

# 核电子技术原理

王芝英等编

原子能出版社

## 内 容 简 介

本书系统地讲述近代核电子学方法。内容包括核脉冲信号的放大、甄别、变换、分析等处理方法和技術，核电子仪器系统中常用电路的基本原理和特性等。

本书可作为高等院校核物理及核技术应用专业的试用教材或教学参考书，也可供从事核电子学、实验核物理及核技术应用等专业人员参考。

\* \* \* \*

本书由周志成主审，经原子核物理教材委员会核电子学课程组于1985年12月由王经谨主持召开的审稿会审定，同意作为高等学校试用教材。

高等学校试用教材

**核电子技术原理**

王芝英 主编

责任编辑 陈进贵

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京昌平兴华印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张21.5·字数516千字

1989年6月北京第一版·1989年6月北京第一次印刷

印数1—1500

ISBN 7-5022-0139-4

TL·56(课) 定价：4.25元

## 前 言

为了满足教学上需要，我们根据1983年6月在京召开的原子核物理专业核电子学教材编写讨论会审议的大纲和1985年核电子学课程组会议的意见，编写了《核电子技术原理》，它是供原子核物理专业学生使用的核电子学教科书。

全书共分六章。第一章讲述核电子学系统中的信号和噪声；第二、三章是有关核脉冲信号的放大和处理，分别讲述了前置放大器、放大器以及模拟信号的处理技术；第四、五章则分别讲述幅度和时间信息的甄别、变换和分析方法；第六章讲述核数据获取和处理，重点介绍了计算机多道分析器。以上内容比较系统地反映当前常用核电子学方法的概貌。本书全部讲授约需70学时，要求学生在学习本课程前学过电子学的基础课程，并具有一定核辐射探测器和计算机的基础知识。

本书总结了多年的教学实践经验，由中国科技大学朱俊杰（第一、二章）、复旦大学王根福（第三章）、北京大学楼滨乔（第四、五章）、南京大学王芝英（第六章）编写，王芝英任主编。

全书由周志成、张万铸同志审校。在编写过程中，清华大学屈建石、王经谨、范天民、钱永庚、王晶宇，四川大学许祖润，原子能研究院梁祺凯，中国科技大学杨衍明，高能所席德明、戴贵亮，衡阳工学院何宪等同志审阅过初稿的有关部分，他们提出了许多宝贵的意见和建议，作者在此一并致谢。

限于我们的水平和经验，书中难免有错误和疏漏之处，敬请使用本书的师生和广大读者给予批评指正。

## 符 号 说 明

1. 本书尽量采用国际通用符号。
2. 大写字母表示直流量、静态参数；小写字母表示变化量、动态参数。

### 下标

- $D$  —— 探测器、二极管  
 $d$  —— 场效应晶体管漏极  
 $g$  —— 场效应晶体管栅极  
 $i$  —— 输入、电流  
 $\max$  —— 最大值  
 $\min$  —— 最小值  
 $n$  —— 噪声  
 $o$  —— 输出  
 $v$  —— 电压

### 常用符号

- $A$  —— 放大器、放大倍数、信号幅度、正比计数管的气体放大倍数、面积、安（电流单位）  
 $A_i$  —— 电流放大倍数  
     当  $i = 1, 2 \dots$  时，为放大器编号  
 $A_0$  —— 开环放大倍数  
 $A_v$  —— 电压放大倍数  
 $A_{s,t}$  —— 信号同相端输入时的放大倍数  
 $A_{s,-}$  —— 信号反相端输入时的放大倍数  
 $A_{n,+}$  —— 噪声同相端输入时的放大倍数  
 $A_{n,-}$  —— 噪声反相端输入时的放大倍数  
 $a_0$  —— 模数变换器的零点  
 $a^2$  —— 电荷灵敏前置放大器输出电压噪声中的  $a$  噪声功率谱密度  
 $AC$  —— 交流  
 $ADC$  —— 模数变换、模数变换器  
 $ARC$  —— 幅度和上升时间补偿  
 $a_i^2 \omega^2$  —— 前置放大器输入端并联电流噪声中的  $a$  噪声功率谱密度  
 $b_i^2$  —— 前置放大器输入端并联电流噪声中的  $b$  噪声功率谱密度  
 $BLR$  —— 基线恢复器  
 $b^2 / \omega^2$  —— 电荷灵敏前置放大器输出电压噪声中的  $b$  噪声功率谱密度  
 $C$  —— 电容器、电容量  
 $C_D$  —— 探测器结电容  
 $C_f$  —— 反馈电容  
 $C_H$  —— 保持电容  
 $C_i$  —— 输入电抗

- $C_s$  ——分布电容  
 $C_{if}$  ——电荷灵敏前置放大器的动态输入电容  
 $C_z$  ——电荷灵敏前置放大器输入端的冷电容  
 CAMAC——一种标准化的插件式仪器与计算机接口系统，通常看作英文“计算机自动测量和控制”的字头缩写  
 CF ——恒比定时  
 CFD ——恒比定时甄别器  
 CP ——时钟脉冲  
 CPU ——中央处理单元  
 CR ——CR微分电路或CR耦合电路  
 CRT ——阴极射线管  
 D ——甄别器、探测器、二极管、D触发器  
 $D_B$  ——弹道亏损  
 $D_w$  ——稳压二极管  
 $D_z$  ——过零甄别器  
 DAC ——数模变换、数模变换器  
 DC ——直流  
 DL ——延迟线  
 $(DL)^2$  ——双延迟线  
 DMA ——直接存储器存取  
 DNL ——微分非线性  
 $E$  ——能量、电场强度值、直流电动势  
 $e$  ——电子、电子电荷量、交流电动势  
 ENC ——等效噪声电荷  
 ENE ——等效噪声能量  
 ENN ——等效噪声电荷数  
 ENV ——等效噪声电压  
 eV ——电子伏特  
 F ——法诺因子，法（电容量单位）  
 FF ——触发器  
 $f$  ——频率、函数、定时甄别电路的触发比  
 $f_H$  ——高半功率点频率、开环带宽  
 $f_L$  ——低半功率点频率  
 $F(s)$  ——函数 $f(t)$ 的拉氏变换象函数  
 $F(\omega)$ 、 $F(j\omega)$  ——函数 $f(t)$ 的富氏变换象函数  
 FWHM ——半高宽  
 $FWHM_E$  ——用能量表示的半高宽  
 $FWHM_T$  ——用时间表示的半高宽  
 FWTM ——十分之一高宽

- G ——门电路、千兆 ( $10^9$ )、跨导放大器  
 $g_m$  ——场效应管共源极小信号低频跨导  
 $h$  ——单个道宽  
 H ——亨 (电感量单位)、道宽 (平均道宽)  
 $H_{eff}$  ——有效道宽  
 $H(S)$  ——复频域传递函数  
 $H(\omega), H(j\omega)$  ——频率响应  
 $h(t)$  ——时不变线性系统的冲击响应  
 $I$  ——直流电流、电流稳态值  
 $\bar{I}$  ——电流平均值  
 $i$  ——电流信号  
 $i_i$  ——输入电流信号  
 $i_o$  ——输出电流信号  
 INL ——积分非线性  
 I/O ——输入/输出  
 $K_i$  ——积分非线性系数  
 $K_d$  ——微分非线性系数  
 $K$  ——常数、绝对温度单位  
 $k$  ——常数、玻耳兹曼常数  
 $L$  ——电感线圈、电感量、量化电平数  
 LG ——线性门  
 LSB ——最低有效位  
 $m$  ——地址码、道址码、数码  
 $M$  ——光电倍增管倍增系数、过载倍数、存储器最大字数 (道数)、存储器、兆 ( $10^6$ )、  
 优质因子  
 MCA ——多道分析器  
 MCS ——多定标器  
 MeV ——兆电子伏特  
 MSB ——最高有效位  
 $N$  ——脉冲数、计数、电子-离子对数、电子-空穴对数  
 $N_0$  ——平均电子-离子对数、平均电子-空穴对数  
 $\nu$  ——计数率、毫微 ( $10^{-9}$ )  
 $\bar{n}$  ——平均计数率  
 $ns$  —— $10^{-9}$ 秒、纳秒  
 NIM ——核子仪器插件国际标准  
 NIM/GPIB ——NIM数字数据总线标准  
 $P$  ——功率、比值、极点、概率、概率密度函数、百分死时间、模数变换器变换系数  
 $p$  ——模数变换器某一范围的变换系数, 微微 ( $10^{-12}$ )  
 $ps$  —— $10^{-12}$ 秒、皮秒

$P/Z$  ——极零相消  
 $Q$  ——电荷量、电流冲击信号的冲击强度、触发器 $Q$ 输出端  
 $r$  ——动态电阻  
 $r_D$  ——二极管正向电阻  
 $r_R$  ——二极管反向电阻  
 $r_S$  ——信号源内阻  
 $R$  ——电阻器、电阻值、分辨率、读、触发器清零端  
 $R_D$  ——探测器固有分辨率  
 $R_{DE}$  ——探测器固有能量分辨率  
 $R_{on}$  ——开关接通时电阻  
 $R_{off}$  ——开关断开时电阻  
 $R_f$  ——反馈电阻  
 $R_{if}$  ——反馈后输入阻抗  
 $R_{of}$  ——反馈后输出阻抗  
 $R(\tau)$  ——自相关函数  
 $RAM$  ——随机存取存储器  
 $RC$  ——时间常数、 $RC$ 积分电路  
 $ROM$  ——只读存储器  
 $R/W$  ——读/写  
 $s$  ——秒(时间单位), 复频率变量  
 $SCA$  ——单道分析器  
 $SRA$  ——慢上升时间拒绝定时  
 $S(\omega)$  ——功率谱密度函数 ( $-\infty < \omega < \infty$ )  
 $s(\omega)$  ——单边功率谱密度函数 ( $0 < \omega < \infty$ )  
 $t$  ——时间  
 $t_d$  ——延迟时间  
 $t_F$  ——信号下降时间  
 $t_n$  ——信号达峰时间  
 $t_r$  ——信号上升时间  
 $t_W$  ——信号宽度  
 $t_o$  ——恒比定时时刻  
 $t_L$  ——前沿定时时刻  
 $t_{on}$  ——接通时间  
 $t_{off}$  ——关断时间  
 $t_R$  ——分辨时间  
 $t_Z$  ——过零时刻  
 $T$  ——时间、周期、温度、晶体管  
 $T_d$  ——死时间  
 $T_L$  ——活时间

- $T_M$  —— 存贮时间  
 $T_o$  —— 时钟周期  
 $T_r$  —— 实际测量时间  
 $TD$  —— 隧道二极管  
 $TDC$  —— 时间数字变换、时间数字变换器  
 $u(t)$  —— 单位阶跃函数  
 $v$  —— 电压信号、速度  
 $v_i$  —— 输入电压信号  
 $v_o$  —— 输出电压信号  
 $v_s$  —— 开关信号  
 $V$  —— 直流电压、电压稳态值、伏 (电压单位)  
 $\bar{V}$  —— 电压平均值  
 $V_B$  —— 偏置电压 (切割阈)  
 $V_C$  —— 道中心  
 $V_{DS}$  —— 场效应管管漏-源极电压  
 $V_H$  —— 高电平  
 $V_{H\#}$  —— 滞后电压  
 $V_L$  —— 低电平, 下阈电平  
 $V_M$  —— 电压脉冲幅度  
 $V_{n_0}$  —— 噪声电压均方根值  
 $V_{OS}$  —— 模拟零道阈  
 $V_T$  —— 阈电平  
 $V_u$  —— 上阈电平  
 $V_w$  —— 单道分析器道宽  
 $\bar{w}$  —— 探测器的平均电离能  
 $Z$  —— 阻抗、零  
 $Z_o$  —— 电缆或延迟线的特性阻抗、输出阻抗  
 $Z_i$  —— 输入阻抗  
 $\epsilon$  —— 模拟信号的定义零、接近零的小量、介电常数  
 $\eta$  —— 信号噪声比  
 $\eta_T$  —— 斜率噪声比  
 $\mu$  —— 微 ( $10^{-6}$ )、载流子迁移率、静电计电子管放大倍数  
 $\sigma$  —— 标准偏差或均方根偏差  
 $\nu$  —— 相对标准偏差  
 $\theta$  —— 相位角  
 $\theta(\omega)$  —— 相位频谱  
 $\tau$  —— 时间常数、时间变量、分辨时间  
 $\tau_o$  —— 前置放大器的噪声转角时间常数  
 $\tau_d$  —— 延迟时间

## 绪 论

随着原子核科学技术的发展,无论是对原子核内部特征和规律的研究,或者是对原子核科学技术的应用,都需要对核辐射和原子核所携带的信息进行测量和分析研究。通常,人们采用各种核辐射探测器来感受和传递核信息,并把它转换成电信号,进而用电子学方法来处理和研究这些信号,而且尽可能不失真地保存探测器输出信号所携带的信息。从输出信号的幅度分布、时间关系、径迹图象等给出相应的能量、电荷量、质量、时间和空间特性等各种信息,而且要求的测量精度不断提高、测量速度愈来愈快,这样在核科学技术中逐步发展并形成称为之“核电子学”的新学科。

核电子学是核科学和电子学相结合的产物,它是一门用电子学方法来获取和处理核信息的学科。核电子学在核科学领域中占有十分重要的地位。在30年代初,当人们开始把电子技术引入到核辐射测量中时,就引起了探测技术的重大革新,到40年代开始逐步形成了一套核电子学方法和技术。几十年来,核电子技术不断更新换代、处于迅猛发展之中,核物理和粒子物理的深入研究以及核技术的广泛应用,对核电子学不断提出新的要求;新的核探测方法的出现又有力地推动着核电子学的发展;特别是不断采用电子学和计算机技术的新成就、新技术、新工艺、新器件,使现代的核电子学的方法和技术达到新的水平,能实现大量地、高效地、精确地、灵敏地、方便地、经济地获取和处理有关核辐射和粒子的各种信息。正是由于核电子学日新月异的发展,改善了实验手段,又促进了核科学技术的突飞猛进。可以说:现代核科学技术领域的任一角落都离不开核电子仪器和设备。目前,核电子技术实际上已成为现代核科学技术的重要基础和进一步发展的前提。

核电子学广义的范畴,可以泛指核科学技术领域的各种电子学方法,除了包括用于核物理基本研究的核辐射探测器电子学外,还包括加速器电子学(从高频振荡、磁场稳定到参数控制),核反应堆电子学(核反应堆的自动控制、电子模拟与设计),以及同位素应用仪表、核医学电子仪器和剂量测量仪表等。从核科学技术与电子科学技术这两大学科相互渗透、促进、发展来看,核电子学不仅泛指电子技术在核科学中的应用,而且还包括核辐射与电子学系统的相互作用和影响的抗核辐射电子学,以及研究核辐射与电磁直接转换的核电磁学。这样,核电子学所包括的范围很广,但其核心部分仍为核辐射测量和分析的电子技术,即大量常用的对核辐射探测器信号作放大、处理、分析和记录所采用的各种电子仪器、装置以及与计算机相配合的实验测量系统。

核电子学采用的方法,通常先将核探测器输出信号作模拟量放大和处理,然后通过模拟-数字变换将有用的模拟信息变换成数字量,再送到计算机或数据获取和处理系统中进行处理,上述各部分构成了核电子学的测量系统。对整个测量系统和各部件,相应都有一系列的特殊要求,包括:高的测量精度,即优越的幅度分辨、时间分辨、波形分辨和计数率分辨的能力;快的测量时间,对各种时间量信息有高速响应和处理的能力;高的稳定性和可靠性,包括环境温度、电源电压变化以及长时间工作的稳定性、抗辐射性能;又如高线性、高灵敏度、使用方便等等。

目前,在能谱测量方面,为了获得高的能量分辨,已发展了一套低噪声核电子学技术,如低噪声电荷灵敏前置放大、滤波成形、极-零相消、基线恢复、堆积拒绝等电路技术(见第二、三章),与之相应发展了高精度、快速的模数变换器(见第四章)和计算机多道分析器(见第六章)。在时间谱测量方面,为了精确地测定核事件发生的时间关系,已发展了各种定时技术、符合电路和时间分析技术,测量精度已由纳秒(ns)发展到皮秒(ps)量级(见第五章)。在核信息的分析处理方面,由于使用计算机,大大提高了数据获取和处理能力,实现了核测量的高级智能化(程序化、自动化、快速化),分布式处理的计算机网络也正在逐渐推广使用。同时,在实际测量系统中,为解决核电子仪器的装配和互换性问题,要求各部件标准化、系列化、插件化,制订了各种标准(NIM标准、CAMAC标准和快总线标准等)。当前,对核电子学发展有直接影响的是计算机技术、大规模集成电路技术、微通道板技术、激光和光纤技术,这些新技术的渗透和应用,将为核电子学向亚皮秒技术、向更高分辨率、更高精度、更高智能化方向加速发展开辟广阔的前景。

近二三十年来,高能(粒子)物理实验正在飞快发展,人们从对原子核的研究深入到对更深层次——基本粒子的研究,核电子学也发展到一个称之“高能核电子学”或“粒子电子学”的新阶段。对粒子电子学的介绍已超过了本书的范围,但是它所用的方法和基本原理,是与核电子学一脉相承的。

核电子学的发展不仅对微观世界的研究,起着日益重要的促进作用,并且随着核技术渗透到其它领域,其应用范围也日益扩展,这样,核电子学和探测技术除直接应用于核科学研究、核燃料与核动力工业、核武器效应和核防护等领域外,目前还广泛应用于物理、化学、天文、地质、生物、医学、环境科学、考古学、水利、空间技术等各个学科领域,以及工业(如采矿、冶金、机械、化工、食品、造纸、建筑、造船等)、农业(如培育良种、土壤分析、示踪技术、辐照保鲜等)、国防、能源等许多部门。核电子学与探测技术的发展和领域开拓,对国民经济的发展和四个现代化的建设必将发挥更大的作用。

鉴于核电子学在现代科学技术发展中的地位和作用,要求通过本课程的学习,系统掌握核电子技术的基本方法,深入理解常用核电子学测量系统及有关电路的基本原理和特性,以便合理和有效地选择、组合和使用核电子仪器,学会运用电子学方法对核辐射探测器信息作分析、处理,提高实验研究工作的能力。由于大多数核电子仪器已按插件化通用的国际标准生产,对核物理专业学生应着重掌握电路的基本原理和特性,学会正确选用标准插件组成所需要的测量系统,而不必去深究电路内部细节。教材中对几种典型的核电子仪器插件实例进行分析,有助于进一步理解和掌握插件的实际使用功能,以提高学生分析和解决问题的能力。

应该强调指出:核电子技术原理是一门实践性很强的课程,要求实验课紧密配合,学习时应当重视实验训练,把书本知识和实际动手结合起来,才能很好地掌握核电子技术的方法和技术。把本教材作为必修的专业基础课,对以后的专业课学习、专业技能训练和实际科学研究工作能力的培养,必将起着重要的作用。

## 目 录

## 绪论

第一章 核电子学系统中的信号与噪声 .....	1
§1 核辐射探测器及其输出信号 .....	1
一、核辐射探测器的要求和特点 .....	1
二、核辐射探测器的主要类别和输出信号 .....	2
三、核辐射探测器的基本性能(指标) .....	5
四、核辐射探测器的输出电路 .....	8
五、核辐射探测器输出信号的数学模拟 .....	10
§2 核电子学中的噪声 .....	11
一、噪声对核测量的影响 .....	11
二、噪声的分类和噪声源 .....	13
§3 核电子学中的信号与噪声分析基础 .....	16
一、时域和频域分析 .....	16
二、核电子学中常见的基本电路分析 .....	17
三、核随机信号通过线性网络 .....	20
§4 核电子学测量系统概述 .....	25
一、系统的基本组成 .....	25
二、核电子学常用的信号处理系统 .....	26
三、核电子学信号处理单元插件标准化 .....	28
习题与思考题 .....	29
[附录] 常用的几项NIM标准 .....	30
第二章 前置放大器 .....	34
§1 概述 .....	34
一、前置放大器的作用 .....	34
二、前置放大器的分类 .....	35
§2 电荷灵敏前置放大器 .....	37
一、电荷灵敏前置放大器的主要特性 .....	37
二、电荷灵敏前置放大器的基本电路和实例分析 .....	42
三、电荷灵敏前置放大器的噪声分析和抑制措施 .....	44
四、电荷灵敏前置放大器的进一步改进 .....	48
五、电荷灵敏前置放大器噪声的实验测量 .....	50
§3 电压(灵敏)前置放大器 .....	53
§4 电流灵敏前置放大器 .....	54
习题与思考题 .....	56
第三章 放大器 .....	58
§1 概述 .....	58
一、放大器在核测量系统中的作用 .....	58

二、谱仪放大器的框图介绍 .....	59
三、放大器的基本参量及测量方法 .....	60
四、其它类型的一些放大器 .....	66
§ 2 谱仪放大器的放大节 .....	67
一、放大节的结构 .....	67
二、分立元件构成的放大节电路介绍 .....	69
三、集成运算放大器构成的放大节电路 .....	73
§ 3 谱仪放大器中的滤波成形 .....	75
一、滤波成形电路在谱仪放大器中的作用 .....	75
二、最佳滤波器的讨论 .....	76
三、滤波成形电路的信息畸变 .....	79
四、无源滤波成形电路 .....	84
五、有源滤波成形电路 .....	95
六、时变滤波成形电路 .....	99
§ 4 通用谱仪放大器 .....	101
一、基线恢复器 .....	102
二、通用谱仪放大器介绍 .....	107
§ 5 高能量分辨率高计数率谱仪放大器 .....	111
一、堆积拒绝方法 .....	111
二、单元电路功能介绍 .....	112
三、堆积拒绝电路 .....	113
四、死时间校正和允许最高计数率 .....	115
§ 6 快放大器 .....	117
一、概述 .....	117
二、快放大器的放大节电路 .....	118
§ 7 弱电流放大器 .....	121
一、电阻式弱电流放大器 .....	121
二、电流-频率转换的弱电流放大器 .....	125
三、调制型弱电流放大器 .....	126
习题与思考题 .....	127
第四章 脉冲幅度分析 .....	130
§ 1 脉冲幅度甄别器 .....	130
一、脉冲幅度甄别器的一般要求 .....	131
二、甄别器电路实例 .....	133
三、脉冲幅度甄别器的使用——半计数法 .....	135
§ 2 单道脉冲幅度分析器 .....	136
一、单道脉冲幅度分析器工作原理 .....	136
二、单道脉冲幅度分析器实例 .....	138
三、单道脉冲幅度分析器技术指标 .....	142
§ 3 幅度-数字变换 .....	142
一、用于幅度分析的模数变换器及其基本性能 .....	142
二、线性门和模拟展宽器 .....	146

三、线性放电型模数变换 .....	151
四、逐次比较型模数变换器 .....	164
五、闪电型模数变换器 .....	173
六、模数变换器的主要技术性能及其测量 .....	175
习题与思考题 .....	187
第五章 时间分析 .....	189
§ 1 概述 .....	189
§ 2 定时方法 .....	192
一、前沿定时 .....	192
二、过零定时 .....	198
三、恒比定时 .....	200
四、幅度和上升时间补偿定时 .....	203
五、定时方法比较 .....	209
六、最佳定时滤波器与定时滤波放大器 .....	210
七、定时单道脉冲幅度分析器 .....	214
§ 3 符合 .....	218
一、符合方法 .....	218
二、符合电路 .....	222
三、快信号的传输和纳秒延时器 .....	226
§ 4 时间量变换方法 .....	230
一、时间分析 .....	230
二、时间-幅度变换 .....	231
三、时间-数字变换 .....	239
四、上升时间-幅度变换 .....	244
§ 5 脉冲波形甄别 .....	247
习题与思考题 .....	249
第六章 数据获取和处理 .....	252
§ 1 核脉冲计数 .....	252
一、定标器 .....	253
二、计数率计 .....	259
§ 2 核谱数据获取和处理 .....	267
一、概述 .....	267
二、计算机技术应用基础 .....	268
三、多道分析器的基本原理和功能 .....	273
四、计算机多道分析器的几种典型结构 .....	283
五、计算机多道分析器的数据获取接口 .....	287
六、计算机多道分析器的显示原理 .....	294
七、计算机多道分析器的软件配置 .....	299
§ 3 通用的核实验数据获取和处理系统 .....	306
一、对核实验数据获取和处理系统的要求 .....	307
二、多参数谱数据的获取方式 .....	307
三、多参数多用户数据获取和处理系统实例 .....	310

---

§ 4 在自动化测量与控制中的通用接口和系统 .....	313
一、CAMAC系统 .....	313
二、NIM数字数据总线和NIM/GPIB系统 .....	319
习题与思考题 .....	326
参考资料 .....	327
中英名词对照 .....	328

# 第一章 核电子学系统中的信号与噪声

## § 1 核辐射探测器及其输出信号

### 一、核辐射探测器的要求和特点

在核物理和粒子物理实验中，最基本的测量方法是：采用各种核电子仪器组成的系统和装置，来获取及处理核探测器测量核辐射时所得的电信号，并对测量结果作出分析和记录。

由于核电子学所研究的是如何处理和分析核辐射探测器给出的电信号，因此必须首先对核辐射探测器的输出信号要有所了解。

通常，核辐射探测器的输出信号是一系列幅度大小不一、波形不尽一致、前后间隔疏密不匀出现的时间随机分布的电荷或电流脉冲，它们是由入射粒子的性质及探测器的响应所决定的，根据这些脉冲及相关参数，可以得到有关核辐射和粒子的信息。例如有：

**每个脉冲所携带的电荷量：**其电荷量的大小与入射粒子的能量（或能量耗损）成正比。若输出电流脉冲，其面积就代表电荷量，所以若将该脉冲送到电容上累积电荷，电容上的输出电压幅度就相应代表电荷量，而电压幅度大小的分布就能反映入射粒子的能谱。

**每个脉冲出现的准确时刻：**由该时刻可以确定粒子射入探测器的准确时刻。当使用两个以上探测器时，可以测定射入这些探测器的粒子在时间上的相互关系，在此基础上可以测定脉冲时间间隔上的分布，即时间谱。

**单位时间内平均出现的脉冲数：**它是和单位时间内平均入射的粒子数成正比的。因此，它可以反映入射粒子的强度，从它的变化也可测量粒子的寿命。测量一定时间内脉冲的总计数，能给出总剂量大小。

**脉冲的形状：**有些探测器输出脉冲波形的某些参量，如脉冲的上升时间和入射粒子的类型有关，通过这种波形参量的测量，可以识别入射粒子的类型，例如分辨 $n$ 、 $\gamma$ 、 $p$ 、 $d$ 或其它粒子。

由上可见，用电子学方法对信号脉冲的幅度、时间、波形和数目等参量的获取、处理和分析，可以获得粒子的动量、能量、电荷量、质量、时间和空间关系等各种性质，从而为识别粒子，研究其运动性质，为探讨其内在规律提供实验依据。

在核辐射测量中，最基本的特点就是它的统计特性，因为在核辐射探测器中，射线和物质相互作用所产生的电离、激发、光电转换和倍增过程都是随机的，而且核衰变过程也是以一定的概率性来表现的。所以，对微观过程的研究，必须对大量事物的统计规律作出相应的处理和分析，由于核事件本身的随机性而出现的统计涨落，在核辐射探测器把核信息转换成电脉冲信号时，该信号就具有与通常周期信号根本不同的特点——即无论在信号的时间特性上，或是幅度分布上，都会是随机的，非周期性或非等值的。正由于核辐射探测器输出信号具有统计性这一基本特点，要求核电子学必须用独特的方法来进行处理和研究。

## 二、核辐射探测器的主要类别和输出信号

核辐射探测器种类繁多，按给出信息的方式来分类，可分为给出电信号和非电信号两大类（少数的二者兼而有之）。但最广泛应用的是给出电信号的核探测器，因为它能进一步被放大、处理、记录和分析，便于作大量的、快速的、综合的各种研究，使用也最普遍。目前常用的有气体探测器、半导体探测器和闪烁探测器，它们接收核辐射后输出电信号。由于不同探测器输出信号各有特点，也要求相应的电子学线路与之配套。下面对这三种探测器的输出信号和主要特性作一简要介绍：

1. 气体探测器：电离室、正比计数器和盖革-弥勒（G-M）计数器均以气体为探测介质，结构上也有相似之处，它们统称为气体探测器。以电离室为例来简述它们的工作原理：图1.1.1(a)给出平行板电离室结构，在二块金属平行板上加以一定高压。当入射带电粒子通过气体，使气体分子电离成电子-正离子对时，带负电荷的电子和正离子在外加电场作用下分别作漂移运动，相应地在平行板电极上产生感应电荷，并在外电路上产生相应的电信号。当外加电压升高时，气体探测器工作于正比区产生气体放大，就成为正比计数器。当气体放大倍数随电压急剧上升，电子雪崩持续发展成自激放电，则成为G-M计数器。

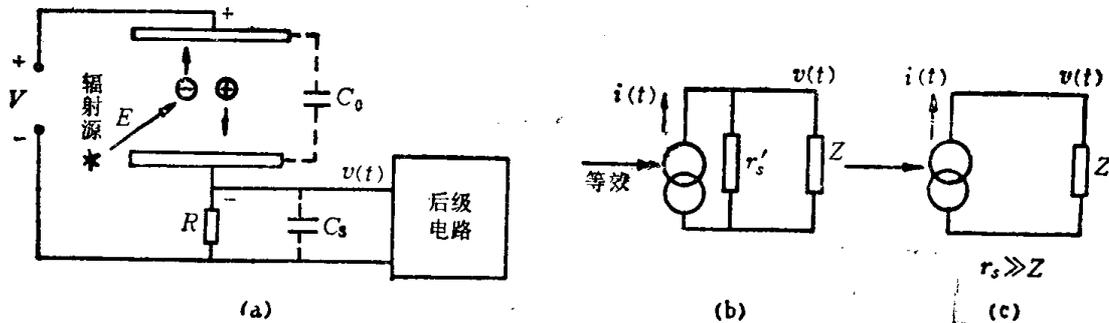


图1.1.1 (a) 气体探测器的工作原理 (b) 等效电路 (c) 简化电路

假定能量为 $E$ 的入射粒子把其全部能量损耗在探测器内使气体电离，每产生一对电子-正离子所需的平均能量为 $\bar{w}$ ，称为平均电离能。则该辐射所产生的总电子-离子对数 $N$ 为

$$N = F \cdot A \cdot E / \bar{w} \quad (1.1.1)$$

式中， $A$ 为气体放大倍数，对电离室 $A=1$ ；对正比计数器 $A$ 约为几百， $F$ 为法诺因子。

各种气体的平均电离能不同，通常 $\bar{w}$ 在20—40eV（电子伏特）之间，设 $\bar{w}=33\text{eV}$ ，则对于能量为1MeV的核辐射来说，按上式，则可得 $N=3 \times 10^4$ 对，相应的电荷量 $Q$ 为

$$Q = N \cdot e \quad (1.1.2)$$

其中， $e$ 为电子电荷： $e=1.6 \times 10^{-19}$ 库仑。

由于电子与离子向电极漂移运动，产生感应电荷的变化，使之在外电路上形成感应电流 $i(t)$ ，可表示为：

$$i(t) = Q(t) / \Delta t \quad (1.1.3)$$

这样，在图1.1.1中，我们可以把气体探测器看成为产生 $i(t)$ 信号的电流源。它的等效电路如图1.1.1(b)所示，在内阻比外负载大得多时，图1.1.1(b)可进一步简化为图1.1.1(c)

(c)。

需要指出：电流信号*i(t)*的时间持续过程，主要与电子和离子的漂移运动速度有关(这与气体性质有关)。通常，在电离室中电子漂移速度较快，约微秒量级，而离子漂移速度慢得多，约毫秒量级。

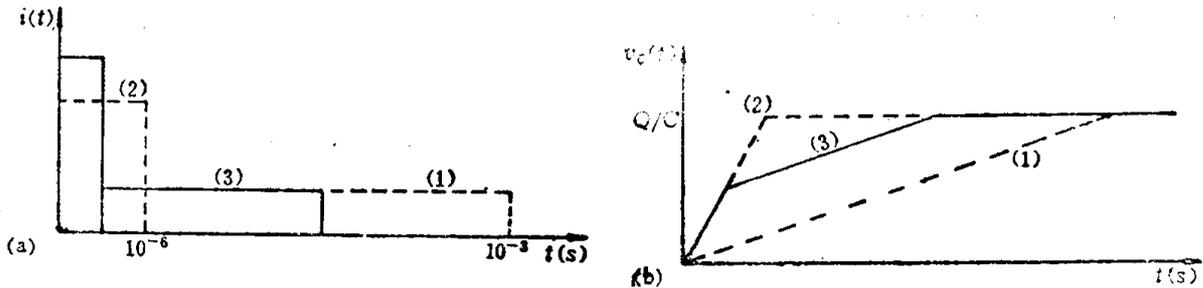


图1.1.2 平行板电离室的输出信号

图1.1.2中，(1)为电离在正极板附近发生时，电子很快到达正电极，感应电流主要由离子漂移运动造成，持续时间最长。(2)为电离在负极板附近时，正好相反。*i(t)*主要由电子漂移运动造成，持续时间最短，为微秒量级。(3)为电离在两极板中间位置时，则*i(t)*由电子感应电流和离子感应电流两部份合成，持续时间随位置有一个分布。

显然，在电离室不同位置入射的同样能量的粒子，因电子-离子对产生的地点不同，所得到的输出电流*i(t)*的大小不同，因此不能用电流大小来测量入射粒子的能量，但是电荷量是相同的，所以，只要在探测器输出端接上电容负载，将输出电流通过电容器积分，在电容*C*上得到电压信号*v<sub>c</sub>(t)*

$$v_c(t) = Q/C = 1/C \int_0^t i(t) dt \quad (1.1.4)$$

当*t*大至足以收集所有感应电流时，则有 $\int_0^t i(t) dt = Q = N \cdot e$ ，*v<sub>c</sub>(t)*达到恒定值，即有

$$v_c(t) = N \cdot e/c = F \cdot A \cdot E \cdot e/\bar{w} \cdot C = K \cdot E \quad (1.1.5) \text{ (a)}$$

因为*F*、*A*、*e*、 $\bar{w}$ 、*C*都是常量，所以电容*C*上输出的电压信号与能量*E*成正比关系，即可由电压信号幅度来测量能量。

正比计数器由于气体放大，输出信号幅度较电离室大几百倍——几千倍，而且几乎与入射粒子产生原电离的位置无关。G-M计数器，由于输出信号已和原电离失去正比关系，但灵敏度高，输出信号幅度大，主要用于计数。

2. 半导体探测器：常用的半导体探测器包括金硅面垒探测器，Ge(Li)和Si(Li)探测器，高纯锗探测器等，它们都是以半导体材料为探测介质，具有能量分辨率高，线性范围宽等优点。

半导体探测器俗称固体电离室，与气体的情况类似。图1.1.3(a)给出平面Ge(Li)探测器的示意，当能量为*E*的粒子入射到耗尽层中时，半导体探测器内产生电子-空穴对。并在外加电场作用下，分别向N与P作漂移运动，同样在外电路上产生感应电流*i(t)*，所以半导体探测器也可等效看作为电流源，如图1.1.3(b)所示。

由于固态的平均电离能相对较小，如对Ge(锗)， $\bar{w}$ 为2.96eV。而对Si(硅)， $\bar{w}$ 为