

# 脉冲辐射探测技术

欧阳晓平

(西北核技术研究所,西安 710024)

**[摘要]** 脉冲辐射探测是探知核反应过程特征信息的主要途径之一,是核反应过程特性研究、核装置设计、运行、监测与控制不可或缺的技术手段。由核探测器、探测方法和应用技术等构成的脉冲辐射场探测技术,已成为科学研究、核技术应用、核材料分析、裂变/聚变研究和天体物理等相关核科学研究的必备技术元素。文章介绍了我国发展的瞬态核裂变、核聚变反应过程释放的脉冲中子、伽马混合辐射场探测系统和测量技术。

**[关键词]** 裂变反应;聚变反应;脉冲辐射探测;探测系统;中子测量;伽马测量

**[中图分类号]** TL81 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)04-0044-12

## 1 核辐射探测

观测和测量是人类认识世界的主要手段之一。从1896年贝可勒尔(Henri Becquerel)发现放射性到1939年哈恩(Hann)和斯特拉斯曼(Strassman)发现裂变现象,核物理学发展史上几乎每一个重大的事件,无不和射线探测与分析相关联。人类对原子核世界的探索 and 认识,最初以射线探测为主要技术手段,它不仅能够揭示核反应过程特性和核内部结构信息,而且能够给出定量描述,为核科学技术,特别是核能、放射性束流应用提供了技术基础和。事实上,探测射线并确定其性质,一直被视为是核物理研究和核技术应用的中心环节<sup>[1]</sup>。

核武器、核电站与放射性同位素、射线束流应用,是核科学技术发展的标志性成就<sup>[2~7]</sup>。当前,人类已经掌握了核能释放、射线束应用的技术。在核科学技术研究和应用实践中、核反应堆、核爆炸装置、同步辐射装置、重离子加速器、散裂中子源等各种大型科学装置的设计,都是基于已有的试验事实和数据,这些试验数据无一例外地源自于核辐射探测。核装置的工作状态通常十分复杂,难以用理论模型和有限实验数据完全准确地描述<sup>[5,6]</sup>,要回答

其最终性能、效果和真实的微观工作机制及装置运行控制(除核爆炸装置外),几乎都需要探测其产生的射线束流参数,例如中子、伽马射线,X射线、带电粒子束流。因此,核辐射探测是探知核反应过程机理、核装置工作状态和核内部结构信息的钥匙。

自然界发生的各种核现象,以及实际应用的各类核装置,其释放的辐射场形态,大致可分为稳态(准稳态)和瞬态两种。早期的实验核物理学主要研究稳态或准稳态辐射场,例如物质的放射性规律、核反应过程机理等,以探测单个粒子的个体行为特征为目标,进而鉴别粒子种类,确定粒子或核反应过程性质。在射线探测方式上,这类研究采用脉冲计数测量方法。设计对粒子敏感的核探测装置,使其在射线作用下产生脉冲电信号输出,分析信号的脉冲高度谱,实施对能量和作用性质的区分。早期发展的各种计数器、电离室、闪烁探测器、固体探测器等,实际上都是为实现这一目的。人们希望对核辐射有更直观的了解,发展了威尔逊云室、核乳胶、气泡室等探测手段,它们使带电粒子径迹成为可见,是核辐射探测的光学方法。对个体粒子特性的研究和鉴别,奠定了实验核物理研究的基本方法和设备基础,先进核探测仪器、设备的建立成为研究中的关键技术环节,多次获得诺贝尔物理

**[收稿日期]** 2007-01-17

**[作者简介]** 欧阳晓平(1961-),男,湖南宁远县人,西北核技术研究所副总工程师、研究员,博士生导师,从事脉冲中子诊断的技术研究和相关诊断工作

学和化学奖<sup>[3]</sup>。

随着核科学技术的发展,强流瞬态脉冲辐射场的产生、应用成为新的研究热点。尤其是核武器试验、脉冲反应堆、同步辐射装置、散裂中子源的设计和运行,在极短的时间内能够产生大量粒子,产额可达 $10^{32} \text{ n}(\gamma)/\text{s}$ 以上<sup>[8]</sup>。对于这类强烈的瞬态核反应过程,若还采用脉冲计数方法来研究个体粒子的行为特征,即使当今最快的电子学系统也无法满足要求,从而迫使人们转向以研究大量群体粒子的共同特征来获得相关信息,探测模式也从传统的脉冲计数方式转为电流工作模式。显然,该类探测所获得的脉冲信号是大量粒子集体行为的统计体现。在核辐射探测中,无论是单个粒子的脉冲计数型测量,还是大量粒子的电流型测量,都需要研制合适的探测器来获取信息。计数型测量能够给出单个粒子的能量信息,不同能量的粒子排列在多道分析器的不同位置,但时间信息被忽略了<sup>[9]</sup>;而电流型测量中,束流的时间过程被详细记录下来,而粒子的能量信息被平均处理了<sup>[10]</sup>。

## 2 脉冲辐射探测及其种类

脉冲辐射探测与辐射场的种类和特性直接相关。

1) 按照待测辐射场参数种类划分。传统实验核物理测量以鉴别粒子种类和性质为目标,研究放射性规律等,脉冲辐射探测主要解决如下3类测量问题。a. 脉冲辐射场的时间过程测量。由于探测过程、信号传输过程和信号记录过程均不可避免地存在时间上的畸变,设法减小和最大限度消除测试过程对源信号的时间畸变,真实地再现脉冲过程时间特性成为重要研究目标;b. 强度(某时刻粒子数目)随时间变化测量。核反应或核装置释放的脉冲辐射场,射线粒子通常具有较复杂的能量分布,在理论上不能十分精确地描述其能量分布,而目前还没有找到哪一种探测器或探测方法对不同能量粒子具有完全相同的灵敏度响应(能量响应),探测获得的信号总在一定程度上偏离真实信号,获取探测过程更为平坦的能量响应,探测灵敏度精确刻度成为重要研究内容;c. 射线能谱测量。射线强度探测存在的不确定度,脉冲宽度的存在,以及电流型测量的积分性质本身的局限,使十分精确地测出辐射场粒子的能量分布变得困难。3类测试量相互制约和影响,同时,辐射场通常是脉冲中子、伽马射线、X射线、带电

粒子和电磁脉冲等的混合辐射场,它们与探测系统作用而形成干扰元素,使得探测特定能段的某种射线束参数变得困难和错综复杂。

2) 按照待测粒子种类划分。脉冲辐射探测可分为脉冲中子束探测、脉冲伽马射线束探测、脉冲X射线探测、核反应活性区图像探测、带电粒子束流探测等,其中包括脉冲强度谱测量、时间谱测量、能量谱测量等;按照测量性质,又可分为相对测量和绝对测量两大类。相对测量只给出脉冲波形的相对强度分布,例如,时间谱和能量谱测量,它们对强度的绝对值没有要求;而绝对测量则要求给出待测物理量的绝对值,例如绝对强度的测量,脉冲所包含粒子数目的测量等。与相对测量比较,绝对测量要求探测器和测试系统的性能精确刻度,测量中须消除各类干扰。

脉冲中子束的探测,分为裂变中子和聚变中子参数测量,包括脉冲中子时间谱、能谱、脉冲过程的粒子数目测量等。伽马射线束探测包括裂变伽马、聚变高能伽马参数的测量,主要对象是伽马射线时间-强度谱测量。

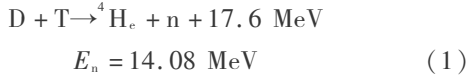
### 2.1 脉冲中子参数探测

脉冲中子束探测可以给出核反应的时间历史、反应总量、反应区温度等重要信息,在核能释放和核反应研究中占有独特地位。中子及其诱发裂变现象的发现,为人类利用核能开辟了途径。中子轰击 $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 等重核产生裂变,同时又产生新的中子,链式裂变反应使系统内的中子不断增殖,数量以指数方式迅速增加。裂变反应系统内的中子数目随时间的变化关系,是指示核反应动力学的重要参量;而裂变反应过程产生的总中子数目,直接指示裂变反应总量,是裂变反应过程机理研究的重要参量。氘氚聚变的直接产物是14 MeV高能中子,高能中子数目随时间的变化关系,以及系统在聚变过程中释放的高能中子能谱、数目,可以指示热核反应离子温度信息和反应总量。因此,在核裂变、聚变反应和反应堆运行过程中,中子扮演着十分重要的角色。不同能量的中子存在飞行时间弥散,使得某些时间过程测量转向伽马射线束。而中子是核裂变反应过程最直接的参与者,将中子时间谱测点邻近核装置或采用准单能中子探测技术,就可能消除中子飞行时间弥散影响。探索新的脉冲中子探测方法和技术原理,可使中子测量提供核反应的时间过程、反应总量、离子温度等丰富的诊断信息。

### 2.1.1 聚变中子能谱测量<sup>[11,12]</sup>

测量聚变中子能谱,可以得到核反应区离子的温度信息。

在聚变装置中,D,T离子聚变产生高能中子:



当反应过程处于热动平衡状态时,反应区中的氘、氚服从麦克斯韦分布。由于 Doppler 效应,氘氚聚变过程发射的聚变中子不是单能的,而是呈有一定半宽的高斯型分布。14.08 MeV 聚变中子的 Doppler 展宽与氘氚区的燃烧温度  $T$  有关,可用下式描述:

$$N(E_n) = N_0 \exp\left[-\frac{(E_n - 14.08)^2}{0.01131T}\right] \quad (2)$$

式中, $E_n$  为聚变中子能量,MeV; $N_0$  为能谱峰值中子数; $T$  为氘氚离子温度,keV。

根据中子飞行时间相对论公式

$$t_n = (L/c) \times \left[1 / \left(1 - (E_0 / (E_0 + E_n))^2\right)^{-\frac{1}{2}}\right] \quad (3)$$

可由出壳中子能谱  $F(E_n)$  得到测点  $L$  处的飞行时间谱  $\Phi(t_n)$

$$\Phi(t_n) = F(E_n) \times \left[E_0 / \left(1 - (L/ct_n)^2\right)^{\frac{3}{2}}\right] \times L^2 / t_n^3 c^2 \quad (4)$$

或由

$$E_n = E_0 \left(1 / \left(1 - (L/ct_n)^2\right)^{-\frac{1}{2}} - 1\right) \quad (5)$$

将测点  $L$  处的飞行时间谱  $\Phi(t_n)$  转换为泄漏超高能中子能谱  $F(E_n)$

$$F(E_n) = \Phi(t_n) \times (E_0^2 / [E_0 + E_n]^3) \times t_n^3 c^2 / L^2 \quad (6)$$

式中, $t_n$  为中子飞行  $L$  距离所需的时间,ns; $E_n$  为中子能量,MeV; $E_0$  为中子的静止能量,939.55 MeV; $L$  为飞行距离,m。

式(3)和式(5)将中子的飞行时间与能量相对应。因而由测点飞行时间谱可以求得出壳中子能谱,或由出壳中子能谱推出测点飞行时间谱,这就是脉冲中子能谱测量中的飞行时间方法。测出高能中子能谱半宽度  $\Delta_{1/2}$  后,通过下式可获得离子温度  $T$ :

$$\Delta_{1/2} = 0.177 \sqrt{T} \quad (7)$$

式(7)中, $\Delta_{1/2}$  的单位为 MeV,温度  $T$  的单位为 keV。

采用时间和能量可分离变量的方法将测点的飞行时间谱  $\Phi_c(t)$  看作源中子发射时间谱  $I_n(t)$  和能量飞行时间展宽谱  $\Phi_n(t)$  及测试系统时间响应  $G(t)$  的卷积:

$$\Phi_c(t) = \Phi_n(t) \times I_n(t) \times G_n(t) \quad (8)$$

在测试中,为了获得高精度的能谱数据,要求测定尽量远离辐射源,使得不同能量中子的飞行时间展宽  $\Phi_n(t)$  远大于中子发射时间谱  $I_n(t)$  和测试系统时间响应  $G(t)$ 。这样,对式(8)实施反卷积可以得到  $\Phi_n(t)$ ,进而由式(4)推得中子能谱  $F(E_n)$ 。

采用反冲质子 PIN 探测系统、同轴法拉第筒探测系统、无源介质快中子探测器和  $n-\gamma$  分辨快中子探测系统进行中子能谱测量。

### 2.1.2 脉冲裂变中子参数测量

对脉冲裂变中子时间-强度谱的精确测量,可以获得核反应随时间变化过程细节和裂变总量信息。

在裂变过程中,中子的增殖过程按下式进行:

$$N_n(t) = N_n(0) \exp\left(\int_0^t \alpha_n(t) dt\right) \quad (9)$$

式(9)中, $\alpha_n(t)$  是反应核反应动力学过程的特征参量<sup>[8]</sup>,通常称为链式反应的中子增殖时间常数。要获取核反应过程的  $\alpha_n(t)$ ,需要精确测定反应中产生的裂变中子数目随时间变化的时间谱波形。

裂变中子能量分布宽,0~15 MeV 都有,裂变中子时间谱探测,要求探测器对于能量相差几倍甚至几十倍的中子要有几乎相同的探测效率或灵敏度,才能实现“数个数”的中子时间-强度测量和对时间-强度谱积分的中子总数测量。

裂变中子时间谱测量有时强度范围跨度很大,研究裂变反应的起始过程需要测量低端强度接近统计起伏极限的中子束流,探测系统需要满足灵敏度和测量统计性要求。

核反应释放的辐射场通常是中子和伽马射线的混合辐射场。在这类辐射场中探测中子或伽马射线,探测系统都需要具有  $n/\gamma$  分辨本领,以消除彼此的干扰。

用于裂变中子参数的探测器,通过灵敏度标定,可提供核反应过程释放的裂变中子数目。

$$N_{\text{total}}(\text{中子数目}) = \int_{t_1}^{t_2} N_n(t) dt \quad (10)$$

### 2.1.3 聚变中子时间谱测量

聚变中子时间谱携带聚变过程起始过程和发展历史的信息。为减少不同能量中子飞行时间弥散对时间波形的畸变,测点或邻近辐射源,或仅探测能段  $\Delta E$  内的准单能中子。同时,聚变反应过程通常与裂变过程同时发生,因而,聚变中子测量受到裂变中子、散射中子、先期到达的伽马射线束的干扰。由于

束流强度高、信号快、干扰强,要求解决超强超快束流的测量与抗干扰问题。在探测系统选择上,需要大线性电流输出、亚纳秒时间响应、高卡阈和很强抗辐射干扰能力的探测器。聚变中子时间谱测量可采用多种手段。1) 直接测量方法。直接测量方法可采用如下两条技术路线。a. 采用介质型中子探测器或同轴法拉第中子探测系统,将其放置在脉冲源附近,直接测量脉冲中子信号,探测器设置 11 MeV 以上的中子阈值。b. 闪烁探测方法。将超快薄膜闪烁体邻近核装置,闪烁体发出的荧光通过光导传至远处的超快光电器件实施探测。这种方式既可消除中子飞行时间弥散的影响,光电器件的后置又能够最大程度地抑制散射干扰。2) 间接测量方法。例如通过 BeO 靶将聚变中子时间波形转换为伽马射线时间波形<sup>[8]</sup>,并将信号传自远处测量。这种方法利用了伽马射线传播没有飞行时间弥散的优点,但 BeO 对中子响应的阈值约 6~7 MeV,对裂变和散射中子的高卡阈测量较难实现。

直接测量方法获得的聚变中子时间谱测试波形见图 1 所示。图中,第一个脉冲波形是伽马信号,第二个脉冲波形是高能中子信号,信号清晰直观。

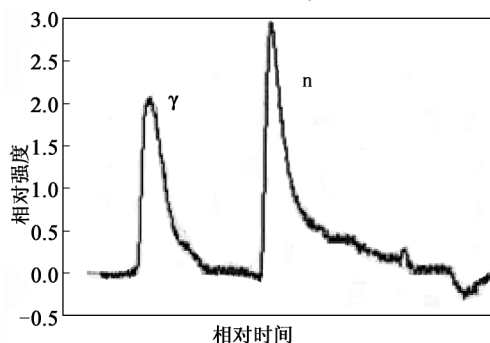


图 1 聚变中子时间谱测试波形示意图

Fig. 1 Schematic of fusion neutron time spectrum waveform with gamma-ray

## 2.2 脉冲伽马射线束测量

核反应产生的脉冲伽马射线束,不存在飞行时间弥散,在裂变过程的某些阶段,伽马射线束的增殖规律与式(9)基本相同。因此,伽马射线时间-强度谱测量在一定条件下可用于获取核反应过程的中子增殖时间常数  $\alpha_n(t)$ <sup>[9]</sup>。伽马射线以光速飞行,总是先于中子到达测点,因而受中子的干扰相对较小。但对于较宽的脉冲辐射场,例如,脉冲半宽度达到 ms 级的脉冲反应堆辐射场,中子、伽马将完全混合,测量中必须设法消除中子干扰。

伽马射线时间-强度谱测量,需要获取很宽强度范围的伽马光子数目随时间的变化关系。高灵敏度的伽马射线探测器,通常是能量收集型的,探测器对射线能量很敏感,而伽马数目的测量,又要求其对不同能量的伽马量子有相同的探测灵敏度,即所谓平坦的能量响应,这是一个很难完全解决的技术难题(中子也有类似问题),因而研究中要寻找新的探测技术原理,不断改善探测过程的能量响应,以获得高质量的测试数据。同时,探测器对脉冲的时间响应,探测灵敏度,γ/n 分辨能力都要满足测量相关要求。在脉冲强度很低时,探测器需有良好的统计性。

伽马波形强度的绝对测量,探测器灵敏度要进行仔细标定。

## 3 脉冲辐射探测系统

测量复杂混合场中脉冲射线时间-强度分布、能量分布等参数,探测器(系统)是关键,它能够区分待测的射线种类,决定测试信号质量。不同辐射环境,不同性质脉冲裂变中子、聚变中子、伽马射线束的探测,需要性能不同的脉冲辐射探测器(系统)。

脉冲辐射场探测的难度主要体现在两类问题上。1) 复杂混合场某指定射线参数的精确测量。例如,高强度中子背景下弱聚变中子的探测;裂变中子、散射中子、强伽马背景下聚变中子的探测;裂变伽马背景下裂变中子的探测;散射中子、伽马背景下弱伽马射线束的探测;强低能伽马背景下极弱高能伽马射线的探测等,这类探测遗留的某些技术难题,至今未能彻底解决。2) 射线强度绝对测量。绝对测量要准确给出射线束流参数的绝对量。这不仅要求对探测灵敏度实施绝对刻度,而且,复杂的能谱分布要求探测器有很平坦的能量响应,实际上很难完全做到;在极其复杂的辐射环境中,探测系统对不同射线束直照又都或多或少存在响应(直照灵敏度),这使得完全消除待测束流外的所有其他干扰成为难题。解决这些难题的根本出路是研制性能优良的探测器,而探索、寻找新的探测技术原理是关键所在。同时,测量方法、测试布局也是实施脉冲辐射探测的重要环节。

### 3.1 描述脉冲辐射探测系统的性能参数

为适应不同环境脉冲辐射参数的探测,需要研制不同性能的探测器(系统)<sup>[13]</sup>。表征探测系统辐射特性和综合性能,采用下列参数描述。

1) 探测灵敏度。探测器在脉冲射线束作用下产生的脉冲电信号输出与其对辐射响应的灵敏度有关。探测器对辐射的灵敏度定义为单个粒子在探测器单位灵敏面积中产生的脉冲电信号输出(国际单位  $C \cdot cm^2$ )。

2) 时间响应。脉冲辐射探测器(系统)的时间响应定义为其对单位  $\delta$  脉冲射线源的输出响应。

3) 最大线性电流。探测系统输出的脉冲电信号与辐照的射线束强度在一定范围内具有线性关系,当射线强度增加到足够大时,辐射诱发的电场将导致系统电流输出开始偏离线性范围。此时,探测系统输出的电流定义为系统的最大线性电流输出。

4) 能量响应。探测器的能量响应是指其探测灵敏度与射线束能量的依赖关系。

5) 探测器的粒子鉴别能力。粒子鉴别能力是指探测器在混合场中挑选出待测粒子的能力或对待测粒子和其他粒子的分辨能力,包括卡阈能力。

6) 探测统计性。在低强度脉冲射线测量中,测量的统计性对测量数据的质量有直接的影响。测量的统计性主要依赖于射线与探测单元作用的概率和电荷收集效率。

7) 群探测的兼容性。研究瞬态核反应过程机理需要进行脉冲射线的群探测。采用群探测系统进行分析测量时,必须确保单个探测器在群探测中的兼容特性。所谓群探测的兼容性,是指单个探测器在实施对束流的探测过程中,对后续或周围其他探测器或系统同时实施束流探测的影响程度。

8) 抗辐射干扰能力和抗电磁干扰能力。探测器的抗辐射干扰能力主要是指其对来自辐射通道的待测信号以外的散射中子、散射伽马射线和电磁脉冲的敏感程度。

9) 工作条件依赖性与可靠性。探测器系统的工作特性包括探测器对工作环境的依赖和工作条件的要求。探测器对工作条件的依赖性愈大,要求愈高,其使用就愈困难,可靠性就愈差。

10) 性能稳定性和快速反应能力。

### 3.2 脉冲裂变中子探测系统

裂变中子探测系统用于核裂变反应脉冲裂变中子、伽马混合辐射场参数的探测,通过对测量结果的分析研究,以实施对裂变反应过程性质的诊断。为满足国家相关科学技术领域研究的需要,发展了裂变中子参数探测系统和裂变伽马探测系统,它们具有高探测灵敏度、平坦能量响应、 $n/\gamma$  分辨能力,性

能可在当前实验室条件下进行刻度,综合性能较优异,其探测的裂变中子注量在  $10^2 \sim 10^{15} n(\gamma)/cm^2$  范围。

#### 3.2.1 高灵敏裂变中子探测系统<sup>[14,15]</sup>

采用能量收集和狭缝结构方式是实现高灵敏裂变探测的技术关键,选用<sup>235</sup>U等材料作裂变靶可获得较理想的能量响应。狭缝外延式高灵敏裂变中子探测系统结构如图2所示。该探测系统由狭缝准直器,裂变靶、探测器等组成。它采用收集裂变碎片能量( $\sim 10^7 e$ /碎片)作为探测原理,比国外报道的收集裂变碎片产生的电子( $\sim 300 e$ /碎片)为探测原理的裂变箔<sup>[8]</sup>探测器高4个量级以上。该系统结构紧凑,采用多探测器组合结构,最高灵敏度可达  $10^{-16} C \cdot cm^2$  以上,可覆盖6个量级的量程范围。

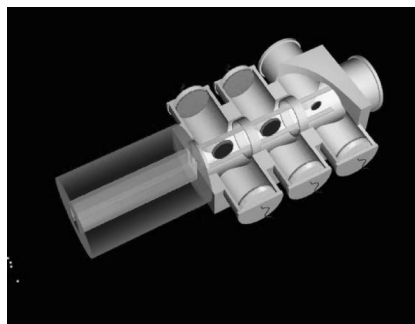


图2 裂变中子探测器系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the fission neutron detection system

#### 3.2.2 闪烁薄膜中子探测器<sup>[16]</sup>

探测器的薄膜探测原理在获得高裂变灵敏度的同时,可解决闪烁探测的  $n/\gamma$  分辨难题,并能大幅度改善对中子的能量响应。采用有机闪烁体的闪烁薄膜中子探测器结构原理如图3所示。该探测器由有机薄膜闪烁体,光电器件和偏转磁场等组成。以有机薄膜闪烁体作为射线探测元件,并垂直于束流方向放置,光电器件偏离辐射通道布放,实现了有机闪烁探测器对裂变中子的探测灵敏度远高于对伽马射线的探测灵敏度,满足了  $n/\gamma$  分辨和能量响应要求。选用不同性能的光电器件和薄膜闪烁体组合,其时间响应达亚纳秒级,最高中子灵敏度  $10^{-12} C \cdot cm^2$ ,测量范围达9个量级以上,是裂变中子时间谱和总数探测较为理想的探测器。

#### 3.2.3 夹层式统计增强型伽马探测器<sup>[17~19]</sup>

探测器的阵列探测原理解决了低强度探测的灵敏度和测量统计性困难。夹层式统计增强型伽马探测阵列结构原理图见图4。该探测器采用尺寸为

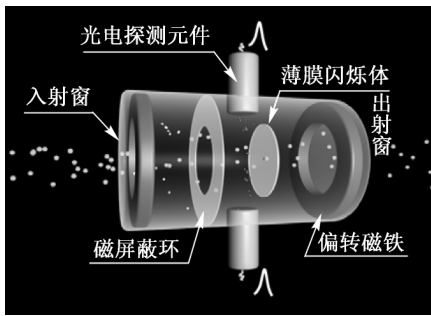


图3 闪烁薄膜裂变中子探测器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the film scintillator neutron detector

φ60,灵敏区厚度为约 1 000 μm 的电流型 Si - PIN 探测器与聚四氟乙烯介质构成夹层式统计增强型探测结构,在裂变中子背景下探测伽马粒子数目,具有 γ/n 分辨能力、较平坦的能量响应和测量统计性。由于信号是多探测器并联输出,线性电流可达 100A 以上,采用单信道脉冲放大技术,灵敏度可达  $10^{-11} \text{ C} \cdot \text{ cm}^2$ ,单个探测器可覆盖 6 个量级的量程。

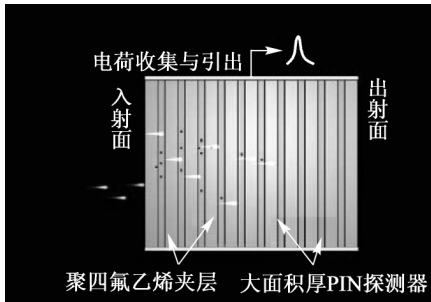


图4 夹层式统计增强型伽马探测阵列结构图

Fig. 4 Cross - sectional view of the gamma - ray detecting array

如果采用聚乙烯介质做夹层,该结构可形成高灵敏的聚变中子探测器。采用加法电路输出,探测器在获得高灵敏度和测量统计性的同时,其时间响应与单个 Si - PIN 基本一致,适用于低强度聚变中子时间 - 强度谱测量。

如果选择电流型碲锌镉 (CdZnTe) 探测器和 CVD 金刚石薄膜探测器作为探测元件,可以获得更为优异的物理性能。

### 3.2.4 ICI 伽马探测器<sup>[20,21]</sup>

基于康普顿原理,介质型、薄探测介质和高灵敏度的 ICI 伽马射线探测器,可满足复杂环境较高强度伽马射线的测量要求。ICI 伽马探测器的结构原理见图 5 所示。该探测器以康普顿散射作为基本原理,探测单元采用薄膜绝缘体 (insulator) - 导体 (conductor) - 绝缘体 (insulator) 结构,不需要真空

和高压可以正常工作。采用低原子序数作为探测介质,并选择适当的厚度,能够获得比传统真空<sup>[22]</sup>和介质康普顿探测器<sup>[23]</sup>更高的伽马灵敏度和较好的能量响应。设置前后偏转磁场,可抑制伽马射线在入射窗作用产生的康普顿电子飞行中在电荷收集极感应的负冲信号。该探测器具有 50 倍以上的超高 γ/n 分辨能力,灵敏度可达  $10^{-19} \text{ C} \cdot \text{ cm}^2$ ,探测介质厚度可小于 2 mm,对辐射场扰动和散射很小,具有良好的群探测兼容性。

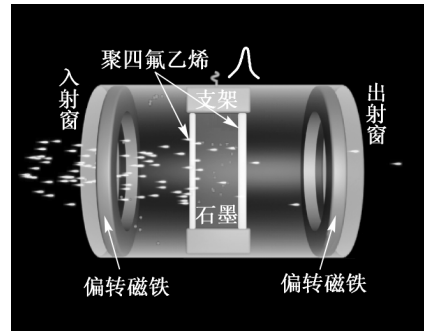


图5 ICI 伽马探测器结构原理图

Fig. 5 Schematic diagram of ICI gamma - ray detector

### 3.3 脉冲聚变中子探测系统

脉冲聚变中子探测系统是指专门用于探测氘氚聚变过程产生的 14 MeV 中子的探测系统,包括中子能谱和数目测量,超高能中子测量,聚变中子时间谱测量的探测系统。由于辐射场特性和测试环境不同,对探测器性能要求也不同。

聚变中子探测原理大致可分为 4 类。a. 以收集反冲质子能量和电荷作为探测原理的反冲质子探测系统;b. 以收集二次电子作为探测原理的探测系统:n - γ 分辨快中子探测系统,裂变箔探测器;c. 以收集反冲质子和二次电子作为探测原理的探测器:无源介质快中子探测器和集电型高 n/γ 分辨聚变中子探测器等;d. 以探测裂变过程中产生的伽马量子作为探测原理的裂变伽马探测器。这些探测器具有不同的物理性能,可满足不同性质辐射场聚变中子参数的测量。

#### 3.3.1 反冲质子聚变中子探测系统<sup>[24]</sup>

高能中子探测的反冲质子探测系统测量原理如图 6 所示。高能中子在聚乙烯转换靶上产生的高能反冲质子,经卡阈后,由探测元件收集。探测元件轴心与中子束流夹角为 45°,不同于国外 30°。通常选用 PIN 探测器 (见图 7)、同轴法拉第筒 (F. C, 见图 8) 作探测元件,也可选择 CVD 金刚石薄膜探测器或

闪烁探测器等探测元件。不同的探测元件构成的探测系统,具有不同的灵敏度、时间响应、能量响应、抗辐照干扰能力。如果探测元件的灵敏度可以刻度和具有快的时间响应,则测量能够给出中子时间-强度的绝对量,对波形积分可得到波形包含的高能中子数目。采用 Si-PIN 探测器收集质子能量,其典型中子灵敏度为  $10^{-18} \sim 10^{-20} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ ,采用同轴 F.C 收集反冲质子电荷,其典型中子灵敏度为  $10^{-23} \sim 10^{-25} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ ,采用闪烁探测器作为探测元件,可以获得  $10^{-14} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$  以上的高中子灵敏度,满足不同强度聚变中子束流参数(能谱、数目、时间谱)的探测要求,工作时需要提供真空和高压。

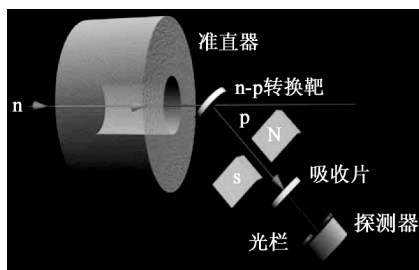


图 6 反冲质子探测系统测量原理图

Fig. 6 Configuration of a recoil-proton neutron detecting system



图 7 收集质子能量的电流型 PIN 探测器

Fig. 7 Current-mode PIN detector for proton energy collection



图 8 收集质子电荷的同轴法拉第筒结构

Fig. 8 Coaxial Faraday cup for neutron detection

早期主要采用 Si-PIN 探测器和同轴 F.C 作探测元件。Si-PIN 探测器时间响应在  $5 \sim 10 \text{ ns}$ ,用作时间谱测量不是很理想,同时,在复杂环境中对散射中子、伽马射线有较灵敏的直照响应,探测器件的 PN 结容易老化,暗电流较大等,适合低强度慢信号和远距离测量;同轴法拉第筒(F.C)探测器时间响应快( $\sim 1 \text{ ns}$ ),但灵敏度很低,在现有脉冲源上无法实施标定,不适合于中子数目的绝对测量,同时为抑制二次电子的影响,要求提供  $\sim 3000 \text{ V}$  左右的电压,这导致在某些环境中测量时系统线性电流小,信噪比不够高等,适合于大束流、快信号和近距离中子束测量。

提升反冲质子探测系统性能的主要途径是创新探测元件。图 9 是研制的具有很强抗辐照能力,快时间响应的金刚石薄膜探测器,其抗辐照能力比 Si-PIN 高  $2 \sim 3$  个量级,时间响应快很多。图 10 是设计的二次电子补偿同轴 F.C,它具有大的线性电流输出和绝对测量性能。通过二次电子的补偿解决了反冲质子进入收集极表面时的电子“丢失”问题,从而明显增大了系统的线性电流输出。



图 9 CVD 金刚石薄膜探测器<sup>[25]</sup>

Fig. 9 CVD film detector

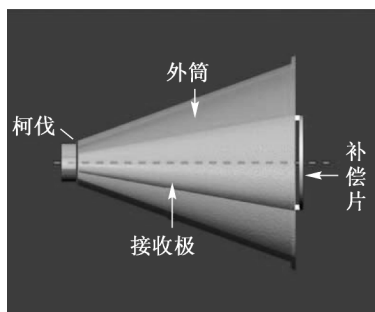


图 10 二次电子补偿同轴法拉第筒结构<sup>[24]</sup>

Fig. 10 Coaxial Faraday cup with second electrons compensation

### 3.3.2 n- $\gamma$ 分辨快中子探测系统<sup>[26]</sup>

以二次电子电荷收集作为探测原理的 n- $\gamma$  分

辨快中子探测系统,其结构原理如图 11 所示。该探测系统以收集中子在聚乙烯转换靶上产生的高能反冲质子在中间极板表面诱发的二次电子电荷作为探测原理,其典型的中子灵敏度在  $10^{-21} \sim 10^{-22} \text{C} \cdot \text{cm}^2$ ,可以填补反冲质子 PIN 探测系统和同轴 F.C 探测系统的灵敏度空缺。该系统具有 10 倍

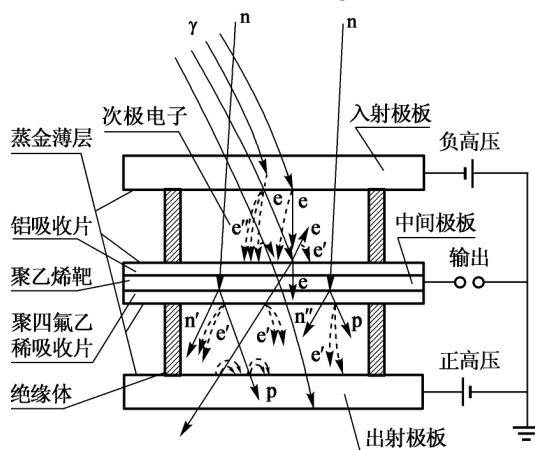


图 11 n- $\gamma$  分辨快中子探测系统结构原理图

Fig. 11 Schematic of the fast - neutron detecting system with n -  $\gamma$  discrimination

左右的本征 n/ $\gamma$  分辨能力,线性电流在 20 A 左右,时间响应约 1 ns。该系统工作时需要提供  $\sim 10^{-2}$  Pa 的高真空和  $\pm 3000$  V 的高压,可用于高能中子能谱和数目测量。

### 3.3.3 无源介质快中子探测器<sup>[27,28]</sup>

探测器对真空和高压的依赖性制约了其物理性能和实际应用,促使了对介质型探测技术原理研究和探测器研制。无源介质快中子探测器结构和探测原理如图 12 和图 13 所示。该探测器以探测中子在转换靶上产生的高能反冲质子及其在电荷收集极表面诱发的二次电子作为探测原理,不需要真空和高压可以正常工作。表征高能质子在介质表面诱发二次电子产额是研制中的难点和关键技术所在。研制中,根据高速带电粒子在介质表面诱发二次电子的理论,选择合适的探测介质,实现了高能中子的介质探测原理。该探测器具有非常优异的物理性能,具有亚纳秒超快时间响应,100 A 以上大线性电流输出,11 MeV 的中子高卡阈能力,很强的抗辐射干扰能力,其高能中子灵敏度  $10^{-20} \sim 10^{-22} \text{C} \cdot \text{cm}^2$ , n/ $\gamma$  分辨在 10 倍左右,可用于复杂混合场高能中子能谱、时间谱和数目等参数的测量。

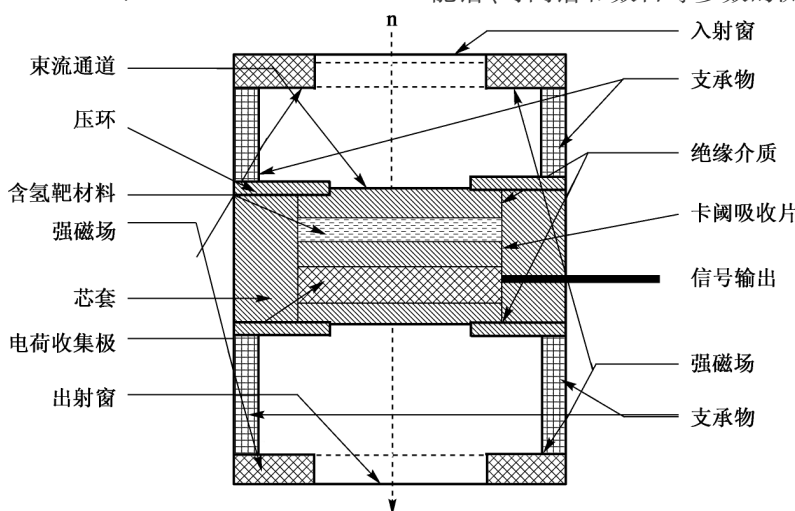


图 12 无源介质快中子探测器结构示意图

Fig. 12 Cross - sectional view of the medium - type neutron detector

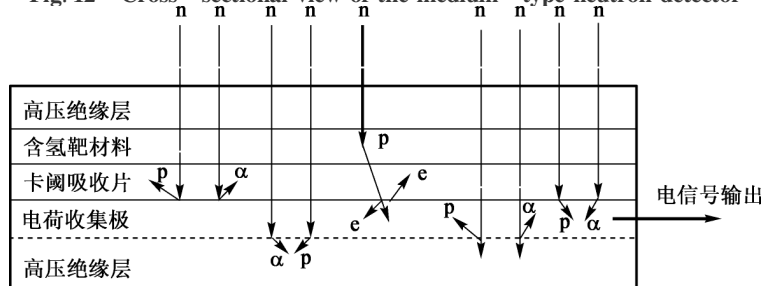


图 13 无源介质快中子探测器探测原理示意图

Fig. 13 Schematic of the detection principle of the medium - type neutron detector



### 3.3.4 集电型高 $n/\gamma$ 分辨快中子探测器<sup>[29]</sup>

强伽马射线背景下低强度聚变中子时间谱测量,要求研制集电型,具有高灵敏度、超高  $n/\gamma$  分辨快中子探测器。图 14 是该探测器探测单元结构图,它由 15 个左右的独立探测灵敏单元并联而成,每个探测单元的基本原理与无源介质快中子探测器相同(见图 13)。这种多灵敏探测单元组合结构,可实现聚变中子的探测灵敏度的叠加,同时,通过结构参数选择,使各探测灵敏单元的伽马射线响应相互平衡和抵消,进而获得超高的  $n/\gamma$  分辨本领。该探测器中子灵敏度比无源介质快中子探测器高 10 倍左右,探测单元采用低原子序数材料,伽马射线与中间各单元作用产生的康普顿电子能够达到相互平衡,仔细选择第一探测单元和最后探测单元的结构参数是实现高  $n/\gamma$  分辨的关键所在。该探测器具有 100 倍以上的超高  $n/\gamma$  分辨本领,  $10^{-19} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$  的高中子灵敏度(相对于电荷收集型探测器),时间响应为亚纳秒级,线性电流很大,设计用于低强度、强伽马干扰环境下大动态聚变中子时间谱、强度等参数的测量。

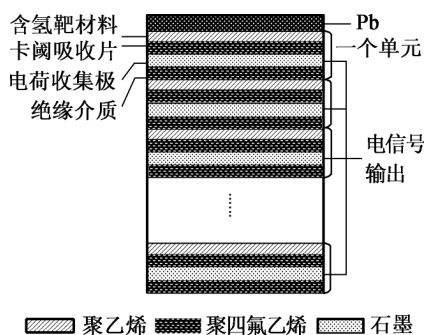


图 14 集电型高  $n/\gamma$  分辨快中子探测器结构原理图

Fig. 14 Structure of the multi-unit medium-type neutron detector

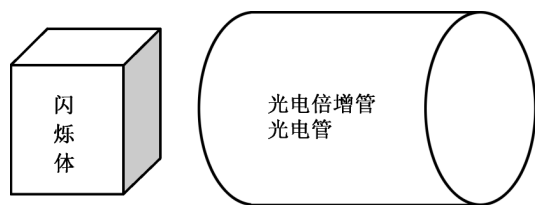


图 15 闪烁体 + 光电器件构成的闪烁探测器结构  
Fig. 15 Configuration of a scintillator detector

### 3.4 脉冲伽马探测系统

用于伽马射线探测的探测器大致可以分为 2

类:1)闪烁体 + 光电器件构成的闪烁探测器。这类探测器是能量收集型探测器,灵敏度高,适合低强度射线束参数探测。2)基于康普顿效应的探测器:真空康普顿二极管和介质康普顿探测器。这类探测器以收集康普顿电子的电荷作为探测原理,收集过程没有信号放大作用,灵敏度较低。裂变、聚变反应辐射场的伽马射线能谱都很宽,强度变化范围极大,宽能谱大动态的时间-强度谱测量,要求获得整个反应过程伽马数目随时间变化的精确数据,因此,实现伽马射线探测平坦能量响应,同时具有高灵敏度、 $\gamma/n$  分辨、超快响应的技术原理是研究的重要方向。

#### 3.4.1 闪烁体伽马射线探测器

闪烁体伽马射线探测器有闪烁体和光电器件组成,其结构如图 15 所示。有机闪烁体有 ST401, BC422Q 等,无机闪烁体有  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{CeF}$ ,  $\text{LSO}$ ,  $\text{ZnO:Ga}$ (见图 16)等。光电器件有光电倍增管(PMT)和光电管,光电倍增管具有信号放大作用,而光电管则没有。选择不同的闪烁体和光电器件藕合,可以构成性能完全不同的伽马射线探测器。闪烁探测器具有很高的探测灵敏度。射线与闪烁体作用产生荧光,光电器件收集荧光转化为脉冲电信号的过程中,都存在信号放大作用,是目前探测灵敏度最高的探测方法之一。闪烁体分为有机闪烁体和无机闪烁体,选用有机闪烁体作为信号探测元件时,探测器对中子和伽马射线都很敏感。采用无机闪烁体作为荧光转换元件,可以抑制中子的响应,实现  $\gamma/n$  分辨,但闪烁探测器的  $\gamma/n$  分辨能力通常小于 20 倍。

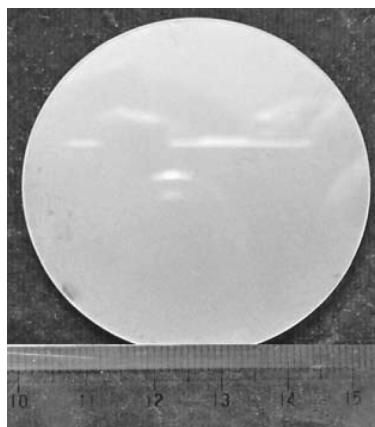


图 16 具有 100 ps 级超快时间响应的  $\text{ZnO:Ga}$  超快闪烁体

Fig. 16 Sample of  $\text{ZnO:Ga}$  scintillator with 100ps time response

### 3.4.2 基于康普顿散射和闪烁探测方法的新型伽马射线探测器

最为典型的基于康普顿效应的伽马探测器有真空康普顿探测器(见图 17)介质康普顿探测器(见图 18)<sup>[22, 23, 30, 31]</sup>。真空康普顿探测器需要提供高真空环境,伽马灵敏度比介质康普顿低,发射极厚度在厘米量级。介质康普顿以吸收伽马射线作为基本探测原理,介质厚度可达 10 cm,对辐射场扰动大,在群探测中容易形成干扰源。康普顿探测器能够获得较高的  $\gamma/n$  分辨,但灵敏度很低,适合超强流脉冲伽马射线探测。

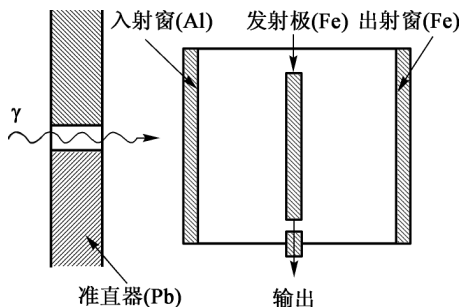


图 17 真空康普顿探测器结构

Fig. 17 Cross-sectional view of the vacuum Compton diode

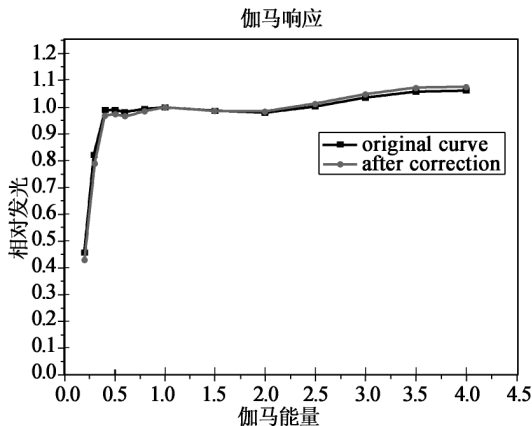
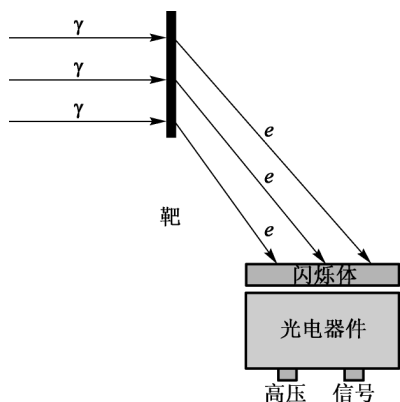


图 19 一种新型的伽马射线探测技术原理(左),能够同时获得高灵敏度、 $\gamma/n$  分辨和平坦的能量响应(右)

Fig. 19 A novel detecting principle for gamma ray detection (Left), based on which high sensitivity and flat energy response are obtained (Right)

### 3.5 探测系统性能研究与刻度

测量脉冲辐射场参数,首先要研究和确定探测系统的物理性能。通常采用理论和实验相结合的研究路线。理论研究通常用于获得灵敏度、时间响应等随探测器结构参数变化的相对曲线,对于物理思路清晰,作用过程简单、核数据准确的探测过程,也

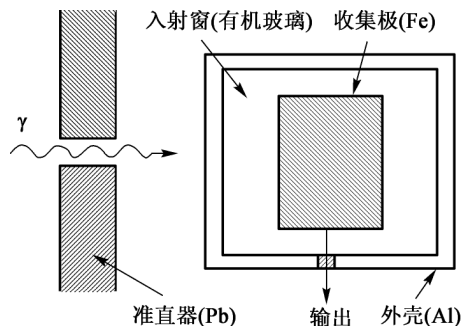


图 18 典型的介质真空康普顿探测器结构

Fig. 18 Cross-sectional view of the dielectric Compton detector

图 19 所示的探测技术原理为<sup>[32]</sup>,伽马射线与物质相互作用产生康普顿电子,在偏离束流方向上,用闪烁体收集散射电子的能量,这种方法,将康普顿效应电荷发射和闪烁体能量收集方法结合,不仅可以同时获得高探测灵敏度、 $\gamma/n$  分辨,更大的收获是能够获得较理想的能量响应。采用 W 作靶,ST401 闪烁体作探测介质,所设计的探测器在 0.4 ~ 4 MeV 范围内能量响应很平坦,在 0.4 ~ 2.5 MeV 区间,能量响应不平坦度好于 5%,探测器在 0.4 ~ 4 MeV 能量范围,灵敏度变化小于 15%,十分理想,是强中子背景下伽马射线时间-强度谱测量较理想的探测方法。

可以获得其绝对值。但获取探测系统真实准确的物理性能参数,实验研究是不可避免和必须的。确定闪烁探测器、反冲质子探测系统、裂变探测系统以及其他探测系统的中子、伽马射线灵敏度、能量响应和时间响应,需要进行实验研究和标定工作。探测器的时间响应通常采用可被视为  $\delta$  源的超快脉冲辐射

源,例如皮秒脉冲 X 射线源、高能皮秒脉冲质子源、飞秒脉冲紫外激光源、纳秒脉冲中子、伽马射线源等,中子灵敏度标定最常用的有 14 MeV, 2.5 MeV 高压倍加器中子源和串列静电加速器的(D-D, p-T)中子源,伽马射线灵敏度标定最常用的是<sup>60</sup>Co (1.25 MeV)、<sup>137</sup>Cs (0.66 MeV) 稳态放射源以及通过反应堆跑兔装置产生的系列低强度单能伽马射线源。灵敏度标定过程中要精确测定源的束流强度和能量,解决散射干扰、设备工作时的电磁干扰等问题。射线标定平台的建立对于提高脉冲射线测量水平,特别是绝对测量技术十分重要。

#### 4 脉冲辐射探测的信号传输和记录系统

探测器获得的脉冲信号通过传输系统输入信号记录站。快脉冲信号的传输通常采用高频同轴电缆和光纤完成。采用电缆传输快脉冲信号,需要进行频带补偿。但极零对的电缆频带补偿方法能够获得最高带宽为 300~400 MHz,限制了超快信号的传输。因此,光纤传输成为唯一选择。而采用光纤传输脉冲信号,要进行电光和光电转换。目前,这种转换的线性范围一般为 100 倍左右,有限制了测量的动态范围。采用数字传输技术将是快脉冲信号传输的重要发展方向。

脉冲信号的记录,通常采用宽频高速数字化示波器。目前已有带宽超过 20 GHz,采样率达 20 GHz 的商用产品,完全能够满足当前脉冲辐射探测的需要。

#### 5 脉冲辐射技术发展展望

脉冲辐射探测是核科学的基础技术之一,发展我国的脉冲辐射探测技术,对核武器技术研究、核反应堆设计、大型核科学装置研制与运行、天体物理研究、材料分析和医学应用等都具有重要意义。

随着脉冲辐射源技术的发展以及在科学研究、工业生产和国防中的应用,脉冲辐射探测技术将朝着超快、超强、超高粒子分辨、超高灵敏方向发展。脉冲束包含的粒子数目随时间变化的测量,高精度射线能谱的测量依然是研究的重点。同时,脉冲计数型测量和脉冲电流型测量的有机衔接,具有重要应用价值和学术意义。它需要研究超快脉冲测量技术,例如,记录单个粒子输出的脉冲电流信号在皮秒量级,超快、高灵敏(单光子)探测能够将脉冲计数法和脉冲电流法有机结合,将成为研究的重要方向。

它可为解决一些长期困扰辐射探测中的束流注量低,注量率很高,既不适于传统的计数型测量,也不适于电流型探测的某些技术难题,例如裂变反应过程的临界点测量等,提供新途径。发展亚纳秒、皮秒超快电子学技术、超快闪烁材料制作技术、超快光电器件研制技术,建立系列不同辐射强度、射线能量和脉冲宽度的脉冲中子、伽马射线、X 射线、高能质子束等标定源,尤其是单能强流脉冲辐射标定源,对于提高我国脉冲辐射探测的技术水平,具有紧迫性和基础作用。

#### 参考文献

- [1] 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京:原子能出版社,1981
- [2] 丁大钊. 中子—打开原子能时代的金钥匙[M]. 北京:清华大学出版社,暨南大学出版社,2000
- [3] 丁大钊,叶春堂,赵志祥,等. 中子物理学—原理、方法与应用[M]. 北京:原子能出版社,2001
- [4] 宫本健郎. 热核聚变等离子体物理学[M]. 金尚宪译. 北京:科学出版社,1981
- [5] 胡思得. 核武器研究的未来[J]. 核科学与工程, 2000, 20(3):241-242
- [6] 春雷. 核武器概论[M]. 北京:原子能出版社,2000
- [7] Spallation Neutron Source, Oak Ridge National laboratory,1999
- [8] Ebert P J. A Survey of Nuclear - Explosive Prompt Diagnostics, UCRL-53724
- [9] Knoll G F. Radiation Detection and Measurement [M]. New York; Wiley, 2000
- [10] 刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术[M]. 北京:科学出版社,1994
- [11] 吕敏,乔登江,朱焕金,等. 核爆炸与核试验[M]. 北京:原子能出版社,2004
- [12] 雷巴可夫 BB, 西道洛夫 BA. 快中子能谱测量[M]. 北京:科学出版社,1961
- [13] 阿利比科夫 3 A, 维利坚尼科夫 AI, 科兹洛夫 OB, 等. 脉冲电离辐射探测器[M]. 北京:原子能出版社,1983
- [14] 欧阳晓平,李真富,霍裕昆. 狭缝外延式高灵敏裂变中子探测系统[J]. 物理学报,2005,54(10):4643-4647
- [15] 欧阳晓平,李真富,张国光. 电流型大面积 PIN 探测器[J]. 物理学报,2002,51(7):1502-1504
- [16] 欧阳晓平,李真富,王群书. Thin plastic scintillating foil for measuring pulsed neutron flux in high gamma - ray environment [J]. 高能物理与核物理,2005,29(14):399-403
- [17] 欧阳晓平,王义,曹锦云,等. 高灵敏大面积 PIN 探测器阵列[J]. 核电子学与探测技术,2005,20(5):329-331
- [18] 欧阳晓平,李真富,霍裕昆. 用于脉冲  $\gamma$  强度测量的  $\phi 60$ , 1000 $\mu\text{m}$  PIN 探测器[J]. 物理学报,2007,56(3):1353-1355
- [19] 欧阳晓平,李真富,霍裕昆. 具有统计增强效应的(CF<sub>2</sub>)n-PIN 夹层探测阵列[J]. 高能物理与核物理,2006,30(7):704-708
- [20] 欧阳晓平,张忠兵,王群书,等. 用于脉冲  $\gamma/n$  混合场强度探测的 ICI 探测器[J]. 高能物理与核物理,2006,3(13):232

- [21] Ouyang X P, Zhang Z B, Wang Q S. A novel detector for measuring gamma - ray fluxes in a mixed pulsed neutron - gamma radiation fields[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2007 NS - 54, (4):1239 - 1243
- [22] Ebert P J, Lauzon A F. Vacuum diode detector for measuring high intensity gamma - ray flux[J]. Rev. Sci. Instr., 1967, 38 (12):1747 - 1752
- [23] Fewell T R. Compton diodes; theory and development for radiation detectors [R]. SC - DR - 720118, 1972
- [24] 欧阳晓平. 脉冲辐射场探测系统设计与实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 2008
- [25] 欧阳晓平, 王 兰, 范如玉, 等. 金刚石薄膜探测器研制[J]. 物理学报, 2006, 55(5):2170
- [26] 欧阳晓平, 黄 豹, 曹锦云. n -  $\gamma$  分辨快中子探测系统及应用技术[R]. 中国核科技报告, NIC - 01214, NINT - 001. 北京: 原子能出版社, ISBN 7 - 5022 - 1764 - 9, 1997
- [27] 欧阳晓平, 李真富, 张忠兵, 等. 介质型脉冲中子探测器[J]. 高能物理与核物理. 2001, 25(11):1100 - 1105
- [28] Ouyang X P, Li ZF, Huo Y K. et al. A charge - collection method for measurements of pulsed fast - neutron flux[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2002, 493 - 501
- [29] 黎春华. 集电型高 n/ $\gamma$  聚变中子探测器  $\gamma$  灵敏度研究[D]. 西安: 西北核技术研究所, 2006
- [30] Artuso J, Stevens J. Linearity, Time Domain Reflector Meter and Fourier Analysis Studies of an Evacuated Compton Detector[J]. 1971, 1183 - 2277
- [31] Ebert P J, Lauzon A F. Measurement of Gamma Ray Induced Secondary Electron Current from Various Elements [J]. 1966, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS - 13(2):735 - 741
- [32] 夏良斌, 欧阳晓平, 王群书. 一种新型伽马辐射探测器原理研究[R]. 西安: 西北核技术研究所, 2007

## Development of Pulsed Radiation Detection Technology

Ouyang Xiaoping

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[ **Abstract** ] A direct way to obtain the characteristic information about a nuclear reaction is to detect the rays released from the reaction. To explore the performances of a prompt fission or fusion reaction, sophisticated diagnostic techniques and equipments have been developed and established in China. The diagnostic equipments can measure intense and rapidly changing neutron and gamma rays fluxes in highly mixed neutron-gamma radiation fields. They operate in current mode, and meet a series of special needs in characteristic properties, such as selective radiation sensitivities, a wide dynamic range, a large linearity, a good neutron to gamma ray discrimination, a very fast time response, reliability, etc. Pulse radiation detection has found its various applications in scientific researches, including nuclear reaction mechanism, material analysis, and astronomy study. These diagnostic techniques and their relative detection systems, the design principle, the parameters which are important for current-mode applications are discussed in this paper.

[ **Key words** ] fission reaction; fusion reaction; pulse radiation detection; detecting system; neutron detection; gamma-ray detection