



DOI: 10.12086/oe.2021.210038

无机闪烁体性能测试方案研究

尹士玉¹, 郭浩^{1,2}, 颜敏², 王志刚^{2,3},
马丽双², 张凌峰², 钱森^{2,3*}

¹北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144;

²中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

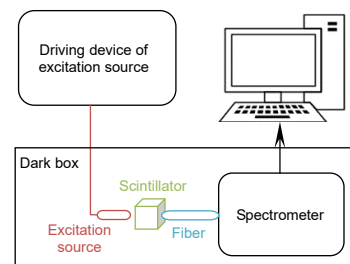
³核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049

摘要: 为满足诸如大型对撞机实验探测器研制、空间载荷量能器等大科学工程和新型医疗影像设备 TOF-PET 对闪烁体的筛选需求, 对闪烁体的闪烁性能(发射光谱、光输出、能量分辨率、衰减时间、余辉以及符合时间分辨率等)进行了研究, 并针对不同闪烁体样品的测试需求设计了一整套完整的无机闪烁体性能测试方案。在发射光谱测试中选择了不同的激发源进行对比测试, 对能量分辨率与符合时间分辨等闪烁性能的测试条件进行优化, 并成功应用于热门闪烁体掺杂铈的硅酸钆镨(LYSO:Ce)和钆铝镓石榴石(GAGG:Ce)的性能研究中, 取得了较好的测试结果。

关键词: 无机闪烁体; 性能测试; 能谱; 能量分辨率; 符合时间分辨率

中图分类号: TL812+.1

文献标志码: A



尹士玉, 郭浩, 颜敏, 等. 无机闪烁体性能测试方案研究[J]. 光电工程, 2021, 48(6): 210038

Yin S Y, Guo H, Yan M, et al. Study on performance test plan of inorganic scintillator[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(6): 210038

Study on performance test plan of inorganic scintillator

Yin Shiyu¹, Guo Hao^{1,2}, Yan Min², Wang Zhigang^{2,3}, Ma Lishuang²,
Zhang Lingfeng², Qian Sen^{2,3*}

¹School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

²Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China

Abstract: In order to respond to the scintillator screening requirements of large scientific projects and the new medical imaging equipment such as the development of large-scale collider experimental detectors, space load calorimeters and TOF-PET, our laboratory conducts research on the scintillation performance (emission spectrum, light output, energy resolution, decay time, afterglow, coincidence time resolution, etc.) of scintillators. A complete set of inorganic scintillator performance test programs is designed for the optimal performance of different scintillator samples. In the test of emission spectrum, different excitation sources were selected for comparison test. The energy

收稿日期: 2021-01-26; 收到修改稿日期: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11675205, 11675196); 中国科学院青年创新促进会经费资助; 核探测与核电子学国家重点实验室资助项目(SKLPDE-ZZ-201902)

作者简介: 尹士玉(1979-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电材料的研究。E-mail: yinsy@ncut.edu.cn

通信作者: 钱森(1981-), 男, 博士, 特聘青年研究员, 主要从事光电器件以及核电子学与核探测器的研究。E-mail: qians@ihep.ac.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

resolution and the test conditions of the scintillation performance such as time resolution were optimized, which were successfully applied to the performance research of popular scintillators including cerium-doped yttrium lutetium silicate (LYSO:Ce) and gadolinium aluminum gallium garnet (GAGG:Ce), and good test results were obtained. The energy resolution of LYSO:Ce and ceramic GAGG:Ce scintillators are 7.9% and 5.4%, respectively, and the coincidence time resolution of the LYSO:Ce scintillator can reach 94.3 ps.

Keywords: inorganic scintillator; performance test plan; energy spectrum; energy resolution; coincidence time resolution

1 引言

闪烁体是指在高能粒子或射线的作用下,能发出荧光的物质。按照组成物质的成分可将闪烁体分为无机闪烁体和有机闪烁体两种^[1-2]。无机闪烁体在我国已有超过六十年的发展历史,期间无数的闪烁体被成功开发并推向市场。为应用于不同的学科领域和满足不同的物理需求,需要将不同种类的闪烁体和多种光电探测器组合。目前,除了在核科学与高能物理实验方面,无机闪烁体在核医学成像、无损探伤、安全检测和环境监测等领域也取得了突飞猛进的发展,研究满足多领域需求的无机闪烁体成为闪烁体开发的主流方向^[3]。环形正负电子对撞机(Circular electron positron collider, CEPC)^[4]和高能宇宙辐射探测设施(high energy cosmic radiation detection, HERD)^[5]等大科学工程需要大量高性能的闪烁体,为满足其对闪烁体精确且高效的筛选需求,本文根据闪烁体特性,开发设计了一套完整且便捷的闪烁体性能测试方案。

目前,闪烁体测试方案并没有国家标准。在闪烁体发射光谱的测试中,关于闪烁体激发源的选择,有的使用紫外发光二极管(ultraviolet light emitting diode, UV-LED)^[6],也有的使用 X 射线的^[7],没有明确的标准可以遵循。在能量分辨率的测试中,有的文献中使用光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)进行测试^[8],也有使用硅光电倍增管(silicon photomultiplier, SiPM)进行测试^[9]。关于放射源的选择,有的使用¹³⁷Cs 的 662 keV 计算^[10],也有的使用²²Na 的 511 keV 进行计算^[11]。

在单光子时间分辨达到 50 ps 量级的光电探测器中,最典型的为近贴聚焦型微通道板光电倍增管(microchannel plate PMT, MCP-PMT)^[12],但单个器件高达 10 万元的高昂价格和进口设备采购用户声明,限制了其在闪烁体性能测试领域的推广。随着光电器件的发展,一些 SiPM 也突破了技术瓶颈,实现了快速时间分辨的功能。此类光电探测器具有时间响应快、抗干扰能力强、体积小、重量轻等特点,尤其是其多种

类型的光谱响应,可覆盖紫外到红外的波长范围,且光子探测效率高,非常适合对不同发射光谱的闪烁体进行性能测试^[13]。但 SiPM 暗噪声较高,且增益受温度影响较大,在实际应用中有一定限制。

LYSO:Ce 闪烁体和 GAGG:Ce 闪烁体突出的发光性能优势获得了广泛的关注,LYSO:Ce 闪烁体具有高的光产额(25000 ph/MeV)和快的发光衰减时间(40 ns)^[14],陶瓷 GAGG:Ce 闪烁体的光产额能达到 50000 ph/MeV,发光衰减时间在 183 ps 左右,单晶 GAGG:Ce 闪烁体的光产额能达到 30000 ph/MeV,并且具有快慢两种发光衰减成分,两种成分的衰减时间分别为 100 ns 和 300 ns 左右。由于不同粒子与之相互作用时发光机制不同,使其发光衰减时间产生差异,有望利用脉冲形状甄别(pulse shape discrimination, PSD)的方法实现粒子甄别^[15]。因此本文对以上两种闪烁体的闪烁特性进行了研究,以验证此套测试方案的可靠性。

本套无机闪烁体性能测试方案测得 LYSO:Ce 闪烁体样品的光输出为 27029 ph/MeV,衰减时间为 42 ns,能量分辨率为 7.9%@662 keV,符合时间分辨率可达到 94.3 ps,陶瓷 GAGG:Ce 闪烁体的光输出为 59316 ph/MeV,衰减时间为 182.9 ns,能量分辨率为 5.4%@662 keV,优于文献^[16-18]的测试结果。

2 发射光谱测量

闪烁体的发射光谱是指闪烁体发光强度随波长的分布,是闪烁体重要的光谱特性,这与闪烁体的材料、闪烁体内掺杂的活化剂和掺入的移波剂等多种因素有关^[19]。闪烁体的发射光谱只有与光电探测器件的光谱响应灵敏区相匹配,才能获得高的探测效率,因此研究闪烁体发光性能的首要步骤应为闪烁体发射光谱的测试。本套测试方案采用光谱仪测量闪烁体的发射光谱,实验室所用光谱仪在 190 nm 至 1100 nm 的极宽光谱范围内可达到 1 nm 的分辨率。测试装置如图 1 所示,利用 X 射线管发射出 X 射线激发闪烁体发出闪烁光,或利用信号发生器驱动 265 nm 的深紫外 LED

激发闪烁体发光, 利用光纤将闪烁体发出的闪烁光导入光谱仪进行测量, 最后通过计算机分析出发射光谱。

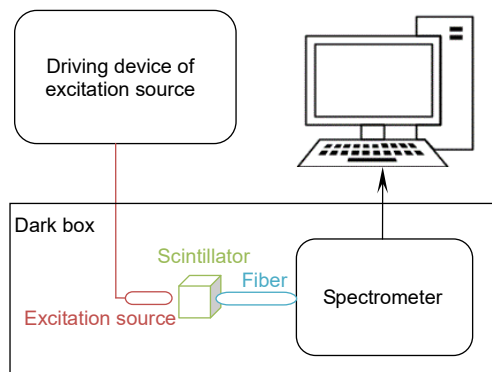


图 1 闪烁体发射光谱测试装置图
Fig. 1 The schematic of scintillator emission spectrum measurement

利用本套装置对尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm 的 LYSO:Ce 闪烁体和尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm 的陶瓷 GAGG:Ce 闪烁体的发射光谱进行测试, 结果如图 2 所示。从图 2(a)中可以看出, LYSO:Ce 闪烁体在 X 光与深紫外 LED 为激发源时发射谱相同, 都分布在 370 nm~600 nm 之间, 且峰值波长在 420 nm 左右, 与文献[20]研究结果一致。在从图 2(b)中, 陶瓷 GAGG:Ce 闪烁体在两种激发源下的发射光谱近乎相同, 由于 5d~4f 跃迁, 主发射峰出现在 550 nm 左右, 与文献[15,21-22]中测试结果一致。区别在于 LED 为激发源时, 在 380 nm 附近观察到一个微弱的发射峰, 而以 X 射线为激发源时无此峰, 这可能是陶瓷 GAGG:Ce 中 Gd³⁺的发光导致[23]。

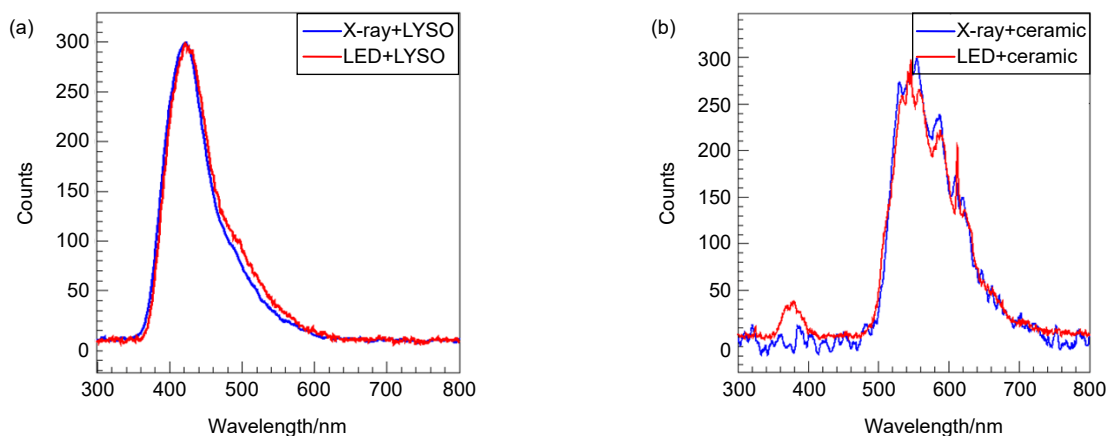


图 2 闪烁体的发射光谱。(a) LYSO:Ce; (b) GAGG:Ce
Fig. 2 Emission spectrum of scintillators. (a) LYSO:Ce; (b) GAGG:Ce

3 能谱测量

本套测试方案中将闪烁体光输出和能量分辨率的测试整合为同一装置, 如图 3 所示。放射源发出 γ 射线进入闪烁体, 在闪烁体内沉积能量使得材料中基态电子跃迁至激发态, 并且退激发出荧光光子被 SiPM 接收。SiPM 固定在由低压电源(± 5 V)供电的驱动板上工作[24], 将 SiPM 和驱动板放置在封闭铝盒中以屏蔽噪声。SiPM 的工作电压可通过驱动板上的电压-温度修正功能进行自动调节, 使其工作在增益稳定状态下。数据获取系统为波形数字化仪, 将波形数据保存下来进行离线分析。如图 4 所示, 该套测试装置测量 LYSO:Ce 耦合不同像素 SiPM 对能量的响应情况。从图中可以看出, 在 31 keV 到 1332 keV 范围内, 耦合 10 μm SiPM 时, 探测器能量线性较好。使用 25 μm 和 50 μm SiPM 探测器能量线性较差, 且对于大像素的 SiPM, 非线性现象更为明显。这是因为感光面积相同的 SiPM, 像素单元尺寸越大, 则像素数量越少。如果单位时间入射光子的数量远小于像素的数量, 则 SiPM 的响应是线性的。当单位时间内入射光子的数量增加时, SiPM 的响应将逐渐饱和, 导致探测器线性度变差。

3.1 能量分辨率测量

能量分辨率是核辐射探测器的一项重要指标, 表征了探测器区分相近能量的 γ 峰的能力。放射源放出的射线进入闪烁体, 闪烁体受激发后退激发出的荧光光子被光电器件探测到, 通过光电器件光电转换和倍增的过程, 得到能谱中全能峰半高宽与峰位值的比值, 称为能量分辨率[17,25]。能量分辨率一般用 ²²Na 或 ¹³⁷Cs 放射源能谱中全能峰半高宽与峰位值的比值表示。

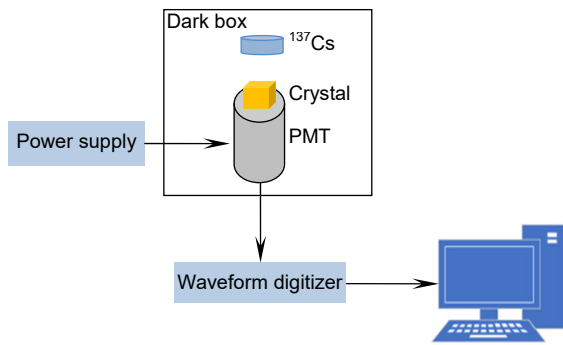


图3 闪烁体能谱分辨率测试装置图
Fig. 3 The schematic of scintillator energy spectrum measurement

闪烁体能量分辨率测试选用的 SiPM 型号是 S13360-6050CS, 其有效面积为 6 mm×6 mm, 对波长在 350 nm~550 nm 的闪烁光有较高的光子探测效率 (>28%)。高的光子探测效率有利于提高能量分辨率。实验中使用的放射源为 ¹³⁷Cs。在闪烁体进行能量分辨率测量前, 应将闪烁体提前避光, 避免闪烁体余辉对测试结果的影响。

闪烁体的能量分辨率受许多因素影响, 主要是由 SiPM 和闪烁体的性能决定。本套测试方案优化了 SiPM 的工作电压和取数阈值, 闪烁体和 SiPM 的耦合方法以及闪烁体的包裹膜反射材料等影响因素, 将 SiPM 工作电压设置为 54.5 V, 使用 Teflon 膜包裹尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm 的 LYSO:Ce 闪烁体, 与 SiPM 使用硅脂进行耦合, 并调整取数阈值, 以获得最佳的能量分辨率。测量 LYSO:Ce 闪烁体的能量分辨率时 SiPM 已饱和, 需要进行饱和修正, 修正方法如下。

对短于 SiPM 有效恢复时间的光脉冲, SiPM 对输入光的响应理论上可以描述为^[26]

$$N_{\text{fire}} = N_{\text{pix}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon N_{\text{in}}}{N_{\text{pix}}}\right) \right), \quad (1)$$

式中: N_{fire} 表示 SiPM 被激发的像素数, 与电荷积分谱中的模数转换(analog to digital conversion, ADC)道数成正比, N_{pix} 为 SiPM 的总像素数, ε 为光子探测效率 (photon detection efficiency, PDE), N_{in} 为入射光子数, 入射光子数和光探测效率的乘积为 N_{pd} 。 N_{pd} 为无限数量的像素将检测到的光子的数量, 并且该数量与检测到的 γ 射线的能量成正比。

当 SiPM 的恢复时间比某个事件的持续时间短

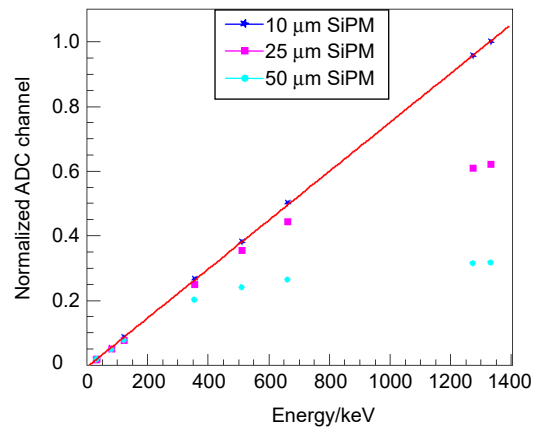


图4 LYSO:Ce 耦合不同探测器的能量线性
Fig. 4 Energy linearity when LYSO:Ce is coupled with different detectors

时, 存在每个像素不止一次地对入射光产生响应的可能性, 这使得有效像素数 N_{eff} 大于实际像素数 N_{pix} 。这种情况下, SiPM 对输入光的响应可以用式(2)^[26]描述。 N_{fire} 和电荷积分谱中的 ADC channel 之间的关系如式(3)所示, 其中, M 是 γ 峰的道址, 即电荷积分谱中的 ADC channel, S 为光电探测器测得多光子谱中单光电子的道址。理想情况下 SiPM 可探测到的闪烁体发出的光子数与入射 γ 能量成正比。再结合式(2)、式(3)可得式(4), 其中 E 为入射 γ 能量, k 为常数。

$$N_{\text{fire}} = N_{\text{eff}} \left(1 - \exp\left(-\frac{N_{\text{pd}}}{N_{\text{eff}}}\right) \right), \quad (2)$$

$$N_{\text{fire}} = \frac{M}{S}, \quad (3)$$

$$M = N_{\text{eff}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E \times k}{N_{\text{eff}}}\right) \right) \times S. \quad (4)$$

从图 4 中 10 μm SiPM 的线性曲线可知, 此 LYSO:Ce 晶体在 31 keV 到 1332 keV 能量范围内线性良好。图 5 为 LYSO:Ce 晶体耦合 50 μm SiPM 时的能量线性, 使用式(4)拟合, 可得式(5):

$$M = 524844 \times \left[1 - \exp\left(-\frac{10.62 \times E}{N_{\text{eff}}}\right) \right] \times 109.8. \quad (5)$$

由式(5)可得入射能量与 ADC 谱中 γ 峰的道址的关系式:

$$E = -450 \cdot \ln\left(1 - \frac{M}{524844}\right). \quad (6)$$

根据式(6)可对 LYSO:Ce 耦合 50 μm SiPM 时 ¹³⁷Cs 的能谱进行修正。修正结果如图 6 所示, 其中图 6(a) 为修正前的 ADC 谱, 图 6(b)为修正后的能谱。经过

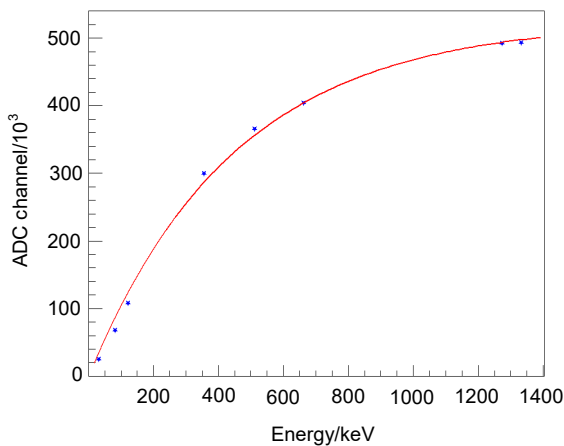


图 5 LYSO:Ce 耦合 50 μm SiPM 的能量线性
Fig. 5 Energy linearity when LYSO:Ce is coupled with the SiPM with 50 μm microcells

饱和修正后得到 LYSO:Ce 晶体耦合 50 μm SiPM 的能量分辨率为 7.9%@662 keV。在相同测试条件下测量了尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm 的 2 块 GAGG:Ce, 其中陶瓷 GAGG:Ce 闪烁体的能量分辨率修正后为 5.4%@662 keV, 单晶 GAGG:Ce 闪烁体的能量分辨率为 7.1%@662 keV(未饱和)。

3.2 光输出测量

闪烁体光产额的大小表征闪烁体的发光能力, 是评价闪烁体性能优劣的一个重要指标。光产额是指粒子损失能量转变为闪烁光子的效率^[27], 单位为 ph/MeV。闪烁体光产额越高, 光电器件探测到的光子数越多, 系统的统计误差越小, 得到的测试精度就越高。绝对光产额通过实验装置的光收集效率(η)与闪烁

体的光输出呈正相关的关系。 η 代表所有因素对闪烁光子从闪烁体到光电探测器传输过程的影响, 如晶体的自吸收、晶体的大小和形状、光子从闪烁体到光电探测器的传输效率等, 此因素难以准确测量, 因此本文仅研究闪烁体的光输出。¹³³Ba 放射源的 31 keV 与 81 keV 两个峰能量较小, 在 SiPM 能量响应的线性范围内。因此本套测试方案将放射源 ¹³³Ba 用于闪烁体光输出测量, 闪烁体光输出可以通过式(7)获得。

$$L_m = \frac{(M_{81\text{ keV}} - M_{31\text{ keV}}) \times 1000\text{ keV}}{S \times \epsilon_s \times (81 - 31)\text{ keV}}, \quad (7)$$

其中: L_m 为闪烁体的光输出, $M_{31\text{ keV}}$ 和 $M_{81\text{ keV}}$ 分别是 ¹³³Ba 能谱中的 31 keV 和 81 keV 峰值处的道址, S 是 SiPM 的单光电子道址, ϵ_s 是基于 SiPM 本身 PDE 与晶体发射光谱计算得到的加权 PDE^[28]。该方法忽略了闪烁体与光电探测器耦合时丢失的光子数量。

闪烁体光输出测量选用的 SiPM 型号是 S13360-6025CS, 使用信号发生器驱动激光二极管(laser diode, LD)作为光源, 测量 SiPM 的单光电子光谱, 从中计算得到单光电子道址。为提高光收集效率, 将 LYSO:Ce 闪烁体的五个面包裹, 闪烁体与 SiPM 之间采用硅脂耦合, 硅脂的折射率约为 1.5, 在 280 nm 至 700 nm 的波长范围内其透射率非常稳定, 约为 95%。放射源紧贴闪烁体, 通过能谱得到能量为 31 keV 和 81 keV 的峰值对应道址, 最后通过式(7)获得闪烁体的光输出。

该测试方法测量得到 LYSO:Ce 闪烁体的光输出为 27029 ph/MeV, 陶瓷和单晶 GAGG:Ce 的光输出为分别为 59316 ph/MeV 和 31405 ph/MeV。

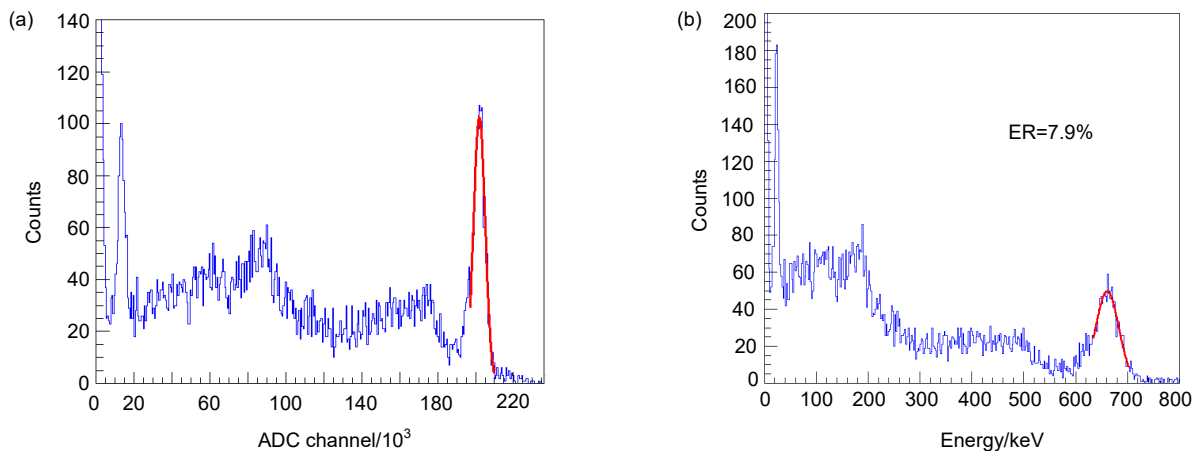


图 6 LYSO:Ce 的能量分辨率。(a) 修正前; (b) 修正后
Fig. 6 The energy resolution of LYSO:Ce. (a) Before correction; (b) After correction

4 时间性能测量

由于新型无机闪烁体的特点是具有快的衰减时间, 为实现对闪烁体时间特性的精确测量, 所用光电探测器需具备优异的时间特性。本套测试方案用一套装置实现了对闪烁体的余辉、衰减时间和符合时间分辨的测试, 所用探测器均为快速光电探测器件。

4.1 余辉测量

当闪烁体受到外界光照射后, 材料中基态电子获得能量跃迁到激发态, 通过放出荧光光子或淬灭效应退激后, 还有部分电子由于所处激发态为亚稳态, 需要通过自身热运动或外界能量才能逐渐将激发能量以光子形式释放, 这种现象称为闪烁体的余辉^[9]。

由于部分无机闪烁体具有较强余辉(如 CsI:Tl、LYSO:Ce 和 GAGG:Ce 等), 为减弱余辉对测试结果造成的影响, 在进行闪烁体性能测试前通常需要长时间

避光, 使用过程中也需要保证严格的避光操作。一旦晶体曝光就需要等到余辉散去才能进行测试, 而余辉的衰减是一个较长的过程。为了解闪烁体曝光后余辉持续时间, 设计了一套余辉测试装置, 如图 7 所示。

本次实验对象为 5 mm×5 mm×5 mm 的单晶和陶瓷 GAGG:Ce 闪烁体, 使用 PMT^[29]进行测量。为扣除环境本底和光电器件暗噪声的影响, 首先将暗箱中的隔板放下将闪烁体与 PMT 隔开, 在无光源无闪烁体情况下采集 PMT 的暗噪声信号。下一步使用信号产生器驱动深紫外 LED 发光, 照射闪烁体 1 min 后, 在关闭 LED 灯的同时抽出暗箱中的隔板, 将闪烁体与 PMT 通过空气耦合在一起, 使闪烁体的余辉被 PMT 探测到。最后将 PMT 的输出信号经过放大、甄别后输入到计数器, 获得了该测试温度下(22.5 °C)不同生长方式的 GAGG:Ce 余辉强度的相对值, 如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 在相同的测试条件下, 单晶

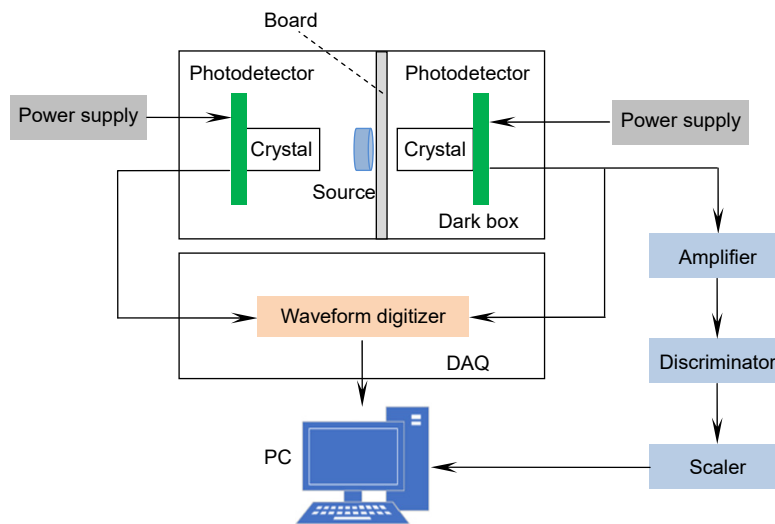


图 7 闪烁体时间特性测试装置图

Fig. 7 The schematic of scintillator time characteristic measurement

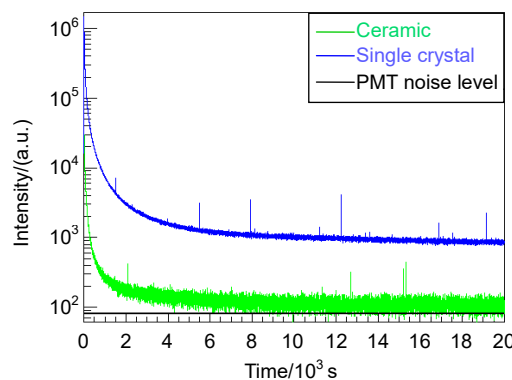


图 8 GAGG:Ce 闪烁体的余辉衰减曲线

Fig. 8 The afterglow decay curve of GAGG: Ce scintillator

GAGG:Ce 的余辉强度比陶瓷 GAGG:Ce 高了至少一个数量级, 强度随时间都呈指数模式衰减, 最后趋于一个固定值。GAGG:Ce 闪烁体的余辉强度随着时间衰减了两个数量级以上, 且闪烁体余辉的衰减主要发生在曝光后的 1000 s 内。曝光后约 10000 s, 闪烁体余辉衰减趋势线变得平坦, 余辉强度不再发生明显降低, 余辉强度仍大于 PMT 的暗噪声水平。值得注意的是, 陶瓷 GAGG:Ce 避光 10000 s 后的余辉强度只略高于 PMT 的暗噪声水平, 产生这种现象的原因除了陶瓷 GAGG:Ce 本身余辉弱于单晶 GAGG:Ce 外, 还可能是陶瓷 GAGG:Ce 透过率太低, 导致光子无法从闪烁体中逃逸。

4.2 衰减时间测量

闪烁体衰减时间是指闪烁光从峰值衰减到峰值的 1/e 处所用的时间, 闪烁体衰减时间的测试使用 PMT^[30], 放射源 ¹³⁷Cs 激发闪烁体发出光子被 PMT 探测, PMT 的输出脉冲波形由波形数字化仪记录后进行离线分析, 只需利用图 7 测试装置的左边一半设备即可对闪烁体衰减时间进行测量。

为了提高测试精度, 对多个脉冲波形进行平均后的波形用于测试闪烁体的衰减时间。图 9 为 PMT 耦合 LYSO:Ce 和 GAGG:Ce 闪烁体对 ¹³⁷Cs 响应的平均波形。通过对 LYSO:Ce 闪烁体平均脉冲波形使用指数函数进行拟合得到公式:

$$y = -9.2 \exp\left(\frac{x - 726.5}{-42.0}\right) + 1006.2。$$

从公式可知, LYSO:Ce 闪烁体的衰减时间为 42.0 ns。通过对单晶 GAGG:Ce 闪烁体平均脉冲波形进行拟合得到公式:

$$y = -34.1 \exp\left(\frac{650.4 - x}{321.5}\right) - 141.3 \exp\left(\frac{650.4 - x}{50.1}\right) + 893.5。$$

由拟合公式可知, 单晶 GAGG:Ce 的衰减时间由快、慢两种成分组成。两种成分的衰减时间分别为 50.1 ns 和 321.5 ns, 二者的强度比例分别为 39.2% 和 60.8%。

4.3 符合时间分辨率测量

实验室研制的基于微通道板(microchannel plate, MCP)的近贴聚焦型 PMT 具有优越的时间特性, 其上升时间能达到 103 ps, 单光子时间分辨为 68 ps, 可实现精确的时间信息测量, 因此本套测试方案的光电探测器采用 MCP-PMT 用于符合时间分辨测量, 其工作电压为 -4800 V。将 3 mm×3 mm×5 mm 的 LYSO:Ce 闪烁体五面包裹 Teflon 反射膜, 使用硅脂与 MCP-PMT 耦合组成探测器, 将 ²²Na 放射源置于两组探测器中间, 并与两组探测器分别间隔 1 cm, 取数系统为采样率为 40 GHz, 带宽为 4 GHz 的示波器, 实验装置如图 7 所示。

²²Na 放射源放出正电子湮灭产生两个能量相等、方向相反的 γ 光子, 这两个光子分别入射到两块晶体, 采用前沿定时法得到两路 MCP-PMT 信号之间的时间差。根据输出信号幅度将取数阈值设置为 10 mV, 采用复合测量方式多次测量两个探测器输出有效符合波形之间的时间差, 得到符合波形时间差的分布。对其进行高斯拟合, 即可得到系统的符合时间分辨率^[25,31]。在此条件下, 利用本套装置测得两块 3 mm×3 mm×5 mm LYSO:Ce 闪烁体的符合时间分辨率为 94.3 ps(FWHM), 如图 10 所示。

为优化测试装置, 使用时间性能更好的快速 SiPM

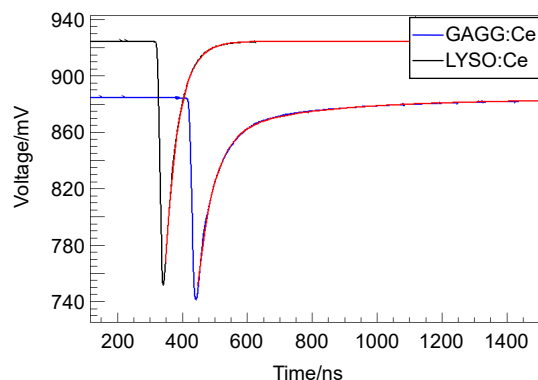


图 9 LYSO:Ce 和单晶 GAGG:Ce 的平均脉冲波形

Fig. 9 The average pulse waveform of LYSO:Ce and single crystal GAGG:Ce

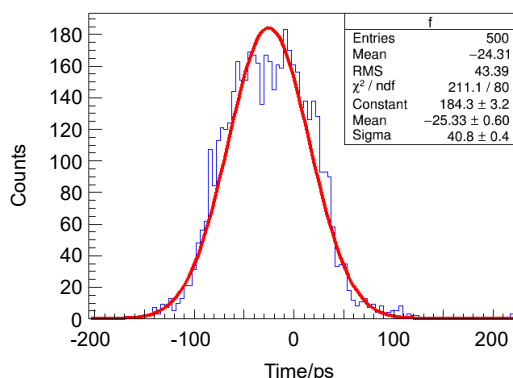


图 10 LYSO:Ce 闪烁体的符合时间分辨率

Fig. 10 The coincidence time resolution of LYSO:Ce scintillator

(MICROFJ-30035-TSV-TR)^[32]进行测试, 此 SiPM 具有两个输出端口, 一个标准输出端口, 一个快速输出端口。标准输出端口用于测量能量信息, 快速输出端口具有优异的时间特性, 用于测量时间信息, 采用信号发生器驱动 LD(400 nm)作为光源, 测得其极限时间分辨可达 35.2 ps。使用两个 SiPM 分别耦合两块 2 mm×2 mm×2 mm LYSO:Ce 闪烁体, 对符合时间分辨率进行测试, 但由于该测试方案还不成熟, 测得其符合时间分辨率为 206.3 ps(FWHM)。

使用本文的无机闪烁体性能测试方案, 对 LYSO:Ce 和 GAGG:Ce 的性能测试结果如表 1 所示。

5 结论

由于无机闪烁体优异的发光特性, 在高能物理实验、核医学成像、无损探伤和环境监测等领域具有巨大的应用前景, 为满足 CEPC、HERD 等大科学工程对闪烁体快速、便捷筛选需求, 实验室设计了完整的无机闪烁体性能测试方案, 可快速而准确地对闪烁体的发射光谱、光输出、能量分辨率、余辉和符合时间

分辨率进行测试, 且已成功应用于 LYSO:Ce 和 GAGG:Ce 闪烁体的性能测试中, 并取得较好的测试结果。因此, 本套测试方案在无机闪烁体性能测试方面具有一定的普适性。另外, 本套测试方案在衰减时间、余辉及符合时间分辨方面还有待优化, 下一步将以此为重点开展后续研究。

参考文献

- [1] Ren G H. Development history of inorganic scintillation crystals in China[J]. *J Synth Cryst*, 2019, **48**(8): 1373–1385.
任国浩. 无机闪烁晶体在我国的发展史[J]. *人工晶体学报*, 2019, **48**(8): 1373–1385.
- [2] Yang Y, Shang S S, Chen Y L, et al. Review of inorganic scintillation materials[J]. *Mater Rev*, 2016, **30**(2): 87–91.
杨熠, 尚珊珊, 陈艳林, 等. 无机闪烁材料研究进展[J]. *材料导报*, 2016, **30**(2): 87–91.
- [3] Zhu Y, Wang Z G, Qian S, et al. Study of characteristics of Ce-doped Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ scintillator[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 2019.
- [4] Li M H, Niu P J, Dong M Y, et al. A testing system of scintillator readout unit based on waveform sampling for CEPC ECAL[J]. *Nucl Tech*, 2018, **41**(1): 010402.
李明慧, 牛萍娟, 董明义, 等. 基于波形采样的 CEPC 电磁量能器

表 1 LYSO:Ce 和 GAGG:Ce 闪烁体的性能测试结果

Table 1 The performance test results of LYSO:Ce and GAGG:Ce scintillators

Scintillator	LYSO:Ce	GAGG:Ce (Ceramic)	GAGG:Ce (Single crystal)
Light output/(ph/MeV)	27029	59316	31405
Energy resolution/(%)	7.9	5.4	7.1
Decay time/ns	42.0	182.9	50.1 (39.2%) 321.5 (60.8%)
Coincidence time resolution/ps	94.3	-	-

- 读出单元测试系统[J]. 核技术, 2018, **41**(1): 010402.
- [5] Huang X Y, Lamperstorfer A S, Tsai Y L S, *et al.* Perspective of monochromatic gamma-ray line detection with the High Energy cosmic-Radiation Detection (HERD) facility onboard China's Space Station[J]. *Astropart Phys*, 2016, **78**: 35–42.
- [6] Yan C F, Zhao G J, Zhang L H, *et al.* Crystal growth and optical characterization of large-sized cerium-doped $\text{Lu}_{1.6}\text{Y}_{0.4}\text{SiO}_5$ [J]. *J Inorg Mater*, 2005, **20**(6): 1301–1305.
严成锋, 赵广军, 张连翰, 等. 大尺寸 $\text{Ce}:\text{Lu}_{1.6}\text{Y}_{0.4}\text{SiO}_5$ 闪烁晶体的生长和光谱特性[J]. 无机材料学报, 2005, **20**(6): 1301–1305.
- [7] Mao R H, Wu C, Dai L E, *et al.* Crystal growth and scintillation properties of LSO and LYSO crystals[J]. *J Cryst Growth*, 2013, **368**: 97–100.
- [8] Phunpueok A, Chewpraditkul W, Limsuwan P, *et al.* Light output and energy resolution of $\text{Lu}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{AlO}_3:\text{Ce}$ and $\text{Lu}_{1.95}\text{Y}_{0.05}\text{SiO}_5:\text{Ce}$ scintillators[J]. *Proced Eng*, 2012, **32**: 564–570.
- [9] Ferri A, Gola A, Serra N, *et al.* Performance of FBK high-density SiPM technology coupled to Ce:LYSO and Ce:GAGG for TOF-PET[J]. *Phys Med Biol*, 2014, **59**(4): 869–880.
- [10] Calva-Coraza E, Alva-Sánchez H, Murrieta-Rodríguez T, *et al.* Optimization of a large-area detector-block based on SiPM and pixelated LYSO crystal arrays[J]. *Phys Med*, 2017, **42**: 19.
- [11] Alva-Sanchez H, Murrieta T, Moreno-Barbosa E, *et al.* A small-animal PET system based on LYSO crystal arrays, PS-PMTs and a PCI DAQ board[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2010, **57**(1): 85–93.
- [12] Akatsu M, Enari Y, Hayasaka K, *et al.* MCP-PMT timing property for single photons[J]. *Nucl Instrum Meth Phys Res*, 2004, **528**(3): 763–775.
- [13] <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/mppc/index.html>.
- [14] Tamulaitis G, Auffray E, Gola A, *et al.* Improvement of the timing properties of Ce-doped oxyorthosilicate LYSO scintillating crystals[J]. *J Phys Chem Solids*, 2020, **139**: 109356.
- [15] Zhu Y, Qian S, Wang Z G, *et al.* Scintillation properties of GAGG:Ce ceramic and single crystal[J]. *Opt Mater*, 2020, **105**: 109964.
- [16] Deprez K, Van Hoken R, Vandenberghe S. A high resolution SPECT detector based on thin continuous LYSO[J]. *Phys Med Biol*, 2014, **59**(1): 153–171.
- [17] Atanov N, Baranov V, Colao F, *et al.* Energy and time resolution of a LYSO matrix prototype for the Mu2e experiment[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sec A: Accel, Spectrom, Detect Assoc Equip*, 2016, **824**: 684–685.
- [18] Wanarak C, Chewpraditkul W, Phunpueok A, *et al.* Luminescence and scintillation properties of Ce-doped LYSO and YSO crystals[J]. *Adv Mater Res*, 2011, **199–200**: 1796–1803.
- [19] Yuan J M. Development of measurement system for scintillator decay time and light yield[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
袁鞠敏. 闪烁体发光衰减时间与光产额测试系统研制[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [20] Martins A F, Carreira J F C, Rodrigues J, *et al.* Spectroscopic analysis of LYSO:Ce crystals[J]. *Spectrochim Acta Part A: Mol Biomol Spectrosc*, 2017, **172**: 163–167.
- [21] Iwanowska J, Swiderski L, Szczesniak L, *et al.* Performance of cerium-doped $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GAGG:Ce) scintillator in gamma-ray spectrometry[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sec A: Accel, Spectrom, Detect Assoc Equip*, 2013, **712**: 34–40.
- [22] Feng D J, Ding Y L, Liu J, *et al.* Study on the growth and scintillation properties of Ce:GAGG crystal[J]. *Piezoelect Acoustoopt*, 2016, **38**(3): 430–432.
冯大建, 丁雨瞳, 刘军, 等. Ce:GAGG 闪烁晶体生长与性能研究[J]. 压电与声光, 2016, **38**(3): 430–432.
- [23] Tong Y, Yan Z W, Zeng H D, *et al.* Enhanced blue emission of SnO_2 doped phosphate glasses by Gd_2O_3 co-doping[J]. *J Lumin*, 2014, **145**: 438–442.
- [24] Yin S Y, Chen P Y, Ma L S, *et al.* Study of the low voltage power module for SiPM[J]. *Nucl Technol*, 2019, **42**(9): 090403.
尹士玉, 陈鹏宇, 马丽双, 等. SiPM 低压电源模块性能研究[J]. 核技术, 2019, **42**(9): 090403.
- [25] Dong C H, Ma M, Zhou R, *et al.* Energy resolution and time resolution of SiPM coupled LYSO crystal detector[J]. *Nucl Electron Detect Technol*, 2017, **37**(1): 1–3, 19.
董春辉, 马敏, 周荣, 等. SiPM 耦合 LYSO 晶体探测器的能量分辨和时间分辨[J]. 核电子学与探测技术, 2017, **37**(1): 1–3, 19.
- [26] Kotera K, Choi W, Takeshita T. SiPM response functions representing wide range including linear behavior after saturation[Z]. arXiv:1510.01102, 2016.
- [27] Eigen G, Lee G R. Light yield and uniformity measurements of different scintillator tiles with silicon photomultipliers[J]. *J Instrum*, 2020, **15**(6): C06059.
- [28] Limkitjaroenporn P, Sangwaranatee N, Chaiphaksa W, *et al.* Comparative studies of the light yield non-proportionality and energy resolution of CsI(Tl), LYSO and BGO scintillation crystals[J]. *Mater Sci Forum*, 2016, **872**: 266–270.
- [29] http://www.hamamatsu.com.cn/UserFiles/DownFile/Product/R6427_R7056_TPMH1187E05.pdf.
- [30] http://lmu.web.psi.ch/docu/manuals/bulk_manuals/PMTs/xp2020.pdf.
- [31] Pan T, Einstein S A, Kappadath S C, *et al.* Performance evaluation of the 5 - Ring GE Discovery MI PET/CT system using the national electrical manufacturers association NU 2 - 2012 Standard[J]. *Med Phys*, 2019, **46**(7): 3025–3033.
- [32] <https://www.mouser.cn/datasheet/2/308/MICROJ-SERIES-D-1811589.pdf>.

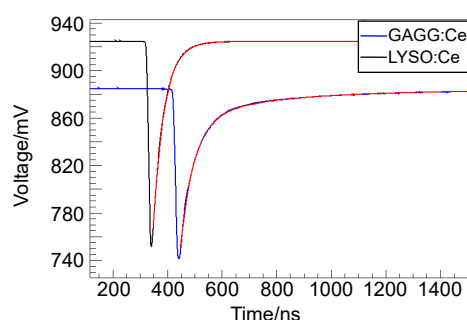
Study on performance test plan of inorganic scintillator

Yin Shiyu¹, Guo Hao^{1,2}, Yan Min², Wang Zhigang^{2,3},
Ma Lishuang², Zhang Lingfeng², Qian Sen^{2,3*}

¹School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

²Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China



The average pulse waveform of LYSO:Ce and single crystal GAGG:Ce scintillators

Overview: Inorganic scintillators have a history of more than sixty years of development in our country. During this period, many scintillators have been successfully developed and put on the market. They have excellent scintillation properties such as high density and high transmittance, as well as stable physical and chemical properties. Coupled with photodetectors, they become one of the core detectors in high-energy physics and nuclear physics experiments. At present, the demand for the physical characteristics of the scintillators has been transformed into high light yield, excellent energy resolution, and fast decay time. Some large-scale scientific projects and new medical imaging equipment, such as the development of large-scale collider experimental detectors, space load calorimeters and TOF-PET require a large number of high-performance scintillators. For this reason, it is urgent to develop and design a complete and convenient scintillator performance test program.

With the development of the photoelectric field, a new type of fast photodetector with fast time response, strong anti-interference ability, small size and light weight has been developed. It is suitable for the detection of fast and extremely weak signals, and its time resolution can reach on the order of tens of picoseconds. The production of new fast photodetectors has also made the scintillator performance test enter a new stage, and the test accuracy will be significantly improved. As a result, an inorganic scintillator performance test plan for a new type of inorganic scintillator and a fast photodetector came into being.

LYSO:Ce scintillator has attracted widespread attention due to its high light yield (25000 ph/MeV) and fast luminescence decay time (40 ns). The single crystal GAGG:Ce scintillator has a light yield of 30000 ph/MeV, and has two decay components: fast and slow. According to the difference of the decay time of the output pulse waveform, it is expected that the PSD method can be used to realize particle discrimination.

The outstanding fluorescence performance advantages of LYSO:Ce scintillator and GAGG:Ce scintillator have set off a research boom. The light output of the LYSO:Ce scintillator is 27029 ph/MeV, the decay time is 40 ns, the energy resolution is 7.9%@662 keV, and the coincidence time resolution can reach 94.3 ps, which were measured by the inorganic scintillator performance test plan. At the same time, the light outputs of ceramic and single crystal GAGG:Ce are 59316 ph/MeV and 31405 ph/MeV, respectively, the energy resolution is 5.4%@662 keV and 7.1%@662 keV, and the decay time of ceramic GAGG:Ce is 182.9 ns. The decay time components of single crystal GAGG:Ce are 50.1 ns and 321.5 ns, respectively.

Yin S Y, Guo H, Yan M, *et al.* Study on performance test plan of inorganic scintillator[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(6): 210038; DOI: 10.12086/oe.2021.210038

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11675205, 11675196), Youth Innovation Promotion Association CAS, and Foundation of State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics (SKLPDE-ZZ-201902)

* E-mail: qians@ihep.ac.cn