

# ms 级脉冲中子束时间谱探测技术研究

程金星<sup>1</sup>, 朱文凯<sup>1</sup>, 王庆波<sup>2</sup>, 高 纓<sup>1</sup>, 耿 葵<sup>1</sup>

(1. 第二炮兵装备研究院 第六研究所, 北京 100085; 2. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:** 本文概述了一类 ms 级脉冲中子的产生背景、辐射特征及探测难点, 提出了精确测量这类脉冲中子时间谱探测技术, 包括电流型脉冲技术测量方法和能够降低  $\gamma/n$  强度比的层叠式探测器设计方案, 并在脉冲反应堆上对这种探测技术进行了验证性实验, 结果表明: 该技术对 ms 级脉冲中子时间谱的测量精度可达 ns 级。

**关键词:** 电流型脉冲技术; 层叠式探测器; ms 级脉冲中子束; 时间谱; 脉冲反应堆

**中图分类号:** O571.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931 (2010) S0-0453-05

## Study on Detection Technique of ms-Scale Pulsed Neutron Time Spectrum

CHENG Jin-xing<sup>1</sup>, ZHU Wen-kai<sup>1</sup>, WANG Qing-bo<sup>2</sup>, GAO Ying<sup>1</sup>, GENG Kui<sup>1</sup>

(1. Beijing Qinghe Building Number 8, Beijing 100085, China;

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A detection technique to measure the pulsed neutron time spectrum accurately was presented including the current-type pulse measuring technique and the design of overlap-layer detector. Experiments were taken in Xi'an Pulsed Reactor to validate this technique. The results show that the pulsed neutron time spectrum measurement precision can reach ns-scale using the technique presented.

**Key words:** current-type pulse technique; overlap-layer detector; ms-scale pulsed neutron; time spectrum; pulsed reactor

在地球同步静止轨道卫星上精确探测来自近地太空的脉冲聚变中子束时间谱具有重要的现实意义。这类脉冲中子源的能量 (0~28 MeV) 服从高斯分布, 因此, 经过 36 000 km 的输运后, 宽能量分布的中子飞行时间谱严重畸变<sup>[1]</sup>, 对于这类半高宽为几十 ms, 注量率为  $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的脉冲中子束<sup>[2]</sup>的探测, 传统的电流模式测量方法和脉冲计数模式测量方法均不能适用。且在聚变反应中, 还会产生

$\gamma$  射线, 其中,  $\gamma$  射线和中子均是单次脉冲源,  $\gamma$  射线的时间半高宽为 10 ns, 聚变中子的时间半高宽为数十 ms, 存在着较高的  $\gamma/n$  比值, 且  $\gamma$  射线比聚变中子提前到达<sup>[3-4]</sup>, 只要探测器响应足够快, 完全可把两种信号分开。实施和解决这类特殊辐射场的探测技术问题, 须研究、建立新的测量模式。因此, 提出精确测量该类脉冲中子时间谱的电流型脉冲技术测量方法和相应探测器的设计。

## 1 电流型脉冲计数技术

电流型脉冲指采用高速采集仪器（如高速示波器）将与探测器灵敏介质作用的每个入射粒子所产生的微弱电流转换而成的电压脉冲。

### 1.1 电流型脉冲计数基本思想

中子是不带电粒子，探测中子必须测量其次级带电粒子。次级带电粒子将其能量部分或全部沉积于闪烁物质后，再应用闪烁探测器将之转换为电信号。在地球同步轨道卫星上测量到的聚变中子强度将会非常微弱。只要中子辐射场强度足够低（但能从背景中提取出来），就可保证中子到达闪烁探测器后，呈现单个电流脉冲状态，因此，可得到中子电流脉冲到达的时间分布，从而获得微弱中子辐射场的到达时间谱。如果将测量过程划分成等时间间隔的时间段，每段称为1道，并在存储器中对应相应的1个地址。经过多次触发测量，最后对存储在各个地址中的数据进行统计，得到每道的测量值，由此获取以时间为函数的脉冲个数分布曲线，称为中子脉冲时间谱分布。这就是电流型脉冲计数技术。

电流型脉冲计数技术是测量低强度辐射场时间行为的有力工具，能够在一定的动态范围内提供良好的线性和精度。脉冲电流计数方法不仅适合稳态辐射场的测量，也适合辐射场强度随时间变化的脉冲场的测量。在脉冲测量中，辐射脉冲的时间宽度可为 ns 到 s 的量级。

### 1.2 电流型脉冲计数器的基本原理

本文所测的脉冲中子束的宽度约 10 ms，注量率为  $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，到达闪烁体（ $\phi 15 \text{ cm}$ ）约  $10^7 \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$ ，每个入射中子脉冲间隔为 100~0.1 ns，符合快电子学要求，因此，采用高速示波器可实现脉冲信号的记录。

宽脉冲中子束的测量用传统的电流方法难以实现，所以首先考虑将其转化为电压脉冲信号，因电压信号的放大易实现，再用幅度甄别器去掉大部分噪声，这样，可直接用电流型脉冲计数器计数。电流型脉冲计数法中子计数器的一般原理如图 1 所示。

由图 1 可见，光电倍增管是整个计数系统的基础，所测的弱中子源先转化为电压脉冲再经过脉冲放大器，这一过程必须避免噪声淹没有用信号。光电倍增管的性能决定了计数系统

的精度、分辨时间等。因此，要求电流型脉冲计数器的光电转换与增益器件必须有较高的增益、较短的上升时间、最好的量子效应、灵敏的时间分辨率、大的峰谷比、较小的暗电流和噪声，因此，合适的光电倍增管是很重要的。

并不是所有的光电倍增管都适合电流型脉冲计数方法，由于被测中子源的强度极其微弱，输出也只能是单脉冲状态，因此，只有输出脉冲计数率幅度分布曲线上有脉冲峰的光电倍增管（PMT）才可用于脉冲计数器。为利于幅度甄别器的设计，还要有峰谷比很大的光电倍增管，即具有很大的第一倍增级二次电子发射系数。应用闪烁探测器进行探测时，首先要保证信号的计数率比 PMT 本身的暗发射大得多<sup>[5]</sup>。

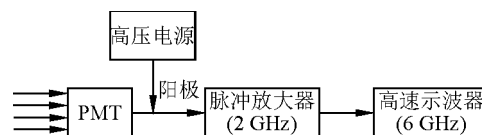


图 1 电流型脉冲计数时间谱测量系统示意图

Fig. 1 Sketch map of current-type pulse count time spectrum measurement system

## 2 探测器设计

前面提出，需探测的辐射场有  $\gamma$  和中子射线存在，且均是单次脉冲源，在应用电流脉冲技术测量中子时间谱时，还需考虑  $\gamma$  射线的测量，为此需设计专门的探测器，用来测量这类特殊的辐射场。

st-401 塑料闪烁体（主要成分为聚苯乙烯）对聚变中子和  $\gamma$  射线同时灵敏，采用中子和  $\gamma$  射线共用探测介质制作光电探测器的方法。但一个基本的事实是：聚变中子注量率较低， $\gamma$  射线注量率相对较高。所以，制作的探测器要对聚变中子信号有所增强，而对  $\gamma$  射线信号有所削弱。光电转换介质则采用如图 2 所示的夹层式设计<sup>[6]</sup>，其中深色夹层部分为聚乙烯，浅色夹层为 st-401 塑料闪烁晶体。

### 2.1 聚变中子的测量原理

来自辐射场的聚变中子（14 MeV）进入到探测器转换介质的第 1 层聚乙烯（ $\text{CH}_2$ ），产生反冲质子，部分质子会穿透聚乙烯到达 st-401 塑料闪烁晶体（ $\text{C}_8\text{H}_8$ ），反冲质子在其中沉积能

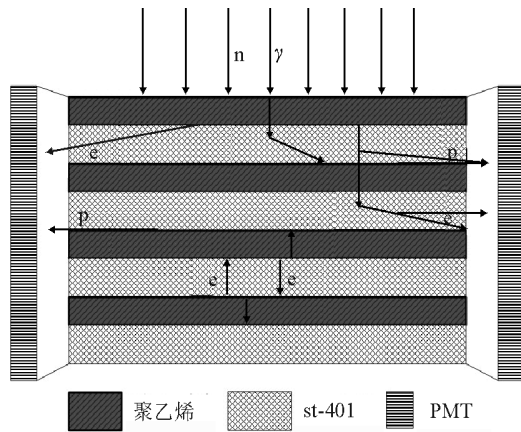


图2 联合探测器的夹层探测介质结构

Fig. 2 Structure of sandwich detector material

量并激发出荧光,而后向侧面穿出,经光电倍增管放大后,假设输出电流为  $I_{pp1}$ 。同时中子到达 st-401 塑料闪烁晶体层后,也产生类似的作用过程,但由于 st-401 含氢量相对聚乙烯较小,故聚乙烯的加入会一定程度上提高中子与氢核的作用几率。在第 1 层 st-401 塑料闪烁晶体中反冲质子产生的荧光电流为  $I_{p1}$ ; 另外,聚变中子在闪烁体中须考虑两个竞争反应:  $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$  (中子阈能为 6.17 MeV) 和  $^{12}\text{C}(n, n')3\alpha$  (中子阈能为 6.17 MeV)。这两个反应的引入会降低对中子沉积能量的发光效率。同样由于该反应引出的电流为  $I_{a1}$ , 于是中子在探测器第 1 层 st-401 塑料闪烁体中的电流输出信号  $I_1$ :

$$I_1 = I_{a1} + I_{pp1} + I_{p1} \quad (1)$$

在设计中,可通过材料夹层厚度的模拟计算,选择合适的夹层组合等技术手段,使式(1)第 3 部分信号  $I_{pp1}$  尽可能增大,比  $I_{a1}$  大很多,这时有:

$$I_1 = I_{pp1} + I_{p1} \quad (2)$$

入射中子进入到第 2 层聚苯乙烯后,中子及相应的出射质子能量有所降低,但仍继续上述同样的相互作用机制,得到第 2 层的电流输出信号  $I_2$  为:

$$I_2 = I_{pp2} + I_{p2} \quad (3)$$

以此类推,假设聚乙烯和聚苯乙烯各有  $n$  层,从而可得探测系统总电流输出信号  $I_{total}$  为:

$$I_{total} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (4)$$

## 2.2 $\gamma$ 射线的探测原理

来自辐射场的  $\gamma$  射线首先同第 1 层聚乙烯作用,在一定程度上衰减并产生电子,由于电子在聚乙烯中的射程较小,只要选择合适的聚乙烯层厚度,这部分电子就会很容易地被阻止在聚乙烯中,所以,这部分电子不能给 st-401 塑料闪烁体发光带来贡献。当  $\gamma$  射线进入到 st-401 塑料闪烁体时,则会发生如上所述的 3 种反应过程产生电子,电子沉积其能量,在晶体中产生荧光。

假设在 st-401 塑料闪烁体中发光的电子由进入的电子和出射的电子能量之差构成(图 2)。现在,对于任意一层发光闪烁体,总会有上下两个面,每个面会有进和出两个方向的电子,所以,对任意一层发光体,入射能量  $E_i$  为:

$$E_i = E_{up,in} + E_{down,in} + E_{up,out} + E_{down,out} \quad (5)$$

式中:  $E_{up,in}$  为从上表面入射的能量;  $E_{down,in}$  为从下表面入射的能量;  $E_{up,out}$  为从上表面出射的能量;  $E_{down,out}$  为从下表面出射的能量。

对所有的发光层来说,  $\gamma$  射线沉积在闪烁体中的总能量  $E_{total}$  为:

$$E_{total} = \sum E_i \quad (6)$$

只要选择了合适的聚乙烯和 st-401 晶体厚度,式(6)中的  $E_{total}$  就有可能达到较小。

## 2.3 探测介质厚度的最优化模拟

基于以上探测原理,若想得到减小的  $\gamma/n$  比值,就得使中子产生的质子在发光体中产生尽可能多的能量,而  $\gamma$  射线产生的电子要尽可能地沉积较少的能量。所以,必须保证聚乙烯和闪烁体片有一很合适的厚度组合,才能同时保证这两个条件。根据以前的模拟计算<sup>[2,4-5]</sup>,到达探测器位置的  $\gamma$  射线能量约为 0.34 MeV,应用蒙特卡罗方法模拟并假设各采用 50 层的聚乙烯和 st-401 闪烁体片(每层厚度为 1 mm),并得到了如图 3、4 所示的能量沉积与聚苯乙烯、聚乙烯厚度之间的关系。

由图 3、4 可看出,在聚苯乙烯厚度为 1~2 mm、聚乙烯厚度为 1 mm 的情况下,能够得到最大的  $n/\gamma$  比。

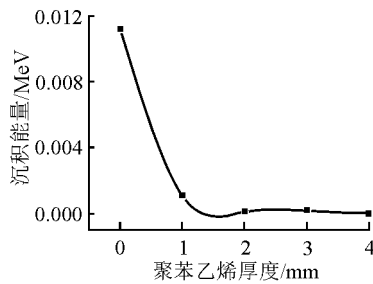


图3 0.34 MeV  $\gamma$  射线沉积能量  
随聚苯乙烯厚度的变化

Fig. 3 Relationship between deposited energy and polystyrene thickness for 0.34 MeV  $\gamma$ -ray in 1 mm st-401 plastic scintillator

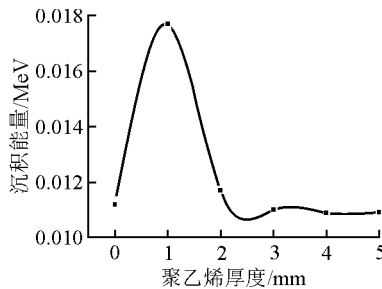


图4 14 MeV 中子沉积能量随聚乙烯厚度的变化  
Fig. 4 Relationship between deposited energy and polyethylene thickness

for 14 MeV neutron in 1 mm st-401 plastic scintillator

### 3 脉冲反应堆模拟实验

#### 3.1 西安脉冲反应堆简介

西安脉冲反应堆是中国建造的第1座实用性脉冲反应堆,它能以稳态方式运行,又能以脉冲或方波形式运行,稳态额定功率为2 MW,最大脉冲峰功率为4 200 MW。

#### 3.2 实验原理图

电流型脉冲技术实验采用图5所搭建的系统。该系统以闪烁探测器为基础,PMT-1管用来测量脉冲 $\gamma$ 射线,该高压电源模块始终供工作高压。从PMT-1输出的电流信号经过阈甄别器,如果小于预先设定的阈电流值,则该电路截止。如果该电流值大于阈值,则触发脉冲发生器模块,该脉冲发生器用来产生一定电压幅度的脉冲控制门控PMT-2模块,当门控光电倍增管启动后开始对聚变中子进行电流型脉冲计数,信号进入图5所示的电流型脉冲计数系统。由于反应堆不具备 $\gamma$ 射线和中子脉冲依次

出现的脉冲序列条件,实验中等效采用了脉冲光源作为开门信号。

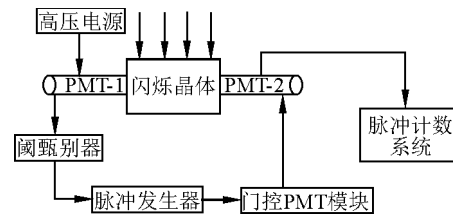


图5 电流和计数型探测系统原理图

Fig. 5 Current and count detection system theory map

#### 3.3 实验结果

西安脉冲反应堆正在进行稳态运行的脉冲辐射的测试,粒子脉冲时间宽度为ns级,脉冲束宽度约为几百ms~1s的量级,比测量目标脉冲的宽度高1~2个量级,注量率高4个量级以上。所以实验条件还不是很理想,但可证明采用图5所示的系统能够实现电流型脉冲计数功能。图6即为实验波形。

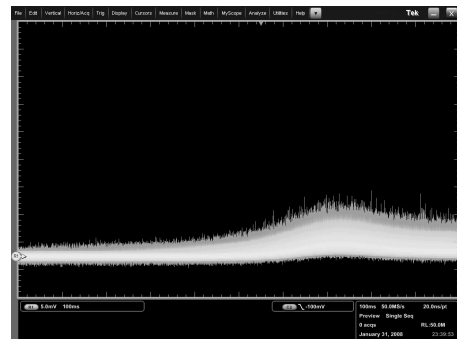


图6 西安脉冲反应堆上进行的  
电流型脉冲计数测试波形

Fig. 6 Current-type pulse count measurement wave on Xi'an Pulsed Reactor

由实验结果可见,从反应堆堆芯发出的脉冲辐射,经过孔道的输运后,利用电流型脉冲计数方法测得的波形能够反映出辐射脉冲经过管道输运后到达探测器的飞行时间谱特征,且该波形能够较为清楚地给出源谱波形的大概轮廓,只是由于强度太高,脉冲间隔比预期计算的要小得多。

#### 4 结论

以上讨论表明, 电流脉冲测量技术能够有效的测量 ms 级聚变中子的时间谱, 层叠式探测器能够有效地降低  $\gamma$  能量沉积, 使得中子信号相对增强。在脉冲反应堆上开展的实验, 初步证明本文提出的测量技术能够有效地在卫星上测量地面核爆炸产生的  $\gamma$  和中子辐射场。

#### 参考文献:

- [1] 程金星, 毛用泽, 张安慧, 等. 光电倍增管对数十毫秒级宽脉冲信号的响应特性研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27 (3): 136-139.  
CHENG Jinxing, MAO Yongze, OUYANG Xiaoping, et al. Study on the response characteristics of photomultiplier tubes measuring tens of milliseconds scale broad pulsed signals[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2007, 27(3): 136-139(in Chinese).
- [2] 程金星, 欧阳晓平, 黄绍艳. 核爆中子大气运输的数值模拟[J]. 防化研究, 2006, 84 (2): 8-12.  
CHENG Jinxing, OUYANG Xiaoping, HUANG Shaoyan. Numerical simulation of atmospheric transport of neutrons from nuclear explosions[J]. Chemical Defense Research, 2006, 84(2): 8-12(in Chinese).
- [3] 程金星, 毛用泽, 欧阳晓平. 核爆  $\gamma$  大气运输的数值模拟[J]. 防化学报, 2006, 93 (2): 23-25.  
CHENG Jinxing, MAO Yongze, OUYANG Xiaoping. M-C numerical simulation of atmospheric transport of pulse  $\gamma$  from near-earth space explosion[J]. Journal of Chemical Defense, 2006, 93(2): 23-25(in Chinese).
- [4] 程金星, 毛用泽, 欧阳晓平, 等. 近地空间强流脉冲中子源大气传输散射  $\gamma$  特性研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27 (2): 227-229.  
CHENG Jinxing, MAO Yongze, OUYANG Xiaoping. Study on the characteristics of inelastic scattering  $\gamma$ -ray by near-earth space high intensity neutron atmospheric transportation[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(2): 227-229(in Chinese).
- [5] 陈成杰, 徐正卜. 光电倍增管[M]. 北京: 原子能出版社, 1988: 33-45.
- [6] 程金星, 欧阳晓平, 毛用泽, 等. 夹层式中子- $\gamma$  联合探测器设计原理[J]. 原子能科学技术, 2008, 42 (2): 159-162.  
CHENG Jinxing, OUYANG Xiaoping, MAO Yongze, et al. Design theory of sandwich combine detector for neutron and  $\gamma$ -ray[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(2): 159-162(in Chinese).