

文章编号: 1000-7032(2020)03-0265-06

CaLuBO₄: Tb³⁺ 荧光粉的制备及发光性质

孙晓园^{1*}, 范小暄¹, 何俊杰¹, 吕启松¹, 姜光远¹, 邓 昀¹, 骆永石², 吴春雷³

(1. 长春师范大学 物理学院, 吉林 长春 130032;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 牡丹江师范学院 理学院, 黑龙江 牡丹江 157012)

摘要: 采用高温固相反应法合成了不同 Tb³⁺ 掺杂浓度的 CaLuBO₄: xTb³⁺ 荧光粉, 研究了样品的晶体结构和发光性质。在紫外光激发下, 样品的发射光谱由 Tb³⁺ 离子的 ⁵D₃→⁷F_J (J=6, 5, 4) 和 ⁵D₄→⁷F_J (J'=6, 5, 4, 3) 特征发射组成, 其中位于 545 nm 和 554 nm 附近的 ⁵D₄→⁷F₅ 跃迁发射强度最大。荧光粉的激发光谱是由位于紫外区的 Tb³⁺ 的 4f-5d 和 f-f 跃迁构成的。研究了 Tb³⁺ 浓度对样品发光性质的影响。测量并分析了 CaLuBO₄: xTb³⁺ 荧光粉的 ⁵D₃ 能级和 ⁵D₄ 能级荧光寿命。结果表明, CaLuBO₄: xTb³⁺ 是一种适于紫外激发的新型黄绿光荧光粉。

关键词: 荧光粉; 光致发光; 荧光寿命

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20204103.0265

Preparation and Photoluminescence Properties of CaLuBO₄: Tb³⁺ Phosphor

SUN Xiao-yuan^{1*}, FAN Xiao-xuan¹, HE Jun-jie¹, LYU Qi-song¹,JIANG Guang-yuan¹, DENG Yun¹, LUO Yong-shi², WU Chun-lei³

(1. Department of Physics, Changchun Normal University, Changchun 130032, China;

2. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. Faculty of Science, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157012, China)

* Corresponding Author, E-mail: sxueyuan@163.com

Abstract: The phosphors CaLuBO₄: xTb³⁺ were synthesized through the solid-state reaction technique. The structure, photoluminescence properties of these phosphors were described. Upon excitation with UV light excitation, the photoluminescence emission spectra could be assigned to the transitions of Tb³⁺ from ⁵D₃→⁷F_J (J=6, 5, 4) and ⁵D₄→⁷F_J (J'=6, 5, 4, 3). The two strong emissions peaked at 545 nm and 554 nm, which arose from the ⁵D₄→⁷F₅ of Tb³⁺, respectively. The photoluminescence excitation spectra show a broad 4f-5d band and f-f transitions in UV region. The dependence of photoluminescence intensities on Tb³⁺ concentration was studied. The luminescence lifetimes of ⁵D₃ and ⁵D₄ energy level were measured and analysed, respectively. The CaLuBO₄: xTb³⁺ phosphor is a novel yellow-green emitting phosphor suitable for ultraviolet light excitation.

Key words: phosphor; photoluminescence; fluorescence lifetime

收稿日期: 2019-12-17; 修订日期: 2019-12-29

基金项目: 长春师范学院自然科学基金([2015] 006) 资助项目

Supported by Natural Science Foundation of Changchun Normal University([2015] 006)

1 引 言

稀土元素独特的电子结构决定了它具有特殊的发光特性,其发射光谱几乎覆盖了从近紫外到远红外的各个波段。稀土激活的发光材料在显示、照明、检测、医学影像等方面有广泛地应用^[1-4]。稀土发光材料的研究有力地推动了照明显示领域产品的更新换代和电子信息产业的发展。稀土发光材料受到国内外研究者的广泛关注,应用领域也不断得到扩展^[5]。在已报道的稀土发光材料中, Ce^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Eu^{2+} 、 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 和 Er^{3+} 等都是研究比较多的发光离子^[1-2]。其中, Tb^{3+} 离子是常见的绿色高效激活离子。 Tb^{3+} 离子的发光主要是来自于 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_j$ 和 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j=0 \sim 6$)的跃迁发射,其中 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ 跃迁是位于550 nm附近的绿光发射,因此 Tb^{3+} 离子被广泛地应用于绿粉的制备与研究中^[23,27-29]。稀土离子激活的硼酸盐荧光粉作为发光材料中的一类体系,在短波UV辐射激发下,具有较高的效率,应用于无汞荧光灯、真空紫外激发的显示器中^[28-30]。其中,稀土激活的硼酸盐 CaLuBO_4 迄今为止尚未有研究报道。本文以硼酸盐 CaLuBO_4 为基质, Tb^{3+} 离子为激活剂,采用高温固相法合成了 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$)系列荧光粉,并研究了其晶体结构、光谱性质、发光机理和荧光寿命。

2 实 验

采用高温固相反应法制备了 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$)荧光粉系列样品。制备原料为 CaCO_3 (分析纯)、 Lu_2O_3 (99.99%)、 H_3BO_3 (优级纯)和 Tb_4O_7 (99.99%)。其制备过程如下:按照材料组成,按化学计量比称取原料,在玛瑙研钵中研磨均匀,放入刚玉坩埚。置于高温箱式马弗炉中,在碳还原气氛下,1400℃恒温4 h。随炉冷却至室温后,将材料取出,研磨后即得所需样品。采用Rigaku D/MAX-RB型X射线衍射(XRD)仪测定样品的晶体结构。样品的发射光谱和激发光谱利用日立F-4600分光光度计测定,激发源为150 W的Xe灯。荧光寿命测量由Tektronix-TDS 3052数字示波器记录,利用Continuum Sure-lite Nd:YAG激光器泵浦Horizon OPO(光参量振荡器)输出268 nm脉冲激光激发。

3 结果与讨论

3.1 样品的 XRD 分析

图1是样品 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$)的X射线衍射图。通过与标准X射线衍射卡片对比,所得样品的XRD衍射峰数据与国际标准卡片JCPDS 04-009-1237 (CaLuBO_4)数据相吻合。说明所制得的样品与 CaLuBO_4 晶体结构一致。 CaLuBO_4 的晶格常数分别为 $a=1.032$ nm, $b=0.352$ nm, $c=0.955$ nm,属于正交晶系。样品在30°附近出现了一个小的杂峰,经对比,发现杂峰来源于 Lu_2O_3 ,说明样品中有少量的 Lu_2O_3 原料剩余。从图1中可以看出,当 Tb^{3+} 的摩尔分数为0.2时,杂峰变强。因此,较低的 Tb^{3+} 掺杂浓度有利于形成晶相比较纯的 CaLuBO_4 样品。

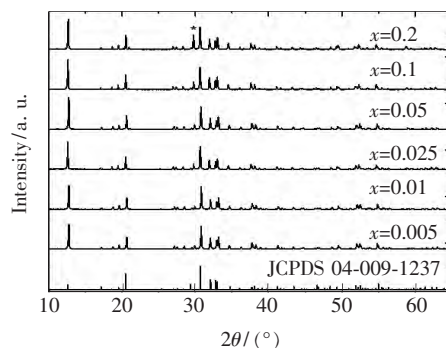


图1 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ 荧光粉的 XRD 衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of the $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ phosphor

图2为样品 $\text{CaLuBO}_4:0.05\text{Tb}^{3+}$ 发射光谱,激发波长分别为216, 233, 268, 303, 377 nm。 $\text{CaLuBO}_4:0.05\text{Tb}^{3+}$ 样品的发射光谱由位于370~670 nm之间的一系列锐峰组成。样品位于382 nm附近的发射峰来源于 Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_6$ 跃迁,位于416 nm和422 nm附近的发射峰来源于 Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_5$ 跃迁,位于440 nm附近的发射峰来源于 Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_4$ 跃迁,位于488 nm和499 nm附近的发射峰来源于 Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_6$ 跃迁,位于545 nm和554 nm附近的发射峰来源于 Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ 跃迁,位于587 nm附近的发射峰来源于 Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_4$ 跃迁,位于627 nm附近的发射峰来自于 Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_3$ 跃迁。由图2可知,当激发波长为268 nm时, $\text{CaLuBO}_4:$

0.05Tb^{3+} 样品的发光强度最大; 当激发波长为 216, 233, 303, 377 nm 时, 样品的发光强度较弱。样品位于 545 nm 附近发光峰的强度最大, 其次为位于 554 nm 附近的发光峰, 而位于 382, 416, 422, 440, 488, 499, 545, 554, 587, 627 nm 附近的发射峰强度较弱, 即样品以 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ 的跃迁强度最大, 而源于 $^5\text{D}_3$ 的跃迁发射强度都比较弱。

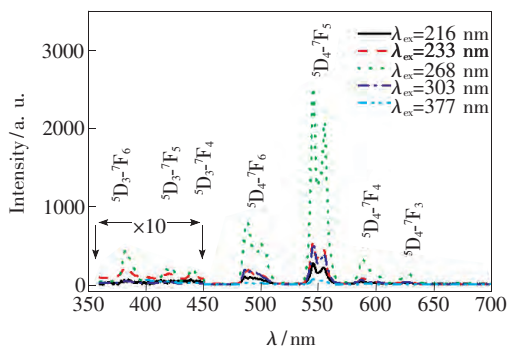


图2 $\text{CaLuBO}_4:0.05\text{Tb}^{3+}$ 样品的发射光谱

Fig. 2 Photoluminescence spectra of the $\text{CaLuBO}_4:0.05\text{Tb}^{3+}$ phosphor

图3是 $\text{CaLuBO}_4:0.05\text{Tb}^{3+}$ 荧光粉的激发光谱, 监测波长分别为 382, 422, 440, 488, 545, 554, 587, 627 nm。由图3可知, 在不同监测波长下, 样品的激发光谱形状相似, 都是由宽带峰和一系列的锐峰组成。宽带峰位于 200 ~ 340 nm 之间, 峰值在 216, 233, 268, 303 nm 附近, 源自于 Tb^{3+} 离子的 $4f-5d$ 跃迁。位于 340 ~ 390 nm 之间还有一组很弱的激发峰, 将其放大之后可以分辨出 5 个激发峰, 源自于 Tb^{3+} 离子由基态 $^7\text{F}_6$ 能级到激发态能级的吸收跃迁。分别归属于 Tb^{3+} 离子的 $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{L}_8$ (343 nm)、 $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{L}_9$ (351 nm)、 $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{G}_5$ (360 nm)、 $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{L}_{10}$ (368 nm) 及 $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{G}_6$ (377 nm) 吸收跃迁。

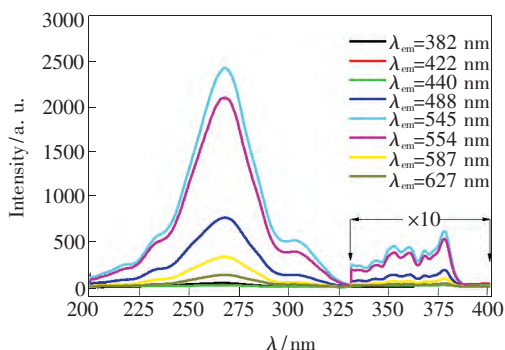


图3 $\text{CaLuBO}_4:0.05\text{Tb}^{3+}$ 样品的激发光谱

Fig. 3 Excitation spectra of $\text{CaLuBO}_4:0.05\text{Tb}^{3+}$ phosphor

3.2 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ 发光性质与 Tb^{3+} 离子浓度的关系

图4为样品 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) 的激发光谱, 监测波长为 545 nm。由图4可知, 不同 Tb^{3+} 离子掺杂浓度样品激发谱的谱形相似。随着 Tb^{3+} 离子掺杂浓度升高, 最强的激发峰的位置从 264 nm 移动到了 268 nm。随着 Tb^{3+} 离子掺杂浓度升高, 样品位于 216 nm 附近的激发峰强度先增强后减弱, 当 Tb^{3+} 摩尔分数为 0.01 mol 时强度最大。样品位于 233, 268, 303 nm 附近的激发峰强度也是随着 Tb^{3+} 离子掺杂浓度升高先减弱后增强再减弱, 当 Tb^{3+} 离子的摩尔分数为 0.1 时, 样品位于 268 nm 附近的激发峰强度最大。

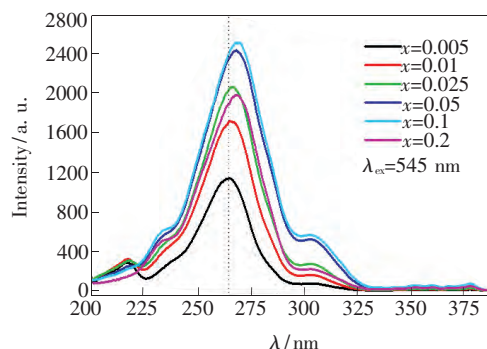


图4 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) 样品的激发光谱 ($\lambda_{em}=545$ nm)

Fig. 4 Excitation spectra of the $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) samples, $\lambda_{em}=545$ nm.

图5给出了样品 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) 在 268 nm 光激发下的发光光谱。从图5中可以看出, 不同 Tb^{3+} 离子掺杂浓度的样品发射光谱的谱形相似, 都是由 Tb^{3+} 的 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j=6, 5, 4$) 和 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j=6, 5, 4, 3$) 特征发射组成。 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j=6, 5, 4, 3$) 的跃迁强度大于 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j=6, 5, 4$) 的跃迁强度。其中 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j=6, 5, 4$) 的跃迁强度随着 Tb^{3+} 浓度的升高而先增强后减弱, 当 $x=0.01$ mol 时发光强度最大, 当 $x>0.05$ mol 时, 发光强度变得极弱。 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j=6, 5, 4, 3$) 的跃迁中, 位于 545 nm 和 554 nm 附近的 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ 跃迁发射强度最大, 其发光强度随着 Tb^{3+} 浓度升高先增强后减弱, 当 Tb^{3+} 离子摩尔分数为 0.1 mol 时发光强度

最大。图 5 中的插图给出了当激发波长为 268 nm 时,样品的积分发光强度与 Tb^{3+} 离子浓度的对应关系。样品的积分发光强度随 Tb^{3+} 浓度的增加先上升后下降。样品在 $x = 0.1 \text{ mol}$ 时积分发光强度最大,其中, $x = 0.05 \text{ mol}$ 和 $x = 0.1 \text{ mol}$ 时积分发光强度十分接近。

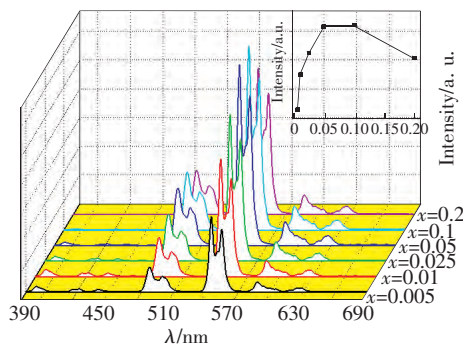


图 5 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x = 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) 样品的发射光谱($\lambda_{\text{ex}} = 268 \text{ nm}$)

Fig. 5 Photoluminescence spectra of the $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x = 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) phosphors under 268 nm excitation wavelength

3.3 荧光寿命分析

在 268 nm 光的激发下,监测 440 nm ($^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_4$) 和 545 nm ($^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$) 两个波长位置,测得 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x = 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) 的荧光衰减曲线,如图 6 和图 7 所示。其中, $^5\text{D}_4$ 能级的衰减满足单 e 指数衰减,而 $^5\text{D}_3$ 能级的衰减是偏离单 e 指数衰减的,因此,寿命由下面的公式计算给出:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty I(t) t dt}{\int_0^\infty I(t) dt}, \quad (1)$$

其中, $I(t)$ 代表 t 时刻的发光强度, τ 是荧光寿命。用公式(1)计算得出的寿命如图 6 和图 7 中的插图所示。从图 6 中可以看出, $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ 的 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_4$ 跃迁发射的寿命在 71.56 ~ 3.03 μs 左右,寿命随 Tb^{3+} 浓度的增加而减小,当 Tb^{3+} 的摩尔分数大于 0.025 时,寿命下降较快。从图 7 中可以看出, $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ 跃迁发射的寿命在 2.03 ~ 1.68 ms 左右,随 Tb^{3+} 浓度的增加寿命变短。当 Tb^{3+} 摩尔分数大于 0.05 时,寿命下降较快。 $^5\text{D}_3$ 能级的寿命比 $^5\text{D}_4$ 能级的寿命短得多。随 Tb^{3+} 浓度的增加, $^5\text{D}_3$ 能级的寿命变短趋势比 $^5\text{D}_4$ 能级更显著,因此 $^5\text{D}_3$ 能级的荧光

猝灭浓度小于 $^5\text{D}_4$ 能级荧光猝灭浓度,这与荧光强度随浓度的变化情况一致。

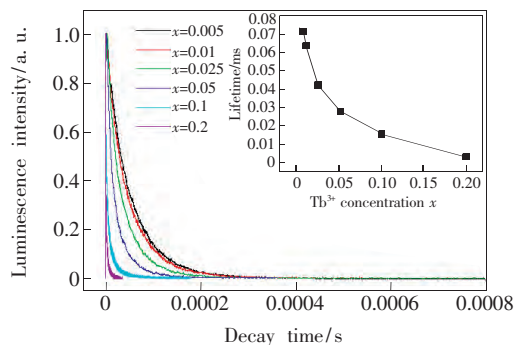


图 6 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x = 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) 荧光寿命衰减曲线,监测波长 440 nm,插图为样品的荧光寿命随浓度的变化关系。

Fig. 6 PL decay curves of the Tb^{3+} ions in $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x = 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) phosphors monitored at 440 nm. Inset shows lifetime vs. Tb^{3+} content.

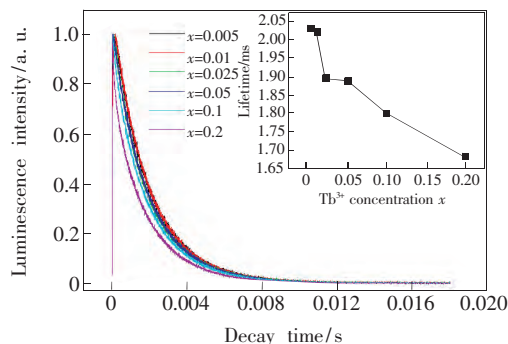


图 7 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x = 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) 荧光寿命衰减曲线,监测波长 545 nm,插图为样品的荧光寿命随浓度的变化关系。

Fig. 7 PL decay curves of the Tb^{3+} ions in $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x = 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) phosphors monitored at 545 nm. Inset shows lifetime vs. Tb^{3+} content.

4 结 论

采用高温固相法合成了 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ ($x = 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$) 系列黄绿光荧光粉,研究了样品的发光性质。在紫外光激发下, $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ 的发射光谱由位于 370 ~ 670 nm 之间的一系列锐峰组成,来源于 Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j = 6, 5, 4$) 和 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j = 6, 5, 4, 3$) 特征发射。其中位于 545 nm 和 554 nm 附近的 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ 跃迁发射强度最大,因此样品的发光

颜色为明亮的黄绿色。在 268 nm 的光激发下,样品的积分发光强度随 Tb^{3+} 浓度的增加先上升后下降, $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j=6,5,4$) 跃迁的发光强度在 $x=0.01$ mol 时最大, $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j=6,5,4,3$) 跃迁的发光强度在 $x=0.1$ mol 时最大。通过测量样品的荧光寿命

衰减曲线,我们发现随着 Tb^{3+} 浓度的增加, $^5\text{D}_3$ 能级的寿命变短趋势比 $^5\text{D}_4$ 能级更显著,因此 $^5\text{D}_3$ 能级的荧光猝灭浓度小于 $^5\text{D}_4$ 能级荧光猝灭浓度,与荧光强度随浓度的变化情况一致。 $\text{CaLuBO}_4:x\text{Tb}^{3+}$ 是一种适于紫外激发的新型黄绿光荧光粉。

参 考 文 献:

- [1] 张亮亮,张家骅,郝振东,等. Cr^{3+} 掺杂的宽带近红外荧光粉及其研究进展 [J]. 发光学报, 2019,40(12): 1449-1459.
ZHANG L L,ZHANG J H,HAO Z D,et al.. Recent progress on Cr^{3+} doped broad band NIR phosphors [J]. Chin. J. Lumin., 2019,40(12): 1449-1459. (in Chinese)
- [2] 刘行仁. CRT、VFD 及 FED 显示器用的荧光粉的进展 [J]. 液晶与显示, 1996,11(1): 61-68.
LIU X R. Progress of the phosphors for CRT、VFD and FED displays [J]. Chin. J. Liq. Cryst. Disp., 1996,11(1): 61-68. (in Chinese)
- [3] ZHANG C H,LIU Y F,ZHANG J H,et al.. A single-phase $\text{Ba}_9\text{Lu}_2\text{Si}_6\text{O}_{24}:\text{Eu}^{2+},\text{Ce}^{3+},\text{Mn}^{2+}$ phosphor with tunable full-color emission for NUV-based white LED applications [J]. Mater. Res. Bull., 2016,80: 288-294.
- [4] 王巍,李一,宁平凡,等. 广色域钙钛矿量子点/荧光粉转换白光 LED [J]. 发光学报, 2018,39(5): 627-632.
WANG W,LI Y,NING P F,et al.. Perovskite quantum dot/powder phosphor converted white light LEDs with wide color gamut [J]. Chin. J. Lumin., 2018,39(5): 627-632. (in Chinese)
- [5] 王娟娟,袁曦明,李予晋,等. 共沉淀法制备 PDP 用红色荧光粉(Y,Gd) $\text{BO}_3:\text{Eu}^{3+}$ 的正交实验研究 [J]. 液晶与显示, 2009,24(5): 645-649.
WANG J J,YUAN X M,LI Y J,et al.. Preparation of red phosphor (Y,Gd) $\text{BO}_3:\text{Eu}^{3+}$ by coprecipitation method with orthogonal test [J]. Chin. J. Liq. Cryst. Disp., 2009,24(5): 645-649. (in Chinese)
- [6] 付作岭,董晓睿,盛天琦,等. 纳米晶体中稀土离子的发光性质及其变化机理研究 [J]. 中国光学, 2015,8(1): 139-146.
FU Z L,DONG X R,SHENG T Q,et al.. Luminescence properties and various mechanisms of rare earth ions in the nanocrystals [J]. Chin. Opt., 2015,8(1): 139-146. (in Chinese)
- [7] NAIR G B,DHOBLE S J. Assessment of electron-vibrational interaction (EVI) parameters of $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$, $\text{TAG}:\text{Ce}^{3+}$ and $\text{LuAG}:\text{Ce}^{3+}$ garnet phosphors by spectrum fitting method [J]. Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc., 2017,173: 822-826.
- [8] 徐文,陈旭,宋宏伟. 稀土离子上转换发光中的局域电磁场调控 [J]. 发光学报, 2018,39(1): 1-26.
XU W,CHEN X,SONG H W. Manipulation of local electromagnetic field in upconversion luminescence of rare earth ions [J]. Chin. J. Lumin., 2018,39(1): 1-26. (in Chinese)
- [9] 周青超,柏泽龙,鲁路,等. 白光 LED 远程荧光粉技术研究进展与展望 [J]. 中国光学, 2015,8(3): 313-328.
ZHOU Q C,BAI Z L,LU L,et al.. Remote phosphor technology for white LED applications: advances and prospects [J]. Chin. Opt., 2015,8(3): 313-328. (in Chinese)
- [10] 洪广言. 稀土发光材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 6-8.
HONG G Y. Fundamental and Application of Rare Earth Luminescent Materials [M]. Beijing: Science Press, 2011: 6-8. (in Chinese)
- [11] HAO Z D,ZHANG J H,ZHANG X,et al.. An intense blue-emitting phosphor for near-ultraviolet pumped white-light-emitting diodes: Ce^{3+} -activated $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ [J]. J. Lumin., 2014,152: 40-43.
- [12] 唐靓,叶慧琪,肖东. 溶胶-凝胶法制备 $\text{YAG}:\text{Ce},\text{Yb}$ 纳米荧光粉及其发光性质研究 [J]. 发光学报, 2018,39(8): 1051-1058.
TANG L,YE H Q,XIAO D. $\text{YAG}:\text{Ce},\text{Yb}$ nano-phosphor synthesized by sol-gel method and its luminescence properties [J]. Chin. J. Lumin., 2018,39(8): 1051-1058. (in Chinese)
- [13] ZHANG L L,ZHANG J H,ZHANG X,et al.. Site distortion in $\text{Li}_2\text{SrSiO}_4$: influence on Pr^{3+} emission and application in wLED [J]. J. Lumin., 2016,180: 158-162.
- [14] 闫宏,宋婷,张猛,等. 高性能 X 射线影像存储 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$ 荧光粉的微结构及光学特性 [J]. 发光学报, 2018,39(7): 895-902.

- YAN H, SONG T, ZHANG M, *et al.*. Microstructure and optical properties of $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Pr}^{3+}$ phosphors for high quality X-ray imaging [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(7): 895-902. (in Chinese)
- [5] WANG B H, WANG Z H, LIU Y G, *et al.*. Crystal structure tailoring and luminescence tuning of $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}$ phosphors for white-light-emitting diodes [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 776: 554-559.
- [6] ZHANG Y J, ZHANG H, DONG P P, *et al.*. Synthesis, structure and photoluminescence properties of $(\text{Sr}, \text{Ca})\text{AlSiN}_3 : \text{Eu}^{2+}$ phosphor for white light emitting diodes with controllable optical performance [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2017, 28(1): 86-93.
- [7] ZHONG J S, CHEN D Q, YUAN Y J, *et al.*. Synthesis and spectroscopic investigation of $\text{Ba}_3\text{La}_6(\text{SiO}_4)_6 : \text{Eu}^{2+}$ green phosphors for white light-emitting diodes [J]. *Chem. Eng. J.*, 2017, 309: 795-801.
- [8] LI J, CHEN L, ZHANG J H, *et al.*. Photoluminescence properties of a novel red-emitting phosphor Eu^{3+} activated scandium molybdate for white light emitting diodes [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2016, 83: 290-293.
- [9] HUANG C H, CHEN C T, GUO S Q, *et al.*. Luminescence and theoretical calculations of novel red-emitting $\text{NaYPO}_4\text{F} : \text{Eu}^{3+}$ phosphor for LED applications [J]. *J. Alloys Compd.*, 2017, 712: 225-232.
- [10] ZHOU L Y, HUANG J L, YI L H, *et al.*. Luminescent properties of $\text{Ba}_3\text{Gd}(\text{BO}_3)_3 : \text{Eu}^{3+}$ phosphor for white LED applications [J]. *J. Rare Earths*, 2009, 27(1): 54-57.
- [11] 孙雷, 张毅, 胡兴凯, 等. LED 用 $\text{KZn}_4(\text{BO}_3)_3 : \text{Eu}^{3+}$ 荧光粉的合成与发光性能研究 [J]. *液晶与显示*, 2014, 29(6): 893-900.
- SUN L, ZHANG Y, HU X K, *et al.*. Synthesis and photoluminescence properties of $\text{KZn}_4(\text{BO}_3)_3 : \text{Eu}^{3+}$ red-emitting phosphor [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2014, 29(6): 893-900. (in Chinese)
- [12] 张家骅, 吕伟, 郝振东, 等. 利用能量传递实现可调全色单一白光 $\text{BaMg}_2\text{Al}_6\text{Si}_9\text{O}_{30} : \text{Eu}^{2+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ 荧光粉 (特邀) [J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 203-208.
- ZHANG J H, LÜ W, HAO Z D, *et al.*. Color-tunable white-light emitting $\text{BaMg}_2\text{Al}_6\text{Si}_9\text{O}_{30} : \text{Eu}^{2+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphors via energy transfer (Invited) [J]. *Chin. Opt.*, 2012, 5(3): 203-208. (in Chinese)
- [13] RAO B V, RAMBABU U, BUDDHUDU S. Analysis of green luminescent $\text{Tb}^{3+} : \text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ powder phosphor [J]. *Phys. B: Condens. Matter*, 2007, 391(2): 339-343.
- [14] ZHANG R, WANG X. Preparation and luminescent characteristics of $\text{Sr}_3\text{RE}_2(\text{BO}_3)_4 : \text{Dy}^{3+}$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{La}, \text{Gd}$) phosphors for white LED [J]. *J. Alloys Compd.*, 2011, 509(4): 1197-1200.
- [15] LENG J, TANG J, XIE W Y, *et al.*. Impact of pH and urea content on size and luminescence of upconverting $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Yb}, \text{Er}$ nanophosphors [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2018, 100: 171-177.
- [16] 王林香, 虞娟, 叶颖, 等. $\text{Li}^+, \text{Zn}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$ 掺杂 $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$ 荧光粉的制备及发光特性 [J]. *中国光学*, 2019, 12(1): 112-121.
- WANG L X, TUO J, YE Y, *et al.*. Preparation and luminescence properties of $\text{Li}^+, \text{Zn}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$ doped $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$ phosphors [J]. *Chin. Opt.*, 2019, 12(1): 112-121. (in Chinese)
- [17] YAN X, FERN G R, WITHNALL R, *et al.*. Contrasting behaviour of the co-activators in the luminescence spectra of $\text{Y}_2\text{O}_3\text{S} : \text{Tb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ nanometre sized particles under UV and red light excitation [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(3): 1091-1096.
- [18] ZHAO W Y, AN S L, FAN B, *et al.*. Cathodoluminescent properties of the green phosphor $\text{Sr}_3\text{Gd}(\text{BO}_3)_3 : \text{Tb}^{3+}$ [J]. *Opt. Mater.*, 2012, 34(7): 1124-1127.
- [19] 林惠红, 梁宏斌, 苏锵, 等. $\text{Sr}_2\text{Mg}(\text{BO}_3)_2 : \text{Tb}^{3+}$ 的真空紫外发光性质 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(7): 1743-1746.
- LIN H H, LIANG H B, SU Q, *et al.*. Luminescence of $\text{Sr}_2\text{Mg}(\text{BO}_3)_2 : \text{Tb}^{3+}$ under vacuum ultraviolet excitation [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 2011, 31(7): 1743-1746. (in Chinese)
- [20] 洪广言. 稀土发光材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 160.
- HONG G Y. *Fundamental and Application of Rare Earth Luminescent Materials* [M]. Beijing: Science Press, 2011: 160. (in Chinese)



孙晓园 (1978 -), 女, 黑龙江克山人, 博士, 教授, 2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事稀土发光材料及功能微结构的研究。

E-mail: sxueyuan@163.com