

# 一种对中子相对不灵敏的大动态脉冲 $\gamma$ 辐射探测器\*

胡孟春<sup>1</sup> 叶文英<sup>2</sup> 彭太平<sup>1</sup> 周殿忠<sup>1</sup> 王振通<sup>1</sup>  
张建华<sup>1</sup> 胡青元<sup>1</sup> 杨洪琼<sup>1</sup>

1(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 四川绵阳 621900)

2(中国工程物理研究院电子工程研究所 四川绵阳 621900)

**摘要** 使用  $CeF_3$  闪烁体配以  $CH\phi T3, CH\phi T5$  型大线性电流光电倍增管, 组合成光电探测器. 实验测量表明:  $CeF_3$  光电探测器对  $^{60}Co$   $\gamma$  灵敏度约为常规塑料闪烁体 ST401 探测器的 0.5—0.6 倍, 而对于脉冲 DT 中子,  $CeF_3$  探测器灵敏度相对于同尺寸闪烁体 ST401 探测器的灵敏度低约 1 个量级, 探测器线性电流大于 1.5A, 暗流小于 10nA, 是一种对中子相对不灵敏的大动态脉冲  $\gamma$  辐射探测器.

**关键词** 闪烁体  $\gamma$  辐射测量 光电倍增管 灵敏度

## 1 引言

无机闪烁体一般密度比较大, 对  $\gamma$  射线阻止本领强而对中子相对不灵敏,  $PbWO_4$  和  $CeF_3$  是近年越来越引起人们关注的无机晶体<sup>[1-7]</sup>. 本工作使用近年国内新研制的  $CeF_3$  配  $CH\phi T3, CH\phi T5$  型大线性电流光电倍增管<sup>[8,9]</sup>, 组合成光电探测系统. 用  $^{60}Co$  和  $Cs^{137}$   $\gamma$  放射性源以及脉冲 DT 中子源, 实验测量比较  $CeF_3$  光电探测器和常规塑料闪烁体 ST401 探测器的  $\gamma$  灵敏度以及 DT 中子相对灵敏度, 用半宽为 2400ns 左右的氙灯脉冲光源考察其对宽脉冲信号的电流输出情况.

## 2 探测器 $^{60}Co$ $\gamma$ 灵敏度测量

### 2.1 测量原理

放射性  $\gamma$  源提供  $\gamma$  射线 ( $^{60}Co$  源提供  $\gamma$  射线能量为 1.17, 1.33MeV),  $\gamma$  射线经准直后直接照射在探测器上, 用小电流仪测量探测器输出电流  $I$ , 单位为 A, 同时用剂量片监测测点处的剂量, 并换算为对应

能点的光子注量率  $\phi(E)$ , 单位为  $s^{-1}cm^{-2}$ , 探测器对应能量为  $E$  的  $\gamma$  灵敏度为  $S(E)$ , 灵敏度单位为  $C \cdot cm^2$ . 测量原理图见图 1, 计算公式为

$$S(E) = \frac{I}{\phi(E)} \quad (1)$$

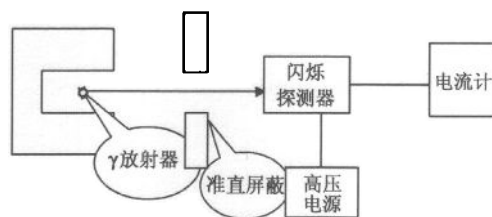


图 1 标定原理图

### 2.2 实验条件说明

实验使用的  $^{60}Co$   $\gamma$  放射性源存在于标准源库中, 经准直后, 离源芯 1m 处的  $\gamma$  射线形成的辐照截面约  $\phi 100mm$ , 探测器周围环境空间宽敞, 环境散射产生的影响小于 5%; 测点处的注量率测量值与按源出厂日期和半衰期推算结果在 6% 内一致. 测量电流使用的小电流仪为 KEITHLEY 6517A 型, 记录量程有 20 $\mu A$ , 2 $\mu A$ , 200nA, 20nA, 2nA, 最灵敏的程

2002-07-17 收稿, 2002-10-24 收修改稿

\* 中国工程物理研究院 J09 专项课题资助

档为 200pA. 根据探测器输出情况可选择不同的量程档进行记录,记录最大不确定度为 7.5% ( $K=2$ ).

### 2.3 $CeF_3$ , ST401 分别与光电倍增管构成探测器的 $^{60}Co$ $\gamma$ 灵敏度比值规律

实验使用的国产  $CeF_3$  晶体最大截面为  $\phi 45mm$ , 新引进的 CH $\phi$ T3, CH $\phi$ T5 型大线性电流光电倍增管的光阴极有效截面为  $\phi 50mm$ . 本工作用  $\phi 45mm$  的国产  $CeF_3$  晶体和尺寸为  $\phi 50mm$  的 ST401 晶体<sup>[9]</sup> 分别与 CH $\phi$ T3 或 CH $\phi$ T5 构成闪烁探测器,在  $^{60}Co$   $\gamma$  放射源场中,测量  $CeF_3$  探测器电流输出与 ST401 探测器电流输出及测点的注量率,由(1)式得到相应  $^{60}Co$   $\gamma$  灵敏度数据. 实验测量结果和推算结果以及同体积比较结果见表 1.

表 1 ST401,  $CeF_3$  分别与光电倍增管构成闪烁探测器的  $^{60}Co$   $\gamma$  灵敏度比较

晶体厚度 $H/mm$	测量值/ $C \cdot cm^2$ 推算值/ $C \cdot cm^2$		同体积比较	
	ST401 $\phi 50 \times H$	ST401 $\phi 45 \times H$		$CeF_3$ $45 \times H$
3	$3.01 \times 10^{-17}$	$2.44 \times 10^{-17}$	$8.99 \times 10^{-18}$	0.37
5	$4.46 \times 10^{-17}$	$3.61 \times 10^{-17}$	$1.63 \times 10^{-17}$	0.45
8	$6.64 \times 10^{-17}$	$5.38 \times 10^{-17}$	$2.73 \times 10^{-17}$	0.51
10	$8.09 \times 10^{-17}$	$6.55 \times 10^{-17}$	$3.46 \times 10^{-17}$	0.53
15	$1.17 \times 10^{-16}$	$9.49 \times 10^{-17}$	$5.29 \times 10^{-17}$	0.56
20	$1.53 \times 10^{-16}$	$1.24 \times 10^{-16}$	$7.12 \times 10^{-17}$	0.57
平均情况				0.50

本工作用了多个 CH $\phi$ T3, CH $\phi$ T5 光电倍增管进行测量,光电倍增管的增益不同,探测器的灵敏度也不相同,为了比较,我们已将测量的灵敏度数据按光电倍增管增益进行了相对归一. 同时为了得到相同体积  $CeF_3$ , ST401 构成闪烁探测器的灵敏度比值规律,按灵敏度大小与被照闪烁体有效截面成正比的方法,已将 ST401  $\phi 50 \times H$  的灵敏度推算出 ST401  $\phi 45 \times H$  的灵敏度. 由表 1 结果比较可得出:对于  $^{60}Co$   $\gamma$  放射源,使用 CH $\phi$ T3, CH $\phi$ T5 型大线性电流光电倍增管为光电器件,当闪烁体厚度为 8—20mm 时,  $CeF_3$  闪烁探测器灵敏度约为 ST401 闪烁探测器灵敏度的 0.5—0.6 倍,对于不同晶体厚度,其相对灵敏度比值稍有差异.  $CeF_3$  闪烁体越薄,其相对灵敏度越小.

我们将放射源换成  $^{137}Cs$ , 对应的放射性源能量为 0.66MeV, 用同样方法和系统测量,得到的  $CeF_3$  闪烁探测器灵敏度与 ST401 闪烁探测器灵敏度的比

值规律与  $^{60}Co$  的情况相似,只是比  $^{60}Co$  的情况稍高一点,仍然为 0.5 左右.

## 3 探测系统 DT 中子相对灵敏度

### 3.1 实验条件说明

实验使用的 DT 中子源为 DPF 脉冲中子源,  $CeF_3$  和 ST401 分别配型号、增益一致的 CH $\phi$ T3 光电倍增管,构成相应闪烁探测器,两个探测器并排放置,正对源芯,离源芯距离均约 6m,确保到达两个探测器的辐射情况一致. 记录仪器为 TDS644A 示波器.

### 3.2 测量结果分析

图 2 为  $CeF_3$  探测器与 ST401 探测器在同一脉冲 DT 中子场中测量的输出波形,图中第一个峰为光子辐射峰(包括约几十 keV 的 X 射线和 DT 中子脉冲形成过程中产生的  $\gamma$  辐射,其平均能量接近 MeV 级),第二个峰为脉冲 DT 中子峰.

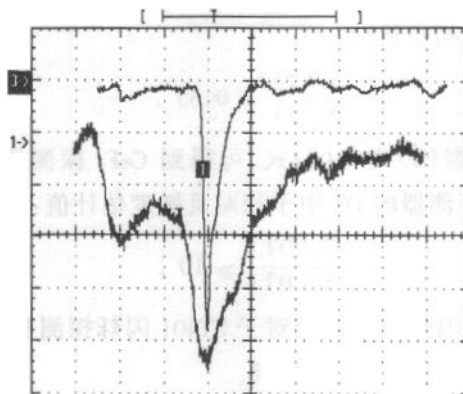


图 2  $CeF_3$  探测器与 ST401 探测器在同一脉冲 DT 中子场中测量的输出波形

图 2 中的波形 1 为  $CeF_3$  探测器输出波形,可看出 DT 中子峰  $I_{cmax}(DT)$  与光子辐射峰  $I_{cmax}(\gamma)$  的比约为 2,即

$$\frac{I_{cmax}(DT)}{I_{cmax}(\gamma)} = 2. \tag{2}$$

图 2 中的波形 3 为 ST401 探测器输出波形,可看出:DT 中子峰  $I_{cmax}(DT)$  与光子辐射峰  $I_{cmax}(\gamma)$  的比约为 13. 即

$$\frac{I_{cmax}(DT)}{I_{cmax}(\gamma)} = 13. \tag{3}$$

由于两探测器处于离中子源相同距离的位置

上,可认为进入探测器的辐射注量是相等的. 因此对于光子峰有

$$\frac{I_{\text{amax}}(\gamma) \times \tau_s}{S_s(\gamma)} = \frac{I_{\text{cmax}}(\gamma) \times \tau_c}{S_c(\gamma)}, \quad (4)$$

对于中子峰有

$$\frac{I_{\text{amax}}(\text{DT}) \times \tau_s}{S_s(\text{DT})} = \frac{I_{\text{cmax}}(\text{DT}) \times \tau_c}{S_c(\text{DT})}, \quad (5)$$

上式中,  $\tau$  为波形响应半高宽,  $S$  为灵敏度, 脚标  $S$  为 ST401,  $C$  为  $\text{CeF}_3$ . (5)与(4)式相除, 可得到

$$\frac{I_{\text{amax}}(\text{DT})}{I_{\text{amax}}(\gamma)} \times \frac{S_s(\gamma)}{S_s(\text{DT})} = \frac{I_{\text{cmax}}(\text{DT})}{I_{\text{cmax}}(\gamma)} \times \frac{S_c(\gamma)}{S_c(\text{DT})}. \quad (6)$$

将(2),(3)式结果代入(6)式有

$$13 \times \frac{S_s(\gamma)}{S_s(\text{DT})} = 2 \times \frac{S_c(\gamma)}{S_c(\text{DT})}, \quad (7)$$

整理得到

$$\frac{S_c(\gamma)}{S_s(\gamma)} \frac{S_s(\text{DT})}{S_c(\text{DT})} = 6.5. \quad (8)$$

参照  $\text{CeF}_3$  探测器和 ST401 探测器在  $^{60}\text{Co}$  和  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 放射源场中测量结果( $\text{CeF}_3$  探测器  $^{60}\text{Co}$  和  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 灵敏度均约为 ST401 的 0.5—0.6 倍). 根据 DT 脉冲过程中形成辐射光子能量的大致情况, 可以按(9)式初步估计

$$\frac{S_c(\gamma)}{S_s(\gamma)} = 0.55. \quad (9)$$

根据(8)式与(9)式, 可得到  $\text{CeF}_3$  探测器相对 ST401 探测器的 DT 中子相对灵敏度估计值:

$$\frac{S_s(\text{DT})}{S_c(\text{DT})} \geq 10, \quad (10)$$

即  $\text{CeF}_3$  闪烁探测器相对于 ST401 闪烁探测器的 DT 中子灵敏度低约 1 个量级.

## 4 探测器线性电流动态范围测量

### 4.1 线性电流测量方法<sup>[9]</sup>

第一种测量光电倍增管输出线性的方法是绝对测量法, 在光源照射下, 直接测量被测光电倍增管的脉冲峰值电流  $I$  和对应的人射光强  $\psi$ , 改变光强, 做出  $I$  与  $\psi$  的变化关系绝对测量曲线, 由该曲线得到光电倍增管的线性工作区间.

第二种是相对测量方法, 让标准光电倍增管始终处于线性工作范围内, 改变光强, 用示波器观测待测管与标准管输出脉冲峰值电流及其比值  $I/I_0$ , 做出  $I/I_0$  与  $\psi$  的变化关系测量曲线, 由判断该曲线对

线性的偏离情况, 得到光电倍增管的线性工作区间.

另一种方法是脉冲波形比较法, 用示波器同时测量处于线性工作范围内的标准光电倍增管(也可以是光电管)和待测光电倍增管的脉冲输出, 当两个脉冲波形完全重合时, 则待测管输出脉冲峰值电流即为线性电流. 该方法可在调节合适分压比的同时, 得到光电倍增管的最大线性输出电流, 而前两种方法, 只是在某一确定分压比的情况下测量出线性上限. 因此, 测量出的输出电流线性上限不一定是最佳分压比, 也不一定是最大线性电流.

### 4.2 实验条件说明

实验使用的脉冲源为半宽 2400ns 左右的氙灯脉冲光源,  $\text{CeF}_3$  配 CH $\phi$ T3 型大电流光电倍增管构成探测器与 GD40 光电管探测器相对放置在光源两边, GD40 光电管探测器为始终处于线性工作范围的标准光电管, 在监测光源的相对稳定性的同时, 提供标定被测光电倍增管线性情况的标准比较波形, 通过在光源与光电倍增管之间加减光片的方法减少进入光电倍增管的光强. 可使光电倍增管探测器分别处于饱和输出、最大线性输出和弱信号线性输出状态, 记录仪器为 TDS644A 示波器. 本工作使用波形比较法测量光电倍增管的线性电流.

### 4.3 测量结果分析

图 3 中 1 号波形为该探测器的电流输出波形, 示波器垂直灵敏度为 1V/div, 信号输入示波器前已衰减 50 倍, 由波形峰值位置可得到探测器的输出电流约 2.2A. 图中 2 号波形为处于线性工作状态的 GD40 光电管标准探测器的电流输出波形. 由于测量的两个波形极性相反, 测量时没有倒相, 不能直接用波形重合的方法比较, 通过比较两个波形的关键特征量前沿和半宽度, 也是可以判断两波形相似程度的. 图 3 中 1 号波形的前沿和半宽度分别为 1185ns 和 2489ns, 源监测探测器 2 号波形的前沿和半宽度分别为 1194ns 和 2443ns, 即光电倍增管输出波形前沿比监测标准探测器测量的源前沿仅变窄 0.75%, 半宽度仅展宽 1.88%, 可以得出该光电倍增管探测器输出电流 2.2A 时最大线性偏离小于 2%. 可以认为小于 2.2A 属线性输出. 我们还测量了同类型的其他探测器, 一般最大线性输出电流均大于 1.5A, 比一般常用的光电倍增管最大线性电流<sup>[10]</sup>高数倍. 用 KEITHLEY 6517A 型小电流仪测量该探测器的暗流为 3nA, 我们也测量了同类型的其

他探测器的暗流情况,一般均小于10nA.可见该类探测器可进行大动态范围辐射测量.

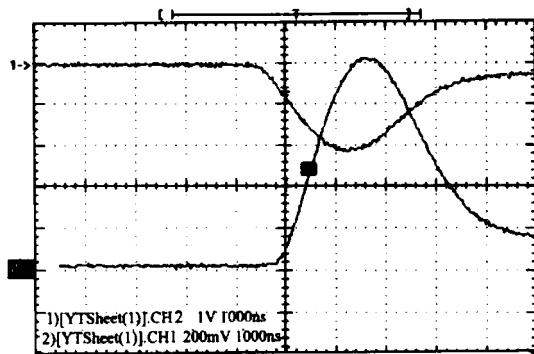


图3  $\text{CeF}_3$  配高增益光电倍增管探测器的电流输出情况

## 5 有关说明

$\text{CeF}_3$  晶体发光峰值波长为310nm左右,波长偏紫外,上面测量使用的大线性电流光电倍增管光阴

级光谱响应峰值波长约为410nm左右,波长主要属可见光范围.晶体发光与光阴极光谱不匹配.以上测量数据和结论均是在这种条件下获得的.

## 6 结论

对以上的测量结果分析研究,可以得出: $\text{CeF}_3$  配CH $\phi$ T3,CH $\phi$ T5型大线性电流光电倍增管构成闪烁探测器时:

1) 对于 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线, $\text{CeF}_3$  闪烁探测器灵敏度约为ST401闪烁探测器灵敏度的0.5—0.6倍;

2) 对于脉冲DT中子, $\text{CeF}_3$  探测器灵敏度相对于同尺寸的ST401探测器约低1个量级;

3) CH $\phi$ T3,CH $\phi$ T5为大线性电流光电倍增管,对2400ns的宽脉冲信号可输出线性电流大于1.5A,暗流小于10nA.

## 参考文献 (References)

- 1 WU Jian, XU Tong, LI Cheng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, 22(6):481(in Chinese)  
(伍健,许彤,李澄等.高能物理与核物理,1998,22(6):481)
- 2 ZHAO Guang-Jun, XU Jun. Journal of Synthetic Cryst Aols, 2002, 31(3):291—293(in Chinese)  
(赵广军,徐军.人工晶体学报,2002,31(3):291—293)
- 3 XUE Hong-Bin. Radiation Protection, 2002, 22(2):70(in Chinese)  
(薛红彬.辐射防护,2002,22(2):70)
- 4 WU Chong, LI Cheng, WANG Zhao-Min et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. 1999, 23(12):1141(in Chinese)  
(吴冲,李澄,汪兆民等.高能物理与核物理,1999,23(12):1141)
- 5 WANG Zhao-Min, Xu Zi-Zong GONG Zhu-Fang et al. Chinese Journal of Atomic and Molecular Phys., 1998, 15(2):234(in Chinese)  
(汪兆民,许咨宗,宫竹芳等.原子与分子物理学报,1998,15(2):234)
- 6 Anderson D F. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1989, 36:137
- 7 Moses W W, Dernenzo S E. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1989, 36:173
- 8 Alibikov A. Pulse Ionization Radiation Detector. Beijing: Atomic Energy Press, 1983. 7(in Chinese)  
(A.阿利比科夫.脉冲电离辐射探测器.北京:原子能出版社,1983.7)
- 9 LIU Qing-Zhao. The Diagnosis Technology of Pulse Radiation Field. Beijing: Science Press, 1994. 141—149(in Chinese)  
(刘庆兆.脉冲辐射场诊断技术.北京:科学出版社,1994.141—149)
- 10 XI Chang-Song. Handbook of Nuclear Radiation Detectors & Their Experiment Techniques [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990. 379—383(in Chinese)  
(汲长松.核辐射探测器及其实验技术手册[M].北京:原子能出版社,1990.379—383)

## A Large Dynamic Range Gamma Radiation Detector Insensitive to Neutron Radiation

HU Meng-Chun<sup>1</sup> YE Wen-Ying<sup>2</sup> PENG Tai-Ping<sup>1</sup> ZHOU Dian-Zhong<sup>1</sup> WANG Zhen-Tong<sup>1</sup>  
ZHANG Jian-Hua<sup>1</sup> HU Qing-Yuan<sup>1</sup> YANG Hong-Qiong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(China Academy of Engineering Physics Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang 621900, China)

<sup>2</sup>(China Academy of Engineering Physics Institute of Electronic Engineering, Mianyang 621900, China)

**Abstract** A photon-detector is composed of CeF<sub>3</sub> (Cerium Fluoride) scintillator and high current photomultiplier tube (PMT). The experiment results indicate that the sensitivity of this detector is about 0.6 and 0.1 with respect to that of usual plastic scintillator ST 401, for <sup>60</sup>Co  $\gamma$  and pulse DT neutron radiation, respectively. The biggest linear current of this detector is above 1.5 A, dark current is lower than 10nA. This kind of detectors is gamma pulse radiation detectors insensitive to neutron radiation with large dynamic range.

**Key words** scintillator,  $\gamma$  radiation detection, photomultiplier tube, sensitivity