

掺钇 BaF₂ 闪烁探测器性能研究

王红锋^{1,2} 刘福雁² 王英杰² 陈俊锋³ 况 鹏² 张 鹏² 于润升² 曹兴忠²
李玉晓¹ 王宝义²

1(郑州大学 物理学院(微电子学院) 郑州 450001)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3(中国科学院上海硅酸盐研究所 上海 201899)

摘要 利用²²Na放射源释放的 β^+ 湮没产生的0.511 MeV γ 射线,研究了掺钇BaF₂(钇掺杂为1 at%,原子百分数)闪烁探测器的能量分辨和时间分辨性能。与BaF₂探测器对比实验结果表明:掺钇BaF₂晶体的快慢成分比(1:1.1)远高于BaF₂晶体的快慢成分比(1:5),掺钇BaF₂探测器的能量分辨率(38%)低于BaF₂探测器的能量分辨率(19%);在高强度 γ 射线环境下,掺钇BaF₂探测器的符合时间分辨率优于BaF₂探测器的时间分辨。分析发现:掺钇BaF₂晶体中慢成分信号的减少,缩短了探测器输出信号的时间宽度,有利于在探测高强度 γ 射线时减缓或消除探测器中高计数率时间信号的堆积现象,提高探测器的时间分辨能力。

关键词 闪烁体探测器, 掺钇BaF₂晶体, 能量/时间分辨率, 高强度 γ 射线, 信号堆积

中图分类号 TL812, TL817

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.030401

Study on performance of Yttrium doped BaF₂ scintillation detector

WANG Hongfeng^{1,2} LIU Fuyan² WANG Yingjie² CHEN Junfeng³ KUANG Peng² ZHANG Peng²
YU Runsheng² CAO Xingzhong² LI Yuxiao¹ WANG Baoyi²

1(School of Physics (School of Microelectronics), Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

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

3(Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China)

Abstract [Background] BaF₂ scintillation detector is commonly used in low intensity γ -ray detection experiments, and it is easy to pileup during high intensity γ -ray detection. [Purpose] This study aims to investigate the performance of Yttrium doped BaF₂ (Yttrium doped with 1 at%, atomic percentage) scintillation detector with main concern of pileup and time resolution for high intensity γ -ray detection. [Methods] The energy resolution and time properties of Yttrium doped BaF₂ (Yttrium doped with 1 at%) scintillation detector were experimentally tested by using 0.511 MeV γ -ray generated after positron annihilation from ²²Na source. As a comparison, the normal BaF₂ detector was also tested. [Results] The experimental results show that the ratio of fast and slow components of Yttrium doped BaF₂ crystal (1:1.1) is much higher than that of BaF₂ crystal (1:5), but the energy resolution of Yttrium

国家自然科学基金(No.11575205、No.11875055、No.51402332、No.11805210)、中国科学院科研仪器设备研制项目(No.YJKYYQ20180007)资助

第一作者: 王红锋, 男, 1994年出生, 2017年毕业于井冈山大学, 现为硕士研究生, 研究领域为正电子湮没谱学技术。

通信作者: 曹兴忠, E-mail: caoxzh@ihep.ac.cn; 李玉晓, E-mail: liyuxiao@zzu.edu.cn

收稿日期: 2019-11-21, 修回日期: 2020-02-24

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11575205, No.11875055, No.51402332, No.11805210), the Scientific Instrument Developing Project of Chinese Academy of Sciences (No.YJKYYQ20180007)

First author: WANG Hongfeng, male, born in 1994, graduated from Jinggangshan University in 2017, master student, focusing on study of positron annihilation spectroscopy technology

Corresponding author: CAO Xingzhong, E-mail: caoxzh@ihep.ac.cn; LI Yuxiao, E-mail: liyuxiao@zzu.edu.cn

Received date: 2019-11-21, revised date: 2020-02-24

doped BaF_2 detector (38%) is worse than that of BaF_2 detector (19%). For high intensity γ -ray detection, the Yttrium doped BaF_2 detector have better time resolution than the BaF_2 detector. **[Conclusions]** The decrease of the slow component in Yttrium doped BaF_2 crystal can shorten the time width of the detector output signal, hence reduce the signals' pileup and improve the time resolution of the detector in high count rate environment.

Key words Scintillation detector, Yttrium doped BaF_2 crystal, Energy/time resolution, High intensity γ -ray, Pileup

BaF_2 无机晶体具有发光时间快、光产额高等发光特性,常被用作 γ 射线探测的闪烁发光晶体材料^[1]。而 BaF_2 闪烁体耐 γ 射线辐照的优点,是核辐射探测器选择闪烁晶体的关键因素^[2]。因此,基于 BaF_2 闪烁体的探测器在定时测量、 γ 多重性测量和核能级寿命测量等 γ 射线探测实验中得到了广泛的应用^[1-3]。 γ 射线在 BaF_2 晶体内的能量沉积产生两种发光成分,分别为光衰减时间约0.6 ns、波长峰值210 nm的快成分和光衰减时间约620 ns、波长峰值为310 nm的慢成分,快慢成分强度比为1:5^[4-6]。实验时,通常采用 BaF_2 晶体耦合光电倍增管作为探测器,利用 BaF_2 闪烁体快慢成分的快-慢信号双重符合测量技术,实现 γ 射线的有效探测和能量的精确甄别。如基于 ^{22}Na 放射源 β^+ 衰变实验的正电子湮没寿命谱测量,通过对1.28 MeV伴随 γ 射线和0.511 MeV湮没 γ 射线在 BaF_2 闪烁体内产生的快-慢光成分信号的符合测量,有效提高正电子湮没寿命谱的峰谷比^[7-8]。研究表明: BaF_2 晶体中的慢成分会导致探测器输出“尾部”较长的信号,探测器中的快信号与“尾部”的慢信号会随着 γ 射线强度的增加发生重叠现象,加重探测器的信号堆积,影响探测系统核电子学的信号处理能力,造成探测系统的死时间增加和时间分辨性能变差等问题^[9]。因此, BaF_2 闪烁探测器通常用于低强度 γ 射线信号的探测,充分发挥高时间分辨和信噪比、低偶然符合效率等特点。

研究发现, BaF_2 晶体中掺杂的少量杂质元素可抑制 BaF_2 闪烁体中慢信号成分的产生^[10-13]。例如,在 BaF_2 晶体中掺杂少量镧(掺杂浓度 ≤ 1 wt%,质量百分数)可有效抑制慢发光成分,快慢成分抑制比随掺杂含量的增加而提高,当掺杂浓度为1 wt%时,晶体的快慢成分抑制比约为纯 BaF_2 晶体的5.6倍^[10-11]。此外,掺杂钇10 at%的 BaF_2 粉末,快慢成分比增加了30倍^[12];在碳化硅中生长的掺杂钇(掺杂浓度为1 at%)的 BaF_2 晶体,慢成分强度减少了85%,而快闪烁成分的强度不受影响^[13]。

掺钇 BaF_2 晶体的发光特性,使得探测器在探测高强度 γ 射线的实验中保持高时间分辨和高信噪比、低偶然符合效率等性能优点。本文针对基于掺钇 BaF_2 闪烁晶体的 γ 射线探测器的探测性能进行测试分析,利用 ^{22}Na 放射源衰变的 β^+ 湮没产生的

0.511 MeV γ 射线测量了探测器的阳极输出信号、能量分辨和时间分辨性能,并与 BaF_2 探测器的性能进行对比分析。

1 实验方法

实验选择的掺钇 BaF_2 晶体由中国科学院上海硅酸盐研究所提供,晶体的几何结构如图1(a)所示,后端直径为 $\varnothing 30$ mm,前端直径为 $\varnothing 20$ mm,晶体厚度为20 mm。探测器采用的光电倍增管为Hamamatsu-R3377型,闪烁体晶体由双层荧光反射聚四氟乙烯薄膜(Teflon)进行封装。探测器快信号从光电倍增管阳极引脚引出,用于探测器时间分辨性能测量;探测器慢信号由光电倍增管的第六打拿极引出,用于探测器能量分辨性能的测量。探测器结构如图1(b)所示。

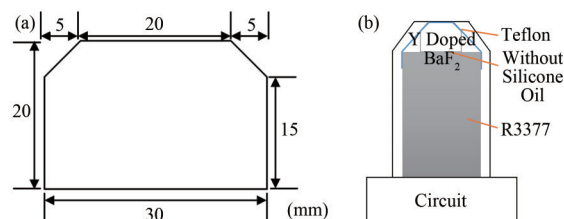


图1 掺钇 BaF_2 晶体几何结构(a)和探测器结构(b)
Fig.1 Structures of Y doped BaF_2 crystal (a) and detector (b)

图2为实验测量探测器时间分辨率时采用的原理框图。 ^{22}Na 放射源与两片金属镍样品组成“镍-源-镍”型“三明治”结构。探测器D1作为参考探测器,由未掺杂 BaF_2 晶体、XP2020Q型光电倍增管及电路构成;探测器D2为实验检测探测器,由掺钇 BaF_2 晶体、R3377型光电倍增管及电路构成。探测器D1和D2相对放置,与 ^{22}Na 放射源保持同轴。探测器阳极信号经恒比定时甄别器(CFDD(Constant-Fraction Differential Discriminator), ORTEC 583B)进行能量甄别,并产生定时信号,D1探测器和D2探测器探测到 γ 射线的定时信号可通过调整CFDD的能窗阈值来筛选。D1探测器与D2探测器之间的定时信号时间差经由时幅转换器(TAC(Time-to-Amplitude Converter), ORTEC 566)计算后输入多道分析器(MCA(Multichannel Analyzer), ORTEC 926),经足够的事例统计,获取D2探测器与D1探测器都探测

到 0.511 MeV γ 射线的符合时间分辨谱,拟合后可得到探测器之间的符合时间分辨率,可等效为被检测探测器的时间分辨。更换被检测探测器的晶体为同样几何结构的 BaF₂ 晶体,在相同实验测量条件下,对比晶体为掺钇 BaF₂ 和 BaF₂ 时被检测探测器的时间分辨率。实验时,为了避免硅油耦合引入的测量差异性,被检测探测器闪烁晶体与光电倍增管之间未添加硅油。

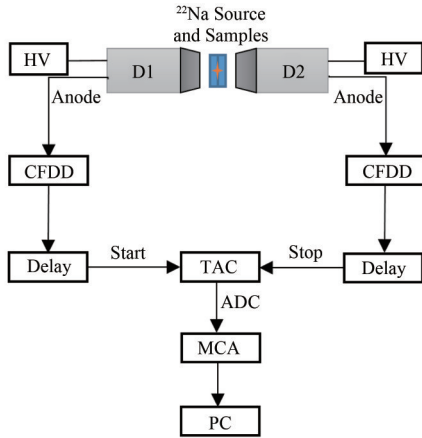


图2 探测器时间分辨测量原理框图
Fig.2 Measurement principle of time resolution of the detector

2 结果与讨论

2.1 掺钇 BaF₂ 闪烁探测器的阳极信号

为了研究 BaF₂ 晶体中掺杂钇对探测器阳极输出信号的影响,实验测量了掺钇 BaF₂ 探测器的阳极

输出信号。实验时,采用活度为 0.31 MBq 的 ²²Na 放射源提供 γ 射线,由 LECROY 数字存储示波器(DSO (Digital Storage Oscilloscope) WaveRunner 640Zi)对掺钇 BaF₂ 探测器的阳极输出信号进行采集分析,在相同条件下对 BaF₂ 探测器的阳极输出信号进行对比测量。探测器的阳极脉冲信号如图 3 所示,两种探测器阳极信号的快成分基本一致,但掺钇 BaF₂ 探测器的阳极信号慢成分明显小于 BaF₂ 探测器。

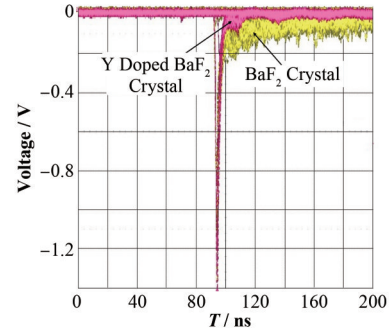


图3 掺钇 BaF₂ 与 BaF₂ 探测器阳极信号对比
Fig.3 Comparison of anode signals of Y doped BaF₂ and BaF₂ detectors

表 1 为两种探测器阳极输出信号的脉冲幅值、脉冲上升/下降时间、脉冲宽度等主要参数的测量结果,其中误差为示波器测量精度(表 1 中 BaF₂:Y 为掺钇 BaF₂ 晶体)。实验表明:掺钇 BaF₂ 和 BaF₂ 两种晶体探测器阳极输出信号的平均幅值、上升时间、下降时间和脉冲宽度没有明显差异。这些参数决定于 BaF₂ 晶体中的快发光成分,结果表明:两种晶体中的快发光成分的强度一致。

表 1 两种探测器阳极输出信号的主要参数
Table 1 The main parameters of anode output signal of two detectors

探测器 Detectors	平均幅值(误差) Mean (error) / mV	上升时间(误差) Rise time (error) / ns	下降时间(误差) Fall time (error) / ns	宽度(误差) Width (error) / ns
BaF ₂ :Y	-613.8 (6.25)	1.429 0 (0.05)	5.100 (0.05)	2.598 0 (0.05)
BaF ₂	-612.6 (6.25)	1.422 6 (0.05)	5.460 (0.05)	2.682 2 (0.05)

闪烁体受激后,电子退激发光一般服从指数衰减规律。单位时间发出的光子数(决定输出光脉冲的曲线形状),即发光强度为:

$$I(t) = -\frac{dn_{ph}(t)}{dt} = \frac{n_{ph}}{\tau_0} e^{-t/\tau_0} \quad (1)$$

式中: n_{ph} 光子数; τ_0 为闪烁体衰减时间。对有快慢两种发光成分的 BaF₂ 无机晶体,光子打在光阴极上产生的光电子经过光电倍增管倍增后在阳极输出回路上产生电流脉冲为 $I(t) = I_f(t) + I_s(t)$, 其中: $I_f(t)$ 和 $I_s(t)$ 分别为快慢发光成分产生的电流脉冲,光电倍增管的阳极输出脉冲波形 $U(t) = U_f(t) + U_s(t)$, 是电流

脉冲 $I(t)$ 在光电倍增管的 RC 输出回路上形成的, $U_f(t)$ 和 $U_s(t)$ 分别为快慢发光成分产生的电压脉冲。由于掺钇 BaF₂ 晶体和 BaF₂ 晶体的快成分一致,阳极信号快成分输出脉冲波形 $U_f(t)$ 一样,故这里只讨论慢成分输出波形。对于阳极信号慢成分电流脉冲波形 $I_s(t)$, 可以解出电压脉冲波形^[14]:

$$U_s(t) = \frac{Q_s R}{RC - \tau_s} \left(e^{-t/RC} - e^{-t/\tau_s} \right) \quad (2)$$

式中:RC 为输出回路时间常数; Q_s 为慢成分在阳极产生的电荷数; τ_s 为慢成分输出脉冲衰减时间常数。对于阳极输出信号,其电路的特点是 RC 远小于 τ_s ,

则式(2)可简化为:

$$U_s(t) = \frac{Q_s R}{\tau_s} e^{-t/\tau_s} \quad (3)$$

又BaF₂晶体慢成分强度值 S 与慢成分在阳极产生的电荷数 Q_s 成正比: $Q_s=kS$, $k>0$, k 为比例系数, 式(3)可表示为:

$$t = \tau_s \ln \left(\frac{kR}{\tau_s U} S \right) \quad (4)$$

当输出脉冲幅度为 U 时,慢成分信号脉冲宽度 t 和慢成分强度 S 的关系如图4所示。从图4可见, BaF₂晶体中慢成分强度越小,慢成分输出脉冲波形宽度 t 也越小。这说明:由于掺钇BaF₂晶体中慢成分的减少,掺钇BaF₂探测器的阳极信号宽度小于BaF₂探测器的阳极信号宽度。因此,在高计数率射线探测情况下,掺钇BaF₂探测器的使用可以有效减少信号堆积程度。

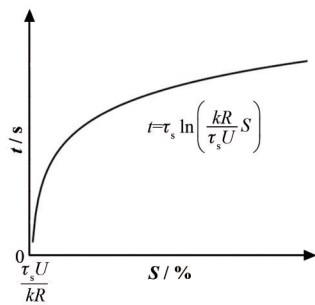


图4 慢成分输出脉冲波形宽度 t 随强度 S 的变化
Fig.4 Variation of output pulse waveform width t and the intensity S of slow component

2.2 掺钇BaF₂闪烁探测器能量分辨性能

探测器的能量分辨率(η)是反映探测器探测性能的关键参数之一,可通过能谱峰位处全能峰的半高宽计算得到。如下:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} \quad (5)$$

式中: ΔE 为全能峰的半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM); E 为峰位能量,计算掺钇BaF₂探测器探测0.511 MeV γ 射线光电峰的半高全宽与光电峰峰位(Peak)的比值得到能量分辨率。通过测

量²²Na放射源释放的 β^+ 湮没产生的 γ 射线(0.511 MeV)能谱实现闪烁探测器能量分辨率的测定,探测器慢信号经过前置放大器和主放大器放大成形后由多道进行收集,两种探测器测量的 γ 射线(0.511 MeV)能谱如图5所示。结果表明:掺钇BaF₂探测器测得能谱中0.511 MeV γ 光电峰的峰位向左偏移,结合图3所示,由于掺钇BaF₂晶体中慢成分较少,导致晶体光产额较低,而探测器输出信号幅度与晶体光产额成正比,因此掺钇BaF₂探测器的输出信号幅度较小。

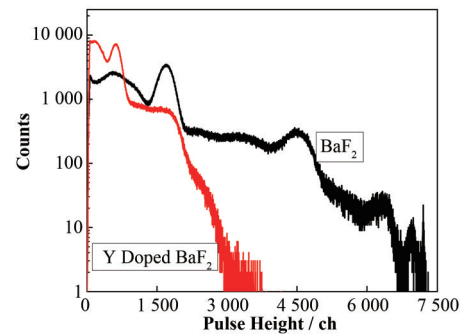


图5 两种探测器的能谱测量结果
Fig.5 Measurement results of energy spectrum of two detectors

依据图5测得的 γ 射线(0.511 MeV)能谱,分别计算了两种探测器的能量分辨率。表2为计算得到的能量分辨率、 γ 射线(0.511 MeV)光电峰半高宽和探测死时间,计算中能谱道宽通过测量²²Na源释放 β^+ 湮没产生的0.511 MeV γ 射线和¹³⁷Cs源释放的0.662 MeV γ 射线能谱标定,其中探测死时间是能谱测量时Ortec-Maestro软件显示的死时间数据。结果表明:掺钇BaF₂探测器和BaF₂探测器对0.511 MeV γ 射线的能量分辨率分别为38.29%和19.14%;掺钇BaF₂探测器系统的死时间显著降低。结合图3所示,由于掺钇BaF₂晶体中的慢成分强度远低于BaF₂晶体中的慢成分,因此掺钇BaF₂晶体的总光产额明显降低。从式(5)可知,探测器的能量分辨率与闪烁体的总光产额成反比,从而导致掺钇BaF₂探测器的能量分辨变差。但是,掺钇BaF₂晶体中慢成分的减少可减缓能谱测量过程中的信号堆积现象。

表2 0.511 MeV γ 能量分辨率计算结果和两种探测系统的死时间
Table 2 Calculation results of 0.511 MeV γ energy resolution and dead time of two detection systems

探测器 Detectors	光电峰半高宽 FWHM / MeV	峰位能量 Peak / MeV	能量分辨率 Energy resolution / %	死时间 Dead time / %
BaF ₂ :Y	0.196	0.511	38.29	29.0
BaF ₂	0.098	0.511	19.14	39.5

通常情况下,闪烁体探测器的输出信号幅度与入射 γ 光子在闪烁体中产生的总荧光光子数成正比。根据图 5 所示 γ 射线能谱中 0.511 MeV 光电峰的相对位置,可得到掺钇 BaF₂ 的光产额和慢成分比例。表 3 给出了计算得到的两种晶体的光产额和快

慢成分比值,计算时假设两种晶体的快成分光产额相同。结果表明:掺钇 BaF₂ 晶体中的慢成分约为 BaF₂ 晶体的 23%,总光产额约为 BaF₂ 晶体的 36.1%。

表 3 掺钇 BaF₂ 晶体光产额与快慢成分比值
Table 3 The light yield of Y doped BaF₂ crystal and the ratio of the fast component to the slow component

晶体 Crystals	光电峰峰位 Peak / ch	总光产额 Total light yield / MeV ⁻¹	快成分光产额 Fast component light yield / MeV ⁻¹	慢成分光产额 Slow component light yield / MeV ⁻¹	快慢比值 Fast/Slow
BaF ₂ ^[13,15]	1 701	11 000	1 870	9 130	1:5
BaF ₂ :Y	614	3 971	1 870	2 101	1:1.1

2.3 掺钇 BaF₂ 闪烁探测器时间分辨性能

为了研究 γ 射线强度对探测器时间分辨性能的影响,分别采用活度为 0.21 MBq、0.31 MBq 和 0.44 MBq 的 ²²Na 放射源,利用图 2 的实验原理对掺钇 BaF₂ 探测器的时间分辨率进行测量,时间分辨率用测得符合时间谱的半高宽表示,两种探测器探测不同强度 γ 射线的时间分辨率见表 4。结果表明:在探测低强度 γ 射线时,两种探测器的时间分辨率没

有差别;探测器的时间分辨率随着 γ 射线强度的增加逐渐变大,但掺钇 BaF₂ 探测器的时间分辨率要优于 BaF₂ 探测器。由于探测器阳极输出脉冲在前一个信号脉冲尾部区域出现的概率随着 γ 射线强度增加而增大,导致信号堆积程度加剧,使定时信号的质量变差,从而导致探测器时间分辨性能变差^[9];而掺钇 BaF₂ 晶体中慢成分较少,探测器产生的阳极信号宽度较窄,发生信号堆积的概率减小,因此探测高强度 γ 射线的时间分辨能力优于 BaF₂ 探测器。

表 4 γ 射线强度对探测器时间分辨的影响
Table 4 Effect of γ -ray intensity on time resolution of detector

γ 射线强度(源活度) γ -ray intensity (source activity) / MBq	时间分辨率 Time resolution / ps	
	掺钇 BaF ₂ 探测器 Y doped BaF ₂ detector	BaF ₂ 探测器 BaF ₂ detector
0.38 (0.21)	234.63	234.50
0.56 (0.31)	234.72	238.50
0.79 (0.44)	237.78	246.84

图 6 为 γ 射线强度为 0.79 MBq 时两种探测器对 0.511 MeV 双 γ 射线的符合时间分辨谱。结果表明:掺钇 BaF₂ 探测器符合时间分辨谱的半高宽小于 BaF₂ 探测器,说明 γ 射线强度为 0.79 MBq 时掺钇 BaF₂ 探测器的时间分辨优于 BaF₂ 探测器。

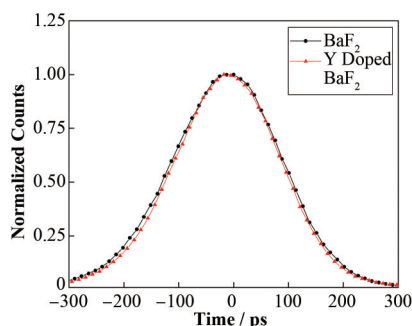


图 6 两种探测器的符合时间谱归一化
Fig.6 Normalization of coincidence time resolution spectra of two detectors

3 结语

利用 ²²Na 放射源释放的 β^+ 湮没产生的 0.511 MeV γ 射线测量了掺钇 BaF₂ (掺杂 1 at%) 闪烁探测器的阳极输出信号、能量分辨和时间分辨性能,计算了掺钇 BaF₂ 晶体的快慢成分强度比值。实验结果表明,掺钇 BaF₂ 探测器阳极输出脉冲快成分信号幅值与 BaF₂ 探测器保持一致,而慢成分信号幅值明显较小,掺钇 BaF₂ 晶体的快慢成分比约为 1:1.1;掺钇 BaF₂ 探测器能量分辨率差于 BaF₂ 探测器;在高计数率 γ 射线测量时,掺钇 BaF₂ 探测器可有效减少信号堆积,提升谱仪系统的时间分辨能力。

参考文献

- 1 潘仲韬, 刘卫宏, 唐金丽. BaF₂ 晶体性能测试及其应用前景[J]. 核电子学与探测技术, 1995, 15(3): 144-149.
PAN Zhongtao, LIU Weihong, TANG Jinli. Measurement of BaF₂ crystal properties and its applications[J]. Nuclear

- Electronics & Detection Technology, 1995, **15**(3): 144–149.
- 2 李培俊. 氟化钡晶体闪烁特性与表征[J]. 无机材料学报, 1995, **10**(3): 265–271.
LI Peijun. Scintillation properties and characterization of Barium fluoride crystals[J]. Journal of Inorganic Materials, 1995, **10**(3): 265–271.
- 3 Mach H, Gill R L, Moszyński M. A method for picosecond lifetime measurements for neutron-rich nuclei: (1) outline of the method[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1989, **280**(1): 49–72. DOI: 10.1016/0168-9002(89)91272-2.
- 4 Laval M, Moszyński M, Allemand R, *et al.* Barium fluoride: Inorganic scintillator for subnanosecond timing [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1983, **206**(1–2): 169–176. DOI: 10.1016/0167-5087(83)91254-1.
- 5 Schotanus P, van Eijk C W E, Hollander R W, *et al.* Photoelectron production in BaF₂-TMAE detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1987, **259**(3): 586–588. DOI: 10.1016/0168-9002(87)90845-x.
- 6 Woody C L, Levy P W, Kierstead J A. Slow component suppression and radiation damage in doped BaF₂ crystals [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989, **36**(1): 536–542. DOI: 10.1109/23.34497.
- 7 张天保, 李雪松, 刘卫民, 等. 高效率的正电子湮没2γ和3γ寿命谱仪[J]. 高能物理与核物理, 1989, **13**(12): 1057–1063.
ZHANG Tianbao, LI Xuesong, LIU Weimin, *et al.* High efficiency 2γ, and 3γ, lifetime spectrometer for the research of positron annihilation in solid[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1989, **13**(12): 1057–1063.
- 8 韩振杰, 刘福雁, 张鹏, 等. 基于起始信号触发判选的正电子湮没寿命测量方法 [J]. 核技术, 2018, **41**(6): 060402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.060402.
HAN Zhenjie, LIU Fuyan, ZHANG Peng, *et al.* Method of positron annihilation lifetime measurement triggered by start-signal[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(6): 060402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.060402.
- 9 van Hoorebeke L, Fabry A, van Walle E, *et al.* A three-detector positron lifetime setup suited for measurements on irradiated steels[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1996, **371**(3): 566–571. DOI: 10.1016/0168-9002(95)01007-6.
- 10 顾牡, 陈玲燕, 沈定中, 等. 掺镧氟化钡晶体的闪烁光慢成分抑制特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, **24**(2): 174–177.
GU Mu, CHEN Lingyan, SHEN Dingzhong, *et al.* Experimental research on slow component suppression in domestic La doped barium fluoride[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 1996, **24**(2): 174–177.
- 11 Schotanus P, Dorenbos P, van Eijk C W E, *et al.* Suppression of the slow scintillation light output of BaF₂ crystals by La³⁺ doping[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1989, **281**(1): 162–166. DOI: 10.1016/0168-9002(89)91229-1.
- 12 Sobolev B P, Krivandina E A, Derenzo S E, *et al.* Suppression of BaF₂ slow component of X-ray luminescence in non-stoichiometric Ba_{0.9}R_{0.1}F_{2.1} crystals (R = rare earth element) [J]. MRS Online Proceedings Library Archive, 1994, **348**: 277. DOI: 10.1557/proc-348-277.
- 13 Chen J F, Yang F, Zhang L Y, *et al.* Slow scintillation suppression in yttrium doped BaF₂ crystals[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, **65**(8): 2147–2151. DOI: 10.1109/tns.2017.2786042.
- 14 刘杨. 闪烁晶体发光性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004. DOI: 10.7666/d.y615815.
LIU Yang. Study on luminescence performance of scintillation crystal[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2004. DOI: 10.7666/d.y615815.
- 15 Takahashi K, Koshimizu M, Fujimoto Y, *et al.* Auger-free luminescence characteristics of Rb_{1-x}Cs_xCaCl₃[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2018, **126**(10): 755–760. DOI: 10.2109/jcersj2.18051.