

文章编号: 1007-4627(2010)03-0300-04

新型国产 $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 晶体 γ/n 甄别能力研究*

李忠宝¹, 胡孟春¹, 郭洪生¹, 周刚¹, 杨高照¹, 曾清²

(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: 对国内最新研制的高光产额(~ 50000 photons/MeV)、快响应(~ 25 ns)无机晶体 $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 的 γ/n 甄别能力进行了研究。利用 MC 模拟程序进行建模计算, 得出 $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 晶体的 γ/n 为 19.56; 利用 DPF 中子源 DD 靶进行实验测量, 结果表明该晶体的 γ/n 高于 19。理论计算结果与实验结果相符合。该晶体可以应用于中子、 γ 混合辐射场中 γ 脉冲的测量。

关键词: $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$; 甄别能力; MCNP; DD 中子源; γ 灵敏度; 中子灵敏度

中图分类号: TL812; TL816

文献标识码: A

1 引言

$\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 晶体是一种新型的高温无机闪烁晶体。1999 年, van Loef 等^[1] 首先发现了这种晶体。属六方晶系, 密度 3.86 g/cm^3 , 熔点为 $863 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由于其具有高发光产额、快衰减时间和能量分辨率高等诸多优点^[2-9], 人们对其做了一系列的研究, Shan 等^[2] 将其应用于 γ 射线的探测, 曾勇等^[9] 对其进行核材料鉴别的研究, 王新华等^[10] 在 γ 能谱测量中应用了该晶体。

在中子和 γ 混合辐射场中测量 γ 脉冲, 探测器不仅要有高的 γ 灵敏度, 而且要对中子相对不灵敏, 即要高的 γ/n 甄别能力, 这对信噪比的提高很有意义, 而目前还没有这方面的研究报道。本工作利用通用程序 MCNP4C 对 $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 晶体的 γ/n 甄别能力进行了模拟计算, 并利用 DPF(DD)中子源、ST401 晶体和光电倍增管等组成测试系统, 实验测量了由中国科学院上海硅酸盐研究所提供的该类晶体的 γ/n 甄别能力, 理论计算结果与实验结果符合较好。

2 模拟计算

2.1 计算模型

计算晶体的 γ/n 甄别能力, 可通过比较两种粒

子在晶体中的沉积能量进行估算^[11]。 γ 射线与物质的相互作用主要有 3 种方式: 光电效应、康普顿效应和电子对效应。 γ 射线首先与物质作用产生次级带电粒子, 这时 γ 射线的能量传递给带电粒子, 电子再与物质相互作用形成能量沉积。沉积的能量一部分通过荧光释放, 另一部分转化为分子间的热能。故 γ 射线灵敏度与沉积能量存在正相关关系。中子与物质相互作用比较复杂。为了合理计算两种粒子在晶体中的光输出, 可定义: E_{γ_c} 为 γ 射线在晶体中沉积的总能量, E_{n_c} 为中子在晶体中沉积的总能量, E_{n_g} 为中子与晶体相互作用产生的光子在晶体中沉积的总能量。此时, 晶体的 γ/n 甄别能力可近似表示为

$$\begin{aligned} \text{最大: } \left(\frac{\gamma}{n}\right)_{\max} &= \frac{E_{\gamma_c}}{E_{n_g}}, \\ \text{最小: } \left(\frac{\gamma}{n}\right)_{\min} &= \frac{E_{\gamma_c}}{E_{n_c}}. \end{aligned}$$

实际的值应介于二者之间。为了合理的表征 γ/n 甄别能力, 引入公式(1)。设 D 为推荐值, 则:

$$D \approx \frac{E_{\gamma_c}}{(E_{n_c} - E_{n_g})/C_a + E_{n_g}}, \quad (1)$$

式中, C_a 为发光等效系数, 它表示带电粒子在闪烁体中沉积 $C_a \text{ MeV}$ 的能量等效于电子沉积 1 MeV

* 收稿日期: 2009-12-11; 修改日期: 2010-03-28

* 基金项目: 中国工程物理研究院预先研究项目(426030201)

作者简介: 李忠宝(1979-), 男(汉族), 黑龙江七台河人, 助理研究员, 本科, 从事辐射探测研究; E-mail: hasobolzb@163.com

能量所发的光。这里 C_a 取值 5.5 进行估算^[11, 12]。

2.2 γ/n 甄别能力

计算了 0.1 到 1.5 MeV 共 15 个能点，由于裂变 γ 能谱与裂变中子能谱对本工作具有较重要的参考价值，故给出此能量下的 γ/n 甄别值为推荐值。为说明问题，做如下限定：(1) γ 能谱为平均能量 1.2 MeV 的裂变 γ 能谱；(2) 中子能谱为平均能量 1.3 MeV 的裂变中子能谱；(3) LaCl₃:Ce 晶体的尺寸为 $\phi 45 \times 0.5 \text{ cm}^3$ 。图 1 给出了 LaCl₃:Ce 晶体的 γ 、中子沉积能量和推荐的 γ/n 甄别值。从图中看出， γ 在晶体中沉积能量随着源粒子能量的增加先减后增，在 0.5 MeV 时达到最小，而中子在晶体中沉积能量比较平稳。图 (b) 给出了 LaCl₃:Ce 晶体 γ/n 甄别能力的推荐值，其按照式(1)进行计算。

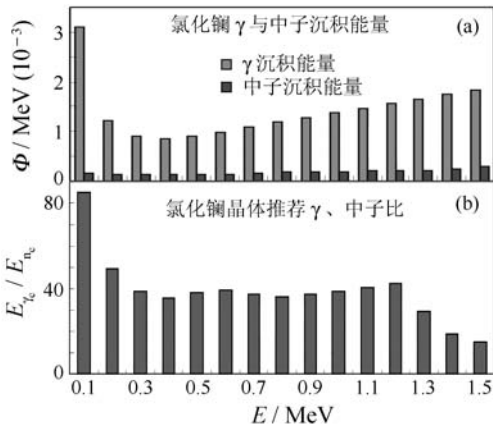


图 1 LaCl₃:Ce 晶体的 γ 、中子沉积能量和推荐的 γ/n 甄别值示意图

表 1 给出了对 LaCl₃:Ce 晶体 γ/n 甄别能力的计算值。实验所用的 DPF 中子源中子能量为 2.45 MeV，根据表 1 可知 E_{n_c} 和 E_{n_g} 分别为 3.25×10^{-4} 和 4.65×10^{-6} ，而 γ 能量取 0.2 MeV，相应的 E_{γ_c} 为 1.23×10^{-3} ，由式(1)计算出 LaCl₃:Ce 晶体的 γ/n 甄别能力推荐值为 19.56。

表 1 LaCl₃:Ce 晶体 γ/n 甄别能力的计算结果

| $E_{源} / \text{MeV}$ | $E_{\gamma_c} / \text{MeV}$ | E_{n_c} / MeV | E_{n_g} / MeV | $(\gamma/n)_{min}$ | $(\gamma/n)_{max}$ | D |
|----------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-------|
| 0.1 | 3.09 | 1.60 | 8.80×10^{-6} | 19.31 | 351.14 | 85.15 |
| 0.2 | 1.23 | 1.32 | 1.26×10^{-6} | 9.32 | 976.19 | 49.14 |
| 0.3 | 0.89 | 1.24 | 3.27×10^{-7} | 7.18 | 2721.71 | 39.01 |
| 0.4 | 0.85 | 1.30 | 4.72×10^{-7} | 6.55 | 1805.08 | 35.47 |

| | | | | | | |
|------|------|------|-----------------------|------|----------|-------|
| 0.5 | 0.90 | 1.30 | 1.64×10^{-7} | 6.95 | 5506.10 | 37.99 |
| 0.6 | 0.99 | 1.37 | 2.39×10^{-8} | 7.19 | 41213.39 | 39.51 |
| 0.7 | 1.08 | 1.59 | 2.39×10^{-8} | 6.79 | 45188.28 | 37.33 |
| 0.8 | 1.18 | 1.79 | 3.12×10^{-7} | 6.59 | 3782.05 | 35.97 |
| 0.9 | 1.28 | 1.89 | 忽略 | 6.77 | — | 37.25 |
| 1.0 | 1.38 | 1.97 | 忽略 | 7.01 | — | 38.53 |
| 1.1 | 1.47 | 2.00 | 忽略 | 7.35 | — | 40.43 |
| 1.2 | 1.56 | 2.03 | 忽略 | 7.68 | — | 42.27 |
| 1.3 | 1.65 | 2.15 | 2.06×10^{-5} | 7.67 | 80.10 | 29.49 |
| 1.4 | 1.74 | 2.45 | 5.77×10^{-5} | 7.10 | 30.16 | 18.96 |
| 1.5 | 1.84 | 3.01 | 8.20×10^{-5} | 6.11 | 22.44 | 15.10 |
| 2.45 | 2.70 | 3.25 | 4.65×10^{-6} | 3.78 | 264.52 | 19.56 |

3 实验测量

3.1 测量系统简介

利用 DPF(DD) 中子源、光电倍增管、ST401 晶体、LaCl₃:Ce 晶体等组成 LaCl₃:Ce 晶体 γ/n 甄别能力测量系统^[13]。系统布局见图 2 所示。

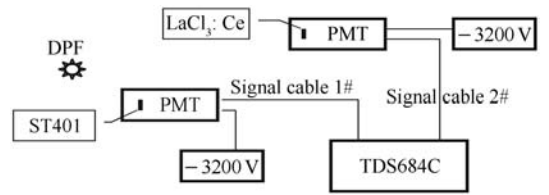


图 2 LaCl₃:Ce 晶体 γ/n 甄别能力测量系统

DPF(DD)源为 Mather 型^[14]，能源主要以电容器储能为主，放电气体为氦气；中子产额约 10^8 neutrons/s，脉宽约 50 ns。它发射的辐射中包含中子和 γ ，当传输系统(信号电缆)与记录系统(示波器)的时间响应相同时，两种脉冲的时间间隔取决于飞行距离。LaCl₃:Ce 闪烁探测器距源 5.2 m，ST401 闪烁探测器距离源 2 m。光电倍增管采用俄罗斯的大电流光电倍增管，渡越时间差小于 2 ns^[15]。

采用 DPF(DD)源的优点是可在一次脉冲信号中得到中子和 γ 灵敏度之比，减少了光电倍增管引起的系统误差，消除了扣除本底过程中增加的不确定度。俄罗斯的光电倍增管中子和 γ 灵敏度比为 7:1，由此测出 ST401 晶体的中子和 γ 灵敏度比为 2.5:1。以此作为测量 LaCl₃:Ce 晶体 n/γ 甄别能力的校准信号。忽略粒子差异引起的光谱变化。

3.2 测量结果与分析

图 3 给出了同一脉冲时两种晶体的响应波形 (该波形水平灵敏度为每格 5 ns, 垂直灵敏度为每格 5 mV)。由于 γ 的飞行速度为光速, 中子的飞行速度则与中子的能量直接相关, γ 飞行 1 m 的时间约为 3.3 ns, 2.45 MeV 中子飞行 1 m 的时间约为 46 ns, 则每飞行 1 m 的距离中子比 γ 晚 43 ns, 中子和 γ 在示波器记录波形上的时间间隔由探测器到源的距离决定。

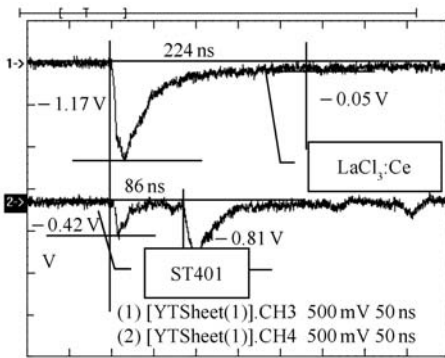


图 3 $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 与 ST401 同一脉冲响应波形

对于 ST401 晶体, 其距离源 2 m, 则中子与 γ 峰距离为 86 ns 左右, 从记录波形上可以判断出中子与 γ 峰的位置。根据示波器判读结果 (γ 峰 0.42 V, 中子峰 0.81 V) 与 ST401 晶体本身的 n/γ , 可以推算 DPF 中子源的 n/γ 为 0.83。

对于 $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 晶体, 其距离源 5.2 m, 则中子与 γ 峰距离为 223 ns 左右。 γ 峰幅度为 1.17 V, 但从记录波形上看只有一个 γ 峰, 而距 γ 峰时间轴正向 223 ns 左右没有中子峰, 主要原因为此晶体对 γ 灵敏而对中子相对不灵敏^[16], 中子脉冲的强度较弱, 信号湮没于噪声当中。在处理时将中子峰的强度取最大值, 即波形噪声的幅度 0.05 V, 可以得出有意义的实验结果。根据上述的推算, $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 晶体的 γ/n 大于 19 倍。

4 结论

根据 MCNP 模拟程序计算, $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 晶体的 γ/n 甄别能力推荐值为 19.56, 而利用 DPF 源实验得出的该晶体的 γ/n 值大于 19 倍, 理论计算与实验结果相一致, 表明该晶体具有高 γ/n 甄别能力, 结合该晶体的高发光产额与快响应的特性, 可应用

于 γ 和 n 混合辐射场中低强度 γ 快脉冲测量。

参考文献 (References):

- [1] Van Loef E V D, Dorenbos P, Van Ejik C W E, *et al.* Optics Communications, 2000, **178**: 355.
- [2] Shah K S, Glodo J, Klugerman M, *et al.* Nucl Instr & Meth, 2003, **505**: 76.
- [3] Higgins W M, Glodo J, Van Loef E, *et al.* Journal of Crystal Growth, 2006, **h287**: 239.
- [4] Balerzyk Marcin, Moszynski Marek, Kapusta Maciej. Nucl Instr and Meth, 2005, **A537**: 50.
- [5] Andriessen J, Antonyak O T, Dorenbos P, *et al.* Optics Communications, 2000, **178**: 355.
- [6] Tsutsumi Masahiro, Tanimura Yoshihiko. Nucl Instr and Meth, 2006, **A557**: 554.
- [7] Guillot-Noel O, Haas J T M de, Dorenbos P, *et al.* Journal of Luminescence, 1999, **85**: 21.
- [8] Bernabei R, Belli P, Montecchia F, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2005, **A555**: 270.
- [9] Zeng Yong, Bai Lixin, Zhang Yunyi. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, **27**(2): 331(in Chinese). (曾勇, 白立新, 张云一. 核电子学与探测技术, 2007, **27**(2): 331.)
- [10] Wang Xinhua, An Li, Deng Pu, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28**(4): 761(in Chinese). (王新华, 安利, 邓普, 等. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(4): 761.)
- [11] Song Zhaohui, Hu Huasi, Wang Kuilu. Radiation Protection, 2006, **26**(4): 220(in Chinese). (宋朝晖, 胡华四, 王奎禄. 辐射防护, 2006, **26**(4): 220.)
- [12] Ji Changsong. Hand Book of Nuclear Radiation Detections & Their Experiment Techniques. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1990, 293—343(in Chinese). (汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册. 北京: 原子能出版社, 1990, 293—343.)
- [13] Hu Mengchun, Ye Wengying, Li Zhongbao, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(7): 721(in Chinese). (胡孟春, 叶文英, 李忠宝, 等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(7): 721.)
- [14] Guo Hongsheng, Li Enping, He Xijun, *et al.* Nuclear Physics Review, 2004, **21**(3): 721(in Chinese). (郭洪生, 李恩平, 何锡钧, 等. 原子核物理评论, 2004, **21**(3): 214.)
- [15] Liu Junhong, Liu Junyong, Guan Xingyin. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, **25**(6): 768(in Chinese). (刘君红, 刘俊勇, 管兴胤. 核电子学与探测技术, 2005, **25**(6): 768.)

- [16] Wang Jing, Chen Boxian, Zhuang Renlin. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, **26**(6): 1039(in Chinese). (汪靖, 陈伯显, 庄人遛. 核电子学与探测技术, 2006, **26**(6): 1039.)

Research on γ/n Discriminability of Newly Homemade $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ Scintillator^{*}

LI Zhong-bao^{1, 1)}, HU Meng-chun¹, GUO Hong-sheng¹, ZHOU Gang¹, YANG Gao-zhao¹, ZENG qing²

(1 *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

Mianyang 621900, Sichuan, China;

2 *Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)*

Abstract: In this paper, the γ/n discriminability of $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ scintillator is studied. This scintillator has high output(50000 photons/MeV) and fast principal decay time constant(~ 25 ns). γ/n discriminability of $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ is 19.56 with MCNP calculation and larger than 19 in the experimental measurement with Dense Plasma Focus facility. The calculation is in agreement with the experiment result. This crystal may be applied to measuring the gamma pulse in the neutron and gamma mixed radiation field.

Keywords: $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$; discriminability; MCNP; DD source; gamma sensitivity; neutron sensitivity

* Received date: 11 Dec. 2009; Revised date: 28 Mar. 2010

* Foundation item: Advanced Research Program of China Academy of Engineering Physics(426030201)

1) E-mail: hasobolzb@163.com