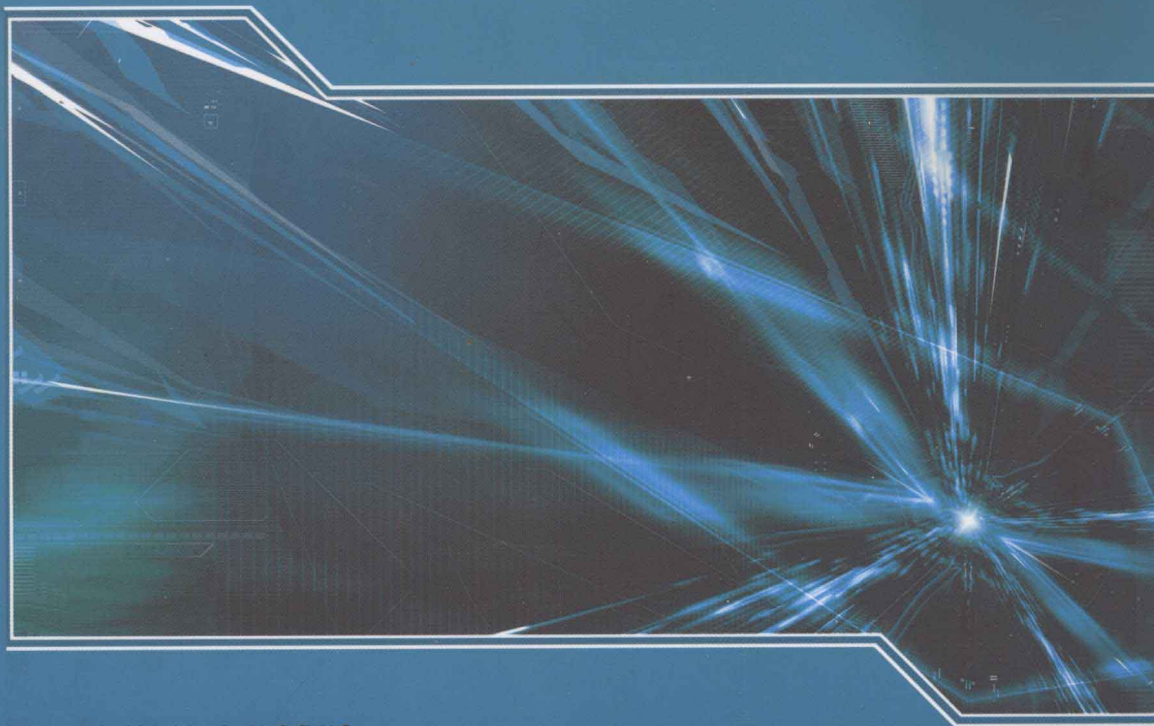




国防特色教材·核科学与技术

核辐射探测器

丁洪林 编著



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

核 辐 射 探 测 器

丁洪林 编著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书是编著者在几十年半导体辐射探测器的研究开发和给研究生讲授核辐射探测器的基础上编写成的。本书首先介绍了核辐射探测器的发展和近十几年来的新进展,介绍了辐射源、射线与物质相互作用等基础知识;重点介绍了核辐射探测器的工作原理、工艺原理和工艺、探测器特性、结构及其应用;然后介绍了核辐射探测器在实验核物理、粒子物理、堆物理中的应用,能量测量和在不同能量范围如何正确选择和使用核辐射探测器;以及在核辐射强度和辐射剂量测量中的应用,阵列探测器构成的核成像探测器及其应用,脉冲辐射探测器和脉冲辐射的探测,核辐射探测器在工业自动化控制、核燃料测量、核保障和对特殊核素监控中的应用,在 X 射线荧光分析、环保生态学中的应用,在探测空间辐射、空间物理、天体物理研究中的应用,以及在核废物处理和核医学中的应用等。

本书主要作为与核相关的研究生的教材,也可作为核物理和有关放射性测量等专业的学生学习和参考,也可供从事相关专业的科研、生产、应用的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

核辐射探测器/丁洪林编著. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2009.9

ISBN 978 - 7 - 81133 - 429 - 6

I. ①核… II. ①丁… III. ①辐射探测器 - 核技术 IV. ①TL81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 149901 号

核辐射探测器

丁洪林 编著
责任编辑 石岭

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451 - 82519328 传真:0451 - 82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂印刷 各地新华书店经销

*

开本:787 × 960 1/16 印张:32.75 字数:678 千字

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷 印数:1000 册

ISBN 978 - 7 - 81133 - 429 - 6 定价:68.00 元

前 言

核辐射探测器作为实验核物理的技术分支,对核物理的发展具有重要作用。法国物理学家贝可勒尔在 1896 年借助于径迹探测器——乳胶,首先发现了天然放射性现象;美籍中国物理学家吴剑雄借助 NaI(Tl)、蒽晶体,用实验验证了著名的宇称不守恒定律。

核辐射探测器研究从开始到现在经历了一百多年的历史。19 世纪末 20 世纪初是核辐射能开始被发现的时期,当时主要使用了空气电离室、硫化锌闪烁体和照相底片等。20 世纪 30 年代前后出现了与核物理实验相关的加速器,从此开始研制了线性放大器、脉冲计数器、(G-M)计数器、正比计数、云雾室和磁谱仪等。20 世纪 40 年代主要研制了与发光现象有关的闪烁计数器和光电倍增管,20 世纪 50 年代初 NaI(Tl)闪烁计数器商品化, γ 射线能量测量成为一般实验室中均能做的常规实验。到 20 世纪 50 年代末,又设计了火花室,特别是流光室得到了很快的发展,并出现了利用 Ge、Si 反向 P-N 结探测带电粒子的半导体探测器。20 世纪 60 年代以后半导体探测器的发展使探测系统发生了显著的变化,它在轻粒子谱仪 X、 γ 射线能谱学方面取得了重要的成就,另外在气体探测器方面设计了多丝正比室,研究了闪烁正比计数器。20 世纪 70 年代,一方面 HPCe 探测器的研制和发展,在 γ 射线和带电粒子领域开辟了新的应用,另外研究了新的闪烁体 BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 锗酸铋)在高能物理领域得到了广泛的应用。Si 探测器、Si(Li)探测器的系列化,以及 HPCe 探测器等半导体探测器迅速发展,成为核物理、粒子物理学使用的主要探测器。离子注入 Si 探测器为探测脉冲辐射提供了波形响应好、时间响应快、线性输出电流大、动态范围宽的探测器。20 世纪 80 年代 Si 平面工艺用到 Si 探测器的制备工艺中,使得 Si 探测器增加了新的系列。20 世纪 90 年代至今,随着科学技术的发展,HPGe 探测器不断智能化以及 CdTe、CdZnTe 半导体晶体生长技术不断改进,单晶材料性能不断提高,制备出了各种类型和各种结构以及像素的探测器。硅光电探测器又开发出了线性阵列和硅 APD 阵列,从而使核辐射探测器和核探测技术在核科学、核能利用、天体物理学、天文学、宇宙物理、工业自动化、国家安全检查(自动行李检查、自动集装箱检查)、反恐防恐、反毒缉毒、核医学影像和对环境有毒有害元素的监测等领域得到了广泛的应用,并对核辐射探测器又提出了新的要求,这又大大加速和促进了这一新学科的发展。当今是核技术应用范围不断

扩大的时代,核辐射探测器和核辐射探测技术具有广阔的发展前景。随着科学技术的发展,核探测器和核电子学又赶上了为核科学、国防、宇宙空间辐射探测、国土安全、反恐防恐、核成像、工业自动化、环保、核医学等服务的新的发展阶段。

在本书的编写过程中,核工业研究生院教务处工作人员及领导给予了很大帮助,打印了全部授课讲义,根据核辐射探测器近年来的发展,在授课讲义充实改写过程中得到了原子能院核探测器研究中心张万昌主任的支持和帮助。李广将同志提供了不少资料,郝晓勇、张凯、孟欣等同志在文字打印、编排等方面做了大量的工作,给予了不少帮助,特在此一并致谢。由于作者水平有限,书中难免有不少缺点和错误,恳请读者不吝指教。

编著者

2009年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 核探测技术在核科学研究、核试验测试、核技术应用中的作用与地位	1
1.2 核辐射探测器的发展及其应用简介	3
第 2 章 核辐射和核辐射探测的原理和方法	19
2.1 核辐射的基本性质	19
2.2 探测带电粒子的物理基础及常用的带电粒子探测器	20
2.3 X, γ 射线的探测原理及常用的核辐射探测器	40
2.4 中子的探测方法	58
第 3 章 气体探测器	83
3.1 气体探测器的原理	83
3.2 电离室	88
3.3 电流电离室和累计电离室	93
3.4 正比计数管及其应用	95
3.5 G-M 计数管	99
3.6 气体多丝正比室和漂移室	100
3.7 高气压电离室和高气压氙电离室	102
第 4 章 闪烁探测器	103
4.1 闪烁探测器的构成和工作原理	103
4.2 闪烁体	104
4.3 闪烁体的特性参数	106
4.4 无机闪烁体的种类和它的物理参数	108
4.5 常用的有机闪烁体	110
4.6 闪烁体的选择	111
4.7 光学收集系统	112
4.8 闪烁探测器的工作特性	118
4.9 闪烁探测器的坪特性	124

4.10 闪烁体探测器的应用	125
第5章 半导体探测器	128
5.1 半导体的基础知识	128
5.2 本征半导体	132
5.3 N型半导体和P型半导体	133
5.4 载流子	134
5.5 半导体探测器对半导体材料的要求和它的基本工作原理	139
5.6 用于制备核辐射探测器的硅、锗和化合物半导体材料	141
5.7 半导体探测器的工作原理、制备工艺	143
5.8 半导体探测器的结构和基本类型	160
第6章 硅探测器	167
6.1 硅核辐射探测器的种类	167
6.2 P-N结的形成	170
6.3 硅半导体探测器的各种特性参数	176
6.4 核辐射探测特性参数	198
第7章 硅锂漂移探测器	212
7.1 锂漂移探测器I区(灵敏区)的形成(补偿区的制备)	212
7.2 锂漂移探测器的分类	213
7.3 硅锂漂移探测器的特性参数	213
7.4 半导体X射线探测器的选择及其性能和特点	224
7.5 X射线能谱测量和数据图表	226
7.6 硅锂漂移X射线谱仪的应用	231
第8章 特殊类型的半导体探测器	233
8.1 全耗尽探测器	233
8.2 位置灵敏探测器	233
8.3 硅漂移室SDC和电荷耦合探测器(CCD)	235
8.4 内放大探测器(或雪崩倍增放大器)	236
8.5 P-I-N电流型探测器	239
8.6 夹心(夹层)型半导体中子探测器	242
8.7 匀质体电导型——无结型器件	243
8.8 MOS-C探测器	244

8.9	高分辨率网栅型 Au-Si 表面势垒探测器	245
8.10	光电导探测器和光电二极管探测器	247
8.11	环形金硅面垒探测器	247
第 9 章	高纯锗探测器	250
9.1	HPGe 探测器的结构	250
9.2	HPGe 探测器的电场和电容	252
9.3	HPGe 探测器灵敏区和死层	254
9.4	HPGe 探测器的能量分辨率	255
9.5	HPGe 探测器的探测效率	257
9.6	峰面积、频谱本底、谱峰极大值和峰康比	267
9.7	锗探测器的时间特性	269
9.8	辐射损伤	272
9.9	锗射线探测器的应用	275
9.10	锗 γ 射线探测器测试方法	285
第 10 章	化合物半导体探测器	296
10.1	概述	296
10.2	砷化镓(GaAs)核辐射探测器	306
10.3	碲化镉(CdTe)核辐射探测器	317
10.4	碲锌镉核辐射探测器	331
10.5	碘化汞(HgI ₂)核辐射探测器	371
第 11 章	低温量热和超导体核辐射探测器	376
11.1	低温量热核辐射探测器	376
11.2	低温超导体核辐射探测器	381
11.3	超导体和低温量热核辐射探测器的应用	400
11.4	展望	410
第 12 章	其他核辐射探测器	411
12.1	切伦科夫探测器	411
12.2	热释光探测器	415
12.3	径迹探测器	417
12.4	康普顿二极管	427
12.5	自给能探测器	428
12.6	液体电离室	430

12.7	气体正比闪烁探测器	431
12.8	穿越辐射探测器	432
第 13 章	探测器的本底和屏蔽	435
13.1	本底来源	435
13.2	降低本底的方法	439
第 14 章	核辐射探测器的应用	443
14.1	概述	443
14.2	实验核物理中用于粒子鉴别的核辐射探测器	448
14.3	核辐射探测器在反应堆(核电站)上的应用	452
14.4	核辐射探测器在核能谱(核辐射能量)测量中的应用	457
14.5	探测和测量脉冲辐射束的探测器	463
14.6	核辐射探测器在核辐射强度和辐射剂量测量中的应用	469
14.7	核辐射探测器在核成像和其他研究领域中的应用	481
14.8	探测器在核保障、核材料生产、加工处理中的监测和核电站燃料消耗的测量	487
14.9	X 射线荧光分析用核辐射探测器和 X 射线荧光分析的应用	489
14.10	核辐射探测器在宇宙空间天体物理领域的应用	498
14.11	核辐射探测器在核医学和临床医学中的应用	504
附录	512
参考文献	514

第1章 绪 论

1.1 核探测技术在核科学研究、核试验测试、核技术应用中的作用与地位

核探测技术从核能开始被发现时起,就使用了气体电离室、照相底片和晶体探测器,到现在已有一百多年的历史。随着核物理实验和核科学研究的深入,核探测技术(核探测器和核电子学)成为促进核科学技术和核武器的发展、核技术应用不断扩大的一门新型科学技术。

1964年我国成功地进行第一次核试验,在此之前我国老一辈核科学领域的知名科学家和科技工作者,研制成功镭铍中子源和中子计数管,为开展中子物理的研究工作提供了初步条件,成功研制了对质子灵敏、对电子灵敏的核乳胶;与此同时还分别研制成G-M(盖革-弥勒)计数管、卤素计数管、碘化钠NaI(Tl)闪烁晶体和光电倍增管,以及相应的核电子学,如电荷灵敏前置放大器、线性脉冲放大器、高压稳压电源、64位进位定标器、计数率仪、单道脉冲分析器等核电子学仪器;开展了对带电粒子能谱测量分析, γ 射线能谱测量分析,脉冲中子测量,临界试验物理实验装置等研究工作。多方面的研究积累了大量的数据资料和经验,为我国首次核试验及其核试验测试奠定了坚实的基础。

我国对核试验测试和研究是从核侦察开始的,利用 α/β 取样测量仪和6道分析器组成的核探测装置对美国在太平洋地区进行的核试验进行核侦察测试,为我国在第一次核试验时利用 α/β 取样分析仪和多道分析器正确可靠地测定放射性烟雾浓度奠定了基础。在第一次核试验中我国用原子能所自己研制的NaI(Tl)光电倍增管 γ 射线探测器和单次纳秒级高速波形照相示波器记录了核试验瞬时 γ 射线变化的波形,同时用飞机装载核探测器、 α/β 取样分析仪、G-M管、NaI(Tl)晶体的高空 γ 辐射强度自动记录系统,可靠地测定了在不同地区上空大气中的放射性烟雾。为核试验环境安全和放射性烟云在空间高度和宽度的分布测量作了及时的测定,以及利用电离室谱仪、 $4\pi\beta$ 计数管测量裂变变碎片核素的绝对衰变率,裂变室测量裂变产物中的裂变数和小角度技术测量裂变衰变率,进行的燃耗测量,直接提供了比其他方法更准确可靠的核试验测试结果,通过分析核爆炸产物样品和沉降样品中裂变产物和剩余装料可以计算出燃耗和爆炸当量。

著名核物理学家(原子能研究所所长)钱三强先生的一句名言“核探测器和核电子学仪器是核科学技术的耳目”一语道破了核探测技术在核科学技术发展中的重要作用和地位。50多年来核探测技术得到了长足的发展,先后为我国核科学技术的发展、核武器的研究、核试验的

测试,研制开发了各种类型的气体探测器、闪烁体探测器、核乳胶、半导体探测器以及核电子学仪器和装置。

1. 建立起具备各自特点适合不同应用要求的带电粒子谱仪。

(1) 栅网电离室谱仪。测量的立体角为 2π , 适合于大面积样品的测量, 特别是弱放射性 α 样品测量。但装置较复杂, 成本高。

(2) 正比计数器谱仪。此谱仪结构简单, 使用方便, 但能量分辨比电离室谱仪差。

(3) 磁谱仪。这种 α 谱仪虽可作精细测量, 但其结构复杂、体积大、灵敏度低、对放射源及整个装置要求高, 使用不方便。

(4) 闪烁谱仪。 α 闪烁谱仪所用的闪烁体一般选用 CsI(Tl) 晶体, 它不适合大面积样品的测量。

(5) 半导体探测器谱仪。半导体 α 谱仪目前所配用的探测器多为 AuSi 面垒和 SiPIIP, 以及 Si(Li) 探测器。它之所以得到广泛应用是因它有很高的能量分辨率, 对 5 MeV 的 α 粒子, 其能量分辨率可小于 0.3%, 而闪烁谱仪为 3% (150 keV), 对面垒型半导体 α 谱仪重要的是选择最佳的工作电压, 因为电压太低会使载流子速度变慢, 导致能量分辨变差, 电压太高, 会增大噪声而使能量分辨变差, 最佳的工作电压要由实验来确定。

2. 为 γ 射线能谱学提供能量分辨率高的探测器。如 HPGe 探测器, 在核结构的分析研究中得到了精细的衰变纲图。另外, γ 射线能谱学在核物理基础研究, 鉴别放射性核素和放射性强度中起到了重要的作用。对核反应中产生的 γ 射线测量, 大大提高了能谱结构的精度。由于核辐射探测器的不断发展和性能的进一步提高, 实现了对短寿命核(寿命为 $10^{-12} \sim 10^{-14}$ 秒)的直接测量。

3. 为 X 射线的探测和能量精确分析提供了分辨率高, 探测效率高的 X 射线谱仪, 使在活化分析中避免了或减少了长时间的复杂的化学分离, 并免除了必须依赖复杂的计算机程序来处理数据的工作, 而实现了高灵敏度和高精度的分析测试手段。例如对水采用带电粒子活化分析技术, 已能测出含量低于百万分之一 (1 ppm) 的杂质元素。

4. 在核能谱学研究中为 β 射线能谱测量提供了适用于不同能量、不同谱仪类型的探测器, 如内转换系数的测量。另外由于半导体探测器具有能量分辨率高的优点, 实现了电子 - γ 角关联的研究和对 β 谱(能谱)的形状研究。

5. 在实验核物理中, 粒子鉴别常用的方法有两种, 一种是对粒子的甄别, 另一种是鉴别, 即测量粒子的原子序数 Z 、质量数 A , 和它的能谱特性。鉴别粒子主要是根据粒子在介质中产生的电离密度和射程差异。鉴别粒子的方法较多, 不同的方法鉴别的效果不但与粒子的种类有关, 而且与粒子的能量强度有关, 特别是核反应产生的粒子(核反应产物)的鉴别, 需要确定它的 Z 和 A (质量数), 因此要根据具体情况设计实验方法和选择核辐射探测器, 而核辐射探测器起着关键的作用。

6. 为地下核试验测试研制了用于测量脉冲 γ 射线束的康普顿二极管和用于测量强脉冲中子束的离子注入硅 P-I-N 电流型探测器。

随着科学技术的发展, 核探测技术又赶上了为核科学、国防、宇宙空间辐射的探测、国土安

全、反恐、防恐、核成像、工业自动化、环保、核医学等方面服务的新的发展阶段。

1.2 核辐射探测器的发展及其应用简介

1.2.1 概述

利用核辐射在气体、液体或固体中引起的电离效应、发光现象、物理或化学变化进行核辐射探测的元件称为核辐射探测器。到目前为止,各种应用的核辐射探测器种类很多,工作原理不尽相同。按探测核辐射的物理过程可分为两大类:电离型探测器和发光型探测器。常用的电离型探测器有电离室、G-M管、正比计数管和半导体探测器,利用物理化学变化的粒子径迹探测器,如核乳胶以及利用物理特性变化的超导体探测器也可纳入这一类。发光型探测器有闪烁体探测器、热释光探测器以及火花室、流光室等。探测器给出的信息能够直接或间接地确定核辐射的种类、能量、强度或核寿命等参数。

核辐射探测器从早期的气体探测器、晶体探测器,到20世纪50年代的闪烁体探测器,20世纪60年代和70年代构成系列的各种半导体探测器,对核科学的发展、核试验测试和核技术的应用都起到了重大的作用。80年代以来,国外核技术发展突飞猛进,开发出了许多新型的探测器。

硅探测器有平面工艺硅探测器即PIP-硅探测器,硅漂移室SDC,P-N结CCD,混合像素探测器,微条带探测器等。

化合物半导体探测器有CdTe,CdZnTe,GaAs,HgI₂和SiC等。

X射线荧光分析谱仪系统不需要液氮制冷,仅需要简便的热电制冷(-10℃~-50℃)就能正常工作,而且对⁵⁵Fe 5.95 keV具有较高的能量分辨,硅漂移室FWHM为145 eV,PIP-Si二极管FWHM≤190 eV,CdZnTe探测器FWHM为250 eV。

CdTe,CdZnTe的γ射线探测器在空间辐射探测、国土安全、核仪器、军用、环保、核核查、工业控制自动化、核医学等许多领域得到了广泛的应用。

核辐射成像探测器:一是γ射线成像探测器,主要有CdTe,CdZnTe像素阵列,平面工艺硅探测器和CsI(Tl)、CdWO₄晶体构成阵列的成像探测器;二是X射线成像探测器,主要有LaCl₃(Ce),LaBr₃(Ce)闪烁探测器,CMOS成像,非晶硅平板探测器,非晶硒平板探测器等。这些成像探测器的出现和应用,开创了数字探测器代替传统胶片的新时代。它们已用于国土安全、自动集装箱检测、自动行李包检测、工业CT、无损探测、核核查、军事医学、核医学等几乎所有领域。

1.2.2 核辐射探测器的发展和应用简介

下面围绕在核科学研究、核试验测试(脉冲X、γ射线束和中子束的测试)、核反恐防恐、核

核查、核保障、环保、核成像和空间探测等方面,对曾作出过重要作用的和近年来开发并取得较好结果,在应用中已发挥作用的探测器作以简要介绍。

1. 径迹探测器

径迹探测器是直接记录粒子走过径迹图像的探测器,这类探测器或是直接给出能够长久保持的径迹图像,如核乳胶和固体径迹探测器;或是把径迹拍成照片,再进行自动分析和处理,如云室、气泡室、火花室、闪光室等,从而得到有关粒子的信息。这里简要介绍的是主要用于核物理、宇宙物理、粒子物理、核试验中对快中子能谱测量,以及在特殊环境,强本底辐射场中进行核数据和核事件测量的固体径迹和核乳胶。

(1) 固体径迹探测器

是一种利用辐射损伤效应记录重带电粒子径迹的探测器。当重带电粒子通过探测器,在它的路径上探测器材料会产生直径 $3\sim 5\text{ nm}$ 的辐射损伤,这种带有潜伏径迹的探测器用蚀刻剂蚀刻处理后,其辐射损伤密度超过阈值的潜伏径迹的孔间直径可达 μm 量级,便可用光学显微镜观察和测量,可测定重带电粒子的数目、飞行方向、原子序数、质量和能量。固体径迹探测器可分为晶体、玻璃和塑料三类,各种材料的记录特性不同。固体径迹探测器适于在特殊核环境(即强本底辐射场)中进行核数据和核事件测量,如测量核爆炸中辐射的强度、能谱及空间分布、核爆炸燃耗、野外布点普查铀矿资源、显示核燃料元件破损等。此外,在核物理、核辐射剂量防护、天体物理及生物医学等方面也得到较广泛的应用。

(2) 核乳胶

核乳胶是指能记录进入其中的单个带电粒子径迹的照相乳胶。与照相乳胶一样,核乳胶液是由银的卤素化合物微晶体均匀分散于明胶中而制成的。核乳胶的特点:微晶体极小($0.01\sim 0.5\ \mu\text{m}$);对带电粒子灵敏度高,且可根据需要选择不同灵敏度的乳胶,从只对裂变碎片灵敏到对电子灵敏。由径迹的数量、参数(射程、颗粒密度、多次散射、 δ 射线密度、径迹黑度)、粒子的衰变或反应情况,可确定粒子的性质、能量与数量。在核物理、宇宙线与粒子物理研究中,在放射性地质矿床研究,核试验中的快中子能谱测量,生命科学与材料科学中的自射线照相与电子显微镜自射线照相中,核乳胶有着重要应用。由于乳胶径迹测量是用显微镜作三维跟踪测量,全面自动化很难,目前还只能在某些特定条件下进行自动化测量,这就限制了它的广泛应用。

2. 气体探测器

气体探测器是在19世纪末20世纪初,核辐射能被发现时最早被使用的一种探测器,当时使用的是空气电离室,它在早期的核物理发展和核科学研究中起到了重要的作用,如G-M管(盖革-弥勒)计数管、电离室、正比计数管三个系列,以及漂移室、平行板雪崩室。虽然其他探测器的发展很快,应用也日益广泛,但气体探测器具有结构简单、使用方便等优点,因此有些气体探测器在今天不仅仍有广泛的应用,而且还有新的发展。这里对这些气体探测器作简要介绍。

(1) 气体电离室

它是基于电离辐射使气体电离的辐射探测器。该类探测器有两个电极并充有工作气体,在两电极间施加工作电压。入射辐射在气体中产生电离,电极上收集的电荷数与电离粒子的

性质有关,也与外加电压的大小有关。

(2) 电离室

它是内充有适当气体的容器组成的电离探测器,容器内装有两个电极,在电极间施加不足以引起电子雪崩放大的电场,但能将灵敏区内由入射辐射产生的离子对收集在电极上。电离室的种类很多,按结构可分为平板形、圆柱形、球形电离室等;按所探测的辐射种类可分为 α 、 β 、 γ 和中子电离室等;按工作方式可分为电流电离室和脉冲电离室。电离室的用途较广泛,可用于核实验室内的测量,用于工业核测控仪表(如核子秤、测厚仪、密度计及料位计等),用于环境辐射本底监测,用于核反应堆测控,以及用于火灾自动报警等。电离室的输出信号较小,它要求记录电子仪器灵敏度高、噪声低,为防止漏电还需选用绝缘性能好的绝缘材料,并设有保护环等措施。

(3) 裂变电离室

它是一种在电极上涂覆裂变物质灵敏层的电离室。中子与灵敏层中的裂变物质(如 ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{232}Th , ^{252}Cf 等)发生裂变反应,产生的裂变碎片使室内气体电离,在电场作用下,电极上收集到电离电荷信号。该信号与入射的中子注量率成正比,涂覆不同的裂变物质可用来探测不同能量的中子。根据入射中子注量率的大小,输出信号的方式也有所不同,在较低中子注量率时,测量脉冲信号;在较高中子注量率时,测量电离电流或均方根电压。因此这种电离室作为宽量程(可达10个量级)探测器,在核反应堆控制中得到广泛的应用。电极上涂覆的裂变物质本身放出的粒子(如 α 粒子)、中子场(如核反应堆内)中伴生的 γ 辐射都会使气体电离,产生本底脉冲或电流,该本底与裂变碎片产生的信号脉冲或电流相比是很小的,很容易被甄别掉或者可以忽略不计,因此这种电离室具有较强的甄别 γ 本底的能力。

(4) 屏栅电离室

它是通常用于测定 α 粒子或裂变碎片能量的一种脉冲电离室。从结构上讲,它是在普通电离室的正、负电极之间附加一个处于某个中间电位的栅网状的第三个电极(屏栅电极)而构成的。 α 粒子或裂变碎片对气体的电离被限制在阴极和屏栅极之间。在电子以比离子的漂移速度高三个量级的速度穿过栅极而被集电极收集的过程中,由于栅极的屏蔽作用而使得电子所获得的加速能量只取决于栅极和收集极之间的确定电位差,而不会受到尚未被收集的离子云电场的影响,因此收集到的信号大小只正比于 α 粒子或裂变碎片所产生的初始电子总数,而与电子产生的地点无关,从而确保了极好的能量分辨本领。与半导体 α 谱仪相比,由于它的阴极面积可以做得很大(如几百或几千平方厘米),因此可以不经化学浓缩而采用直接物理铺样的办法,这样不仅简化了操作,而且更重要的是可以避免由于化学浓缩过程对核素的选择作用,而使某些不易被化学浓缩的核素在制样过程中被丢失。正是由于屏栅电离室既具有相当好的能量分辨本领,又具有很好的探测灵敏度,因此和半导体 α 谱仪一样在很多方面得到十分广泛的应用。

(5) 正比计数管

它是工作在气体放电正比区的辐射探测器(简称正比管)。正比管有多种结构,但常用的

是同轴圆柱形。其外壁为阴极,阴极材料多为不锈钢、铜或铝;在中心轴上紧拉一根阳极丝,阳极丝一般用钨丝或不锈钢丝制成;圆柱形容器内充以工作气体。探测对象不同工作气体也各异:用于测中子的充有 BF_3 , ^3He , H_2 或 CH_4 等气体;用于测 α , X 射线等用惰性气体(Ar 或 Xe)加少量多原子气体(CO_2 、 CH_4 等)。辐射进入正比管内,因工作电压较大,使得初始总电离产生的次级电子获得足够能量,进一步电离其他气体分子,产生电子雪崩,即使气体电离得到放大(简称气体放大),通常将气体放大后的电离总数 N 与初始电离数 N_0 之比叫做气体放大系数(用 M 表示)。在正比放电区内 M 值大于 1,它与初始总电离生成的离子对数无关,在某一工作电压下,正比管的输出脉冲幅度与初始总电离的离子对数成正比。正比管的坪特性较好,它能有效地用于辐射强度的测量;正比管的信噪比较大,能量分辨率较好,用于 α , β , 中子及 X 射线的能量测量;正比管的放电空间有严格的局限性,较广泛地用于辐射的定位。

(6) 平行板雪崩室

它是由两平行平面电极构成,并工作在正比放电区的气体电离探测器。两个电极间的距离较窄(1~3 mm),工作气体的气压较低 666.61~3 999.66 Pa(5~30 torr),在两电极间形成很高的约化电场 E/P (E 为电场强度, P 为气压)。当射线进入室内灵敏区使气体分子电离,在窄小的电极间形成电子雪崩,电子漂移速度很高,输出信号的信噪比很大,所以这种雪崩室的时间分辨本领比一般正比计数管要高很多,时间分辨率可达亚纳秒数量级,它是较理想的快定时探测器。由于结构简单、成本低以及辐射损伤小,它在核物理实验中提供精确定时和高计数率的测量工作,尤其在重离子实验物理中受到重视。如果它的电极平面由若干位置灵敏单元构成,这种雪崩室还可以做既定时又定位的辐射探测器,或与其他探测器组成多参数测量系统。

(7) BF_3 正比计数管

它是一种充有 BF_3 气体的正比计数管。计数管的初始电离是由慢中子与 ^{10}B 进行核反应产生的 α 粒子和锂核引起的,它用来记录单个中子脉冲,由于它的中子脉冲幅度大而 γ 射线产生的脉冲幅度小,因而能有效地将中子脉冲与 γ 射线脉冲区分开。计数管内充以含有浓缩 ^{10}B 或天然硼的 BF_3 气体,由于 BF_3 气体的化学性质很活泼,容易与计数管的结构材料起化学作用,因而必须选用化学性质稳定的结构材料。在充气过程中还需采取一系列有效工艺,才能制作出性能长期稳定可靠的 BF_3 正比计数管。由于 BF_3 正比计数管造价相对低廉,性能稳定可靠,探测效率较高,在核实验以及工业中(如中子水分计,公路路基湿密度计等)得到较广泛应用。

(8) X 射线正比计数管

它是一种带有能透过 X 射线入射窗的正比计数管。计数管的初始电离是由入射的低能 X 射线或软 γ 射线与计数管所充气体相互作用产生的。入射窗一般为侧窗或端窗,部分计数管还有出射窗。入射窗的材料和厚度根据 X 射线的能量来选择,常用材料为有机薄膜、铝箔、铍片和云母。计数管的形状一般为圆柱形、长方形和鼓形。计数管有密封式和流气式两种,所充气体为惰性气体(如 Ne, Ar, Kr, Xe)加少量的淬灭气体(如 CH_4 , CO_2 , N_2 等)。与闪烁探测器相比,计数管的能量分辨率较好,能量线性范围宽、信噪比高、温度效应较小。X 射线正比计数管广泛应用于天文、地质、冶金、医学、材料科学、机械加工和环保等领域。

(9) ^3He 正比计数管

它是一种充有 ^3He 气体的正比计数管。在管中产生的起始电离是由中子与 ^3He 进行核反应后产生的质子和氦核引起的,由于其反应截面较大,所以它对热中子和超热中子的探测效率较高,在核反应启动、核物理测量、石油工业的测井等方面有较广泛的应用。 ^3He 气体的纯度对计数管的性能影响很大,必须消除 ^3He 中的微量氘, ^3He 气价格昂贵,制备设备中必须有剩余气的回收装置,制作工艺相对复杂些。

(10) 盖革计数管

它是工作在盖革放电区的气体电离探测器(又叫盖革-米勒计数管)。其大多为圆柱形结构,即用金属圆筒作阴极,轴线上用一细金属丝作阳极,管内常充以惰性气体和少量多原子气体。入射辐射使管内气体分子电离,电子向阳极丝漂移,经雪崩放电大量离子沿阳极丝发展,在阳极丝周围形成正离子鞘,正离子鞘在电场作用下,到达阴极附近时得到一定的动能,它可以从阴极打出二次电子,产生假计数,所以要用淬灭的方法来消除这种可能产生的假计数。这种计数管制作工艺较简单、结构形式多样、输出脉冲幅度大,广泛用于 α, β, γ 射线的强度测量。

(11) 高气压电离室

它是一种内充高气压气体的电离室。电离室壁通常由钢材制作,充以 $2.0265 \sim 3.03975 \text{ MPa}$ ($20 \sim 30$ 大气压)高纯氩气或氮气,体积一般为 $4 \sim 8 \text{ L}$ 。高气压电离室具有较高的灵敏度和长期稳定性,对环境陆地 γ 辐射与宇宙射线电离成分的空气吸收剂量率响应近似相同。为得到对入射辐射各向同性响应高气压气体电离室常采用球形结构。高气压电离室20世纪30年代初研制成功,20世纪80年代后期采用能量补偿法进一步改善了能量响应特性,早年曾用于海平面宇宙射线空气电离量测量,20世纪70年代初用于环境辐射照射量率测量以及核设施气载流出物的连续监测。高气压电离室除在核技术领域内的应用外,作为传感器在工业自动化方面也被广泛应用。

(12) 气体闪烁正比计数管(GSPC)和高压Xe电离室

到20世纪80年代末,Xe气体纯化技术的提高促进了Xe闪烁正比计数管的发展,构成了新型的X射线Xe气体闪烁正比计数管。与一般的正比计数管相比,GSPC能量分辨率高。例如,对 ^{55}Fe 5.9 keV的X射线,Xe GSPC的FWHM为472 eV;对0.15 keV的X射线,FWHM为85 eV,噪声仅为50 eV,可鉴别硼的KX射线,比一般正比计数管的能量分辨率提高了一倍。Xe气体的法诺因子为0.17,电荷倍增没有产生空间电荷效应,所以计数率可高达 $90 \times 10^3/\text{s}$,并可用于穆斯堡尔实验、荧光X射线谱的测量、环境放射性的监测等。另外球形电离室、重离子电离室等新产品的相继研制成功,越来越受到了人们的重视。高压Xe电离室线性阵列探测器的一致性较好,并可做到很高的排列密度,是近十年来在我国首先应用于集装箱安检成像系统的核辐射线性阵列探测器,其缺点是气体对射线的吸收(衰减)效率低,探测效率小于60%,所以一般用于能量较低的情况。

3. 闪烁探测器

(1) 闪烁探测器的工作原理

闪烁探测器是利用某些物质在核辐射的作用下会发光的特性来探测核辐射,这些物质称为荧光物质或闪烁体。光电器件(光敏元件)将微弱的闪烁光在光电倍增管的光阴极转变为光电子,光电子经过光电倍增管的多次倍增大后输出一个电脉冲(对 Si 光电二极管来说是闪烁光在 Si 光电二极管中转变为电子-空穴。在 Si 光电二极管上的电场作用下被收集输出一个电脉冲,它没有放大作用),这种装置叫做闪烁探测器。

典型的闪烁探测器的工作过程可以概括为四个相互联系的步骤:①核射线进入闪烁体,使闪烁体的原子、分子电离和激发;②部分电离激发能以光辐射的形式释放出来,形成闪烁光,产生光子;③部分闪烁光被收集到光电倍增管的光阴极上产生光电子;④光电子在电子倍增器中倍增,并在阳极上被收集,形成电信号。闪烁探测器能探测各种类型的带电粒子和中性粒子。其主要特点是探测器效率高,时间分辨好。它是一种应用较广泛的核辐射探测器。

(2) 闪烁体

具有射线致发光特性的闪烁物质称为闪烁体,构成对电离辐射灵敏的元件。闪烁体按其化学属性可归类为有机与无机闪烁体两大类;而依其物理形态,有固体、液体、气体与固溶液四种;但在实际核技术应用中,考虑到闪烁体的发光机理与核性能特点,闪烁体分作无机晶体闪烁体、有机晶体闪烁体、塑料闪烁体、玻璃闪烁体、液体闪烁体和气体闪烁体等 6 个品种。带电粒子穿过闪烁体时,闪烁体的原子或分子产生电离或激发,这些原子或分子在复合和退激时瞬时光,中性粒子或 X, γ 射线是依靠其与闪烁体物质相互作用(核反应或电磁作用等)所产生的次级带电粒子而使闪烁体激发发光。对于无机晶体闪烁体与有机晶体闪烁体,用原子、分子结构的能带理论解释激活剂的作用与闪烁发光机理,已经取得了令人信服的结果;塑料闪烁体与玻璃闪烁体的能量传递与发光现象的理论描述,也已经可以解释大部分实验结果。但是应指出,对闪烁体的发光至今仍不能进行定量的计算。

(3) 闪烁体的主要特性参数

闪烁体的主要特性参数有发射光谱、光输出、能量转换效率、能量分辨率、闪烁衰减时间、闪烁衰减长度及温度效应等。不同的使用情况,对这些性能参数有不同的要求。闪烁体的发射光谱是指闪烁体发射的光子数随光子的能量或波长而变化的分布曲线。闪烁体的光输出是指闪烁体发射光子的总数与被该闪烁体吸收的入射辐射能量的比值。与闪烁体标准样品的光输出值相比较给出的相对值,称为相对光输出。闪烁体的能量转换效率是指闪烁体发射光子的总能量与被它吸收的入射辐射能量的比值。与闪烁体标准样品的能量转换效率值相比较给出的相对值,称为相对能量转换效率。闪烁体固有能量分辨率是指闪烁探测器的能量分辨率扣除光电倍增管贡献后的值。闪烁衰减时间是指从闪烁体受单次激发到其光子发射率下降到最大值的 $1/e$ 所需的时间。闪烁有效衰减长度是指闪烁体内,闪烁光因传输而衰减至 $1/e$ 倍的长度,通常以厘米为单位表示。闪烁体的温度效应是指闪烁体的基本性能(如能量转换效率、固有幅度分辨率、闪烁衰减时间等)随温度变化的关系。

(4) 有机闪烁体

一种由有机物组成的闪烁体称为有机闪烁体。它可简单地分成三类:(1)有机晶体闪烁