

Y³⁺掺杂 Ce:Li₆Lu(BO₃)₃ 闪烁体的发光性能研究

孙丹丹¹, 潘尚可¹, 任国浩¹, 吴云涛¹, 商珊珊², 张国庆³

(1. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 201800; 2. 中国计量学院 材料科学与工程学院, 杭州 310018; 3. 中国地质大学 地球科学学院, 武汉 430074)

摘 要: 针对 Ce:Li₆Lu(BO₃)₃ 晶体有效原子序数(Z_{eff})高的问题, 采用低原子序数的 Y³⁺离子部分置换晶体中的 Lu³⁺离子。通过固相合成法制备了 Ce:Li₆Lu_{1-x}Y_x(BO₃)₃(0≤x≤1)固溶体。X 射线粉末衍射(XRD)分析表明, 该系列固溶体结构与 Li₆Gd(BO₃)₃ 晶体相同, 空间群为 P2_{1/c}。其 X 射线激发发射(XSL)的发光强度随着 Y³⁺的含量增加而降低, 当 x=0.5 时, 固溶体的有效原子序数与 Li₆Gd(BO₃)₃ 闪烁体相当, 但 XSL 发光强度是其 1.4 倍。Ce:Li₆Lu_{0.5}Y_{0.5}(BO₃)₃ 的 XSL 光谱和 PL 光谱都在 400 nm 附近出现 Ce³⁺离子的特征峰, 可拟合出 361 和 419 nm 两个发光分量, 分别对应于 Ce³⁺离子的激发态电子的 5d¹→²F_{5/2} 和 5d¹→²F_{7/2} 能级跃迁。Ce:Li₆Lu_{0.5}Y_{0.5}(BO₃)₃ 固溶体的衰减时间比 Ce:Li₆Lu(BO₃)₃ 略长, 为 19.6 ns。当 x=0.50~0.70 时, Ce:Li₆Lu_{1-x}Y_x(BO₃)₃(0≤x≤1)闪烁体比较适合作为中子探测材料。

关 键 词: 固相合成; Ce:Li₆Lu_{1-x}Y_x(BO₃)₃; X 射线激发发射谱; PL 光谱; 衰减时间

中图分类号: O734

文献标识码: A

Luminescence Properties of High Y³⁺-doped Ce:Li₆Lu(BO₃)₃ Scintillators

SUN Dan-Dan¹, PAN Shang-Ke¹, REN Guo-Hao¹, WU Yun-Tao¹, SHANG Shan-Shan², ZHANG Guo-Qing³

(1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. College of Materials Science and Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To decrease the high effective atomic number (Z_{eff}) of Ce:Li₆Lu(BO₃)₃ crystal, Y³⁺, which has a lower atomic number, is introduced to substitute Lu³⁺. The Ce:Li₆Lu_{1-x}Y_x(BO₃)₃(0≤x≤1) solid solutions were prepared by the solid-state synthesis method. Based on the X-ray powder diffraction (XRD) analysis, Ce: Li₆Lu_{1-x}Y_x(BO₃)₃ (0≤x≤1) solid solutions and Li₆Gd(BO₃)₃ crystal have the similar XRD patterns and belong to the space group P2_{1/c}. The luminescence intensity of X-ray stimulated luminescence (XSL) spectrum of Ce:Li₆Lu_{1-x}Y_x(BO₃)₃ (0≤x≤1) decreases with the increasing of the content of Y³⁺. In the case of x=0.5, the Z_{eff} of Ce:Li₆Lu_{0.5}Y_{0.5}(BO₃)₃ is similar to that of Ce:Li₆Gd(BO₃)₃, while the luminescence intensity of Ce:Li₆Lu_{0.5}Y_{0.5}(BO₃)₃ is as much as 1.4 times of Ce:Li₆Gd(BO₃)₃. The XSL and PL spectra of Ce:Li₆Lu_{0.5}Y_{0.5}(BO₃)₃ indicate that the emission band around 400 nm can be fitted into two peaks, 391 nm and 419 nm, which correspond to the electronic transition from 5d energy level to ²F_{5/2} and ²F_{7/2} of Ce³⁺ ions, respectively. The decaying time of Ce:Li₆Lu_{0.5}Y_{0.5}(BO₃)₃ is about 19.6 ns. When x=0.50~0.70, Ce:Li₆Lu_{1-x}Y_x(BO₃)₃(0≤x≤1) is suitable for using as neutron detection material.

Key words: solid-state synthesis; Ce:Li₆Lu_{1-x}Y_x(BO₃)₃; X-ray stimulated luminescence spectrum; PL spectrum; decay time

近几年来, 随着中子探测技术的发展和传统中子探测材料 ³He 的日益短缺, 探索能够替代 ³He 气体正比计数器的新型热中子探测材料及器件的研究

成为国际核辐射探测领域的研究热点^[1-2]。Li₆RE(BO₃)₃(RE=Gd、Y、Yb、Ho、Lu)体系的化合物具有密度小并含有 Li 元素和 B 元素的特点, 适合

作为中子探测晶体的基质。研究表明,掺杂了 Ce^{3+} 离子的 $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 和 $\text{Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$ 晶体具有发光强度高,衰减时间短,且其 5d-4f 能级的跃迁形成的宽带发光峰恰好落在 PMT 的探测敏感区,是一种性能优越的中子探测闪烁晶体^[3-11]。

$\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 晶体化学性质稳定,但是使用天然丰度的原料生长出的 $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 晶体由于 ^{155}Gd 和 ^{157}Gd 同位素的存在,晶体的 n- γ 甄别能力低;并且该晶体在热中子激发下的衰减时间为 200 ns 和 800 ns,作为位置敏感型热中子探测器来说,其衰减时间略长^[12-15]。 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$ 晶体虽具有良好的闪烁性能,但该晶体由于含有原子序数很高的 Lu^{3+} 离子($Z=71$),导致晶体的有效原子序数($Z_{\text{eff}}=58$)较高,使其对伽马射线敏感而对中子的敏感度较低,进而影响其 n- γ 甄别能力^[16-17]。

在 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的基础上,本工作使用低原子序数 Y^{3+} ($Z=39$) 离子部分置换 Lu^{3+} 离子,降低闪烁体的有效原子序数 Z_{eff} ,从而降低闪烁体对 γ 射线的敏感度,通过研究 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 系列闪烁体的闪烁性能,并与 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 进行比较,筛选出较佳的闪烁体组分。

1 实验

1.1 闪烁体的合成

使用纯度均为 99.99% 的 Li_2CO_3 、 H_3BO_3 、 Lu_2O_3 、 Y_2O_3 、 CeO_2 的粉体为原料,根据 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($x=0, 0.05, 0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 0.90, 0.95, 1.00$, Ce 含量为 1mol%) 的化学计量比称重,研磨,充分混合均匀后,于 15 MPa 的压力下压成料锭,料锭置于 650 °C 碳粉还原气氛烧结 10 h,呈蜂窝状,然后再次研磨混合,在 700 °C 烧结 10 h 进行二次固相合成。

按以上工艺,使用纯度均为 99.99% 的 Li_2CO_3 、 H_3BO_3 、 Gd_2O_3 、 CeO_2 粉体,合成了 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ (Ce 含量为 1mol%) 闪烁体粉末。

1.2 分析测试

物相分析使用 D/Max-2250V 型 X 射线衍射仪,条件为: $\text{CuK}\alpha$ 辐射,辐射波长 $\lambda=0.154056$ nm,工作电压为 40 kV,工作电流为 100 mA,扫描范围 $2\theta=10^\circ\sim 60^\circ$,步进为 0.02° 。

X 射线激发发射光谱(XSL)采用上海硅酸盐研究所自制的 X 射线激发光谱仪,实验条件为: X 射线管电压为 70 kV,光电倍增管电压为 900 V。

荧光光谱测试采用 HITACHI F4500 荧光光谱仪,激发源为 45 kW 的 Xe 灯,测试温度为室温。

衰减时间谱使用 PLSP920 时间分辨光谱仪进行测试,测试中使用纳秒灯(nF900)作为激发源,采用时间关联光电子技术(Time Correlated Single Photon Counting, TCSPC)获取衰减时间谱,测试温度为室温。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

对二次固相合成的 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 闪烁体进行 XRD 测试分析,结果如图 1 所示。与 $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 晶体的 XRD 图谱对比可以看出, $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ 在 $0 \leq x \leq 1$ 的范围内能够形成完全互溶的固溶体,它们的衍射峰与 $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 晶体衍射峰类似,只是衍射峰位略有偏移,说明 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ 与 $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 具有相同的结构,都属于单斜晶系,空间群为 $\text{P}2_1/\text{c}$ 。

2.2 X 射线激发发射(XSL)光谱

对 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 闪烁体和 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体进行 X 射线激发光谱测试,结果如图 2 所示。由图 2 可以看到,随着 Y 含量的增加, $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 闪烁体的发光强度呈现明显减弱的趋势, $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的发光强度小于 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体,其发光强度与 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{0.1}\text{Y}_{0.9}(\text{BO}_3)_3$ 的发光强度相当。

发光强度反映了样品在 X 射线激发下的光输出能力,国内外对 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 晶体的研究表明其闪烁发光强度约为 4000 phe/MeV^[12]。所以 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的发光强度应高于这个值。

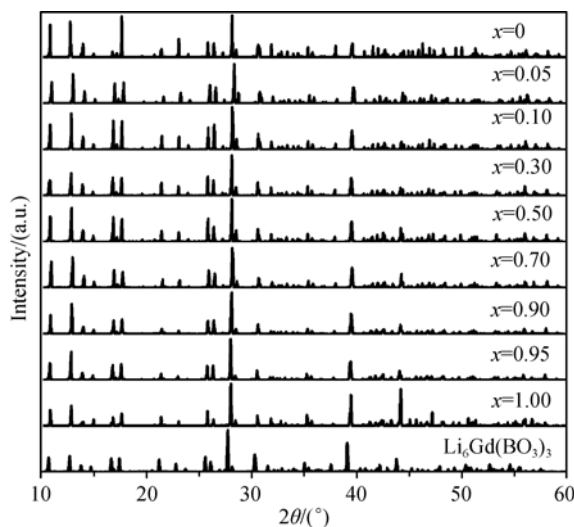


图 1 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 和 $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) and $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ scintillators

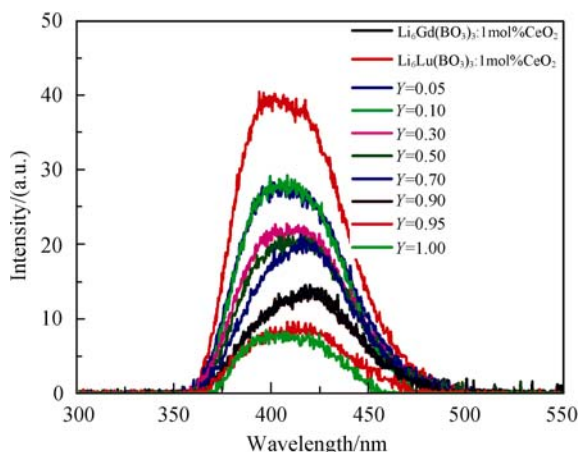


图2 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 和 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的 XSL 光谱

Fig. 2 XSL spectra of $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) and $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ scintillators

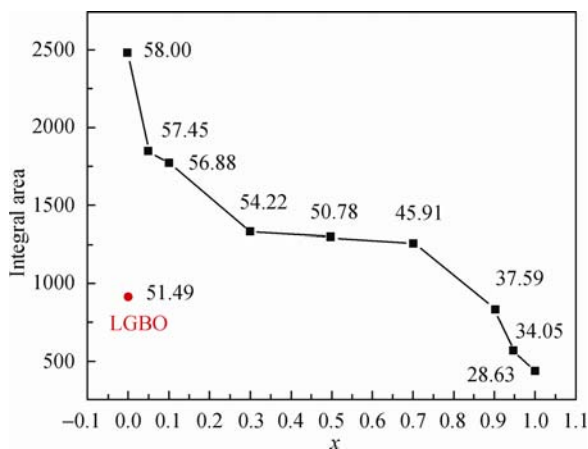


图3 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 闪烁体在 X 射线激发下的发光强度和有效原子序数随 x 的变化

Fig. 3 Change of the integral area of XSL spectrum and the effective atomic number Z_{eff} of $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) scintillators with the increase of x

对图2中的 XSL 光谱进行积分, 结果如图3所示, 图3中的数字是计算所得的有效原子序数 Z_{eff} 。对于中子探测闪烁材料来说, Z_{eff} 是非常重要的物理参数, 有效原子序数大的闪烁材料对 X 射线或者 γ 射线等比较敏感。XSL 光谱的积分面积反映了样品在 X 射线激发下的发光强度。由以上分析可知, $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体和 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{0.3}\text{Y}_{0.7}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的发光强度均高于 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的发光强度, 而有效原子序数却小于 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的有效原子序数。说明 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体和 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{0.3}\text{Y}_{0.7}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体与 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体相比, 在中子作用下具有更高的发光强度和更好的 $n\text{-}\gamma$ 甄别能力, 更适用于作为中子探测闪烁体。

图4显示, 在 XSL 光谱中 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的宽带发光峰位于 400 nm 附近, 这是 Ce^{3+}

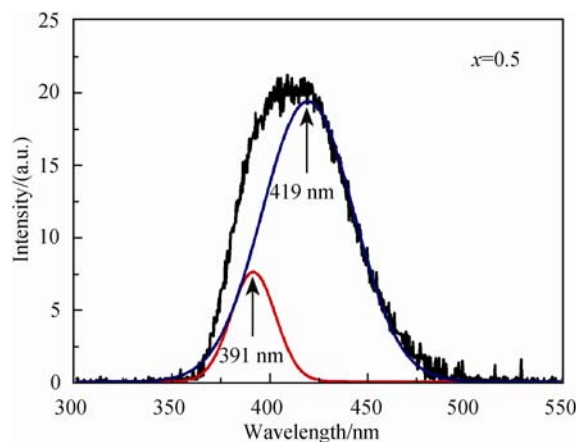


图4 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的 XSL 光谱及其高斯拟合
Fig. 4 Gauss model of XSL spectrum of $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ scintillators

离子的特征发光峰。 Ce^{3+} 离子最外层只有一个电子, 其基态电子构型为 $4f^1$ 。在自旋-轨道耦合作用下, $4f^1$ 可分裂出两个子能级, 即 $^2F_{5/2}$ 和 $^2F_{7/2}$, 两者之间的能级相差 0.3 eV, 所以 $5d^1$ 能级的最低子能级到 $4f^1$ 基态存在着 $5d^1 \rightarrow ^2F_{5/2}$ 和 $5d^1 \rightarrow ^2F_{7/2}$ 两种跃迁^[18]。这两种跃迁能量有差异, 导致 Ce^{3+} 离子的荧光具有两种波长, 这两种波长的发光峰叠加就得到了宽带发光峰。对 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的宽带发光峰进行 Gauss 拟合可以区分出两种波长的发光分量^[19], 即 391 和 419 nm, 如图4所示, 这两个发光峰分别对应激发态 Ce^{3+} 离子的电子的 $5d^1 \rightarrow ^2F_{5/2}$ 和 $5d^1 \rightarrow ^2F_{7/2}$ 能级跃迁。

2.3 荧光(PL)光谱

图5为 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($x=0, 0.50, 1.00$) 闪烁体的紫外荧光光谱。它们之间除峰形有所不同外, 激发峰位与发光峰位无明显变化。

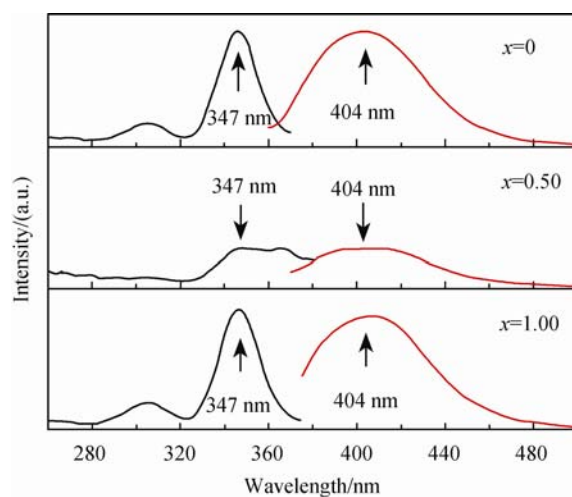


图5 $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($x=0, 0.50, 1.00$) 闪烁体的荧光光谱
Fig. 5 Photoluminescence spectra of $\text{Ce}:\text{Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($x=0, 0.50, 1.00$) scintillators

激发光谱的发射波长均为 404 nm, 在激发光谱中可以看到位于 307 和 347 nm 附近的激发峰。位于 347 nm 处的激发峰对应着 Ce^{3+} 离子的 $^2\text{F}_{5/2}$ 向 5d 能级的最低能级跃迁^[20], 位于 307 nm 处的峰对应着 Ce^{3+} 离子的 $^2\text{F}_{5/2}$ 向 5d 能级的跃迁。

在 347 nm 紫外光激发下, 在 404 nm 波长附近有一个宽的发射峰, 与 X 射线激发发射光谱相对应, 是两个发光峰叠加而得。这个宽带激发峰对应着激发态 Ce^{3+} 离子的电子从 5d¹ 到 $^2\text{F}_{5/2}$ 和 $^2\text{F}_{7/2}$ 能级跃迁。

2.4 衰减时间谱

在室温下测试 $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($x=0, 0.50, 1.00$) 闪烁体的衰减时间谱, 激发波长为 347 nm。测试样品的衰减时间谱及拟合曲线如图 6 所示。衰减时间谱根据下面的公式:

$$R(t) = A + B \cdot e^{-t/\tau} \quad (3)$$

进行拟合。其中 A 为背景常数, B 为指前因子, τ 为特征衰减常数, $R(t)$ 为计数随时间的变化采用重卷积拟合扣除了机器响应和噪音的影响, 得到衰减时间。

从图 6 中可以看出, $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$ 和 $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的衰减时间分别为 17.6 ns 和 19.6 ns, 与本课题组生长的 $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$ 晶体的

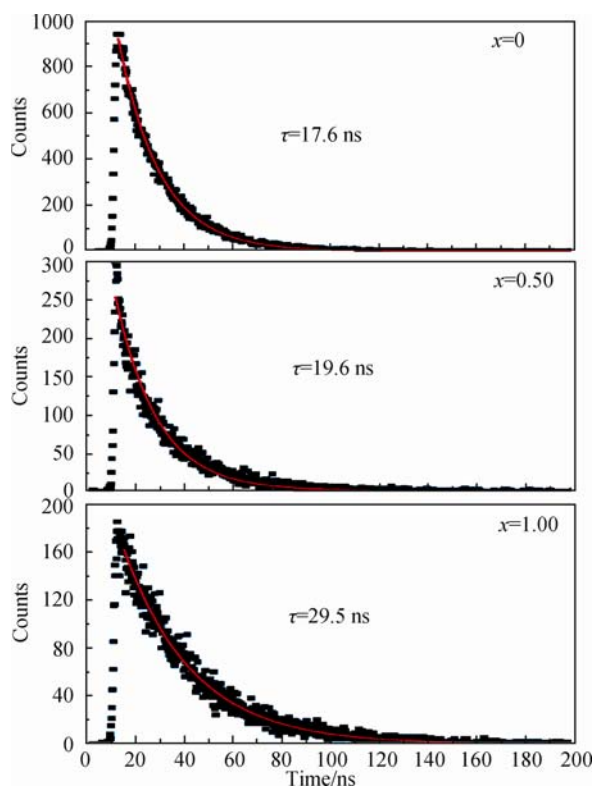


图 6 $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($x=0, 0.50, 1.00$) 闪烁体的衰减时间谱及其拟合曲线

Fig. 6 Fluorescence decay curves of $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($x=0, 0.50, 1.00$) scintillators excited by the nanolamp

The dots stand for the raw data and the dash line is the curve

衰减时间($\tau=17.9$ ns)接近^[17], 而 $\text{Ce:Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ 的衰减时间略长, 但均低于文献^[21]报道的 $\text{Ce:Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 的衰减时间 ($\tau=38.0$ ns), 说明 $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$ 和 $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体均具有很快的衰减时间, 属于快衰减闪烁体。

3 结论

采用固相合成法, 合成了 $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 闪烁体, 其 XRD 衍射峰与 $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 晶体类似, 该系列闪烁体均属于单斜晶系, 空间群为 $\text{P2}_1/\text{c}$ 。

XSL 光谱中, 在 400 nm 附近有一个 Ce^{3+} 离子的特征宽带发光峰, 该特征峰与 Ce^{3+} 离子的 5d-4f 跃迁相关; 随 Y 掺杂量的增加, $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 闪烁体的有效原子序数 Z_{eff} 不断减小, XSL 光谱的发光强度逐渐降低; $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ 与 $\text{Ce:Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体相比, 在拥有较低 Z_{eff} 值的材料在中子作用下具有更高的发光效率, 更适宜做中子探测用闪烁体。

PL 光谱同样在 400 nm 附近出现 Ce^{3+} 离子的特征宽带发光峰, 用 PL 光谱中得到的 347 nm 的激发峰波长来测试 $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$ 、 $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ 和 $\text{Ce:Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ 闪烁体的衰减时间, 其发光属于单指数衰减类型, 衰减时间分别为 17.6、19.6 和 29.5 ns。

综上所述, $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 闪烁体是一种性能优异的中子探测材料, 其中 $x=0.50 \sim 0.70$ 时, $\text{Ce:Li}_6\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x(\text{BO}_3)_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 闪烁体由于拥有比 $\text{Ce:Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ 更强的发光效率和较低的有效原子序数, 更适合于作为中子探测材料。

致谢 感谢上海硅酸盐研究所高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室刘茜研究员在荧光光谱测试方面提供的帮助和指导。

参考文献:

- [1] Adrian C. Helium-3 shortage could put on low-temperature research. *Science*, 2009, **326**(5954): 778-779.
- [2] Kouzes R T, Ely J H, Erikson L E, *et al.* Neutron detection alternatives to ^3He for national security applications. *Nuclear Instruments Methods in Physical Research Section A*, 2010, **623**(3): 1035-1045.
- [3] Chaminade J P, Guillen F, Fouassier C, *et al.* Crystal growth and optical properties of new neutron detectors $\text{Ce}^{3+}:\text{Li}_6\text{R}(\text{BO}_3)_3$ ($\text{R}=\text{Gd}, \text{Y}$). *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001, **48**(4): 1158-1161.
- [4] Chaminade J P, Viraphong O, Miyazawa S. One possible macha-

- nism of spiral/footing growth of Cz-grown $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$. *Journal of Crystal Growth*, 2002, **237–239**: 864–868.
- [5] Shekhovtsov A N, Tolmachev A V, Dubovik M F, *et al.* Structure and growth of pure and Ce^{3+} -doped $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ single crystal. *Journal of Crystal Growth*, 2002, **242(1/2)**: 167–171.
- [6] Rivas-Silva J F, Flores-Riveros A, Berrondo M. DFT study of 1-D $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$. *International Journal of Quantum Chemistry*, 2003, **94(2)**: 105–112.
- [7] Baumer V N, Dubovik M F, Grinyov B V, *et al.* Radiation-stimulated defects into LaB_3O_6 and $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$ single crystals. *Radiation Measurements*, 2004, **38(4/5/6)**: 359–362.
- [8] Nishimura H, Hosoya S, Takashima H, *et al.* Growth of Ce^{3+} -doped $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ single crystals under ultralow oxygen partial pressure. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, **45(2A)**: 909–911.
- [9] Berezovskaya I V, Dotsenko V P, Efryushina N P, *et al.* Luminescence of Ce^{3+} ions in alkaline earth borophosphates. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, **391(1/2)**: 170–176.
- [10] Voronova V, Shiran N, Gektin A, *et al.* Carriers trapping and radiative recombination in Ce, Eu and Pr-doped LiLuF_4 crystals. *Radiation Measurement*, 2007, **42(4/5)**: 823–826.
- [11] Knitel M J, Dorenbos P, Van Eijk C W E, *et al.* Photoluminescence, and scintillation/thermoluminescence yields of several Ce^{3+} and Eu^{2+} activated borates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2000, **443(2)**: 364–374.
- [12] Van Eijk C W E, Bessiere A, Dorenbos P. Inorganic thermal-neutron scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, **529(1/2/3)**: 260–267.
- [13] Czirr J B, MacGillivray G M, MacGillivray RR, *et al.* Performance and characteristics of a new scintillator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1999, **424(1)**: 15–19.
- [14] Shekhovtsov A N, Tolmachev A V, Dubovik M F, *et al.* Structure and growth of pure and Ce^{3+} -doped $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ single crystals. *Journal of Crystal Growth*, 2002, **242(1/2)**: 167–171.
- [15] PAN Shang-Ke, YANG Fan, Ding Dong-Zhou, *et al.* Czochralski growth of Ce^{3+} -doped $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ single crystal. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, **57(3)**: 1300–1303.
- [16] HENG Yue-Kun, JIA Ru, FU Zai-Wei, *et al.* Scintillation Properties of Neutron Detection Crystals $\text{Li}_6\text{RE}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}^{3+}$ ($\text{RE}=\text{Lu}, \text{Y}$). *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, Valencia, 2011: 4627–4631.
- [17] Chaminade J P, Guillen F, Fouassier C, *et al.* Crystal growth and optical properties of new neutron detector $\text{Ce}^{3+}:\text{Li}_6\text{R}(\text{BO}_3)_3$ ($\text{R}=\text{Gd}, \text{Y}$). *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001, **48(4)**: 1158–1161.
- [18] Ogorodnikov I N, Poryvai N E, Pustovarov V A, *et al.* Transient hole-polaron optical absorption in $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ crystal. *Physics of Solid State*, 2009, **51(6)**: 1160–1166.
- [19] Ogorodnikov I N, Pustovarov V A, Tolmachev A V, *et al.* Electronic excitation dynamics and energy transfer in lithium-gadolinium borates doped by rare earths. *Physics of Solid State*, 2008, **50(9)**: 1684–1686.
- [20] YANG Fan, PAN Shang-Ke, DING Dong-Zhou, *et al.* Crystal growth and luminescent properties of the Ce-doped $\text{Li}_6\text{Lu}(\text{BO}_3)_3$. *Journal of Crystal Growth*, 2010, **312(16/17)**: 2411–2414.
- [21] Grinyov B V, Dubovik M F, Tolmachev A V. Borate single crystals for polyfunctional applications: production and properties. *Semiconductor Physics. Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2000, **3(3)**: 410–419.