

# 黄色荧光粉 $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:\text{Dy}^{3+}$ 的 制备及其性能的研究

赵丹<sup>1,2</sup>, 刘稳<sup>1</sup>, 邓玲<sup>1</sup>, 李亚男<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 化学化工学院, 河南 焦作 454000; 2. 结构化学国家重点实验室, 福建 福州 350002)

**摘要** 近年来, 由于 LED 照明灯具发光性能高、寿命长、环保、节能、可靠性高等一系列特点, 引起了人们的广泛关注。本文采用的高温固相法合成稀土发光材料  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  ( $x=0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030$ ), 并研究了其晶体结构及光学性能。在 350 nm 光激发下, 发射主峰在 576 nm, 归因于  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$  跃迁。 $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.01\text{Dy}^{3+}$  的 CIE 坐标为 (0.3779, 0.3961), 位于黄光区域。 $\text{Dy}^{3+}$  的最佳掺杂量为 0.010, 接着研究了  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  的温度猝灭行为, 结果显示在 150 °C 时的发射积分强度为其初始值 25 °C 的 82%, 表明荧光粉的热稳定性很好。综上所述,  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:\text{Dy}^{3+}$  荧光粉的发光性能良好, 可作为黄色荧光粉应用于 LED 照明及显示领域。

**关键词** 磷酸盐;  $\text{Dy}^{3+}$ ; 高温固相法; 发光材料

**中图分类号** O74

**文献标识码** A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



## Synthesis and Properties of a Yellow Phosphor $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:\text{Dy}^{3+}$

ZHAO Dan<sup>1,2</sup>, LIU Wen<sup>1</sup>, DENG Ling<sup>1</sup>, LI Yanan<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. State Key Laboratory of Structural Chemistry, Fuzhou 350002, China)

**Abstract** In recent years, white LED has aroused widespread attention due to its advantages of high luminous performance, long life, environmental protection, energy saving and high reliability. In this paper, a series of phosphors  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  ( $x=0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030$ ) were synthesized by high-temperature solid-state method, and their crystal structure and optical properties were studied. Under 350 nm excitation,  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  shows an emission maximum at 576 nm, due to the transition from  $^4\text{F}_{9/2}$  to  $^6\text{H}_{13/2}$ . CIE coordinates of  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  was calculated to be (0.3779, 0.3961), following in the yellow region. The optimized concentration of  $\text{Dy}^{3+}$  is  $x=0.01$ . Temperature dependent luminescence of  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  was studied, revealing that the emission integral intensity at 150 °C is 82% of its initial value at 25 °C. This indicates that the phosphor has good thermal stability. To sum up, we think that  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:\text{Dy}^{3+}$  is a good yellow phosphor, and can be applied in fields of LED lighting and displays.

**Key words** phosphor;  $\text{Dy}^{3+}$ ; high-temperature solid state method; luminescent material

收稿日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(22075070); 结构化学国家重点实验室开放课题资助

通讯作者: 赵丹, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 晶态固体材料, E-mail: iamzd@hpu.edu.cn.

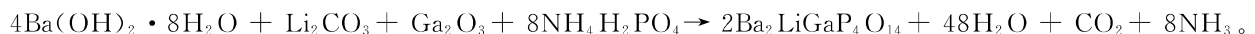
## 0 引言

稀土发光材料(或稀土荧光粉)由于其独特的光学特性,包括色彩鲜亮、纯度高、性能稳定、转换效率高和光吸收容量强等,在显示、激光、照明、闪烁体等领域和得到了广泛的应用,在生活、医疗、器械、农业等方面发挥着重要的作用<sup>[1-3]</sup>。近年来,科学家们对于稀土发光材料尤为重视,国内外众多科研人员致力于稀土发光材料的研究。

一般来说,稀土发光材料由基底和稀土激活离子组成。基底的选用尤为重要,无机硫化物、氮(氧)化物、卤化物基底材料虽然具有高的量子效率,但是其稳定性较差,长期暴漏在空气中容易受到氧化、水解等因素的影响,导致其发光效率降低;此外,这类发光材料制备条件苛刻,且具有一定的毒性。无机氧化物或含氧酸盐类化合物具有物理化学性质稳定、价格便宜的优点,受到了国内外研究者的广泛关注,其中硅酸盐<sup>[4]</sup>、磷酸盐<sup>[5,6]</sup>、硼酸盐<sup>[7]</sup>等作为基底的稀土掺杂的发光材料的研究已经取得了可观的成果。夏志国教授制备了一系列  $\text{Eu}^{2+}$  掺杂  $\text{UCr}_4\text{C}_4$  基荧光粉,其窄的发射带、高的量子效率、良好的热稳定性备受关注<sup>[8,9]</sup>。杜鹏教授制备了  $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$  共掺  $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4$  荧光粉实现了在 395 nm 激发下,材料同时发射出  $\text{Eu}^{2+}$  的蓝光和  $\text{Eu}^{3+}$  的红光,并且其温度猝灭效应是由于交叉弛豫导致的<sup>[10]</sup>。稀土激活离子主要以  $\text{Ce}^{3+}$  及  $\text{Gd}^{3+}$  两侧的  $\text{Sm}^{3+}$ 、 $\text{Eu}^{3+}$ 、 $\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Tb}^{3+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$  为主<sup>[11-13]</sup>。 $\text{Dy}^{3+}$  离子的  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$  和  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$  跃迁分别位于蓝色和黄色区域,因此,只要适当的改变黄蓝强度比,掺  $\text{Dy}^{3+}$  的荧光材料就可以呈现出白色光<sup>[14]</sup>。本文选用焦磷酸盐  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2$  为基底、 $\text{Dy}^{3+}$  为激活离子制备了一系列新型发光材料  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$ ,并研究了其晶体结构于发光性能,发现它在近紫外光激发下可以发射出黄色光,是潜在的 LED 材料。

## 1 实验

采用高温固相法制备  $\text{Ba}_{2-x}\text{LiGa}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  ( $x=0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030$ ) 荧光粉,所用合成原料是从国药化学试剂有限公司购买来的分析纯试剂,直接使用。按照化学计量比分别称取  $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  药品混合,加入适量的酒精充分研磨,然后将装入坩埚中。样品的具体用量以  $x=0.010$  样品为例,各反应物依次为 3.000 g、2.198 g、0.1766 g、0.4477 g、0.008911 g。放在马弗炉中用 500 °C 的温度反应 10 h,以分解  $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,除去反应物中的水分和相关气体,该反应可由下式表示



然后将低温反应之后的混合物冷却至室温后再次研磨,在 750 °C 下加热 40 h,期间分三次煅烧,每次取出都将反应物粉末再次研磨,使其混合更加的均匀,使其反应的更加充分。最后,当样品冷却至室温时,将获得的产物研磨成粉末后用于之后的性能研究。

## 2 结果和讨论

### 2.1 晶体结构

在我们的前期工作中,报道了基底  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2$  的晶体结构<sup>[15]</sup>,它具有三斜空间群  $P-1$ ,晶胞参数为  $a=0.76289(8)$  nm,  $b=0.85139(8)$  nm,  $c=0.91246(9)$  nm,  $\alpha=73.463(2)^\circ$ ,  $\beta=82.196(1)^\circ$ ,  $\gamma=81.571(2)^\circ$ ,  $V=55.924(10)$  nm<sup>3</sup>,  $Z=2$ 。该化合物包含由  $\text{P}_2\text{O}_7$ ,  $\text{LiO}_5$  和  $\text{GaO}_6$  多面体构成的一维链  $[\text{LiGa}(\text{P}_2\text{O}_7)_2]_\infty$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  离子分布于链周围,如图 1 所示。为了确定我们合成的粉末产物  $\text{LiBa}_{2-x}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  ( $x=0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030$ ) 就是该化合物并且纯度较高,我们进行了 XRD 分析,测试结果如图 2 所示。从 XRD 图谱中,可以看出所有化合物的衍射峰与标准谱图吻合很好,没有杂峰存在,说明该粉末样品就是  $\text{LiBa}_2\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$ ,少量  $\text{Dy}^{3+}$  离子的掺杂并没有引起化合物结构的改变。在该化合物中,  $\text{Ga}^{3+}$  离子半径(0.0620 nm, CN=6)与  $\text{Dy}^{3+}$  离子半径(0.0912 nm, CN=6)相差较大<sup>[16]</sup>,而  $\text{Li}^+$  离子半径(0.0760 nm, CN=6)、 $\text{Ba}^{2+}$  离子半径(0.1350 nm, CN=6)与  $\text{Dy}^{3+}$  较为接近,因此我们认为  $\text{Dy}^{3+}$  离子可进入  $\text{Li}^+$  或  $\text{Ba}^{2+}$  离子格位。但是,  $\text{Li}^+$  离子电荷与  $\text{Dy}^{3+}$  离子差距较大,因此可能  $\text{Dy}^{3+}$  离子主要

进入  $Ba^{2+}$  离子格位,  $Dy^{3+}$  掺杂进入  $Ba^{2+}$  格位的情况已有文献报道, 如  $KBaBP_2O_8:Dy^{3+}$  [17],  $Ba_7(BO_3)_3(SiO_4)Cl:Dy^{3+}$  [18] 等。

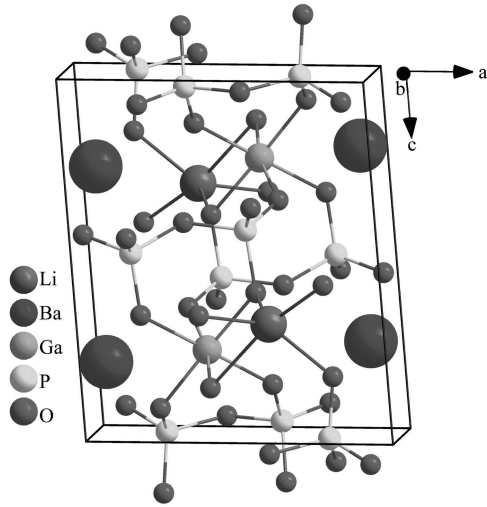


图1  $LiBa_2Ga(P_2O_7)_2$  的晶体结构

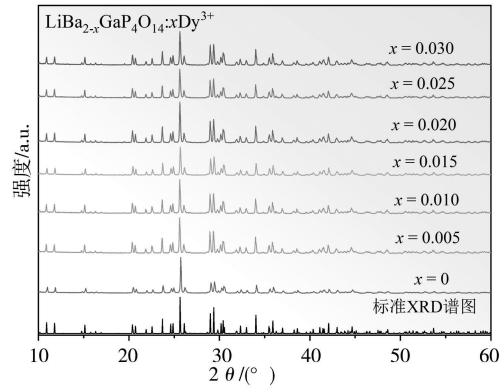


图2 粉末样品  $LiBa_{2-x}Ga(P_2O_7)_2:xDy^{3+}$  ( $x=0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030$ ) 的 XRD 衍射图谱

## 2.2 激发发射光谱

图3展示出了  $LiBa_{1.99}Ga(P_2O_7)_2:0.010Dy^{3+}$  的激发(左)和发射光谱(右), 在 576 nm 监测波长下, 激发光谱由较弱的  $O^{2-} \rightarrow Dy^{3+}$  电荷迁移带(简称 CTB)和一系列  $Dy^{3+}$  的特征激发峰组成, 主要的激发峰分别位于 299 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4D_{7/2}$ ), 325 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4K_{15/2}$ ), 350 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{7/2}$ ), 365 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{5/2}$ ) 和 388 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4M_{21/2}$ ) [19,20], 这些激发峰都分布在近紫外附近, 它们的谱线密度大而且具有较高的激发强度。其中, 350 nm 是最强的激发峰, 次强激发峰位于 366 nm。

以 350 nm 为激发波长测得目标样品的发射光谱, 我们发现, 荧光光谱由一系列峰值在 482, 576, 672 nm 的窄带组成, 分别归因于  $Dy^{3+}$  的 482 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ ), 576 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ ) 和 672 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$ ) 跃迁。其中, 575 nm 的黄光发射是最强的, 482 nm 蓝光强度次之, 672 nm 红光发射。

如图4所示, 我们测量了荧光粉  $LiBa_{1.99}Ga(P_2O_7)_2:0.010Dy^{3+}$  的荧光寿命衰减曲线。衰减曲线都可以通过二次指数衰减方程来拟合, 公式如 [21]

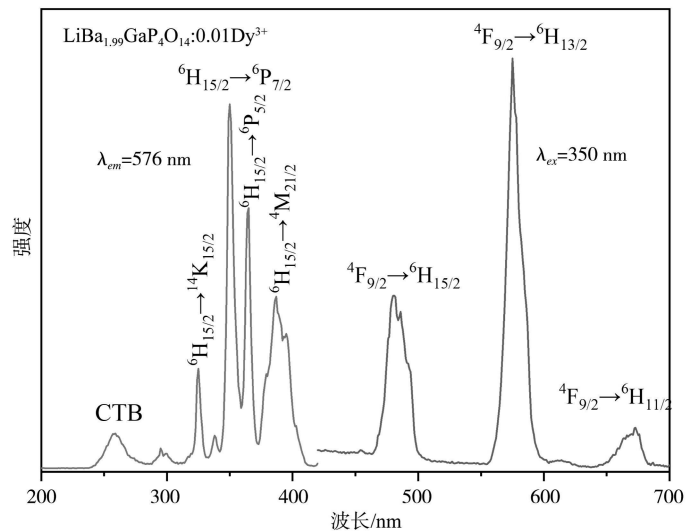


图3  $LiBa_{1.99}Ga(P_2O_7)_2:0.010Dy^{3+}$  的激发光谱(左)和发射光谱(右)

$$I(t) = I_0 + A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2), \quad (1)$$

$$\tau = (A_1 \tau_1^2 + A_2 \tau_2^2) / (A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2), \quad (2)$$

其中  $I(t)$  是时间  $t$  时  $Dy^{3+}$  的荧光强度,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别表示快寿命和慢寿命成分。  $A_1$  和  $A_2$  是指数前参数。  $\tau$  是发光寿命。其中  $LiBa_{1.99}Ga(P_2O_7)_2:0.010Dy^{3+}$  荧光粉的寿命计算为 0.69 ms, 与其他文献中所描述的  $Dy^{3+}$  掺杂荧光粉的寿命在同一数量级 [22,23]。

为了解释我们所制备的荧光粉的发光机理, 如图5所示, 我们分析了  $Dy^{3+}$  离子在  $LiBa_2Ga(P_2O_7)_2:Dy^{3+}$  荧光粉的能级图。  $Dy^{3+}$  离子中的自由电子从光中吸收能量, 并从基态 ( ${}^6H_{15/2}$ ) 上升到激发态 ( ${}^4K_{15/2}$ 、 ${}^6P_{7/2}$ 、 ${}^6P_{5/2}$  和  ${}^4M_{21/2}$ )。高激发态的电子通过非辐射方式返回到最低激发态  ${}^6F_{9/2}$ 。最后, 电子从  ${}^6F_{9/2}$  回到  ${}^6$

$\text{H}_{11/2}$ 、 $\text{H}_{13/2}$  和  $\text{H}_{15/2}$  的状态,释放光子并且发光<sup>[24-26]</sup>。

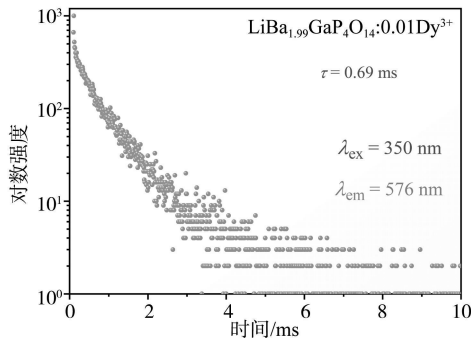


图 4  $\text{LiBa}_{2-x}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  荧光粉的衰减曲线

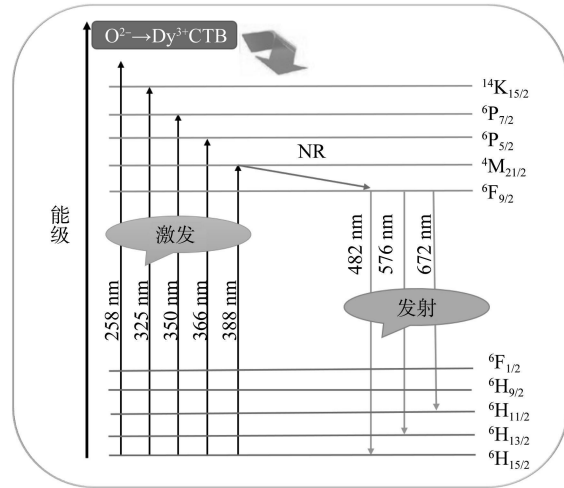


图 5  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  离子的能级图

### 2.3 浓度猝灭分析

为了优化  $\text{Dy}^{3+}$  离子的掺杂浓度,我们对于不同掺杂浓度的  $\text{LiBa}_{2-x}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030$ ) 的相对发射强度进行了研究,如图 6(a)所示。很明显的可以看出, $\text{Dy}^{3+}$  的浓度对发射光谱的峰位分布并没有影响,但是对发射强度有着比较大的影响。576 nm 发射峰强度随着  $\text{Dy}^{3+}$  的浓度的增加而增加,直到达到  $x = 0.010$  的最高值(图 6(b)),当  $x$  超过 0.010 时,由于浓度猝灭效应,随着  $\text{Dy}^{3+}$  的浓度的增加而逐渐降低。

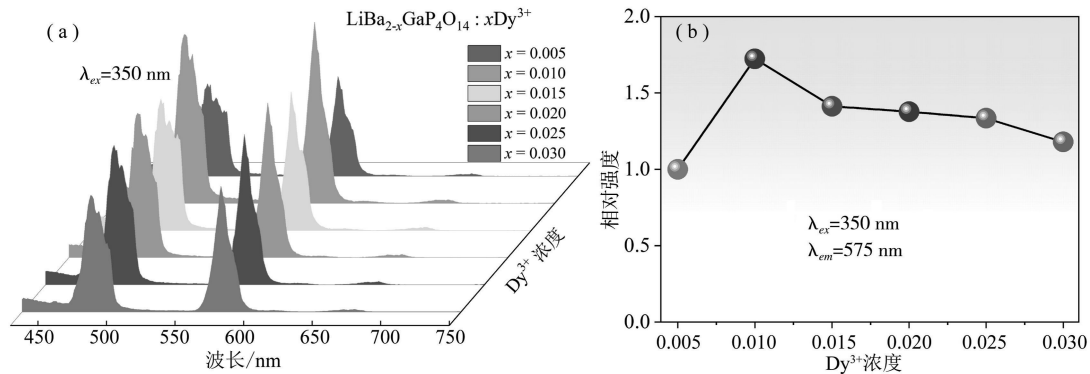


图 6 (a) 在 350 nm 的激发下  $\text{LiBa}_{2-x}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.005-0.030$ ) 荧光粉的发射光谱;

(b) 不同  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂浓度 576 nm 发射峰强度比较

### 2.4 热稳定性分析

通常,荧光粉的热稳定性是影响发光材料性能的一个重要的因素。因此,我们研究了  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  发光性能随温度变化的影响。如图 7(a)所示,显示了在 350 nm 激发的荧光粉的温度相关的  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  样品的发射光谱,我们可以发现,在所有温度下的光谱的轮廓都是相似的,但是其发射强度随着温度的升高单调递减。而且我们可以从图 7(b)中观察到,在 150 °C (近似 LED 工作温度)时的发射积分强度仍是其原始值 25 °C 积分强度的 82 %,这表明材料  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  具有良好的热稳定性。

通常,活化剂发射强度的降低归因于热猝灭,与材料的活化能( $\Delta E$ )有关,可以根据如下所述的阿伦尼乌斯方程得

$$I = \frac{I_0}{1 + A \exp(-\Delta E / KT)}, \quad (3)$$

其中  $I$  和  $I_0$  分别代表的是初始温度和测量温度下的发射强度, $A$  是指前因子, $K$  表示的是玻尔兹曼常数, $\Delta E$  代表活化能。图 8 为  $\ln[(I_0/I) - 1]$  与  $1/KT$  的关系图,可得线性拟合的斜率为 0.186,对应  $\text{Dy}^{3+}$  热猝

灭效应对应的活化能  $\Delta E$ , 即热猝灭活化能  $\Delta E$  为 0.186 eV。

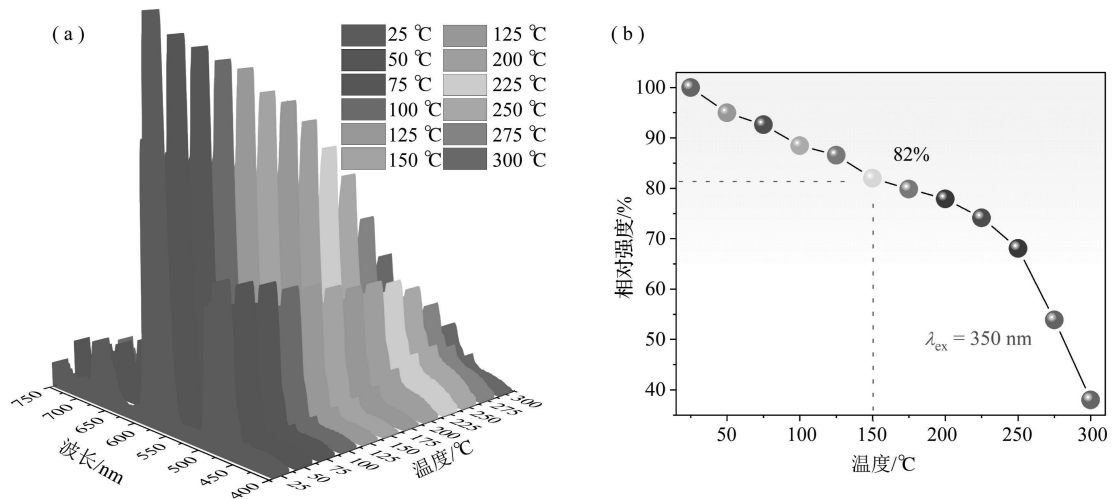


图 7 (a)  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  荧光粉在 350 nm 激发下的温度相关荧光光谱; (b) 强度比较图

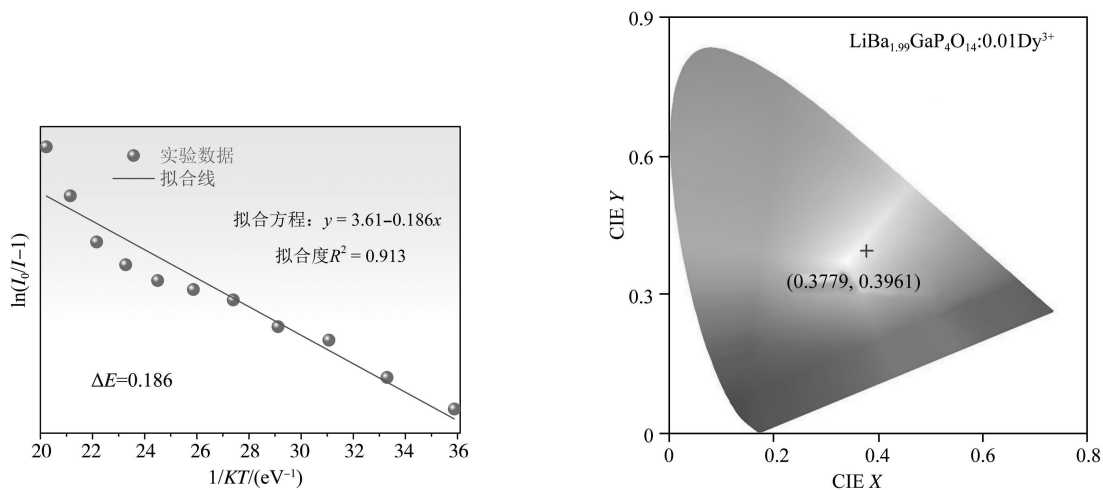


图 8  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  样品的热猝灭活化能

图 9 激发波长为 350 nm 的  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  的 CIE 色度图

## 2.5 色度图分析

CIE 图可以通过  $(x, y)$  坐标表示光的颜色, 可以更加清晰明了的了解样品发什么颜色的光。图 9 展示了  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  荧光粉在 350 nm 激发下的 CIE 1931 色度图。色度坐标  $(x, y)$  计算为  $(0.3779, 0.3961)$  该区域位于黄光区域。因此, 我们可以预期  $\text{LiBa}_{2-x}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  可作为黄色荧光粉应用于 LED 照明领域。

## 4 总结

使用高温固相法合成  $\text{LiBa}_{2-x}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  荧光粉, 并且对其物相组成、激发发射光谱、能级跃迁、浓度猝灭、荧光寿命和 CIE 色度坐标进行了研究。研究结果得出:  $\text{Dy}^{3+}$  离子的最优浓度为  $x=0.010$ ; 在 350 nm 的近紫外光激发下, 荧光粉  $\text{LiBa}_{2-x}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  的发射峰在 482、575、672 nm 处, 分别对应于  $\text{Dy}^{3+}$  离子的 482 nm ( ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$ )、575 nm ( ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ ) 和 672 nm ( ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ ) 跃迁, 并且计算得到的热猝灭活化能  $\Delta E$  为 0.186 eV。计算出  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  荧光粉的 CIE 坐标为  $(x, y) = (0.3779, 0.3961)$  对应于黄光。荧光粉  $\text{LiBa}_{1.990}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:0.010\text{Dy}^{3+}$  在 150 °C (近似 LED 工作温度) 时的发射积分强度仍是其原始值 25 °C 积分强度的 82%。综上所述, 我们可以预期  $\text{LiBa}_{2-x}\text{Ga}(\text{P}_2\text{O}_7)_2:x\text{Dy}^{3+}$  可作为黄色荧光粉应用于 LED 照明领域。

## 参 考 文 献

- [1] ZHAO Y, WANG Y J, WANG N, et al. Tetraphenylethylene-decorated metal-organic frameworks as energy-transfer platform for the detection of nitro-antibiotics and white-light emission[J]. *Inorg Chem*, 2019, 58: 12700-12706.
- [2] 刘小星, 赵丹. 橙红色荧光粉  $\text{K}_2\text{Bi}_{(1-x)}\text{Zr}(\text{PO}_4)_3:x\text{Sm}^{3+}$  的电子结构与荧光性能(英文)[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(1): 28-34.
- [3] 李金锋, 李宝慧, 刘学霞, 等. 红色荧光粉  $\text{Sr}_9\text{Zn}_{1.5}(\text{PO}_4)_7:\text{Eu}^{3+}$  的制备及发光性质研究(英文)[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2018, 31(3): 24-30.
- [4] ZHANG M, LIANG Y, XU S Y, et al. Investigation of luminescence properties and the energy transfer mechanism of tunable emitting  $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{Si}_3\text{O}_9)_2:\text{Eu}^{2+}, \text{Tb}^{3+}$  phosphors[J]. *Crystengcomm*, 2016, 18: 68-76.
- [5] GUPTA I, SINGH S, BHAGWAN S, et al. Rare earth (RE) doped phosphors and their emerging applications: a review[J]. *Ceram Int*, 2021, 47: 19282-19303.
- [6] ZHAO D, ZHANG S R, FAN Y P, et al. Two-site occupancy induced a broad-band emission in phosphor  $\text{K}_2\text{YZr}(\text{PO}_4)_3:\text{Eu}^{2+}$  for white-light-emitting diode applications[J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2020, 8: 18992-19002.
- [7] SHI J C, ZHAO D, XUE Y L, et al. Crystal structure and luminescent properties of a new rare-earth borate  $\text{K}_3\text{Pr}_3(\text{BO}_3)_4$ [J]. *Chin J Struct Chem*, 2019, 38: 727-736.
- [8] ZHAO M, YANG Z, NING L, et al. Tailoring of white luminescence in a  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  phosphor containing broad-band defect-induced charge-transfer emission[J]. *Adv Mater*, 2021, 33: 2101428.
- [9] ZHAO M, CAO K, LIU M, et al. Dual-shelled  $\text{RbLi}(\text{Li}_3\text{SiO}_4)_2:\text{Eu}^{2+}@\text{Al}_2\text{O}_3@\text{ODTMS}$  phosphor as a stable green emitter for high-power LED Backlights[J]. *Angew Chem*, 2020, 132: 13038-13043.
- [10] ZHOU L H, DU P, LI L. Facile modulation the sensitivity of  $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ -coactivated  $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4$  phosphors through adjusting spatial mode and doping concentration[J]. *Sci Rep*, 2020, 10: 1-11.
- [11] FENG X, GUO N, LI R, et al. A facile route for tuning emission and magnetic properties by controlling lanthanide ions in coordination polymers incorporating mixed aromatic carboxylate ligands[J]. *J Solid State Chem*, 2018, 268: 22-29.
- [12] CHE Y, ZHENG Y, YANG D, et al. Investigation into the surface chemical analysis and luminescent properties of  $\text{La}_7\text{O}_6(\text{BO}_3)(\text{PO}_4)_2:\text{Dy}$  phosphor[J]. *Ceram Int*, 2020, 46: 8483-8489.
- [13] SHI L Y, ZHAO D, XUE Y L, et al. A new phosphate phosphor  $\text{K}_5\text{Y}_{1-x}\text{Sm}_x(\text{P}_2\text{O}_7)_2$  with bright orange-red emission and good thermal stability[J]. *J Mater Sci-Mater Electron*, 2020, 31: 15644-15651.
- [14] RATNAM B V, JAYASIMHADRI M, JANG K, et al. White light emission from  $\text{NaCaPO}_4:\text{Dy}^{3+}$  phosphor for ultraviolet-based white light-emitting diodes[J]. *J Amer Ceram Soc*, 2010, 93: 3857-3861.
- [15] LI Y N, ZHAO D, ZHANG R J, et al. A new diphosphate  $\text{Ba}_2\text{LiGa}(\text{P}_2\text{O}_7)_2$ : synthesis, crystal structure and  $\text{Eu}^{3+}$ -activated fluorescence performance[J]. *Dalton Trans*, 2019, 48: 13780-13788.
- [16] SHANNON R. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. *Acta Crystallogr Sec A*, 1976, 32: 751-767.
- [17] HAN B, ZHANG J, LI P, et al. Luminescence properties of novel single-host white-light-emitting phosphor  $\text{KBaBP}_2\text{O}_8:\text{Dy}^{3+}$ [J]. *Optics Spectrosc*, 2015, 118: 135-141.
- [18] JU H, QIAN R, DENG X, et al. Synthesis, structure and luminescent properties of a new white phosphor  $\text{Ba}_7(\text{BO}_3)_3(\text{SiO}_4)\text{Cl}:\text{Dy}^{3+}$  for light-emitting diodes[J]. *J Mol Struct*, 2018, 1173: 776-780.
- [19] BEDYAL A K, KUMAR V, SWART H C. Influence of an adjoining cation on the luminescence performance of the  $\text{Dy}^{3+}$  doped  $\text{A}_3\text{Gd}(\text{PO}_4)_2(\text{A}=\text{Na}, \text{K})$  phosphors[J]. *J Alloys Compd*, 2020, 845: 156352.
- [20] TIAN Y, CHEN B, TIAN B, et al. Concentration-dependent luminescence and energy transfer of flower-like  $\text{Y}_2(\text{MoO}_4)_3:\text{Dy}^{3+}$  phosphor[J]. *J Alloys Compd*, 2011, 509: 6096-6101.
- [21] BLASSE G. Energy transfer in oxidic phosphors [J]. *Physics Lett A*, 1968, 28: 444-445.
- [22] ZHANG Y, GONG W T, YU J J, et al. A new single-phase white-light-emitting  $\text{CaWO}_4:\text{Dy}^{3+}$  phosphor: synthesis, luminescence and energy transfer[J]. *Rsc Adv*, 2015, 5: 62527-62533.
- [23] YU R, SHIN D S, JANG K, et al. Photoluminescence properties of novel host-sensitized  $\text{Y}_6\text{WO}_{12}:\text{Dy}^{3+}$  phosphors[J]. *J Amer Ceram Soc*, 2014, 97: 2170-2176.
- [24] MANHAS M, KUMAR V, NTWAEABORWA O M, et al. Structural, surface and luminescence properties of  $\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6:\text{Dy}^{3+}$  phosphors[J]. *Ceram Int*, 2016, 42: 5743-5753.
- [25] SHANG M, LI C, LIN J. How to produce white light in a single-phase host [J]. *Chem Soc Rev*, 2014, 43(5):1372-1386.
- [26] 黄伟, 程菊.  $\text{Ba}_2\text{La}_8(\text{SiO}_4)_6\text{O}_2:\text{Dy}^{3+}$  荧光粉的制备及发光性能研究[J]. *中国陶瓷*, 2021, 57(05): 43-48.