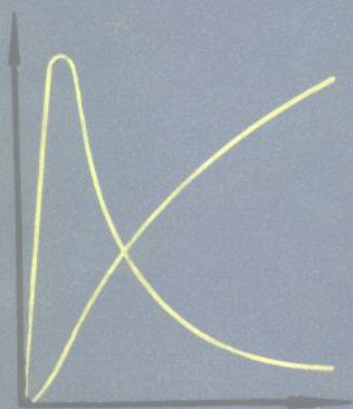


脉冲电离辐射探测器

[苏] 3. A. 阿利比科夫
A. И. 维利坚尼科夫 著
O. B. 科兹洛夫



原子能出版社

53-03/3

335

脉冲电离辐射探测器

[苏] 3. A. 阿利比科夫 A. И. 维利坚尼科夫
O. B. 科兹洛夫 著

宿昌厚 译



原子能出版社

1111034

ДЕТЕКТОРЫ ИМПУЛЬСНОГО
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ
З. А. АЛЬБИКОВ, А. И. ВЕРЕТЕННИКОВ,
О. В. КОЗЛОВ

Под редакцией
А. И. Веретенникова
МОСКВА АТОМИЗДАТ, 1978

脉冲电离辐射探测器

[苏] З. А. 阿利比科夫

А. И. 维利坚尼科夫 著

О. В. 科兹洛夫

宿昌厚 译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $63 \frac{3}{4}$ ·字数147千字

1983年7月第一版·1983年7月第一次印刷

印数1—2000·统一书号:15175·486

定价:0.85元

内 容 简 介

脉冲电离辐射的测量，是实验核物理和放射性测量技术迫切需要解决的一个问题。在脉冲X射线装置和粒子加速器的建造与运行过程中，在热核研究中，在医学以及其他科技领域中都需要进行这种测量工作。

本书介绍测量脉冲电离辐射用的各类探测器，叙述这些探测器的基本原理，并列关于探测器特性方面的计算结果与实验资料。

书中讨论了各类探测器的幅度特性、时间特性和能谱特性，同时也讲述了由输出电流统计涨落引起的一些局限性。本书着重讨论时间分辨率为纳秒（ 10^{-9} 秒）和亚纳秒级的探测器。

本书主要对象是实验核物理工作者和核仪器制造方面的专业人员。

引 言

电离辐射的测量在现代科学技术中具有重要意义。在把实验核物理方面取得的成就推广应用于工业、医学和国民经济其他领域时，人们越来越多地重视电离辐射场各个参数的测量，因为通过这些参数不仅能够了解射线源装置的工作情况，而且还能够取得关于被研究对象和服务设施在电离辐射场中的工作条件方面的资料。

目前作为电离辐射源用的许多装置都有一个特点，就是它们都在脉冲方式下工作。在此种情况下，周围的电离辐射场与静态源造成的辐射场不同，前者具有脉冲性质，而后的平均辐射强度恒定不变或者按照放射性衰变规律变化。

探测电离辐射的基本原理，是把被测粒子的能量在探测器输出端转换成电信号，接着再用电子设备对这个电信号进行分析处理。按照输出信号的形式，电离辐射探测器可以分为不连续式和模拟式两种。在前者的输出端，各单个粒子形成一系列的电信号（脉冲）；而在后者的输出端，各个单个粒子形成的信号不能被区别开来，人们是根据探测器输出电路中电流的数值来判断被测辐射的情况的*。

在测量脉冲辐射源和脉冲电离辐射场的各参数时，人们最关心的是辐射脉冲的形状及它们的幅度（最大强度）；而如果被测的是一系列辐射脉冲，则人们重视的是各个脉冲之间

* 用这种方法对探测器进行分类是有条件的，因为随着辐射强度的减弱，以及被测粒子数量的相应减少，模拟式探测器将转化成不连续式探测器。

的间隔以及该系列中各个脉冲的形状等。

为了用相应的核电子学设备测量脉冲电离辐射的上述各个参数，一般是应用模拟式探测器，因为利用不连续式探测器实际上不可能达到目的，特别是当单个脉冲的持续时间是纳秒¹⁾级，甚至是皮秒²⁾级的时候，或者是当出现持续时间也是这样短的一系列电离辐射脉冲时，更是如此。

关于测量静态放射源电离辐射用的不连续式核粒子探测器，许多资料已有论述。然而作者还没有看到系统地讲述脉冲电离辐射探测器的理论和应用的著作。本书试图叙述在研制和应用模拟式脉冲电离辐射探测器方面所取得的实际结果以及一些基本理论问题，其中主要着重于分析用这些探测器测量纳秒和亚纳秒宽度的辐射脉冲的可能性。

在叙述过程中，作者尽可能地遵循近年来苏联出版的国家标准。但这并不是任何时候都能做得到的。最大的困难是在术语方面，而这也自然，因为本书所阐述的问题是一个新课题。在讲述探测器的各种特性时，书中引入了一些新定义，根据作者的意见，这些定义在实践中是十分需要的。从探测器的工作原理来看，提出这些新定义也是合乎逻辑的。有了这些新定义，测量辐射参数时合理的度量学也就有了保证。此外，作者也从其他测量技术方面选用了一些同类型的术语。

作者没有为本书提出这样的目的：叙述测量脉冲辐射参数用的方法和设备。虽然对于广大读者来说，毫无疑问对此更有特殊兴趣。然而在某些场合，作者也不得不对此进行扼要叙述，否则，所讲的探测器的某些特性及其实际应用的可能性就毫无基础。

1) НАНОСЕКУНД, 国际符号为 ns, 本文译作纳秒。——译者

2) ПИКОСЕКУНД, 国际符号为 ps, 本文译作皮秒。——译者

目 录

引言

第一章	脉冲电离辐射探测器的特性	1
1.1	脉冲电离辐射场的基本参数	1
1.2	脉冲电离辐射探测器的分类及其性能特点	2
1.3	脉冲电离辐射探测器的基本特性	4
第二章	充电式带电粒子探测器	12
2.1	探测器的构造和工作原理	12
2.2	充电式探测器的时间分辨率	22
2.3	探测效率和灵敏度	33
2.4	准静态和动态方式下幅度特性的线性	36
第三章	充电式 γ 量子和中子探测器	42
3.1	真空充电式 γ 量子探测器	42
3.2	具有电介质散射体的充电式 γ 量子探测器	59
3.3	充电式中子探测器	70
第四章	闪烁探测器	74
4.1	闪烁体和光电器件	74
4.2	闪烁探测器的构成	86
4.3	灵敏度和能谱特性	90
4.4	线性和时间分辨率	98
第五章	切伦科夫探测器	103
5.1	辐射体特性和探测器的构造	103

5.2	灵敏度和能谱特性	109
5.3	线性和时间分辨率	114
第六章	半导体探测器	121
6.1	构造和工作原理	121
6.2	时间分辨率	124
6.3	幅度特性	133
6.4	灵敏度和能谱特性	137
6.5	半导体探测器的抗辐射性能	146
第七章	量热型探测器	151
7.1	构造和工作原理	151
7.2	强力电介质探测器的灵敏度	152
7.3	强力电介质探测器的时间分辨率和输出电流	157
第八章	探测器电流的统计涨落	160
8.1	闪烁探测器和切伦科夫探测器	160
8.2	各类探测器的比较	167
第九章	具有对数幅度特性的探测器	171
9.1	对数探测器的幅度特性	172
9.2	对数探测器的时间特性	174
9.3	对数探测器的构成原理	174
第十章	测量脉冲辐射探测器特性的方法	180
10.1	探测器能谱特性的测量	180
10.2	中子辐射探测器能谱特性的测量	183
10.3	探测器脉冲特性的测量	185
10.4	探测器幅度特性的测量	189
	参考文献	190

第一章 脉冲电离辐射 探测器的特性

1.1 脉冲电离辐射场的基本参数

所谓电离辐射，我们指的是带电粒子、X射线、 γ 量子、中子等。电离辐射在所研究的介质中的空间-时间分布，称为电离辐射场。

根据已经建立起来的术语系统^[1-13]，目前使用以下几个物理量来表征电离辐射场。

粒子或量子通量

$$\Phi_v = dN/dt \text{ [量子/秒]} \quad (1.1)$$

dN 是在 dt 时间内通过某一表面的粒子或量子数目；

粒子或量子通量密度

$$\varphi_v = d\Phi_v/ds \text{ [量子/(厘米}^2 \cdot \text{秒)]} \quad (1.2)$$

$d\Phi_v$ 是进入横截面面积为 ds 的单元小球体体内的粒子或量子通量；

辐射能量通量

$$\Phi = dE/dt \text{ [焦/秒]} \quad (1.3)$$

dE 是 dt 时间内入射到某一表面的全部粒子和量子的能量总和；

辐射能通量密度（辐射强度）

$$\varphi = d\Phi/ds \text{ [焦/(厘米}^2 \cdot \text{秒)]} \quad (1.4)$$

$d\Phi$ 是进入横截面面积为 ds 的单元小球体体内的辐射能通

1111034

量；

粒子或量子注量

$$F_N = dN/ds [\text{量子/厘米}^2] \quad (1.5)$$

dN 是进入横截面面积为 ds 的单元小球体体内的粒子或者量子的数目；

辐射能注量

$$F = dE/ds [\text{焦/厘米}^2] \quad (1.6)$$

dE 是进入横截面面积为 ds 的单元小球体体内的全部粒子和量子的能量总和；

辐射能谱（粒子或者量子的能量分布）

$$f(E) = dn(E)/dE [1/\text{焦}] \quad (1.7)$$

同时 $\int_0^{\infty} f(E) dE = 1$ 。

上述各参数作为一个整体，足以能完整地反映脉冲电离辐射场的各种性质。

1.2 脉冲电离辐射探测器的分类 及其性能特点

大多数电离辐射探测器的工作原理，是基于粒子（量子）在探测器灵敏体积内使原子和分子电离或者激发而产生的效应。

大家知道，带电粒子能够直接引起物质原子的电离和激发，而 X 射线、 γ 射线和中子则是通过光电效应、康普顿效应、电子对产生、核弹性散射、核反应等次级过程使原子电离和激发的。为使原子电离或者激发而传输给物质的能量，被转换成电信号，这个转换过程一般是由几个连贯的具体转换过程所组成的。

电信号在核电子学设备中还要被进一步转换，以便使电

离辐射的被测参数能够呈现为便于观察和便于分析的形式。

按照电离辐射能量被转换为电信号的原理，探测器可以分成下列几个基本类型^[1·2]：电离型，其基本原理是利用物质的电离过程；辐射致光型，其中包括闪烁型，其基本工作原理是利用物质在电离辐射作用下发光；切伦科夫型，它是利用物质在电离辐射作用下放出的法维洛夫-切伦科夫辐射；充电型，它利用电离辐射作用于物体时所产生的电场；量热型，其基本原理是利用电离辐射在物质中造成的热能。

因为探测器类型繁多，形式各异，人们必须选出一些对于所有脉冲辐射探测器来说是共同的、在总体上能决定探测器适用范围的最重要的特性来加以研究。首先应该对于准静态工作方式——辐射脉冲的持续时间及其强度的衰减时间超过探测器分辨时间好多倍——确定这些特性。下面我们主要讨论的也正是这种工作方式。

探测器的基本特性应该能反映出以下几个应用特点：

1) 模拟式测量仪表的指示值是被测物理量的连续函数。模拟式脉冲辐射探测器应该以最高的时间准确度记录下被测的量。从探测器的特性应能看出这种可能性。

2) 电离辐射同探测器物质的相互作用以及其后在探测器中进行的具体转换过程，具有统计性质(或然性质)。因此，探测器输出端的电信号在某种程度上反映出探测器中各个过程的统计学本质，而探测器的特性则具有量子学的意义。

3) 一个实际上十分重要的极端情况，是测量单次(单个)电离辐射脉冲。由于探测纳秒和亚纳秒宽度的单个电脉冲是个尚未解决的课题，特别是当幅度较小时更是这样，所以在此种情况下，应当更多地注意探测器在单次脉冲方式下应用

时的输出电流特性。

4) 为要测量电离辐射脉冲的形状,必须使探测器的灵敏度在整个脉冲持续时间内或者在系列脉冲的持续时间内,保持恒定不变。在一个强的、能使探测器严重过载的初始辐射脉冲作用之后,还会出现另一些辐射脉冲,探测器有没有能力正确地记录这些脉冲的形状,往往具有很大意义。在有些情况下,例如在测量待研究的脉冲辐射的参数时还存在着其他本底辐射时,探测器的抗辐射性能及其能否多次使用的问题,也十分重要。

5) 为了在实际中使用某一类型的探测器,还必须考虑其应用时的机械条件和环境条件。

1.3 脉冲电离辐射探测器的基本特性

脉冲辐射探测器的一个基本特性是探测效率:

$$\eta = N_p / N_{\lambda \text{射}} \quad (1.8)$$

式中: N_p 是已探测到的粒子(量子)数目, 而 $N_{\lambda \text{射}}$ 是在同一时间内通过探测器灵敏体积的粒子(量子)数目。已探测到的粒子(量子)是指对探测器输出端电流有贡献的那些粒子。

探测效率的物理意义是, 当粒子通过探测器的灵敏体积时探测器记录粒子(量子)的几率。探测效率与射线射到探测器上的方向有关, 因为 N_p 和 $N_{\lambda \text{射}} = s F_N$ 在一般情况下与射线的入射方向有关 (s 是垂直于射线入射方向的探测器灵敏体积的横截面面积)。

探测器的有效探测截面(有效面积)也是一个有用的特性:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{有效}} &= S\eta = N_p S / N_{\text{入射}} = \\
 &= N_p / F_N [\text{厘米}^2] \quad (1.9)
 \end{aligned}$$

就物理意义而言，有效探测截面就是在假设探测器的 $\eta = 1$ 的情况下其灵敏体积的横截面面积。有效探测截面等于在具有单位粒子注量，即探测器灵敏体积横截面单位面积上只通过一个粒子的辐射场中，它所能探测到的粒子（量子）数目。

借助于有效探测截面可以求出探测器所记录下来的粒子数目，进而也就能够确定测量脉冲辐射参数时可能出现的统计误差。

探测器的另一个重要特性是电流灵敏度，通常就把它称为探测器的灵敏度：

$$S = \frac{dI}{d\varphi_N} [\text{安} / (\text{量子} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{秒}^{-1})] \quad (1.10)$$

式中： dI 是在探测器所在位置上与给定能量的粒子（量子）通量密度的增量 $d\varphi_N$ 相对应的输出电流的增量。照一般规律，灵敏度 S 也与射线入射到探测器上的方向有关，这主要应归因于 η 的大小随入射方向有变化。

由于粒子的探测过程和探测器输出端电流的形成都具有统计性质，所以只有当探测器输出电流统计涨落同输出电流平均值相比是不太大的情况下，才能讨论探测器的电流灵敏度。

探测器的能谱特性 $S(E)$ 也相当重要，它描述灵敏度对入射到探测器上的单能粒子（量子）的能量的依从关系。知道辐射能谱 $f(E)$ 和能谱特性 $S(E)$ ，探测器的灵敏度 S 可由下式求出：

$$S = \int_0^{E_{\text{最大}}} S(E) f(E) dE \quad (1.11)$$

有时候, 探测某种给定辐射时的能量灵敏度 $dI/d\varphi$ 以及照射量率灵敏度 $dI/d\dot{P}$, 也是十分有用的两个参数, 这里 $\dot{P}$ 是探测器所在位置上的照射量率。

探测器的幅度特性 $I(\varphi_N)$, 在测量脉冲辐射时起很大作用。幅度特性是指探测器输出电流对照射它的粒子(量子)通量密度的依从关系。

在研究幅度特性时, 辐射通量范围的选取, 一般是使探测器输出电流达到饱和状态(极限状态)。在相应的曲线图(图1.1)上, 粒子通量密度通常取相对单位。

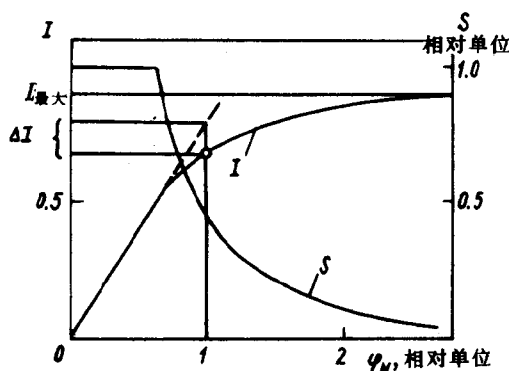


图 1.1 探测器的幅度特性

探测器幅度特性曲线的斜率决定了探测器在幅度特性不同区域上的灵敏度 $S = dI(\varphi_N)/d\varphi_N$ 。S 对输出电流(辐射通量)的关系, 一般用相对单位画在同一张图上(图1.1)。

在幅度特性的线性区域上运用的探测器, 能够保证不失

真地传输电离辐射的脉冲波形（在没有瞬态过程影响的情况下），而利用幅度特性的非线性区则会导致失真。

探测器最重要的特性之一是其最大线性电流 I_s 。在此最大线性电流下，探测器仍应能够满意地传输电离辐射脉冲波形。

测量辐射脉冲波形的某个给定参数时的容许误差，是能否准确地传输脉冲波形的判据。在求 I_s 时，基于幅度特性可以有两种办法来确定允许的非线性。第一种办法，当所关心的主要是传输脉冲幅度的准确性时，是利用探测器实际幅度特性 $I(\varphi_N)$ 对于理想特性（图1.1中的虚线）的相对偏离 $\Delta I/I$ 。一般是在 $\Delta I/I=0.1$ 时取 I_s 。

第二种办法，当所关心的是脉冲各段上的“快特性”（脉冲平顶和下降部分的上下冲和振荡等）时，是利用探测器微分灵敏度 S 的变化（比如说变化10%）。作者在下面将集中叙述如何用第一种办法来求 I_s 。

脉冲辐射探测器的时间特性，决定着它们实际上能否以输出电流脉冲波形的形式准确地传输脉冲辐射场的快时间特性（快的升降）。

有两种方法来确定象探测器的时间分辨率这样一种重要特性。第一种方法是利用探测器的瞬态特性 $h(t)$ （图1.2）。瞬态特性描述探测器对前沿极陡的阶梯式辐射脉冲 $\Phi_N(t) = dN(t)/dt \equiv l(t)$ 的响应。在此情况下，人们是取探测器输出电流从其稳定值的0.1上升到0.9所需要的时间 $\tau_{0.1-0.9}$ 作为时间分辨率。

第二种方法是利用探测器的脉冲特性 $g(t)$ （图1.2），而脉冲特性是指探测器对 δ 脉冲——持续时间极短的辐射脉冲 $\Phi_N(t) = dN(t)/dt \equiv \delta(t)$ 的响应。此时一般是取以时间

单位来表示的输出电流脉冲半高度处的宽度 τ_{1-2} ，即脉冲特性 $g(t)$ 半高度处的宽度作为时间分辨率。然而在有些情况下（例如在光学测量中）人们取脉冲特性的0.1高度处的宽度 $\tau_{0.1}$ 作为时间分辨率（图1.2）。

应该指出，在通常情况下对于线性系统，

$$g(t) \equiv \frac{dh(t)}{dt} \quad (1.12)$$

而为了分析测量结果，瞬态特性和脉冲特性二者中只要知道一个就已足够。但是利用这两个特性分别进行计算所带来的误差，则可能相差很大。

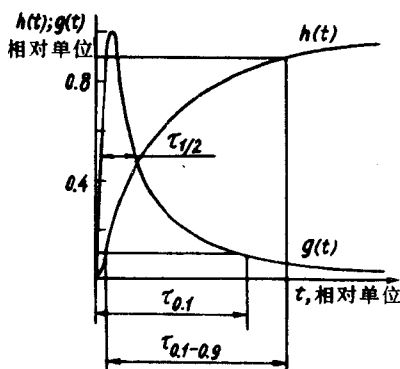


图 1.2 探测器的瞬态特性 $h(t)$ 和脉冲特性 $g(t)$

实际上，从研究脉冲辐射的时间参数的可能性这个观点来看，脉冲特性 $g(t)$ 较之瞬态特性 $h(t)$ 在提供数据方面更为有利也更加直观。所以，作者在下面将利用探测器的脉冲特性 $g(t)$ 来求时间分辨率。

当然，只有当探测器记录下大量粒子（量子）时所得到的那些实验脉冲特性和瞬态特性，才是有实用价值的特性，只有这样才能保证测量脉冲波形时有足够高的统计精度。

用上述方法之一求出的探测器的时间分辨率，反映出用该探测器能够分析的被测脉冲辐射时间参数的最大实际限度。利用文献中已叙述过的脉冲波形恢复法，可以使这种分析能力大为扩展。该方法的依据是要知道 $g(t)$ 或者 $h(t)$ 。

关于通量密度和注量的测量范围，也是人们所关心的问题。

测量粒子通量密度的上限，由最大线性输出电流来决定：

$$\varphi_N^{\text{最大}} = I_N / S [\text{量子}/(\text{厘米}^2 \cdot \text{秒})] \quad (1.13)$$

测量粒子通量密度的下限 $\varphi_N^{\text{最小}}$ ，首先取决于显示探测器信号所用的仪器的灵敏度。但是甚至在有一台理想的仪器能够记录探测器输出的任意电信号的情况下，仍然存在着粒子通量密度测量下限的统计局限性，这主要是因为被测得的粒子数目减少了，而测量的统计误差却增加了。通常 $\varphi_N^{\text{最小}}$ 是在测量统计误差约为 10% 时取值，此时在等于时间分辨率 $\tau_{1/2}$ 的时间内，记录到约 100 个粒子；在这种情况下

$$\varphi_N^{\text{最小}} = 100 / S_{\text{有效}} \tau_{1/2} [\text{量子}/(\text{厘米}^2 \cdot \text{秒})] \quad (1.14)$$

此时，用探测器测量粒子（量子）通量密度的最大动态范围为

$$D_N^{\text{最大}} = \varphi_N^{\text{最大}} / \varphi_N^{\text{最小}} = I_N S_{\text{有效}} \tau_{1/2} / 100 S$$

$$(D_N \gg 1) \quad (1.15)$$

然而，如果脉冲辐射探测器及其后面所连接的测量设备，