

高等学校试用教材

核辐射测量

郑成法 主编

苏剑尘 审校
张庆嘉

原子能出版社

内 容 简 介

本书阐述了核辐射测量的原理和实验。原理部分包括核辐射探测器、放射性测量的统计误差、放射性活度测量、放射性核素的鉴定和分析等。实验部分包括常用探测器和测量仪器的使用 α , β , γ , 射线的强度和能量的测量以及放射性环境样品的监测和放射性核素的应用等。

本书可作为高等学校放射化学等专业的试用教材, 也可供从事放射性测量、放射性核素应用、辐射防护等工作的科技人员参考。

3.10.15

高等学校试用教材

核辐射测量

郑成法 主编

苏剑尘 张庆熹 审校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

重庆印制一厂印刷

(重庆枇杷山后街)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $12\frac{1}{4}$ ·字数 271 千字

1983 年 5 月第一版·1983 年 5 月第一次印刷

印数 001—3,700·统一书号: 15175·482

定价: 1.30 元

前 言

本书是在复旦大学放射化学专业用的《核辐射测量基础》讲义的基础上编写而成的。全书分原理和实验两部分。原理部分着重于阐述核辐射探测器、放射性活度测量和放射性核素分析等方面的基本原理。实验部分包括计数管、闪烁探测器、半导体探测器的特性和使用；闪烁 γ 谱和 $\text{Ge(Li)}\gamma$ 谱的测量；固体样品比活度和放射性气溶胶浓度的测量以及 β 反散射测厚和同位素X荧光分析等。我们期望学生通过本书的学习，不仅能掌握放射性测量的基本原理，而且能正确地选用探测器和掌握常用的测量技术。

本书可作为高等学校放射化学等专业的试用教材，也可供有关专业的教师和学生以及从事核技术研究和应用工作的科技人员参考。

本书由郑成法主编。其中，原理部分的第一、二章由赵魁东编，第三章由赵魁东、郑成法合编，第四章由郑成法编；实验部分由杨植震、赵魁东和郑成法合编。

本书由苏剑尘、张庆熹审校。在审稿会上北京大学、中国科学院原子能研究所、四川大学、清华大学、天津大学的有关同志对本书提出了宝贵意见。在本书编写过程中也曾得到国内许多单位的支持和帮助。编者谨向他们一并致谢。

由于编者水平所限，又是仓猝成稿，书中缺点和错误之处在所难免，恳请读者指正。

编 者

一九八二年五月

目 录

前言

第一部分 原 理

第一章 核辐射探测器	1
第一节 气体电离探测器	1
一、气体中的电离现象	2
二、电离室	7
三、正比计数管	18
四、G-M计数管	26
第二节 闪烁探测器	36
一、概述	36
二、闪烁体	37
三、光电倍增管	50
四、闪烁计数器及其应用	56
第三节 半导体探测器	65
一、工作原理	66
二、PN结型半导体探测器	68
三、锂漂移型半导体探测器	73
四、高纯锗半导体探测器	78
第二章 核辐射测量中的统计误差	79
第一节 核衰变的统计分布规律	79
一、核衰变的统计性	79
二、统计分布的一般规律	82
三、核衰变的统计分布	86
第二节 核衰变的统计误差及其运算	87
一、统计误差的表示方法	87
二、误差的传递	89
三、核辐射测量误差的运算	90
第三节 测量数据的检验	94

一、两次测量计数值的检验	94
二、测量装置稳定性的检验	95
三、可疑数据的舍弃	99
第三章 放射性活度的测量和中子的探测	103
第一节 概述	103
一、放射性活度及其单位	103
二、影响放射性活度测量的因素	106
三、绝对测量和相对测量	114
第二节 放射性活度的绝对测量	117
一、小立体角法	117
二、 4π 测量法	118
三、符合测量法	125
第三节 测量低能 β 放射源活度的液体闪烁计数法	133
一、液体闪烁计数器的结构及基本原理	134
二、闪烁液中的非荧光现象	138
三、液体闪烁计数器的工作条件和猝灭校正	140
第四节 低水平放射性测量	147
一、低水平测量装置的选择原则	148
二、本底的来源和降低本底的措施	150
三、常用低水平测量装置	153
四、低水平测量中的测量下限	157
第五节 中子的探测	160
一、中子探测的原理	160
二、中子探测器	166
三、中子通量的测量	170
四、中子源强度的测量	175
第四章 放射性核素的鉴定和物理分析	176
第一节 射线类型的确定	177
第二节 半衰期的测定	178
一、中等半衰期的测定	178
二、短半衰期的测定	192
三、长半衰期的测定	195

第三节 γ 能谱分析	196
一、 γ 能谱的基本形式	197
二、 γ 能谱的测量方法	213
三、 γ 谱仪的能量刻度和效率刻度	216
四、复杂 γ 能谱的解析	221
第四节 α 能谱和 β 最大能量的测定	231
一、 α 能谱的测定	231
二、 β 最大能量的测定	238
参考文献	241

第二部分 实 验

实验一 定标器的使用及G-M计数管坪曲线的测定	243
实验二 G-M计数管分辨时间的测定	247
实验三 几何位置对测量结果的影响	251
实验四 核衰变的统计分布规律	254
实验五 α , β , γ 闪烁探测器的使用	257
实验六 液体闪烁计数器	268
实验七 半导体 α 谱仪	273
实验八 单道闪烁 γ 谱仪	277
实验九 多道闪烁 γ 谱仪	281
实验十 用计算机解析多道闪烁 γ 谱	290
实验十一 高分辨率Ge(Li) γ 谱仪	300
实验十二 吸收法测定 β 射线的最大能量	303
实验十三 符合法测量 ^{60}Co 的活度	313
实验十四 流气式低水平 β 测量仪	319
实验十五 固体样品 β 比放射性活度的测定	322
实验十六 固体样品 α 比放射性活度的测定	328
实验十七 大气中 α 放射性气溶胶浓度的测定	335
实验十八 固体径迹探测器	342
实验十九 激活法测定中子通量和 $^{116\text{m}}\text{In}$ 半衰期的测定	345

实 验 二十	用闪烁室测量射气	349
实 验 二十一	反散射测量及其应用	359
实 验 二十二	放射性同位素X射线荧光分析	364
附录一	常用物理常数	373
附录二	能量单位的换算	373
附录三	常用放射性核素	374
附录四	指数函数表	379

第一章 核辐射探测器

通常，放射性测量装置主要由核辐射探测器和电子仪器所组成。核辐射探测器简称探测器，是指在射线作用下能产生次级效应的器件，而且这种次级效应能被电子仪器所检测。多数探测器是根据射线使物质的原子或分子电离或激发的原理制成的。它们可以把射线的能量转变为电流、电压的信号以供电子仪器记录。因此，探测器是一种能量转换器件，是测量装置的主要组成部分。

根据射线在探测器内产生的效应和探测器的工作介质，可把探测器分为几种类型。常用的探测器有三类：气体电离探测器（利用射线在气体介质中产生的电离效应）、闪烁探测器（利用射线在闪烁物质中产生的发光效应）和半导体探测器（利用射线在半导体中产生的电子和空穴）。此外，还有其它类型的探测器，如照相乳胶、固体径迹探测器、切伦科夫探测器和热释光探测器等。

在实际应用中，往往需要测量各种射线的强度，有时也需要测定它们的能量，确定放射性核素的半衰期和分析它们的复杂混合物。根据不同的测量要求，必须选择合适的探测器并配以有关的电子仪器。在本章主要介绍几类常用探测器的原理、性能和应用。关于电子仪器的内容在电子学课程内已有叙述，不再赘述。

第一节 气体电离探测器

电离室、正比计数管和盖革-弥勒(G-M)计数管统称为气体电离探测器。它们是早期应用最广的探测器。由于闪烁探测器和半导体探测器的发展，它们已逐步被取代，但是这类探测器结构简单、性能稳定、使用方便、价格低廉，至今在某些方面仍在应

用。

这三种气体电离探测器的工作特点虽不完全相同，但都具有一个共同点：首先射线使探测器内的工作气体发生电离，然后收集所产生的电荷而达到记录射线的目的。因此，在分别介绍它们之前，对气体中的电离现象进行简要的讨论。

一、气体中的电离现象

(一) 电 离

带电粒子通过气体时与气体分子不断地碰撞逐步损失能量，而气体分子中的电子在碰撞过程中获得能量。在电子获得的能量足以克服原子核的束缚时，电子就会脱离分子成为自由电子，这时分子就分离成一个自由电子和一个正离子，这种过程称为电离。在电子获得的能量不足以产生电离时，电子可以从低能级跃迁至高能级，使原子处于激发态，这种过程称为激发。因此，带电粒子在气体中损失的能量，能导致气体分子的电离和激发。通常，带电粒子具有很大的能量，在经过的路程上可以产生大量的离子对（一个自由电子和一个正离子合称为一个离子对）。在电离中产生的次级电子，其中一部分还具有较大的能量，能再使气体分子电离。因此，常把入射粒子和气体分子直接作用产生的电离称为初电离，由次级电子和气体分子作用产生的电离称为次电离。初电离和次电离的总和称为总电离。入射粒子在气体中产生的总电离离子对数 N_0 与它在气体中损失的能量有关。实验结果表明，在相当大的能量范围内，二者成正比，即

$$N_0 = E/W \quad (1.1)$$

式中， E 为入射粒子在气体中损失的能量； W 为电离能，即入射粒子在气体中产生一个离子对所消耗的平均能量。表 1-1 列出了 α 、 β 粒子在常用气体中的电离能和最低电离电位。由表 1-1 可见，带电粒子在常用气体中的电离能比较接近，约为 30eV。此外，还可看到，电离能比相应的电离电位要大得多。这是由于入射粒子产生

表1-1 常用气体中的电离能 W 和最低电离电位 I_0

气 体	W_{α}, eV	W_{β}, eV	I_0, eV
He	42.7	41.3	24.5
Ne	36.8	35.4	21.6
Ar	26.4	23.8	15.8
Kr	24.1	24.4	14.0
Xe	21.3	22.1	12.1
H ₂	36.4	36.5	15.6
N ₂	37.0	34.8	15.5
O ₂	32.2	30.8	12.5
CO ₂	34.2	33.0	14.4
CH ₄	29.1	27.3	14.5
空气	35.1	33.9	

一个离子对所消耗的能量，除用于气体分子的电离外，还用于气体分子的激发。

应当指出， W 和 N_0 都是统计平均值。这是因为入射粒子在经过的路程上所引起的电离过程是随机性的，每次电离碰撞所损失的能量不可能完全相同。因此，同一种粒子在气体中损耗的能量即使相同，所产生的离子对数也不完全相等，而是存在着一定的统计涨落。

粒子在单位路程上产生的离子对数目称为比电离。不同类型的粒子，其比电离可能相差很大。例如， α 、 β 和 γ 射线在气体中 1cm 的路程上产生的离子对分别为 10^4 — 10^5 ， 10^2 — 10^3 和 1—10。其中， γ 射线的电离作用主要是通过次级效应产生的。因此不同类型粒子所产生的离子对的空间密度相差很大。同时应指出，同一种粒子产生的离子对在整个路程内的分布也是很不均匀的。

(二) 电子和离子在气体中的运动

入射粒子在气体中产生的电子和正离子都具有一定的动能。在没有外加电场的情况下，它们和其它气体分子一样，作无规则的热运动，彼此不断碰撞。结果可以产生下列几种现象：

1. 扩散

电离产生的电子和正离子在空间的分布都是不均匀的，由于存在扩散现象，它们从密度高的区域向密度低的区域移动。在探测器中，电子和正离子的扩散会影响电离电荷的收集，而不利于探测器的正常工作。

2. 负离子的形成

自由电子在运动过程中与气体分子碰撞时，有可能被气体分子捕获。这样，就形成了负离子。不同的气体分子捕获电子的几率相差很大。例如，卤素、氧和水气捕获电子的几率可达 10^{-4} — 10^{-3} ，而 H_2 、 N_2 、 CH_4 和惰性气体捕获电子的几率小于 10^{-6} 。电子与气体分子形成负离子后，其运动速度大大减慢，这对探测器的工作也是不利的，因此在气体电离探测器中必须注意工作气体的选择和纯化。

3. 复合

正离子和电子（或负离子）碰撞时，可能复合成一个中性原子或中性分子。复合的几率与正离子密度 n^+ 和电子（或负离子）密度 n^- 成正比，单位时间单位体积内的复合数目为

$$-\frac{dn^+}{dt} = -\frac{dn^-}{dt} = \alpha n^+ n^- \quad (1.2)$$

式中， α 称为复合系数。它与气体的性质、压力、温度以及正、负离子的相对速度有关。例如，相对速度愈小，复合系数愈大。因此，负离子与正离子的复合几率要比电子与正离子的复合几率大得多。显然，复合现象使收集电荷数减少，对探测器的工作甚为不利。

（三）外加电场下电子和离子的运动规律

1. 漂移运动

当存在外加电场时，电子和正离子受到一定方向电场力的作用，获得平行于电场方向的加速度。这些电子和正离子分别向两电极运动时，同其它气体分子不断碰撞，从而能量损失、速度降

低。这种不断加速和减速的过程，在宏观上表现为一种具有一定平均速度的定向运动。电子和正离子在电场内的这种定向运动称为漂移运动，它们的平均速度称为漂移速度。外加电场愈强，这种定向漂移运动愈明显。漂移速度与电场强度、气体压力有关。在一般气体电离探测器的工作条件下，电子漂移速度为 10^5-10^6 cm/s，而正离子的漂移速度为 10^2-10^3 cm/s，离子质量愈大，漂移速度愈慢。

2. 电离电流随外加电场的变化

为了对核辐射进行探测，应将入射粒子产生的离子对有效地收集起来。为此，气体

电离探测器必须加有电场，使气体中产生的电子和正离子沿电场方向作漂移运动，形成可被测量的电离电流。图 1-1 为圆柱形气体电离探测器的示意图。它是一个具有正、负两个电极的密封圆筒。筒内充有工作气体，两极间加有直流高压。在带电粒子入射后，气体发生电离，产生的离子对在电场作用下分别向两极作漂移运动并被电极收集。同时，在探测器输出电路中形成电离电流。如果在探测器中由一个带电粒子引起电离，在电极上收集的离子对数

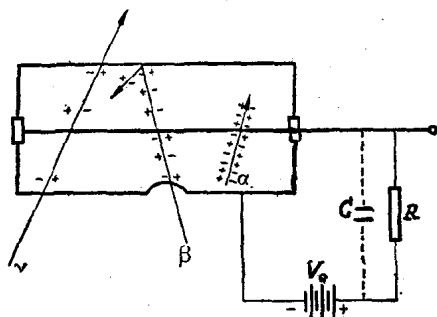


图1-1 气体电离探测器示意图

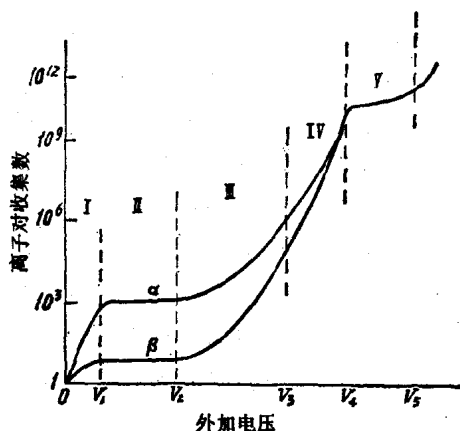


图1-2 离子对收集数与外加电压的关系

随外加电压的变化如图 1-2 所示。因为电离电流的强度正比于单位时间内收集的离子对数,所以只要测量的射线强度恒定,图 1-2 中的曲线就可以反映电离电流与外加电压的关系。图中的两条曲线分别代表 α 、 β 射线形成的曲线。

从图 1-2 可以明显地看出,曲线有五个特征不同的区域,现分别加以讨论:

区域 I 为复合区。在此区内,收集的离子对数随外加电压的增加而增大。这是由于此时的电场很弱,离子对的相对速度较小而容易复合,因此只有部分离子对被电极收集。随着外加电压的增加,复合机会减少,曲线呈上升趋势。

区域 II 为电离室区。当外加电压超过 V_1 时,电场较强,复合损失可忽略不计,入射粒子产生的离子对几乎全部被电极收集。因此继续升高电压,收集的离子对数几乎不再增加,形成一个坪区。电离室工作在这个特性区,因此区域 II 称为电离室区。

区域 III 为正比区。当外加电压超过 V_2 时,收集的离子对数又开始迅速增加。这是由于电场相当强,由入射粒子引起的电子加速后引起次级电离,而且次级电离产生的电子还能引起新的电离。若把入射粒子引起的电离称为原电离,则收集到的离子对数比原电离产生的要大得多,此种现象称为气体放大。收集的离子对数与原电离的离子对数之比值,称为气体放大倍数,以 M 表示。 M 随外加电压的增加而增大。例如在区域 III 中, M 可由 10 增大至 10^4 。此区内的气体放大倍数有一个特点,就是在外加电压固定时,它是一个常数,即收集的离子对数与原电离的离子对数成正比。因此区域 III 称为正比区,工作在此区的气体电离探测器称为正比计数管。

区域 IV 为有限正比区。当电场增加至一定程度时,产生的离子对数过多,而正离子的漂移速度比电子的慢得多,因此在电子漂移过程中大量的正离子滞留在原处,形成空间电荷。这种空间电荷使电场削弱,从而限制了电子的继续增殖,这一现象称为空间电荷效应。在图 1-2 中,当外加电压超过 V_3 时,空间电荷效应

逐渐显著，对应于一定工作电压的 M 值不再是常数。对于原电离大的 α 粒子， M 值较小，而对于原电离小的 β 粒子， M 值较大。随着电场的增加，空间电荷效应更加严重。因此，在图上反映出两条曲线在区域Ⅳ逐渐趋近。由于空间电荷效应对气体放大已经有所限制，而且气体放大倍数不再是常数，因此区域Ⅳ称为有限正比区。

区域Ⅴ为G-M区。当电压超过 V_4 时，由于电场很强，气体放大倍数可高达 10^8 ，同时，空间电荷效应的影响更加严重。此区的特点是：只要原电离产生一个离子对，通过气体放大，就能产生数目极大的离子对。因此输出信号很大，对于射线强度的探测十分有利。缺点是在电极上收集的离子对数与原电离无关，如在图1-2中可看到，此区内的 α 、 β 两条曲线完全重合在一起。因此，工作在此区的探测器不能区分入射粒子的类型和能量。这类探测器称为G-M计数管。

当外加电压超过 V_4 时，探测器已进入连续放电区，不能用于射线的探测。

由上述讨论可知，电离室、正比计数管和G-M计数管虽然都是利用气体的电离效应进行工作的，但它们的工作条件差别很大，因而各自具有不同的特性和适用范围，并且在具体设计上也有不同的要求。

二、电 离 室

(一) 概 述

电离室是最简单的气体电离探测器，它要求的电场强度不高，可以做成各种形状，并且对所充气体的要求不高，以及充气压力的范围也可以很宽，甚至可直接用大气压下的空气。但是电离室没有气体放大作用，其输出的电离电流很弱，因此在结构上要特别考虑弱电测量的要求。

常见的电离室结构形式有两种：平行板形和圆柱形。它们的

示意图见图1-3。图中 K 称为高压电极，直接连接高压； A 称为收集电极，通过负载电阻 R 接地。两个电极之间加有高压，并以绝缘体隔开。绝缘体的性能对于弱电流测量的影响很大，因此必

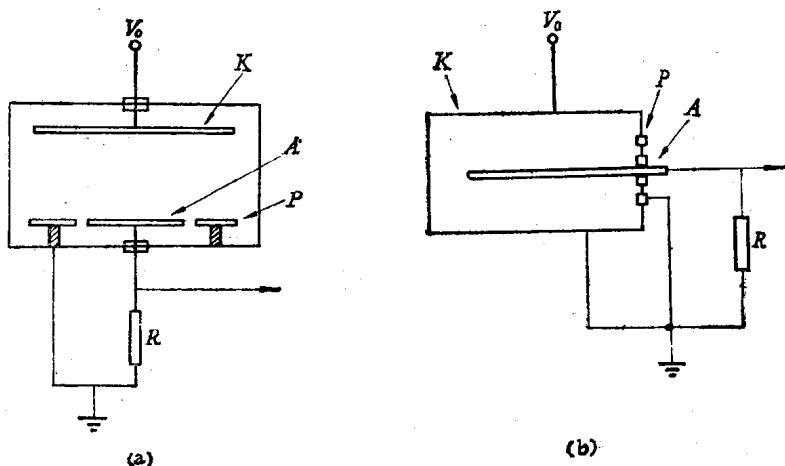


图1-3 电离室结构形式示意图

(a) 平板形

(b) 圆柱形

K ——高压电极； A ——收集电极； P ——保护环

须选用绝缘性能良好的材料，如琥珀、聚苯乙烯、聚四氟乙烯等，而且要求它们的表面光滑、清洁和干燥，以免吸附水气和杂质而漏电。为了减少从高压电极至收集电极的漏电流，常在它们之间加一个金属的保护环 P ，其电位与收集电极的相同。保护环有两个作用，一个作用是使漏电流由高压电极经保护环至地，不再通过收集电极；另一个作用是使收集电极边缘的电场保持均匀，保证电离室有确定的灵敏体积。探测器的灵敏体积是指射线在该体积内能产生电离效应(或其它次级效应)。

按照工作方式，电离室可分为两类：一类是脉冲电离室，它可用来测量单个粒子的电离效应，即测量单个粒子引起的电流脉冲或电压脉冲；另一类是电流电离室(包括累计电离室)，它们测量的是大量入射粒子的平均电离效应。如电流电离室测量的是单位时间内入射粒子所产生的平均电离电流，累计电离室是测量

相当长时间内大量入射粒子所累积的电荷。

电流电离室和累计电离室的工作气体可以是氮气、空气或惰性气体。脉冲电离室的工作气体大多是惰性气体和少量多原子分子气体的混合气体，如90% Ar+10% CH₄等气体。

(二) 脉冲电离室

1. 脉冲的形成

图1-4为平行板脉冲电离室的示意图。通常，平行板电离室相当于一个平板电容器，其极间距离为 d ，电容量以 C 表示。电容 C 积累的电荷可以通过负载电阻 R 放电并输出电压脉冲。当电离室内无入射粒子时，收集电极的电位 $V(t)=0$ 。下面讨论一下，当有入射粒子时，脉冲信号是如何形成的。

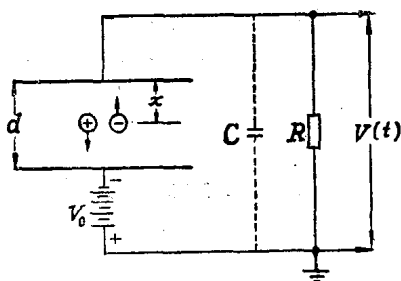


图1-4 平行板脉冲电离室工作示意图

设在时间 $t=0$ 时，射线在电离室中距收集电极 x 处形成一个离子对，正离子和电子所带的电荷分别为正、负基本电荷 e 。在离子对刚形成的时刻，由于正离子和电子十分靠近，它们在极板上感生的电荷相同，但符号相反，恰好抵消，因而在两个极板上都没有引起任何电压变化。在电场作用下，电子立即向阳极漂移，此时电子在收集电极上的感生电荷比正离子的感生电荷大，能引起微弱的电压变化。

在电子向阳极漂移的过程中，电场对电子做功，同时电子在收集电极上引起一定的电压变化，即在电离室电容 C 上所贮存的能量要发生相应的变化。根据能量守恒定律，这一能量变化值恰好等于电场对电子所作的功。设电离室两个电极之间的电位差为

V ，则在电容 C 上贮存的能量为 $\frac{1}{2}CV^2$ 。在 x 处与收集电极之间的

电位差为 xV/d ，电子由 x 漂移至收集电极的过程中，电场对它

所作的功为 xeV/d 。假如由于电子的漂移，在收集电极上引起的电压变化为 $-\Delta V_-$ ，则可得到下列等式

$$\frac{xeV}{d} = \frac{1}{2}CV^2 - \frac{1}{2}C(V - \Delta V_-)^2 \quad (1.3)$$

上式中，等号左边为电场对电子所作的功，等号右边为电容 C 上贮存能量的变化。由于 ΔV_- 很小， ΔV_-^2 项可被忽略，因此电容上贮存能量的变化近似为 $-CV\Delta V_-$ 。因此，上式可写为

$$-CV\Delta V_- = xeV/d$$

或

$$\Delta V_- = -xe/Cd \quad (1.4)$$

由于在气体中电子的漂移速度（约 10^6cm/s ）比正离子的漂移速度（约 10^3cm/s ）约快 10^3 倍，因此电子漂移至阳极的时间极短（ μs 级），而当电子刚被收集完时，正离子向阴极漂移的距离还极小，只有电子漂移距离的千分之一。可以认为，在电子被收集的短时间内，收集电极上总的电压变化仅由电子所贡献，即为 $-\Delta V_-$ 。

在收集电子结束至收集正离子的这段时间内，正离子漂移的距离为 $d-x$ 。与电子的情况相似，正离子在收集电极上引起的电压变化 ΔV_+ 也可用下式表示

$$\Delta V_+ = -(d-x)e/Cd \quad (1.5)$$

因此，收集电极上总的电压变化为

$$\Delta V = \Delta V_- + \Delta V_+ = -xe/Cd - (d-x)e/Cd$$

即

$$\Delta V = -e/C \quad (1.6)$$

上式说明，当入射粒子在电离室内产生一个离子对时，从电子和正离子的漂移、收集、直至通过 RC 电路放电的过程中，收集电极可以输出幅度为 $\Delta V = -e/C$ 的负脉冲信号。当入射粒子在电离室中产生 N_0 个离子对时，则电离室输出的脉冲幅度为

$$\Delta V = -N_0e/C \quad (1.7)$$

若入射粒子的能量为 E ，并全部损失在电离室内，则产生的平均离子对数为

$$N_0 = E/W \quad (1.8)$$