在此一并致谢!

作 者

2014年12月于成都理工大学

目 录

第 1 章 核辐射探测器知识	(1)
1.1 计数器	(1)
1.1.1 气体电离探测器	(1)
1.1.2 多丝室和漂移室	(1)
1.1.3 半导体探测器	(2)
1.1.4 闪烁计数器	(2)
1.1.5 切伦科夫计数器	(2)
1.2 径迹室	(3)
1.2.1 核乳胶	(3)
1.2.2 云室和泡室	(3)
1.2.3 火花室和流光室	(3)
1.2.4 固体径迹探测器	(3)
1.3 气体探测器	(3)
1.3.1 电离室	(4)
1.3.2 正比计数器	(5)
1.3.3 盖革计数器	(5)
1.4 闪烁体探测器	(8)
1.4.1 闪烁体	(9)
1.4.2 光电倍增管	(9)
1.5 半导体探测器	(10)
1.5.1 结型探测器	(10)
1.5.2 面垒型探测器	(10)
1.5.3 锂漂移型探测器	(11)
1.5.4 X 射线探测器	(11)
1.5.5 切伦科夫探测器	(18)
第 2 章 常用信号的模拟	(23)
2.1 正弦信号的模拟	(23)
2.2 负指数信号模拟	(25)
2.3 双指数信号的模拟	(27)
2.4 重叠脉冲的模拟	(28)

2.5	平头脉冲的模拟	(29)
2.6	噪声的模拟	(29)
第3章	信号处理电路的数值分析与数字模拟	(32)
3.1	C-R 微分成形电路的分析与模拟	(32)
3.2	R-C 积分成形电路的分析与模拟	(37)
3.3	极零相消电路的分析与模拟	(40)
3.4	负指数信号的计算机模拟	(42)
3.4.1	标准负指数信号时域内数字成形处理的模拟	(42)
3.4.2	标准负指数信号数字 C-R 微分成形	(42)
3.4.3	标准负指数信号数字极零相消成形	(43)
3.5	核脉冲信号放大电路的数值模拟	(44)
3.5.1	反相运算放大电路模型	(44)
3.5.2	同相运算放大电路模型	(46)
3.5.3	两种改进电路的滤波效果的对比研究	(47)
3.6	S-K 电路的分析与模拟	(48)
3.6.1	S-K 滤波器介绍	(49)
3.6.2	S-K 滤波器的数值分析与数字实现	(49)
3.6.3	数字 S-K 滤波器在信号处理上的应用研究	(51)
3.7	C-R 电路和 R-C 电路频率特性分析	(56)
3.7.1	C-R 电路频率特性分析	(56)
3.7.2	C-R 电路波特图	(57)
3.7.3	R-C 电路频率特性分析	(58)
3.7.4	R-C 电路波特图	(58)
第4章	数字脉冲成形的分析与模拟	(60)
4.1	数字脉冲成形的发展	(60)
4.2	数字脉冲成形的理论	(61)
4.2.1	核脉冲与梯形(三角形)脉冲的数学描述	(62)
4.2.2	梯形(三角形)成形的函数卷积法	(63)
4.3	梯形(三角形)成形的模型建立	(67)
4.4	梯形(三角形)脉冲成形的仿真	(68)
4.5	梯形(三角形)成形的问题与改进	(70)
4.5.1	输入信号与成形时间	(70)
4.5.2	重叠脉冲的分离	(72)
4.5.3	单脉冲成形方法的实现	(73)
4.5.4	连续脉冲信号成形的讨论	(73)
4.6	基于 z 变换的梯形成形	(75)
4.6.1	梯形成形算法	(75)

4.6.2	算法收敛性	(77)
4.6.3	噪声抑制	(78)
4.6.4	实测脉冲测试	(80)
第5章	核谱数据处理方法	(82)
5.1	最小二乘拟合法平滑	(82)
5.2	S-K 平滑处理	(84)
5.3	卡尔曼平滑方法	(85)
5.3.1	应用介绍	(85)
5.3.2	卡尔曼滤波原理	(86)
5.3.3	卡尔曼滤波的自适应处理	(91)
5.3.4	卡尔曼滤波的数学模型的建立和优化	(93)
5.3.5	数字基线处理	(99)
5.4	小波平滑	(101)
5.4.1	小波分析在核能谱数据平滑中的应用	(101)
5.5	核信号的 FIR 数字滤波模拟计算	(103)
5.5.1	FIR 滤波器的设计	(104)
5.5.2	最小二乘 FIR 滤波器的实现	(105)
5.6	几种平滑方式的对比分析	(108)
第6章	虚拟核仪器设计	(112)
6.1	随机信号	(112)
6.1.1	均值分布	(112)
6.1.2	正态分布	(114)
6.1.3	负指数分布	(114)
6.2	连续脉冲信号的数字模拟	(118)
6.2.1	高分辨率连续信号的数字模拟	(118)
6.2.2	分辨率可调节连续信号的数字模拟方法 I	(119)
6.2.3	分辨率可调节连续信号的数字模拟方法 II	(120)
6.3	基于数字存储示波器的 DPP 设计	(121)
6.4	双通道数字成形的计算机模拟	(123)
第7章	数字化核仪器系统的构建与测试实验	(125)
7.1	核仪器数字化发展历程	(125)
7.2	影响核仪器性能指标的主要因素	(125)
7.2.1	探测器的固有分辨率	(126)
7.2.2	弹道亏损	(126)
7.2.3	脉冲堆积	(127)
7.2.4	噪声	(128)
7.3	核仪器系统硬件电路设计	(128)

7.3.1	主放大电路设计	(129)
7.3.2	高速 ADC 电路设计	(131)
7.3.3	FPGA 电路设计	(134)
7.3.4	接口电路设计	(140)
7.4	谱数据处理和分析软件应用	(144)
7.4.1	谱数据处理技术组成	(145)
7.4.2	自动寻峰	(145)
7.4.3	能量刻度及特征 X 射线谱峰识别	(145)
7.4.4	谱线光滑	(147)
7.4.5	峰面积的计算	(148)
7.4.6	确定工作曲线	(148)
7.4.7	模式识别的应用	(149)
7.5	测量系统软件设计	(151)
7.5.1	测试模块设计	(152)
7.5.2	分析样品模块的设计	(153)
7.5.3	标定测量模块的设计	(154)
7.5.4	长稳测量模块设计	(155)
7.5.5	监控测量模块设计	(156)
7.5.6	参数设置模块设计	(156)
7.5.7	数据管理模块的设计	(159)
7.6	性能测试与样品分析	(160)
7.6.1	核脉冲信号实时采集与数字成形的测试	(160)
7.6.2	标准核素能谱的测试	(162)
7.6.3	实际样品的分析实验	(166)
7.6.4	补充实验	(169)
附录	测量系统介绍	(171)
参考文献		(175)

第1章 核辐射探测器知识

核辐射探测器 (nuclear radiation detector) 又称核探测元件 (nuclear detection element), 是探测辐射射线用的器件。常用的有电离室、计数管和闪烁计数器、原子核乳胶、固体核径迹探测器和半导体探测器等。这类探测元件可以测量辐射射线和它们的性质。其原理主要是利用射线与物质相互作用时所产生的多种效应。如应用带电粒子与物质作用产生电离的原理制作的电离室、计数管, 以及 α 径迹探测器等; 利用其荧光作用做成的闪烁计数器; 利用电离和激发所引起的化学反应过程制作原子核乳胶、固体核径迹探测器等。对带电离子可直接应用上述性质, 对不带电的粒子 (如 γ 射线), 则应用其与物质作用的 3 种效应 (光电效应、康普顿-吴有训效应、电子对效应) 所产生的二次电子来达到上述目的。

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。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。

1.1.1 气体电离探测器

气体电离探测器是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。

1.1.2 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 $50\text{ }\mu\text{m}$),但允许的计数率不如多丝室高。

1.1.3 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3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并进行漂移的锂漂移型。高纯锗探测器具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。砷化镓、碲化镉、碘化汞等材料也有应用。

1.1.4 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(BaF_2)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、芪等),前两种使用普遍。由于它们的光衰减时间短($2\sim 3\text{ ns}$,快塑料闪烁体可小于 1 ns),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(小于 10 ns)。

1.1.5 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 辐射或强子的能量。

1.2 径迹室

径迹室是通过记录、分析辐射产生的径迹图像测量核辐射。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。

1.2.1 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($1\text{ }\mu\text{m}$),阻止本领大,功用连续而灵敏。

1.2.2 云室和泡室

使入射粒子产生的离子集团在过饱和蒸汽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 mm),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。

1.2.3 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 $200\text{ }\mu\text{m}$)。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。

1.2.4 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。

1.3 气体探测器

气体探测器的原理是,当探测器受到射线照射时,射线与气体中的分子作用,产生由一个电子和一个正离子组成的离子对。这些离子向周围区域自由扩散。扩散过程中,电子和正离子可以复合重新形成中性分子。但是,若在构成气体探测器的收集极和高压极上加直

流的极化电压 V , 形成电场, 那么电子和正离子就会分别被拉向正负两极, 并被收集。因此, 气体探测器通常是由高压极和集电极组成, 常见的是两个同轴的圆柱形电极, 两电极由绝缘体隔开并密封于容器内。电极间充一定的气体并外加一定的电压。随着极化电压 U 逐渐增加, 气体探测器的工作状态就会从复合区、电离室区、正比区、有限正比区、盖革区 (G-M 区) 一直变化到连续放电区。如图 1-1 所示。

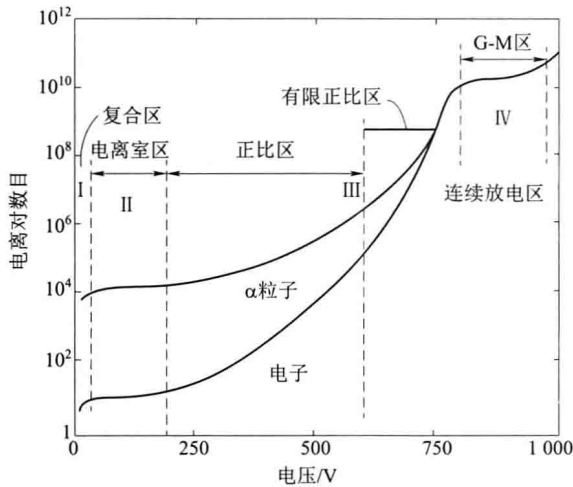


图 1-1 外加电压与电力电流曲线图

1.3.1 电离室

电离室是工作在饱和区的气体探测器, 因而饱和区又称电离室区。在该区内, 如果选择了适当的极化电压, 复合效应便可忽略, 也没有碰撞放大产生, 此时可认为射线产生的初始离子对 N_0 恰好全部被收集, 形成电离电流。该电离电流正比于 N_0 , 因而正比于射线强度。加速器的监测探测器一般均采用电离室。标准剂量计也用电离室作为测量元件。电离室的电流可以用一台灵敏度很高的静电计测量。

不难看出, 电离室主要由收集极和高压极组成, 收集极和高压极之间是气体。与其他气体探测器不同的是, 电离室一般以一个大气压左右的空气为灵敏体积, 该部分可以与外界完全连通, 也可以处于封闭状态。其周围是由导电的空气等效材料或组织等效材料构成的电极, 中心是收集电极, 二极管间加一定的极化电压形成电场。为了使收集到的电离离子全部形成电离电流, 减少漏电损失, 在收集极和高压极之间需要增加保护极。如图 1-2 所示。

当 X 射线、 γ 射线照射电离室, 光子与电离室材料发生相互作用, 主要在电离室室壁产生次级电子。次级电子使电离室内的空气电离, 电离离

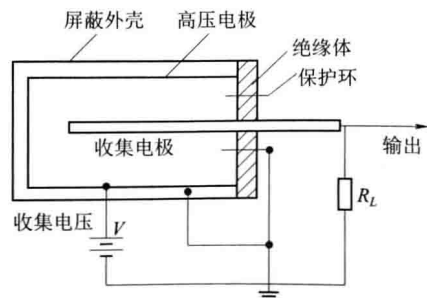


图 1-2 圆柱形电离室结构图

子在电场的作用下向收集极运动,到达收集极的离子被收集,形成电离电流信号输出给测量单元。

一般说来,电离室的灵敏度取决于电离室内的空气质量。由于电离室内的气压近似为一个大气压,那么,也可以说其灵敏度正比于空气体积,因而这个体积又称“灵敏体积”。

1.3.2 正比计数器

正比计数器是工作在正比区的气体探测器,可以用来计数单个粒子,并根据输出信号的脉冲高度来确定入射辐射的能量。这种探测器的结构大多采用圆柱形,中心是阳极细丝,圆柱筒外壳是阴极,工作气体一般是惰性气体和少量负电性气体的混合物。如图 1-3 所示。

自窗口射入的 X 射线能量一部分通过,而大部分能量被气体吸收,其结果使圆筒中的气体产生电离。在电场的作用下,电子向阳极丝运动,而带正电的离子则向阴极圆筒运动。因为这时电场强度很高,可使原来电离时所产生的电子在向阳极丝运动的过程中得到加速。当这些电子再与气体分子碰撞时,将引起进一步的电离,如此反复不已。这样,吸收一个 X 射线光子所能电离的原子数要比电离室多 $10^3 \sim 10^5$ 倍。这种现象称为气体放大作用,其结果即产生所谓“雪崩效应”。每个 X 射线光子进入计数管产生一次电子雪崩,于是就有大量的电子涌到阳极丝,从而在外电路中产生一个易于探测的电流脉冲。

正比计数器具有较好的能量分辨率和能量线性响应,探测效率高,寿命长,广泛应用于核物理和粒子物理实验。

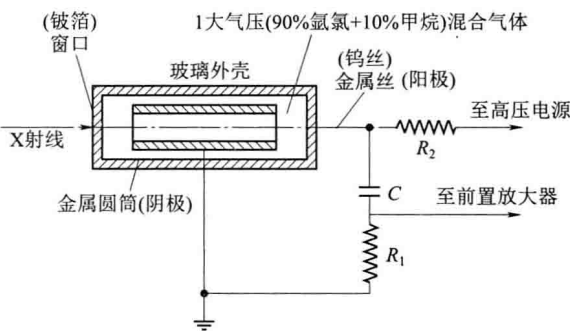


图 1-3 正比计数器结构图

1.3.3 盖革计数器

盖革计数器是工作在 G-M 区的气体探测器,通常为密封并抽真空的玻璃管,中央是一根细金属丝作为阳极,玻璃管内壁涂以导电材料薄膜或另装一金属圆筒作为阴极构成真空二

极管。同时充有一定量的惰性气体和少量猝灭气体,一般二者充气压比例是 9 : 1。G-M 计数管有很多类型,按结构形状区分有圆柱形和钟罩形等;按探测对象分类有 β 、 γ 或兼测 β 、 γ 型计数管;按所充猝灭气体种类不同分,有卤素管,其猝灭气体为 Br_2 、 Cl_2 等,如果用乙醇或乙醚等碳氢化合物作为猝灭气体,称为有机计数管。如图 1-4 所示。

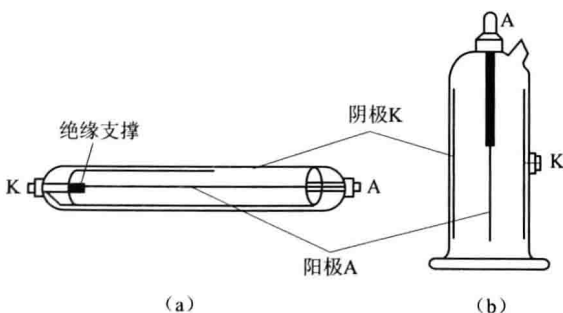


图 1-4 G-M 计数管结构图

(a) 圆柱形计数管;(b) 钟罩形计数管

当计数管的阳极和阴极之间加有适当的工作电压时,管内形成柱形对称电场。如有带电粒子进入管内,由于粒子与管内惰性气体原子的电子之间的库仑作用,可使气体电离(或激发),形成正、负离子对(负离子即为电子),这种电离称为初级电离。在电场作用下,正、负离子分别向各自相反的电极运动,但正离子向阴极运动的速度比电子向阳极运动的速度慢得多。在电子向阳极运动过程中不断被电场加速,又会和原子碰撞而再次引起气体电离,称为次级电离。由于不断的电离过程使电子数目急剧增加,形成自激雪崩放电现象。同时,原子激发后的退激发及正负离子对的复合,都会产生大量紫外光子,这些光子可在阴极上打出光电子,这些光电子在电场中被加速,一般在 10^{-7} s 之内会使雪崩放电遍及计数管整个灵敏体积内。在这段时间内正离子移动很少,仍然包围在阳极附近,构成正离子鞘,使阳极周围电场大为减弱。在正离子缓慢地向阴极运动过程中,也会与猝灭气体分子相碰撞。对充有不同类型猝灭气体的计数管,其猝灭机制是不同的,对卤素管而言,由于猝灭气体的电离电位低于惰性气体,见表 1-1,因而会使大量的猝灭气体电离,使到达阴极表面的大部分是猝灭气体的正离子。它们与阴极上电子中和后大部分不再发射光子,从而抑制正离子在阴极上引起的电子发射,终止雪崩放电,形成一个脉冲电信号。对于有机管而言,其猝灭气体是多原子(分子),如酒精或石油醚等,它们能强烈地吸收紫外光子,可把惰性气体电离或激发后在退激过程中产生的大量光子吸收掉。这些光子不能产生次级雪崩放电,使由入射粒子引起的一次雪崩式放电过程终止,起到使放电自猝灭的作用。

表 1-1 几种气体的电离电位

原子(分子)	第一电离能/ eV	原子(分子)	第一电离能/eV
Ar	15. 76	Br	11. 76
Ne	21. 56(16. 5 亚稳态)	Cl	12. 90
Kr	14. 00	C ₂ H ₃ OH	约 11. 3

因此一次放电过程可在输出电阻上产生一个电压脉冲信号,其数目与进入计数管的粒子数相对应。计数管的使用寿命主要受猝灭气体因素限制。对有机管来说,由于有机分子的分解而逐渐消耗减少,一般有机管的使用寿命约 10^8 次计数。对于卤素管来说,被电离的卤素离子移动到阴极后,仍可复合为分子,因此卤素分子几乎不消耗。所以卤素管的寿命更长,可达 10^9 次计数以上。同时卤素管工作电压也低于有机管。

一个带电粒子进入计数管,可以引起一次放电过程而产生一个电压脉冲信号而被记录。因此,G-M 计数管对带电粒子(如电子)的探测效率近于 100%。如果被探测的是 γ 射线,可以利用 γ 射线穿入计数管壁或金属阴极时,产生的次级带电粒子(如光电子等)进入计数管引起电离并产生输出脉冲。所以 G-M 计数管不仅能探测带电粒子也能探测 γ 光子,不过对后者的探测效率很低,仅约 1%。

盖革计数器的主要特性:

(1) 坪曲线

正常的 G-M 计数管在强度不变的放射源的照射下,测量计数率随阳极和阴极间外加电

压的关系,得到如图 1-5 所示的曲线,称为坪曲线。由图 1-5 看出,在外加电压低于 V_0 时,粒子虽然进入计数管但不能引起计数,这是因为此时所形成的电压脉冲高度不足以触发定标器的阈值。随着外加电压的升高,计数管开始有计数,此时对应的外加电压 V_0 ,称为起始电压或阈电压。随着外加电压的继续升高,计数率也迅速增加,但外加电压从 V_1 到 V_2 这一范围内,计数率却几乎不变,这一段外加电压的范围称为坪区, $V_1 \sim V_2$ 的电压值称为坪长。计数管的工作电压就应选择在此范围的重点附近。一般有机管的坪长约 150~200 V,其实电压约在 800~1 100 V。而卤素管坪长仅约 100 V,起始电压约在 280~350 V 范围。不过计数管的坪区也并非完全平坦,随着外加电压的进一步升高,计数率也稍有增加,如电压从 V_1 升至 V_2 ,计数率也从 N_1 升至 N_2 。其原因主要是猝灭不够完全,即猝灭气体的正离子到达计数管阴极时有少数也还可能产生次级电子,引起假计数。这些假计数是随外加电压的升高而增加的。为了表示这一特性,定义坪斜 T 为

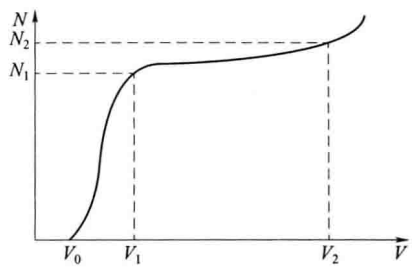


图 1-5 G-M 计数管的坪曲线

$$T = \frac{N_2 - N_1}{N_1 (V_2 - V_1)} \times 100\% \tag{1-1}$$

式中,各物理量的意义在图 1-5 中已标出。坪斜 T 的意义为当坪长每增加 1 V 时,引起计数率增加的百分率,一般要求合用的计数管 $T < 0.1\% \text{ V}^{-1}$ 。

当计数管两极上所加电压超过 V_2 时,计数率会明显上升,这说明已进入连续放电区,猝灭气体已失去作用。此时计数管不能正常使用且很容易损坏,实验中应尽量避免外加电压超过坪长区域。

通过测量计数管的坪曲线,可以得出计数管的起始电压、坪长、坪斜等参数,并可选择正确的工作电压。

(2)计数管的死时间和失效时间

如果放射源的活度合适,可用触发扫描示波器观察计数管输出脉冲波形,如图 1-6 所示。图 1-6 的横轴是扫描时间,纵轴是脉冲信号幅度,由图 1-6 可以看出,在第一个大脉冲之后有一系列由小逐渐变大的脉冲。在第一个大脉冲的宽度 t_D 时间之内,计数管内正离子鞘离阳极还很近,管内电场较弱,即使有离子进入管内也不能引起放电,不会形成脉冲,因此称 t_D 为死时间。随着正离子鞘离开阳极的距离增大,管内电场稍有恢复,此时若有粒子进入计数管内,就能引起放电而形成脉冲,不过脉冲幅度很小。随着正离子鞘越接近阴极,管内电场逐渐恢复,输出脉冲也逐渐恢复到脉冲的幅度。直到正离子鞘到达阴极而被中和,管内电场完全复原,输出脉冲也达到正常幅度。如图 1-6 中表示脉冲幅度的变化情形,其中 t_D 表示计数管的死时间, t_R 为恢复时间,此段时间有粒子进入计数管时,它可能产生脉冲信号,但其幅度较小。实际上计数管不能计数粒子的时间一般大于 t_D 而小于 $t_D + t_R$ 。计数管实际不能计数的时间称为失效时间(或称分辨时间)。失效时间除决定于计数管的结构和工作电压外,还与计数率的大小和定标器的触发阈等因素有关。参考图 1-6 中表示,如