

高等学校试用教材

核电子学

上册

王 经 瑾
范 天 民 等编著
钱 永 庚

原子能出版社

内 容 简 介

本书是《核电子学》上册，分为八章，内容包括：核辐射探测器的输出信号，核电子学中的噪声源，信号和噪声的分析方法，前置放大器、谱仪放大器、滤波成形和时变与非线性电路等。

本书可作为高等院校实验核物理专业的试用教材或教学参考书。也可供核电子学专业学生、在职的核电子学、实验核物理和核技术应用等人员参考。

高等学校试用教材

核电子学（上册）

清华大学 工程物理系

王经瑾 范天民 钱永庚
屈建石 王志焜 谭彩云 编著
兰克坚 赵希德 王晶宇

原子能出版社出版

（北京 2108 信箱）

国防科工委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张17 1/4·字数408千字

1983年6月第一版·1983年6月第一次印刷

印数001—4,100·统一书号：15175·484

定价：1.75元

前 言

我校编写的，1978年由原子能出版社出版的《射线仪器电子学》，侧重于介绍射线仪器的原理和电路。为了满足新的教学要求，我们根据1978年9月在青岛召开的原子能专业理科教材会议上审议的大纲草案，编写了这本《核电子学》，比较系统地介绍了近代核电子学的信号分析理论、信号处理和数据处理方法。

鉴于核电子仪器迅速发展，不断更新，本书着重于阐明核电子学赖以发展的基本理论和近代核电子仪器的一般设计原理，而不广集具体电路。由于大多数核电子仪器已按插件化国际标准大量生产，实验核物理专业的学生应着重学习如何正确选用标准插件组成所需的测量系统。所以本书只着重说明典型核电子仪器的功能和特性，而不深究内部细节。此外，在确定本书各章节的篇幅时，不以实际仪器的元件多少或复杂程度为依据，而以技术指标对物理实验的重要性的使用难易为依据。例如，元件不多的滤波成形电路占有较多篇幅，而元件较多的定标器只占很少篇幅。因为前者对提高系统的能量分辨率有重要作用而且涉及较深的电路理论；后者原理较简单，使用很容易。

本书共十四章，第一章至第八章为上册，第九章至第十四章为下册。全书内容分为三部分：

第一部分(第一章至第三章)，讲述核电子学中的信号源、噪声源以及信号和噪声的分析方法。

第二部分(第四章至第十一章)，讲述核电子学中的信号处理，包括能量信息和时间信息的处理以及模数变换。

第三部分(第十二章至第十四章)，讲述核电子学中的数据获取和处理，以谱数据的获取和处理为重点。

学生在学习本书前应已学过电子学的基础课程和核辐射探测器课程。本书的主要教学内容为第四章至第十三章。第一章介绍各种核探测器的输出信号波形，供阅读本书其它章节时参考。第二、三两章介绍信号和噪声的分析方法。掌握了这两章的基本概念后，不仅易于理解本书的某些章节(例如第六章)，而且也易于阅读近代核电子学论文和资料。但是，不要求深入掌握这些内容的专业，可以越过这两章，径从第四章学起。在安排本书的内容时尽量使不学第二、三章的读者也能理解后续章节的基本内容。在各章节中凡在节段前标以“*”或印为小号字者均属补充内容，供教师删节时参考。第十四章介绍计算机多道分析系统，仅供已学过电子计算机基本知识的读者参阅。

本书上册由北京原子能所许廷宝同志审阅。大连低压开关厂吴凤档同志审校了上册后四章修改稿。北京原子能所周和琦、杨钟汉同志审校了上册部分修改稿。参加本书审稿会的有北京高能物理所方澄，上海原子核所薛镠东，北京原子能所周和琦、杨钟汉、许谨诚，北京大学夏松江、楼宾桥，南京大学王芝英，中国科技大学虞孝麒，复旦大学胡毓德，四川大学吴世英，兰州大学王化民，吉林大学贾文彤，国防科大邵连源，261厂郑溥堂、刘登舟同志。他们对本书提出了许多宝贵意见和建议，作者在此一并致谢。

限于我们的水平和经验，本书可能有不少缺点和错误，请同志们批评指正。

编者

本书主要符号说明

1. 主要下标

- 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
- l —— 负载
- M —— 最大值
- n —— 噪声、探测器中的电子
- o —— 输出
- opt —— 最佳值
- p —— 正离子或空穴
- s —— 散粒噪声、场效应晶体管源极
- T —— 热噪声

2. 本书主要符号

- A —— 放大器、放大倍数、安(电流单位)、正比计数管气体放大倍数、面积
- 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
- ADC —— 模数变换、模数变换器
- ATC —— 幅度时间变换、幅度时间变换器
- $a_i^2 \omega^2$ —— 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 —— 贝塔函数、磁感应强度值、本底计数
- 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/ω^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_f —— 反馈电容
- C_{if} —— 电荷灵敏前置放大器动态输入电容
- C_{zf} —— 电荷灵敏前置放大器输入端冷电容
- CAMAC —— 一种标准化的插件式仪器与数字接口系统(通常看作英文“计算机自动测量和控制”字头的缩写)
- CFD —— 恒比甄别器
- 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、 D 触发器、探测器、二极管
- D_s —— 弹道亏损

- D_z —— 过零甄别器
 DAC —— 数模变换、数模变换器
 DL —— 延迟线
 DMA —— 直接存储器存取
 DNL —— 微分非线性
 E —— 能量、直流电动势、电场强度值
 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
 F —— 法诺因子、法(电容量单位)、滤波成形电路的信噪比劣值系数
 f —— 频率、函数、定时电路的触发比
 \mathcal{F} —— 富氏变换算符
 \mathcal{F}^{-1} —— 富氏反变换算符
 $F(s)$ —— 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 —— 亨(电感量单位)、道宽、磁场强度值
 $H(s)$ —— 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、电流平均值、电流稳态值、积分常数
 i —— 电流信号
 INL —— 积分非线性
 I/O —— 输入/输出
 K —— 常数、绝对温度单位
 k —— 常数、玻尔兹曼常数
 L —— 电感线圈、电感量、相对计数损失
 \mathcal{L} —— 拉氏变换算符
 \mathcal{L}^{-1} —— 拉氏反变换算符
 LG —— 线性门
 M —— 兆(10^6)、光电倍增管倍增系数、过载倍数、存储器、存储器最大字数(道
 数)
 MCA —— 多道分析器
 MCS —— 多定标器

- N —— 计数、电子-离子对数、电子-空穴对数
 n —— 毫微(10^{-9})、计数率(n 或 π)
 NIM —— 核子仪器插件国际标准
 P —— 功率、比值、极点、气体探测器充气压力、概率、概率密度函数
 p —— 微微(10^{-12})、模数变换器变换系数
 PHA —— 脉冲幅度分析器
 Q —— 电荷量、电流冲击信号的冲击强度、触发器 Q 输出端
 R —— 电阻器、电阻值、分辨率、读、触发器清零端
 r —— 动态电阻
 $R(\tau)$ —— 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
 $S(\omega)$ —— 功率谱密度函数($-\infty < \omega < \infty$)
 $s(\omega)$ —— 单边功率谱密度函数($0 < \omega < \infty$)
 SCA —— 单道分析器
 T —— 时间、周期、晶体管、温度
 t —— 时间
 t_D —— 探测器电流脉冲宽度
 t_F —— 信号从最大值开始至尾部衰减到定义零的复零时间
 t_M —— 达峰时间、测量时间
 t_R —— 上升时间(从最大值的10%到90%)
 $t_w(1\%)$ —— 信号从输入开始至尾部衰减到定义零(最大值的1%)的宽度
 TD —— 隧道二极管
 TDC —— 时间数字变换、时间数字变换器
 U_0 —— 模拟零道阈
 $u(t)$ —— 单位阶跃函数、在第一章里表示电压信号
 V —— 直流电压、电压平均值、电压稳态值、伏(电压单位)
 v —— 速度、电压信号
 V_M —— 电压脉冲幅度
 V_n —— 噪声电压均方值
 V_T —— 甄别阈
 \bar{W} —— 探测器的平均电离能
 Z —— 阻抗、零
 Z_0 —— 电缆或延迟线的特性阻抗
 ZD —— 稳压管
 ϵ —— 模拟信号的定义零、介电常数

- η —— 信号噪声比
- θ —— 探测器的能量-电荷转换系数、相位角
- μ —— 微 (10^{-6})、载流子迁移率
- σ —— 标准偏差或均方根偏差
- τ —— 时间常数、时间变量、分辨时间
- τ_c —— 前置放大器的噪声转角时间
- τ_d —— 延迟时间
- ω_c —— 前置放大器的噪声转角频率
- * 复共轭、卷积分、补充内容

目 录

第一部分 信号、噪声和分析方法

第一章 核辐射探测器的输出信号 (2)

第一节 探测器中的能量-电荷转换 (2)

1.1.1 能量-电荷转换系数 (2)

1.1.2 探测器的固有能量分辨率 (4)

1.1.3 探测器的线性和稳定性 (7)

第二节 探测器的输出电流波形 (8)

1.2.1 电离室的输出电流波形 (8)

1.2.2 PIN半导体探测器的输出电流波形 (13)

1.2.3 PN结半导体探测器的输出电流波形 (19)

•1.2.4 粒子径迹对半导体探测器输出电流波形的影响 (22)

•1.2.5 正比计数管的输出电流波形 (25)

1.2.6 闪烁探测器的输出电流波形 (26)

第三节 探测器的电源 (30)

1.3.1 探测器电源的技术指标和辅助功能 (31)

1.3.2 高压电源的工作原理 (33)

第二章 信号和噪声的分析方法 (35)

第一节 频域和时域分析 (35)

2.1.1 富里叶级数 (35)

2.1.2 富里叶变换 (36)

2.1.3 富里叶变换的基本性质 (38)

2.1.4 冲击函数 (δ 函数) (41)

2.1.5 线性系统的冲击响应和频率响应 (44)

2.1.6 坎贝尔定理 (50)

第二节 复频域分析 (53)

2.2.1 拉普拉斯变换及其基本性质 (53)

2.2.2 极点、零点和时域波形的关系 (54)

第三节 统计分析 (59)

2.3.1 记录组和样本函数 (60)

2.3.2 概率密度函数 (62)

2.3.3 功率谱密度函数 (64)

2.3.4 自相关函数的基本性质 (65)

•2.3.5 自相关函数和功率谱密度函数的实例 (67)

2.3.6 噪声通过线性系统的计算 (70)

第三章 核电子学中的噪声 (73)

第一节 噪声的分类 (73)

3.1.1 散粒噪声 (73)

3.1.2	热噪声	(76)
3.1.3	低频噪声	(77)
第二节	器件的噪声	(81)
3.2.1	探测器的噪声	(81)
3.2.2	场效应晶体管的噪声	(83)
3.2.3	电阻的噪声	(84)
第三节	系统噪声的表示方法	(85)
第二部分 信号处理		
第四章	核电子学信号处理概述	(89)
第一节	信号处理的基本要求	(89)
第二节	线性系统的一般特性	(90)
4.2.1	积分非线性	(91)
4.2.2	微分非线性	(92)
4.2.3	稳定性	(93)
4.2.4	速度特性	(95)
第三节	用于测试信号处理系统的精密信号发生器	(96)
4.3.1	水银开关精密信号发生器	(96)
4.3.2	电子开关精密信号发生器	(98)
4.3.3	滑移脉冲信号发生器	(99)
第四节	信号处理设备的插件化和标准化	(101)
第五章	前置放大器	(104)
第一节	概述	(104)
5.1.1	前置放大器的作用	(104)
5.1.2	前置放大器的分类	(104)
第二节	电荷灵敏前置放大器	(106)
5.2.1	电荷灵敏前置放大器的工作原理	(106)
5.2.2	电荷灵敏前置放大器的噪声	(107)
5.2.3	电荷灵敏前置放大器的电路	(111)
5.2.4	电荷灵敏前置放大器的主要特性	(115)
5.2.5	噪声测量	(123)
第三节	电压灵敏和电流灵敏前置放大器	(125)
5.3.1	电压灵敏前置放大器	(125)
5.3.2	电流灵敏前置放大器	(127)
第六章	滤波和成形	(135)
第一节	滤波器概述	(135)
6.1.1	线性系统的最佳滤波	(135)
6.1.2	电荷灵敏前置放大器后的最佳滤波	(138)
6.1.3	实际滤波器的信噪比	(141)
第二节	成形电路概述	(148)
6.2.1	信号成形的要求	(149)

6.2.2	极-零相消技术	(151)
第三节	成形电路的信息畸变	(158)
6.3.1	弹道亏损	(158)
6.3.2	堆积畸变	(164)
第四节	无源阻容滤波成形	(171)
6.4.1	$CR-(RC)^n$ 滤波成形的输出波形和信噪比	(171)
6.4.2	$CR-(RC)^n$ 滤波成形引起的信息畸变	(174)
6.4.3	$(CR)^2-(RC)^n$ 滤波成形	(176)
第五节	有源滤波器	(179)
6.5.1	常用的有源滤波器	(179)
6.5.2	有源滤波器在能谱测量系统中的应用	(182)
第六节	延迟线滤波成形	(186)
6.6.1	DL和(DL) ² 成形	(186)
6.6.2	延迟线-阻容积分器滤波成形	(190)
6.6.3	延迟线成形的使用问题	(192)
*6.6.4	横向滤波器	(199)
第七章	谱仪放大器和弱电流放大器	(205)
第一节	谱仪放大器	(205)
7.1.1	概述	(205)
7.1.2	谱仪放大器的放大节	(206)
7.1.3	谱仪放大器的实际电路	(208)
7.1.4	谱仪放大器的技术指标	(208)
第二节	弱电流放大器——静电计	(215)
7.3.1	电阻式静电计	(215)
7.3.2	动电容静电计	(217)
第八章	时变与非线性电路	(220)
第一节	线性门	(220)
8.1.1	线性门的基本特性	(220)
8.1.2	线性门电路实例	(223)
第二节	展宽器	(225)
8.2.1	模拟展宽器	(225)
8.2.2	逻辑展宽器	(228)
*8.2.3	采样-保持电路	(230)
第三节	基线恢复器	(231)
8.3.1	基线恢复原理	(232)
8.3.2	CD基线恢复器	(233)
8.3.3	CDD基线恢复器(Robinson电路)	(235)
8.3.4	反馈式基线恢复器	(238)
*8.3.5	基线恢复器对信号噪声比的影响	(239)
第四节	堆积判弃电路	(242)
*第五节	时变滤波器	(246)

8.5.1 权函数	(246)
8.5.2 时变积分器和时变微分器	(250)
8.5.3 时变能谱测量系统	(253)
附录一 常用拉普拉斯变换表	(261)
附录二 $CR-(RC)^n$ 滤波成形电路的信噪比	(262)

第一部分 信号、噪声和分析方法

核电子学研究的是如何处理和分析核辐射探测器给出的电信号。这些信号携带着核素和核反应的信息。例如，信号的幅度可能代表粒子的能量；信号的形状可能反映粒子类别；信号的时间关系可能代表激发态寿命，或者反映出粒子飞行速度和径迹的空间分布；电脉冲信号的计数率则代表辐射强度。所以，不论是学习核电子学还是研制核电子仪器，都要对核辐射探测器给出的信号有所了解。本书不阐述核辐射探测器的工作原理，只介绍它们的输出信号形状，说明信号所携带的能量信息、时间信息以及它们的统计涨落。

关于核辐射探测原理和探测器输出信号的知识可参阅文献[1]、[2]。

在获取有用信号的能量信息和时间信息时，不可避免地会遇到探测器和电子器件的噪声干扰。为了不使微弱的有用信息被噪声淹没，为了能区分能量信息或时间信息的微小差别，必须设法抑制噪声。这就需要掌握噪声的特性和分析噪声的方法。

在本书的这一部分里，第一章介绍几种常用核辐射探测器的输出信号¹⁾，附带介绍核辐射探测器所需的电源；第二章介绍信号和噪声的分析方法；第三章介绍核电子学中的噪声源。后两章比较多地用到一些数学工具，这对于深入了解核电子学的一些最新成就是有用的，对于研究高分辨能力的核电子学系统也是必需的。当然，只需了解核电子仪器的一般原理和用法的读者，不一定要完全掌握第二、三章的内容再读后面的章节。

[1] 原子核物理实验方法，上册，复旦大学、清华大学、北京大学合编，原子能出版社，一九八一年。

[2] 常用核电子技术，席德明、许廷宝、郭瑞琪等编著，科学出版社，一九八二年。

1) 应当说明，这里主要介绍低能核物理常用的脉冲探测器。虽然分析探测器输出信号的一般方法，对分析某些高能物理探测器也是适用的，但本书不对高能物理探测器信号进行分析。对于测定射线宏观平均参数（如剂量、热效应）的探测器信号也不进行分析。

第一章 核辐射探测器的输出信号

第一节 探测器中的能量-电荷转换

我们知道，许多产生电信号的核辐射探测器都是利用射线和物质的相互作用，通过电离、激发或光电转换等效应来得到电荷的。收集这些电荷就得到电流或电压信号，从而可以用电子仪器分析这些信号。在这一节里，我们将说明核辐射探测器吸收的射线能量和所转换成的电荷量之间的关系。下一节再说明这些电荷如何被收集而得到具有一定形状的电 流、电压信号。

1.1.1 能量-电荷转换系数

设射线在探测器中消耗掉的能量为 E ，得到的电子电荷的平均数为 N ，则 N/E 称为探测器的能量-电荷转换系数 $\bar{\theta}$ ，即

$$\bar{\theta} = \frac{N}{E} \quad (1.1.1)$$

由于能量-电荷转换的统计性， $\bar{\theta}$ 一般指的是平均值。

1. 气体电离室中的能量-电荷转换

用气体电离室探测带电粒子时，如果所充气体的平均电离能为 \bar{W} ，则能量-电荷转换系数 $\bar{\theta}$ 就是 \bar{W} 的倒数。 \bar{W} 是带电粒子在气体中产生一对电子-正离子（简称离子对）平均消耗掉的能量，其数值主要决定于气体的种类，与入射带电粒子的种类和能量关系不大。如果入射粒子将它的能量 E 全部消耗在电离室的灵敏体积内，则平均产生的离子对数为

$$N = \bar{\theta}E = \frac{E}{\bar{W}} \quad (1.1.2)$$

各种电离室所充气体的平均电离能 \bar{W} 大致为 20—40 eV。如果带电粒子的能量为 1 MeV，并全部消耗在电离室灵敏体积内，则在 \bar{W} 取 33 eV 时，平均电离出的离子对数为

$$N = \frac{E}{\bar{W}} = \frac{1}{33} \frac{\text{MeV}}{\text{eV}} \approx 30000$$

如果这 30000 离子对分别收集在 20 pF 的电容 C 的两个极板上，所得的电压约为

$$\begin{aligned} V &= \frac{Ne}{C} = \frac{Ee}{\bar{W}C} \\ &= \frac{10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{33 \times 20 \times 10^{-12}} \approx 0.25 \text{mV} \end{aligned}$$

式中 e 为电子电荷。

实际上，如在下一节要说明的，这些离子对不一定都能被收集到。即使这样，上面的例子也可以使我们对气体电离室探测带电粒子时的电荷转换系数有一个量级概念。它大概是每兆电子伏30000对；全收集在20pF电容上所得电压大致是0.25mV。

要探测中子和 γ 射线，必须先使它们在电离室内或室壁上与物质相互作用而产生次级带电粒子，然后次级带电粒子再在电离室中产生离子对。因而，气体电离室探测中子和 γ 射线时的电荷转换系数不只决定于气体的平均电离能，而且还决定于射线与探测物质相互作用时初级辐射与次级带电粒子间的能量关系。

2. 正比计数器中的能量-电荷转换

正比计数器利用了气体放大机理，电荷转换系数为

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{A}}{\bar{W}} \quad (1.1.3)$$

式中 \bar{A} 为正比计数器的气体放大倍数，其数值从几十到上千不等。此外，由于气体放大没有噪声，因而正比计数器可以探测到更低能量的粒子。

3. 半导体探测器中的能量-电荷转换

半导体探测器就其电离与收集电荷的过程来说，和气体电离室类似，所以有固体电离室之称。不过，在半导体探测器中，每产生一对电子-空穴的平均电离能比气体探测器要小一个量级。对于室温下的硅(Si)， $\bar{W} = 3.61\text{eV}$ ；对于低温(77K)下的锗(Ge)， $\bar{W} = 2.96\text{eV}$ 。

4. 闪烁探测器中的能量-电荷转换

闪烁探测器探测带电粒子不是利用电离效应而是利用激发效应。探测介质的原子被激发后，在退激时发射光子，光子经光电倍增管的光阴极转换成电子，电子经各打拿极倍增后得到输出电荷。闪烁探测器通常指由闪烁体和光电倍增管组成的整体，它可以由使用者组合。从光阴极获得的光电子数与粒子在闪烁体中消耗的能量之比称为闪烁探测器的阴极能量-电荷转换系数 $\bar{\theta}_k$ 。相应的阳极能量-电荷转换系数 $\bar{\theta}_A = \bar{\theta}_k \bar{M}$ ， \bar{M} 是光电倍增管的倍增系数。

$$\bar{\theta}_k \propto \bar{G} \bar{\gamma}_k \quad (1.1.4)$$

式中 \bar{G} 是闪烁体平均光能输出额，即闪烁体放出的光子数与它所吸收的能量之比。例如，NaI(Tl)晶体对 β 射线的平均光能输出额是每兆电子伏约3000光子。有机闪烁体、塑料闪烁体和液体闪烁体的光能输出额只有NaI(Tl)晶体的几分之一。 $\bar{\gamma}_k$ 是光阴极灵敏度，

$$\bar{\gamma}_k = \frac{\text{发射的光电子数}}{\text{入射的光子数}}$$

$\bar{\gamma}_k$ 和入射光的波长有关。一般光电倍增管的光谱响应范围为3000—6000 Å。

(1.1.4)式只表示 $\bar{\theta}_k$ 与 \bar{G} 、 $\bar{\gamma}_k$ 成正比，因为还有一些影响 $\bar{\theta}_k$ 的因素，例如闪烁体发出的光子不能全部到达光阴极，所以 $\bar{\theta}_k$ 小于 $\bar{G} \bar{\gamma}_k$ 。粗略估计，闪烁探测器的 $\bar{\theta}_k$ 大约为每兆电子伏300个光电子。

同气体探测器一样，在探测中子和 γ 时，半导体探测器和闪烁探测器都是利用这两种射线在探测器中产生的次级带电粒子。

上述四种用于能谱分析的探测器，在探测带电粒子时的能量-电荷转换系数 $\bar{\theta}$ 大致为
电离室： 3×10^4 电子离子对/兆电子伏

正比计数器: $3 \times 10^4 \bar{A}$ 电子离子对/兆电子伏

闪烁探测器 (θ_A): $300 \bar{M}$ 个电子/兆电子伏

半导体探测器: 3×10^5 电子空穴对/兆电子伏

上述数据是粗略的,但可用来估计探测器输出的电压脉冲幅度 V_M 。设粒子在探测器中消耗的能量为 E , 探测器输出端的总电容量为 C , 则

$$V_M = \frac{\bar{\theta} e E}{C} \quad (1.1.5)$$

式中 e 为电子电荷。 $C = 10 \text{ pF}$ 时上述各探测器的输出脉冲幅度大致为

电离室: 5×10^{-4} 伏/兆电子伏

正比计数器: $5 \times 10^{-4} \bar{A}$ 伏/兆电子伏

闪烁探测器: $5 \times 10^{-6} \bar{M}$ 伏/兆电子伏

半导体探测器: 5×10^{-3} 伏/兆电子伏

1.1.2 探测器的固有能量分辨率

由于探测器中的电离、激发、光电转换以及倍增过程都是随机的,即使粒子能量可以全部转换成离子对,探测器所产生的离子对数 N 也是围绕其平均值 \bar{N} 涨落的。如图1-1-1所示,离子对数 N 的概率密度函数 $f(N)$ 呈高斯分布,即

$$f(N) = f(N)_{\max} e^{-\left(\frac{N - \bar{N}}{\sqrt{2} \sigma_N}\right)^2} \quad (1.1.6)$$

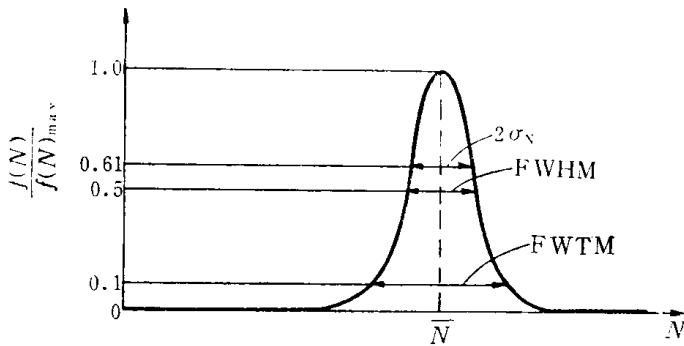


图1-1-1 探测器把同样粒子能量全转换成离子对时,离子对数 N 的概率密度分布

即

$$R_D = \frac{\text{FWHM}}{\bar{N}} 100\% \quad (1.1.7)$$

式中 FWHM¹⁾ 是峰的半高宽, \bar{N} 是峰位。

有时不仅要求峰的半高宽窄,还要求峰的底部也比较窄。所以有时还要衡量峰在 1/10 高度处的宽度 FWTM²⁾ (图1-1-1)。

如果峰的形状呈高斯曲线,可以由 (1.1.6) 式算出 FWHM。FWTM 和标准偏差 σ_N 的

1) FWHM或fwhm—Full width at half maximum.

2) FWTM或fwtm—Full width at tenth maximum.

关系

$$\text{FWHM} = 2.355\sigma_N \quad (1.1.8)$$

$$\text{FWTM} = 4.292\sigma_N \quad (1.1.9)$$

用 σ_N 表示能量分辨率, 得

$$R_D = 2.355 \frac{\sigma_N}{\bar{N}} \quad (1.1.10)$$

如果探测器中产生的离子对数 N 全被收集, 变换成信号电压, 其幅度平均值为 \bar{A} , 幅度的标准偏差为 σ_A , 则由幅度谱决定的能量分辨率 R 为

$$R = \frac{\text{FWHM}_A}{\bar{A}} \quad (1.1.11)$$

或

$$R = 2.355 \frac{\sigma_A}{\bar{A}} \quad (1.1.12)$$

式中 FWHM_A 为幅度谱上的峰的半高宽。

因为信号幅度 A 反映的是粒子能量 E , 将 A 换为 E , R 也可表示为

$$R = \frac{\text{FWHM}_E}{\bar{E}} \quad (1.1.13)$$

或

$$R = 2.355 \frac{\sigma_E}{\bar{E}} \quad (1.1.14)$$

应当注意, 有许多因素会影响能量分辨率。由探测器的能量-电荷转换过程所产生的离子对数的涨落所决定的能量分辨率称为探测器的固有能量分辨率, 用 R_D 表示。实际测得的幅度谱, 其能量分辨率用 R 表示, 它取决于各种因素。尽量使 R 接近 R_D 是核电子学要研究的一个重要课题。另外, 实际测出的幅度谱由于受到各种因素的影响, 峰的形状不一定完全符合高斯曲线。但能量分辨率的定义仍如(1.1.11)式或(1.1.13)式。只有峰形符合高斯曲线才可以用(1.1.12)、(1.1.14)式计算。

下面分析前述几种探测器的固有能量分辨率。

1. 气体电离室和半导体探测器的固有能量分辨率

前面已经说明过, 对能量为 E 的带电粒子, 当其能量全部消耗在这两种探测器的有效体积内并转换成离子对时, 所得离子对数的平均值为

$$\bar{N} = \theta E$$

N 的标准偏差为

$$\sigma_N = \sqrt{F\bar{N}} \quad (1.1.15)$$

相对标准偏差为

$$\frac{\sigma_N}{\bar{N}} = \sqrt{\frac{F}{\bar{N}}} \quad (1.1.16)$$

式中 F 为法诺因子, $0 < F < 1$ 。按照泊松分布, N 的标准偏差应为 $\sqrt{\bar{N}}$, 但实际测定 $\sigma_N < \sqrt{\bar{N}}$, 所以引入了法诺因子。随着技术的发展, 实验确定的 F 值不断有变化, 这还是个研究中的问题。对于气体电离室, $F \approx 1/3$; 对于半导体探测器, $F \approx 0.05-0.2$ 。

半导体探测器的平均电离能比气体电离室小一个量级, 所以对于同样能量的入射带电粒

子，它们的全部能量被吸收后，半导体探测器所得的离子对数 \bar{N} 要比电离室的高一个量级。由(1.1.10)式和(1.1.16)式得探测器的固有能量分辨率为

$$R_D = 2.355 \frac{\sigma_N}{\bar{N}} = 2.355 \sqrt{\frac{F}{\bar{N}}} \quad (1.1.17)$$

可知半导体探测器的固有能量分辨率要比气体电离室的好五、六倍。例如，对于能量为1MeV的带电粒子，电离室可产生离子对数平均为30000，相对标准偏差约为0.3%，固有能量分辨率约为0.7%。在同样情况下，半导体探测器的固有能量分辨率约为0.1—0.2%。图1-1-2是半导体探测器固有能量分辨率和粒子能量的关系。

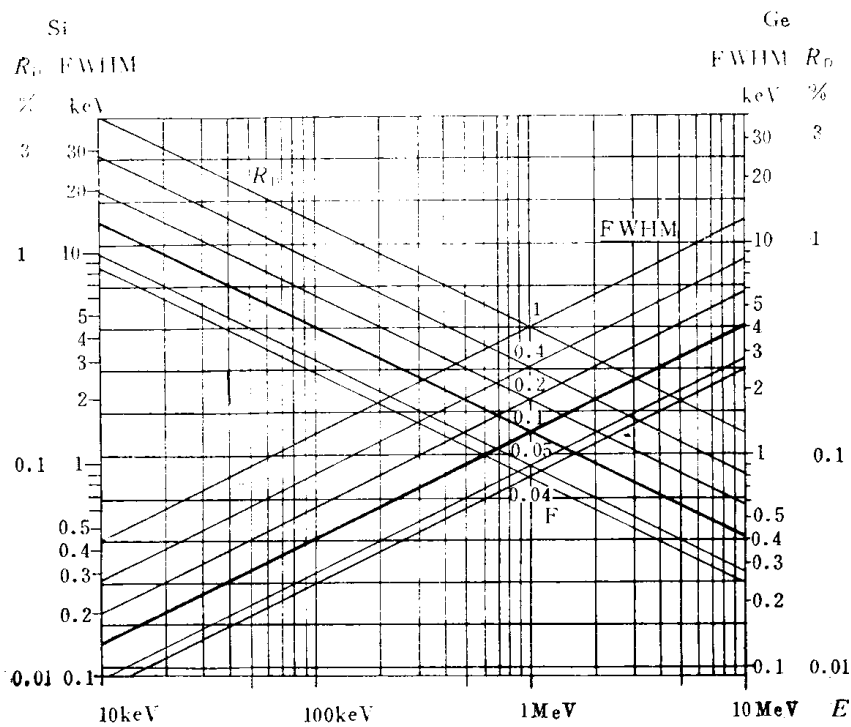


图1-1-2 在法诺因子取不同数值时计算出的半导体探测器固有能量分辨率和粒子能量的关系

2. 正比计数器的固有能量分辨率

在正比计数器中，由带电粒子电离所得到的电荷数 N 的涨落，和在电离室中一样。但是由于气体放大作用，输出电荷数 N' 为 N 的 A 倍，即

$$N' = NA$$

A 为气体放大倍数。设 \bar{N}' 、 \bar{N} 和 \bar{A} 分别为 N' 、 N 和 A 的平均值，则按统计理论中的两级串级随机变数计算规则，可用下式计算 N' 的相对标准偏差

$$\left(\frac{\sigma_{N'}}{\bar{N}'}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_N}{\bar{N}}\right)^2 + \frac{1}{\bar{N}} \left(\frac{\sigma_A}{\bar{A}}\right)^2 \quad (1.1.18)$$

因为 $\sigma_N = \sqrt{F\bar{N}}$ ， $(\sigma_A/\bar{A})^2 \approx 0.68$ ，所以

$$\frac{\sigma_{N'}}{\bar{N}'} = \sqrt{\frac{F + 0.68}{\bar{N}}} \approx \sqrt{\frac{1}{\bar{N}}} \quad (1.1.19)$$

比较(1.1.16)和(1.1.19)式，可见正比计数器的固有能量分辨率的数值约为电离室的二