

快响应塑料闪烁体 EJ-232 的时间特性研究

彭晓世 王峰 徐涛 刘永刚 刘慎业 梅雨 陈铭

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 在核反应时间过程测量系统中, 闪烁体主要用于将中子转换为便于记录的可见光。EJ-232 塑料闪烁体的主要特点是响应快、衰减时间短, 利用其进行中子-光转换可提高系统的时间分辨。利用波长为 263 nm 的激光激发闪烁体对其时间特性进行了测量, 闪烁体尺寸为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 和 $\Phi 6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。测量结果表明, EJ-232 塑料闪烁体的发光上升时间小于 30 ps, 光致激发荧光衰减常数分别为 0.6 ns 和 1.1 ns。中子激发闪烁体的衰减时间常数比光致激发荧光的衰减常数更长。

关键词 材料; 闪烁体; EJ-232; 时间特性; 衰减常数; 上升时间

中图分类号 O536; O621.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1216001

Study on Time Characteristics of Fast Time Response Plastics Scintillator EJ-232

Peng Xiaoshi Wang Feng Xu Tao Liu Yonggang Liu Shenye Mei Yu Chen Ming

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract EJ-232 is a kind of plastics scintillator with fast time response and decay time, it acts as a neutron-to-light converter in the system of nuclear reaction measurement. Time characteristics of EJ-232 plastics scintillator are measured by using short-pulse laser to excite scintillator in size of $\Phi 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ and $\Phi 6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ (excited at 263 nm). The results show that the rise time is less than 30 ps for EJ-232 plastics scintillator and the laser excited fluorescence decay constant of the scintillator are 0.6 ns and 1.1 ns. The neutron excited fluorescence decay constant of the scintillator is longer than the laser excited fluorescence decay constant.

Key words materials; scintillator; EJ-232; time characteristic; decay constant; rise time

OCIS codes 160.5470; 160.1890; 350.2660; 320.7100

1 引言

认识瞬态核裂变、聚变反应系统发生的剧烈核反应过程及其规律对于核技术应用、核材料分析、裂变/聚变研究和天体物理等众多核科学研究领域都具有十分重要的科学意义^[1]。在脉冲辐射场测量中, 通常利用闪烁体将核反应产生的射线或粒子转换为便于记录的可见光, 由于辐射脉冲的时间信息对反映脉冲辐射源的物理信息是不可缺少的物理量, 因此测量中所用的闪烁材料的时间响应特性对于脉冲辐射场测量来说是一个非常重要的物理特性指标。

闪烁体的时间特性一般可以用闪烁体发光上升

时间和发光衰减时间来描述。闪烁体发射荧光的光子数达到最大值的时间, 对应发光上升时间, 主要由闪烁体电子激发时间以及带电粒子在闪烁体中耗尽能量所需的时间决定。辐射与闪烁体作用使闪烁体受激形成次级带电粒子, 这些带电粒子将能量传递给闪烁体, 通过能量损失、电离、激发和退激等方式使闪烁体发荧光, 发射荧光的光子数达到最大值后下降的过程, 对应发光衰减过程, 用发光衰减时间常数来描述。

EJ-232 是 ELJEN 公司生产的一种具有超快时间响应的塑料闪烁体, 由聚苯乙烯作基质, 掺入其他的有机添加剂作闪烁物质, 再加上移波剂制成, 它具

收稿日期: 2011-06-16; **收到修改稿日期:** 2011-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(10805041)资助课题。

作者简介: 彭晓世(1981—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事惯性约束聚变物理诊断及设备研发等方面的研究。

E-mail: xiaoshi1025@sohu.com

有较高的探测效率、光产额以及稳定的机械性能。其性能指标与 Saint-Gobain 公司的 BC-422 基本相同,发射光谱的主峰位于 370 nm,相对于蒽晶体的光输出约 55%。EJ-232 和 BC-422 塑料闪烁体富含氢原子,且具有响应快、衰减时间短的特点,因此广泛应用于中子时间谱测量中^[2~4]。

目前,关于闪烁体时间特性的研究主要集中在无机闪烁晶体,利用辐射源激发闪烁晶体并通过光电器件配示波器进行记录。由于 EJ-232 塑料闪烁体发光上升时间很短,受限于光电器件的时间响应和传输电缆及示波器带宽,利用光电器件配示波器无法测量闪烁体的脉冲响应前沿时间。为了获得 EJ-232 塑料闪烁体的时间响应特性,利用波长为 263 nm 的激光激发闪烁体并通过高时间分辨的条纹相机进行记录对其时间特性进行了测量,闪烁体尺寸为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 和 $\Phi 6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。测量结果表明,EJ-232 塑料闪烁体的发光上升时间小于 30 ps,光致激发荧光衰减常数分别为 0.6 ns 和 1.1 ns。利用神光Ⅲ原型装置打靶产生的 DT 中子激发闪烁体对衰减时间常数进行了测量,结果表明中子激发闪烁体的衰减时间常数比光致激发荧光的衰减常数更长。

2 实验原理与方法

一般情况下,利用短脉冲辐射源激发闪烁体后,可直接测量闪烁探测器的输出电流脉冲波形来获得发光上升时间。但对于 EJ-232 超快塑料闪烁体,由于其发光上升时间很短,实际测得的输出电流脉冲波形的上升沿主要取决于光电器件的时间响应和传输电缆及示波器带宽,电流脉冲波形的上升沿并不能准确反映闪烁体的发光上升时间^[5,6]。本次实验中对记录系统进行了改进,通过成像方式对闪烁体

的发光进行收集并利用超高时间分辨(优于 10 ps)的条纹相机进行记录,获得了 EJ-232 闪烁体的发光上升时间。

电子退激发光一般按负指数规律进行衰减^[7,8],闪烁体发光强度表达式为

$$I(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

式中 $I(t)$ 为闪烁体发光强度; A 为相对归一系数,对一定的闪烁体可认为是常量; τ 即为衰减时间常数,它表示光子衰减到 $1/e$ 所需的时间。利用短脉冲辐射源(脉宽 8 ps)激发闪烁体时,由于辐射源可视为 $\delta(t)$ 源且记录系统时间分辨很高,因此条纹相机记录的发光信号后沿与闪烁体发光衰减按同样的负指数规律进行,对发光信号的后沿进行负指数拟合即可得到闪烁体的发光衰减常数。

3 实验条件及排布

闪烁体时间特性测量的光路排布如图 1 所示。实验使用的激发源脉冲为 YLF 激光器输出的脉宽约 8 ps、波长为 263 nm 激光信号,激光经取样镜 BS_1 后分成两束,其中一束入射到光电探头后产生条纹相机所需的触发信号,信号经过延时箱后输入条纹相机。另一束入射 EJ-232 塑料闪烁体,激光激发闪烁体所产生的荧光通过成像系统进行收集,并通过成像方式传递到条纹相机输入狭缝进行记录,在光路中放置了一片转折反射镜 M_1 以便于光路调节。由于实验中所用的激发光为 YLF 激光器的四倍频光,在光路中还存在未转换的基频(1053 nm)和二倍频(526 nm)激光,条纹相机光阴极对基频光不响应,因此在条纹相机前放置了滤波片以消除未转换的二倍频光对实验测量的影响。

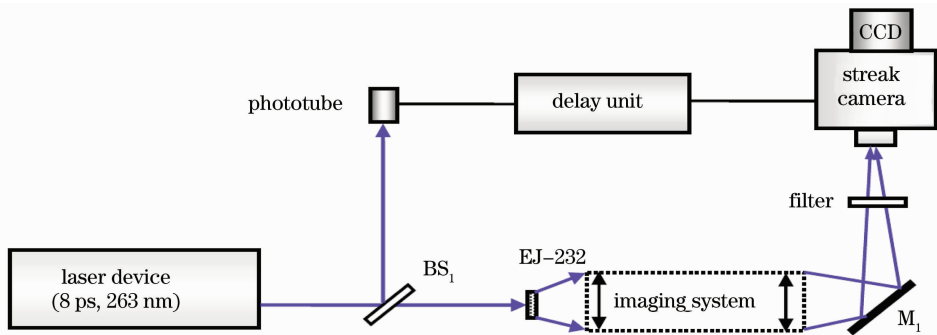


图 1 EJ-232 时间特性测量实验排布

Fig. 1 Experimental arrangement for time characteristics measurement of EJ-232

实验中使用的触发探头为德国 Alphas 公司生产的 UPD-200-UD 型光电管,其光谱响应范围为 170~1100 nm,上升沿小于 175 ps。由于闪烁体发射的荧光波长范围为 350~450 nm,因此用于光收集的成像系统采用消色差技术以减少系统的时间弥散,光线追迹的结果表明闪烁体上不同位置发出的光线经过成像系统后在条纹相机狭缝处的最大时间弥散小于 8 ps。用于记录闪烁体发光过程的条纹相机的时间记录长度约 2 ns,时间分辨优于 10 ps。滤波片为二倍频(526 nm)的全反镜。

4 实验结果及分析

4.1 闪烁体发光上升时间

利用短脉冲的紫外激光对厚度 1 mm,直径 6 mm 的 EJ-232 塑料闪烁体进行激发时,条纹相机记录到的闪烁体发光图像如图 2 所示,图像横向为空间分辨方向,纵向为时间扫描方向。利用图 2 得到的闪烁体发光时间扫描波形如图 3 所示(取虚线框内的图像进行处理,虚线框顶端对应时间零点)。

闪烁体发光波形为激发脉冲与闪烁体响应的卷积,对于 EJ-232 塑料闪烁体,由于其发光上升时间

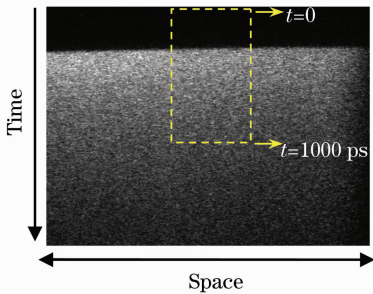


图 2 EJ-232 塑料闪烁体发光测量图像

Fig. 2 Experimental image of laser excited fluorescence for EJ-232 plastics scintillator

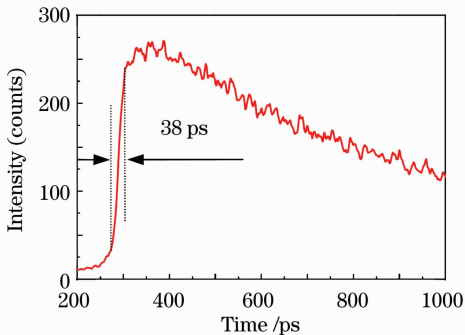


图 3 EJ-232 塑料闪烁体时间响应典型波形

Fig. 3 Typical time response waveform of EJ-232 plastics scintillator

远小于发光衰减时间,因此闪烁体发光波形的上升沿时间可近似为闪烁体发光上升时间与激发脉冲宽度的叠加。激光脉冲宽度为 8 ps,由图 3 可知闪烁体发光上升前沿为 38 ps,因此闪烁体的发光上升时间约为 30 ps。考虑到用于光收集的成像系统存在 8 ps 的时间弥散及条纹相机的时间分辨为 10 ps,EJ-232 塑料闪烁体的发光上升时间应小于 30 ps。

4.2 闪烁体衰减时间常数

对于直径均为 6 mm,厚度分别为 1 mm 和 2 mm 的 EJ-232 塑料闪烁体,条纹相机记录到的闪烁体发光图像如图 4 所示,对应的闪烁体发光时间扫描波形如图 5 所示。

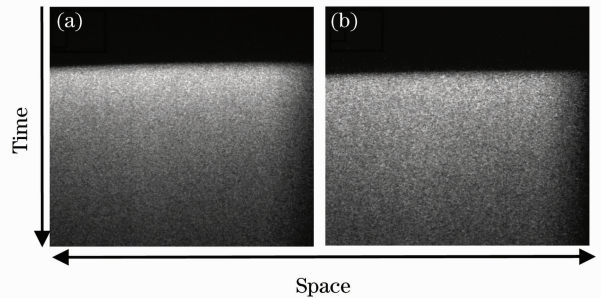


图 4 不同厚度的 EJ-232 塑料闪烁体发光测量图像。

(a) 1 mm;(b) 2 mm

Fig. 4 Measuring pictures of laser excited fluorescence for EJ-232 plastics scintillator with different thicknesses.

(a) 1 mm;(b) 2 mm

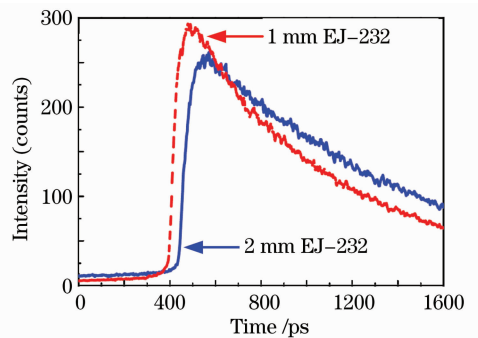


图 5 不同厚度的 EJ-232 塑料闪烁体时间响应典型波形

Fig. 5 Typical time response waveforms of EJ-232 plastics scintillator with different thicknesses

闪烁体受激后,退激发光一般服从负指数衰减规律,对于大多数有机闪烁体,发光衰减既有快成份也有慢成份,因此通过对发光信号的后沿进行负指数拟合求闪烁体的衰减时间常数时需要进行多指数拟合^[9],即拟合函数形式:

$$I = \sum_i A_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (2)$$

式中 A_i, τ_i 为拟合系数, 其中 τ_i 即为某一成份对应的衰减时间常数。对不同厚度、不同发次的闪烁体发光信号后沿分别进行单指数和双指数拟合的结果如表 1 所示(闪烁体后的编号对应不同发次的处理结果)。从表 1 中的单指数和双指数拟合公式可以

看出, EJ-232 塑料闪烁体的光致荧光衰减实质上都是单指数形式, 其发光衰减只有快成份, 不含慢成份。另外, 由表 1 可知: 对于厚度为 1 mm 的 EJ-232 塑料闪烁体, 衰减时间常数约为 0.6 ns, 厚度为 2 mm 的 EJ-232 塑料闪烁体, 衰减时间常数约为 1.1 ns。

表 1 指数拟合结果

Table 1 Exponential fitting result

Sample	Exponential fit method	
	Single exponential fit	Two exponential fit
1 mm EJ-232 1 #	$293.462\exp(-t/616.0194)$	$146.731\exp(-t/616.0194)+146.731\exp(-t/616.0194)$
1 mm EJ-232 2 #	$264.086\exp(-t/600.3193)$	$132.043\exp(-t/600.3192)+132.043\exp(-t/600.3194)$
2 mm EJ-232 1 #	$319.604\exp(-t/1119.0792)$	$159.802\exp(-t/1119.0792)+159.802\exp(-t/1119.0792)$
2 mm EJ-232 2 #	$254.427\exp(-t/1146.3053)$	$127.214\exp(-t/1146.2958)+127.214\exp(-t/1146.3143)$
2 mm EJ-232 3 #	$267.596\exp(-t/1032.5347)$	$133.798\exp(-t/1032.5347)+133.798\exp(-t/1032.5347)$

厚度 1 mm 的闪烁体比 2 mm 的闪烁体衰减时间常数更小, 可能是因为闪烁体使用的淬火添加剂为苯甲酮, 其在室温下会慢慢转化为气体后从闪烁体上蒸发, 在闪烁体的表层蒸发速度更快, 因此当闪烁体很薄时丢失淬火的现象更为明显。

烁体的发光的上升时间很短(约 30 ps)而衰减时间很长, 而实验中中子发射的持续时间很短, 约为 100~200 ps。因此中子发射时间过程信息包含在发光信号的上升前沿中, 而实验中测得的信号后沿与闪烁体发光衰减按同样的负指数规律进行, 对发光信号后沿进行负指数拟合即可求得闪烁体衰减时间常数。由于实验中的 DT 中子产额较低, 发光图像信噪比较差, 因此在进行数据处理时首先通过滤波滤除了信号后延的高频噪声, 对于不同发次的记录信号通过负指数拟合获得的中子激发闪烁体的衰减时间常数如图 7 所示。由图 7 可知, 中子激发闪烁体时衰减时间常数约为 1.2 ns, 比光致激发荧光衰减常数更长。

5 中子辐照效应

利用神光 III 原型装置打靶产生的能量为 14.1 MeV 的 DT 中子激发直径 6 mm, 厚度 1 mm 的 EJ-232 塑料闪烁体获得的典型闪烁体发光信号如图 6 所示, 图 6 中的 5 个光点是用作时间标尺的序列脉冲, 脉冲间隔为 500 ps。

实验中条纹相机记录到的发光信号为中子发射时间过程与闪烁体响应的卷积, 由于 EJ-232 塑料闪

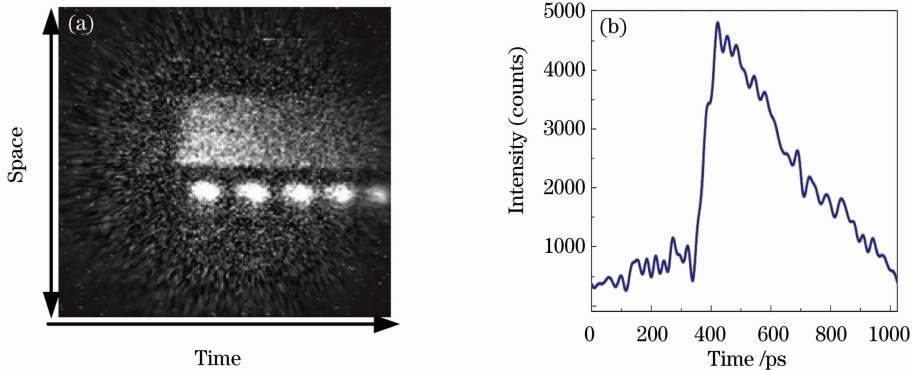


图 6 (a)中子发射时间过程测量信号及(b)典型的时间波形

Fig. 6 Signal of the fusion reaction history measurement (a) and typical time response waveform(b)

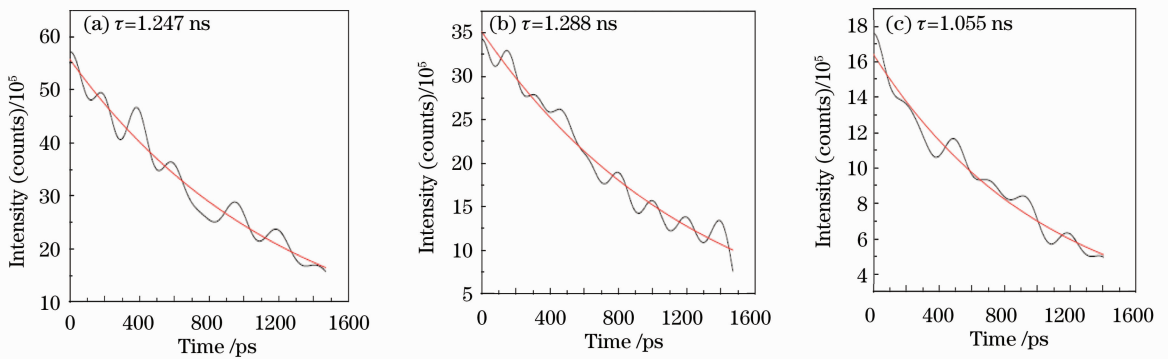


图 7 不同发次指数拟合获得的衰减时间常数比较

Fig. 7 Comparison of the results of decay time constant by exponential fit

6 结 论

EJ-232 塑料闪烁体的主要特点是响应快、衰减时间短,利用其进行中子-光转换可提高系统的时间分辨。为了获得具有超快时间响应的 EJ-232 塑料闪烁体的发光时间响应特性,利用波长为 263 nm 的激光激发闪烁体,通过成像方式对闪烁体的发光进行收集并利用超高时间分辨(优于 10 ps)的条纹相机进行记录,对闪烁体的时间特性进行了测量。该方法解决了以往受限于光电器件的时间响应和传输电缆及示波器带宽,利用光电器件配示波器无法测量闪烁体的脉冲响应前沿时间的问题。测量结果表明,EJ-232 塑料闪烁体的发光上升时间小于 30 ps,对于直径为 6 mm,厚度分别为 1 mm 和 2 mm 的 EJ-232 塑料闪烁体,其光致激发荧光衰减常数分别为 0.6 ns 和 1.1 ns。中子激发闪烁体的衰减时间常数比光致激发荧光的衰减常数更长。

参 考 文 献

- 1 J. D. Lindl, P. Amendt, R. L. Berger *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Phys. Plasmas*, 2004, **11**(2): 339~491
- 2 C. Stoeckl, V. Y. Glebov, S. Roberts *et al.*. Ten-inch manipulator-based neutron temporal diagnostic for cryogenic experiments on OMEGA[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 2003, **74**(3): 1713~1716

- 3 R. A. Lerche, M. D. Cable. Fusion reaction-rate measurement- Nova and NIF[R]. UCRL-LR-105821-96-3, 1996, 115~122
- 4 R. A. Lerche, D. W. Phillion, G. L. Tietbohl. 25 ps neutron detector for measuring ICF-target burn history[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(1): 933~935
- 5 Guo Cun, Xu Rongkun, Li Zhenghong *et al.*. The capacity study of fast plastics scintillator for X-ray energy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5): 1331~1334
- 郭存, 徐荣昆, 李正宏等. 一种新型快塑料闪烁体的性能研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(5): 1331~1334
- 6 Hu Mengchun, Ye Wenyong, Zhou Dianzhong *et al.*. Study on time characteristics of fast time response inorganic scintillator CeF₃[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2003, **37**(5): 461~463
- 胡孟春, 叶文英, 周殿忠等. 快响应无机闪烁体 CeF₃ 的时间特性研究[J]. *原子能科学技术*, 2003, **37**(5): 461~463
- 7 Cao Dunhua, Liu Yongjian, Zhao Guangjun *et al.*. Investigation on the self-absorption of Ce:YAP crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3463~3466
- 曹顿华, 刘永建, 赵广军等. 掺铈钨酸钇闪烁晶体自吸收问题研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3463~3466
- 8 Ning Jiamin, Jiang Shilun, Xu Rongkun *et al.*. Linear luminescence for thin plastic scintillator under intense soft X-ray radiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(7): 1215~1218
- 宁家敏, 蒋世伦, 徐荣坤等. 强脉冲软 X 光辐照薄塑料闪烁体发光特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(7): 1215~1218
- 9 Zhang Jianhua, Peng Taiping, Hu Mengchun *et al.*. Laser excited fluorescence decay constant measurement of YAP:Ce scintillation crystal [J]. *J. Synthetic Crystals*, 2006, **35**(5): 1057~1060
- 张建华, 彭太平, 胡孟春等. YAP:Ce 闪烁晶体光致激发荧光衰减常数测量[J]. *人工晶体学报*, 2006, **35**(5): 1057~1060.