

文章编号: 1000-7032(2013)01-0078-04

# 用于位置灵敏型中子探测器的 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体性能研究

唐军杰<sup>1</sup>, 王 拓<sup>1</sup>, 张 强<sup>1</sup>, 孙志嘉<sup>2</sup>, 吴 冲<sup>1\*</sup>

(1. 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249;

2. 中国科学院高能物理研究所实验物理中心, 北京 100049)

**摘要:** 研究了掺杂 ${}^6\text{LiF}$ 的 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体对中子、 $\gamma$ 射线的发光特性和EJ426闪烁体样品的热中子探测效率、出射光产额和 $\gamma$ 灵敏度。EJ426的热中子探测效率为32.4%, 出射光产额为 $8.01 \times 10^3$ 光子/中子, 70 mV阈值时的 $\gamma$ 灵敏度小于 $10^{-7}$ , 表明EJ426是较理想的闪烁体型位置灵敏中子探测器材料。

**关键词:**  ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体; 热中子探测效率; 光产额;  $\gamma$ 灵敏度

中图分类号: O434 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20133401.0078

## Characteristics of ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ Scintillator Used in Position-sensitive Neutron Detectors

TANG Jun-jie<sup>1</sup>, WANG Tuo<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, SUN Zhi-jia<sup>2</sup>, WU Chong<sup>1\*</sup>

(1. College of Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Center of Experimental Physics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding Author, E-mail: wuc@ihp.ac.cn

**Abstract:** The thermal neutron detection efficiency, emergent light yield and  $\gamma$  sensitivity of EJ426 scintillator with  ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$  blended was systemically researched. The results indicate that thermal neutron of EJ426 scintillator detection efficiency is 32.4%, emergent light yield  $8.01 \times 10^3$  photon/neutron. When the threshold value is 70 mV, its sensitivity is less than  $10^{-7}$ , which proves that it is an ideal material for scintillator-based position-sensitive neutron detectors.

**Key words:**  ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$  scintillators; thermal neutron detection efficiency; light yield;  $\gamma$  sensitivity

## 1 引 言

作为研究物质结构的理想探针,中子散射技术已在凝聚态物理、化学、生命科学等多学科领域的研究中被广泛采用<sup>[1-2]</sup>。位置灵敏中子探测器是中子散射谱仪中的关键设备,其基本原理是通过入射中子与探测器内核素的相互作用来实现对

中子的探测。基于 ${}^3\text{He}$ 气体的位置灵敏中子探测器是最佳的选择<sup>[3]</sup>,但近几年 ${}^3\text{He}$ 气体价格飞涨,基于 ${}^3\text{He}$ 的探测器也就十分昂贵。开发新型中子探测器具有重大的科学意义。基于掺杂 ${}^6\text{LiF}$ 的 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体和波移光纤结构的大面积位置灵敏型中子探测器是近些年的研究热点<sup>[4-5]</sup>。热中子通过闪烁体时与 ${}^6\text{Li}$ 发生核反应,核反应产生的

收稿日期: 2012-08-09; 修订日期: 2012-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(11175257); 中国石油大学(北京)基本科研基金资助项目

作者简介: 唐军杰(1976-), 男, 湖南永州人, 主要从事发光材料方面的研究。

E-mail: tang@cup.edu.cn

带电粒子 $\alpha$ 和氦核在闪烁体中通过电离激发损失能量而产生闪烁光子。出射的光子被分布于闪烁体表面的波移光纤阵列俘获吸收,并被转换为较长波长的光子,由光纤传输到光电倍增管,经光电转换后产生电脉冲信号,最后通过后续电子学和数据分析系统,给出中子事例的位置和时间等信息。 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体是一种多晶粉末,透明度较差,但 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 发光效率很高,约为葱晶体的3倍,发射光谱范围为365~540 nm,峰值波长为450 nm,平均光衰减时间约为300 ns。通常中子环境中总伴随有较高的 $\gamma$ 射线辐射本底,但是 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体热中子探测能够区分 $\gamma$ 信号与中子信号。 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体作为中子探测器的重要组成部分,其性能参数指标有热中子探测效率、出射光产额和 $\gamma$ 灵敏度等,这些指标将直接影响探测器的探测性能。

本文对 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 的性能参数进行了研究。 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 样品为美国Eljen Technology公司的EJ426。实验结果显示,EJ426的热中子探测效率为32.4%,出射光产额为 $8.01 \times 10^3$

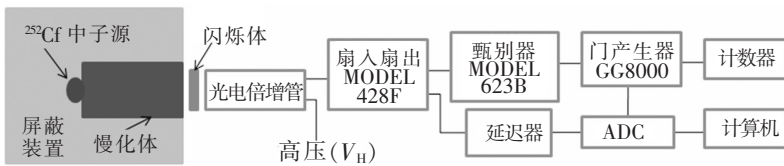


图1 测试闪烁体性能的实验装置简图

Fig. 1 The experimental setup to measure the properties of  ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$  scintillator

## 3 结果与讨论

### 3.1 热中子探测效率

${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体的热中子探测效率主要和2个参数有关:闪烁体中 ${}^6\text{Li}$ 的掺杂量和闪烁体的有效厚度。理论上可以通过增加 ${}^6\text{Li}$ 的比例或增加闪烁体厚度来提高闪烁体的热中子探测效率,但由于 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 的不透明性,要保证闪烁体的出射光产额,探测器的厚度不能超过 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 的光衰减长度( $\sim 0.5$  mm)。

通过甄别器和计数器,可以得到闪烁体样品的热中子计数率。将实验结果与高气压 ${}^3\text{He}$ 多丝正比室(MWPC)的结果比较,可以得到闪烁体样品的热中子探测效率。实验得到在甄别器为50 mV阈值下,闪烁体的中子探测效率为 $32.3\% \pm 1.1\%$ ,这与厂家提供的指标34.5%一致<sup>[7]</sup>。

光子/中子,70 mV阈值时的 $\gamma$ 灵敏度小于 $10^{-7}$ ,是一种比较理想的闪烁体型位置灵敏中子探测器材料。

## 2 实验方案和测试装置

### 2.1 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ 闪烁体样品

${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 样品中 ${}^6\text{LiF}:\text{ZnS}(\text{Ag})$ 的质量比为1:3,样品厚度为400  $\mu\text{m}$ ,尺寸为25 mm  $\times$  25 mm。衬底材料是对热中子散射截面最小的铝,同时衬底与闪烁体粉末接触的一面经过仔细抛光以提高反射率,增大出射光子数。

### 2.2 实验装置

图1为闪烁体性能测试的实验装置简图,闪烁体和光电倍增管XP2020之间采用空气耦合,避光封装放置于中子源出射窗口。闪烁体产生的闪烁光子信号经光电倍增管收集,送入后端电子学和数据获取系统。其中Model428F扇入扇出插件的两路信号,一路经甄别器和门产生器进入获取系统做触发信号,一路延时后经过模数转换ADC,由计算机获取数据。

### 3.2 出射光产额

中子核反应 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 产生的次级带电粒子,在 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体中电离沉积4.78 MeV能量产生闪烁光子数约为 $1.6 \times 10^5$ <sup>[6]</sup>。利用中子照射闪烁体得到的出射光子电荷谱,可以测试出闪烁体样品的出射光产额。图2为采用XP2020 PMT, -1 500 V高压,50 mV阈值电压下测试得到的闪烁体样品的出射光子电荷谱。要计算出闪烁体的出射光子数,首先要对实验系统中的光电倍增管进行刻度,再采用单光电子能谱的办法获得单光电子电荷谱峰位,最后利用中子信号电荷谱的峰位和同高压下单光电子峰的比值得到出射光子数 $N_{\text{out}}$ ,即:

$$N_{\text{out}} = n_{\text{ADC}} / (\Delta \times \eta), \quad (1)$$

其中 $\Delta$ 为单光电子峰对应的电子学道数, $n_{\text{ADC}}$ 为中子信号的出射光电荷谱峰对应的电子学道数,

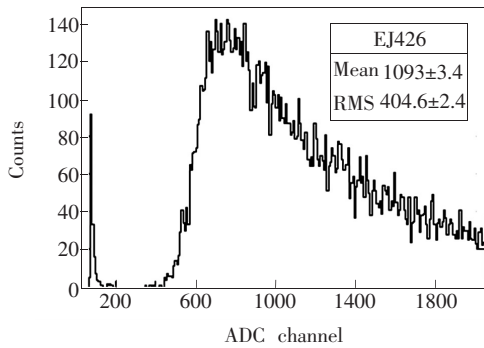


图 2 闪烁体样品的出射光对应的电荷谱

Fig. 2 The charge spectra of scintillator outgoing photons

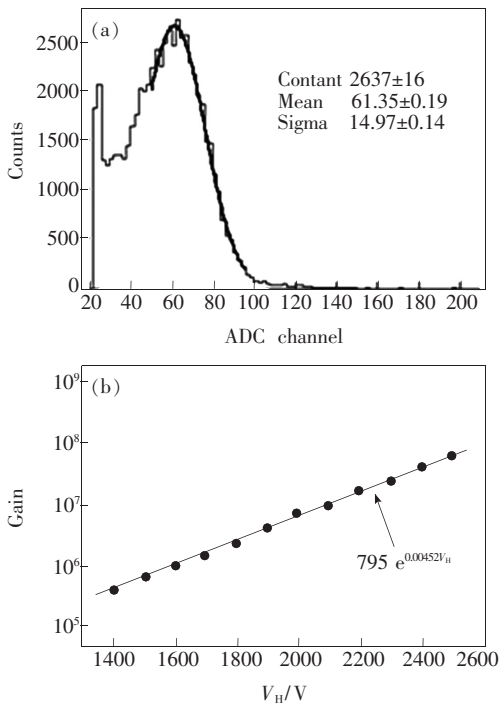
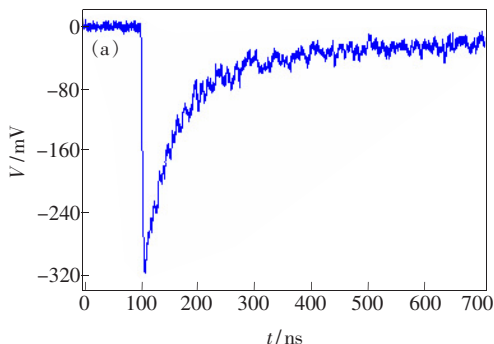


图 3 (a) 光倍增管单光电子电荷谱; (b) XP2020 光电倍增管增益线性。

Fig. 3 (a) The charged spectrum of single photoelectron of photomultiplier tube. (b) The linear of the gain of XP2020 tube.



$\eta$  为光电倍增管的量子效率。

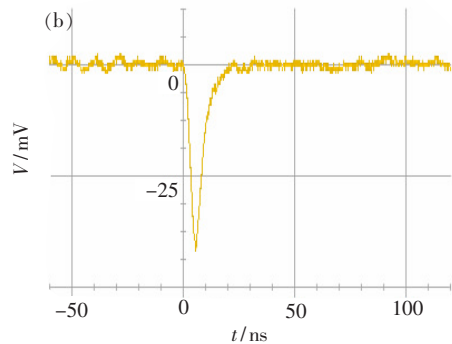
采用 LED 点光源法测试光电倍增管的单光电子峰<sup>[7]</sup>, 并通过改变 XP2020 的工作高压来测试光电倍增管的增益线性。图 3 为 XP2020 的实验结果, 根据光倍增管的刻度结果, 可以得到中子实验条件下 XP2020 的单光电子峰峰位为  $0.668 \pm 0.02$ 。闪烁体发射闪烁光峰值波长为 450 nm, 对应 XP2020 PMT 的量子效率为 20%。利用公式 (1), 可以计算出闪烁体样品的出射光子数为  $(8.01 \pm 0.03) \times 10^3$ /中子。

通过中子核反应  ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ , 在闪烁体中产生的  $1.6 \times 10^5$  原初闪烁光子仅有较少的数量入射到光电倍增管中, 说明大部分闪烁光子在闪烁体内传输过程中, 被闪烁体自吸收了, 这也说明了闪烁体的光衰减长度短。

### 3.3 $\gamma$ 灵敏度

通常中子束都伴随  $\gamma$  射线本底, 这要求中子探测器对  $\gamma$  射线不灵敏, 探测器把  $\gamma$  射线误认为是中子信号的几率, 称为中子探测的  $\gamma$  灵敏度<sup>[8]</sup>。

实验观测到  $\gamma$  射线引起的脉冲信号的平均幅度约为 50 mV, 远小于中子信号平均幅度 300 mV (图 4), 因此通过甄别器阈值甄别很容易将  $\gamma$  和中子信号区分开。图 5 (a) 为闪烁体样品的  $\gamma$  灵敏度随甄别器阈值电压的变化关系, 可以看到在 70 mV 阈值时,  $\gamma$  灵敏度达到  $10^{-7}$  量级。图 5 (b) 为不同阈值电压下的 EJ426 的热中子探测效率, 可以看出在阈值从 30 mV 到 60 mV 变化时, 其探测效率基本不变。主要原因是 EJ426 闪烁体的出射光产额较高, 也就是图 2 的 ADC 道数大, 而 30 mV 到 60 mV 阈值卡在 ADC 道数约为 300 ~ 600, 这样丢失的中子信号较少, 表现为探测效率变化不明显。

图 4 (a) 典型中子信号幅度谱; (b) 典型  $\gamma$  本底信号幅度谱。Fig. 4 (a) Amplitude spectrum of typical neutron signal. (b) Amplitude spectrum of typical  $\gamma$  background signal.

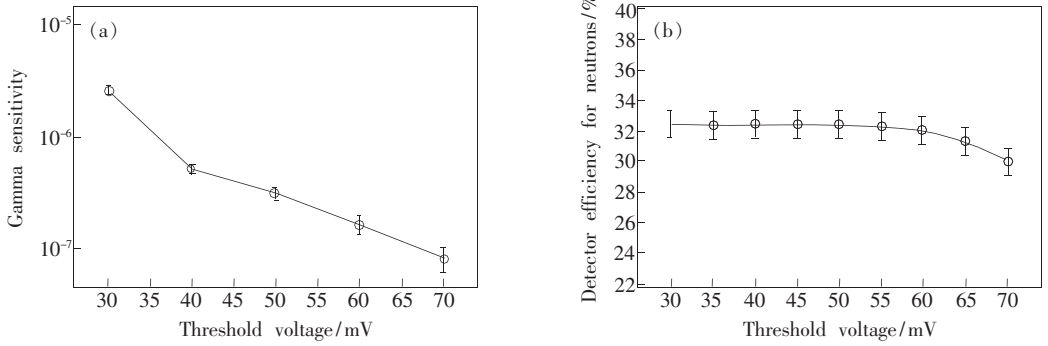


图5 (a)不同阈值电压下 EJ426 闪烁体 灵敏度;(b)不同阈值电压下 EJ426 闪烁体样品热中子探测效率

Fig. 5 (a) The sensitivity vs. threshold voltage of the discriminator. (b) Detection efficiency vs. threshold voltage of the discriminator.

## 4 结 论

利用<sup>252</sup>Cf 中子源测试了美国 Eljen Technology 公司的 EJ426 <sup>6</sup>LiF/ZnS(Ag) 闪烁体样品的性能。实验结果表明,其热中子探测效率为 32.4%, 出

射光产额约为  $8.01 \times 10^3$ , 70 mV 阈值时的  $\gamma$  灵敏度达到  $10^{-7}$ 。综合考虑各方面性能, EJ426 闪烁体称得上是一种较理想的位置灵敏闪烁体中子探测材料。

## 参 考 文 献:

- [1] Wei Z Y, Zang L H, Fan W, et al. Study of biological materials by neutron scattering [J]. *Nuclear Techniques* (核技术), 2006, 29(9):713-720 (in Chinese).
- [2] Chen D F, Gou C, Ye C T. Neutron scattering project on CARR [J]. *Nuclear Techniques* (核技术), 2005, 28(2):127-129 (in Chinese).
- [3] Oed A. Detector for thermal neutrons [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, 525(1):62-68.
- [4] Rhodes N J, Wardle A G, Boram A J, et al. Pixelated neutron scintillation detectors using fibre optic coded arrays [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1997, 392(3):315-318.
- [5] Crow M L, Hodges J P, Cooper R G. Shifting scintillator prototype large pixel wavelength-shifting fiber detector for the POWGEN3 powder diffractometer [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, 529(2):287-292.
- [6] van Eijk C W E. Inorganic-scintillator development [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2001, 460(1):1-14.
- [7] Wu Z L, Wang J M, Wang Y F, et al. Emission properties of scintillator crystal CsI:Tl excited by X-ray and UV light [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(6):830-835 (in Chinese).
- [8] Meng X C, Yang C G, Wang Z M, et al. Measuring and study for photoelectron spectrum of the photomultiplier [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2005, 25(6):594-600 (in Chinese).
- [9] Kouzes R T, Ely J H, Lintereur A T, et al. Neutron detection gamma ray sensitivity criteria [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2011, 654(1):412-416.