

文章编号: 1000-7032(2018)03-0307-08

# 金属离子 $\text{Li}^+$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Ba}^{2+}$ 掺杂 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$ 荧光粉的制备及发光特性研究

度娟<sup>1,2,3</sup>, 王林香<sup>1,2,3\*</sup>, 叶颖<sup>1,2,3</sup>, 赵海琴<sup>1,2,3</sup>

(1. 新疆师范大学 物理与电子工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆师范大学 新疆矿物发光材料及其微结构实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054;

3. 新疆师范大学 重点学科物理学, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 用高温固相法制备了  $\text{Lu}_2\text{O}_3:x\text{Pr}^{3+}$  与  $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}, yM$  ( $M = \text{Li}^+, \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Ba}^{2+}$ ) 荧光粉。用 XRD 对其结构进行表征, 测量了激发光谱、发射光谱和发光衰减曲线, 分析了金属离子  $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$  掺杂对  $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$  样品发光强度及荧光寿命的影响。结果显示: 掺杂金属离子后的样品仍为纯  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  立方晶相结构; 与  $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}$  样品在 632 nm 处的发光强度比较, 分别掺杂 12% 的  $\text{Li}^+$ 、8% 的  $\text{Na}^+$ 、8% 的  $\text{K}^+$  获得样品的发光强度提高了 7.32、4.11、2.55 倍, 掺杂了  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Ba}^{2+}$  的样品发光强度均减弱; 与  $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}$  样品荧光寿命比较, 掺杂  $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$  获得的样品  $^1\text{D}_2$  能级荧光寿命均缩短。

**关键词:** 荧光粉; 金属离子掺杂  $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$ ; 发光强度; 荧光寿命

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20183903.0307

## Preparation and Luminescence Properties of $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$ Phosphors Codoped with $\text{Li}^+$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Ba}^{2+}$ Ions

TUO Juan<sup>1,2,3</sup>, WANG Lin-xiang<sup>1,2,3\*</sup>, YE Ying<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Hai-qin<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Key Laboratory of Mineral and Microstructure of Xinjiang, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

3. Key Discipline of Physics, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

\* Corresponding Author, E-mail: wanglinxiang23@126.com

**Abstract:**  $\text{Lu}_2\text{O}_3:x\text{Pr}^{3+}$  and  $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}, yM$  ( $M = \text{Li}^+, \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Ba}^{2+}$ ) phosphors were synthesized by the high temperature solid-state reaction. The structures of the samples were characterized by XRD, the excitation spectra, emission spectra and luminescence decay curves of the samples were measured. The influences of the doping metal ions of  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Ba}^{2+}$  on the microstructure, luminescence intensity and fluorescence lifetime for synthesized samples of  $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$  were researched. The results show that the samples after doping metal ions are still pure  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  cubic crystal phase structure. The emission intensities of  $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}$  samples doped with 12%  $\text{Li}^+$ , 8%  $\text{Na}^+$  and 8%  $\text{K}^+$  increased 7.32, 4.11 and 2.55 times than that of  $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}$  sample, but the emission intensities of samples doped with  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Ba}^{2+}$  decreased. Compared with  $^1\text{D}_2$  fluorescence lifetime of  $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}$  sample, the lifetime of the samples

收稿日期: 2017-08-19; 修订日期: 2017-11-08

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2017D01A60); 新疆师范大学新疆矿物发光材料及其微结构重点实验室招标课题(KWFG1601, KWFG1606); 新疆师范大学硕士研究生科技创新项目(XSY201602008); 新疆师范大学本科生科技创新项目(201610762098)资助

Supported by Natural Science Foundation of Xinjiang (2017D01A60); Foundation of Key Laboratory of Mineral and Microstructure of Xinjiang (KWFG1601, KWFG1606); Xinjiang Normal University Graduate Student Science and Technology Innovation Project (XSY201602008); Xinjiang Normal University Undergraduate Science and Technology Innovation Project (201610762098)

codoped with  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  all decreased.

**Key words:** phosphor;  $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$  codoped with the metal ions; luminous intensity; fluorescence lifetime

## 1 引 言

透明闪烁陶瓷是能够有效吸收高能光子(X射线、 $\gamma$ 射线)或高能粒子( $\alpha$ 粒子、 $\beta$ 粒子等)的能量而发出紫外或可见光子的功能材料,它在高能物理、核医学、医疗诊断及工业检测等领域有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。为了提高探测器的探测效率和检测成像的质量,高密度、高光输出、快衰减的高性能无机闪烁体材料受到了人们的普遍关注。 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 的密度高达  $9.42 \text{ g/cm}^3$ ,具有高的光吸收系数,呈现立方晶相结构及光学各向同性的特点,成为制备多晶透明陶瓷的一种很好的基质材料。 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 价带和导带的带间隙很宽(6.5 eV),可容纳许多激活剂离子的发射能级<sup>[5-6]</sup>,所以稀土掺杂 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 材料成为闪烁探测领域的一个研究热点。如Trojanpiegza等<sup>[7]</sup>研究了不同金属离子掺杂及煅烧温度对 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ ,  $M^{2+}$  ( $M = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ )材料的持久性发光特性影响。Morales Ramírez等<sup>[8]</sup>研究了 $\text{Bi}^{3+}$ 作为敏化剂将能量传递给 $\text{Eu}^{3+}$ 对 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Bi}^{3+}$ 发光材料的性能的影响。Xie等<sup>[9]</sup>采用溶胶凝胶法结合旋涂技术制备了 $\text{Pr}^{3+}$ 掺杂 $\text{Lu}_2\text{O}_3:5\% \text{Eu}^{3+}$ 薄膜。Krsmanovic等<sup>[10]</sup>利用聚乙烯和乙二醇作为分散剂,采用燃烧法制备了 $(\text{Y}_{0.5}\text{Lu}_{0.5})_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 材料,与未掺杂 $\text{Pr}^{3+}$ 样品比较,发现 $\text{Pr}^{3+}$ 掺杂后的样品, $\text{Eu}^{3+}$ 发光有所降低, $\text{Eu}^{3+}$ 的 $^5\text{D}_0$ 能级荧光寿命缩短。Yang等<sup>[11]</sup>利用水热法合成了三维像花的 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln} = \text{Eu}, \text{Th}, \text{Dy}, \text{Pr}, \text{Sm}, \text{Er}, \text{Ho}, \text{Tm}$ )样品,并研究了 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Dy}^{3+}$ 的发光机理。然而,关于金属离子掺杂 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$ 荧光粉的制备及发光特性研究报道甚少。所以,本文利用高温固相法<sup>[12]</sup>合成了不同浓度 $\text{Pr}^{3+}$ 掺杂 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 及不同浓度金属离子 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 掺杂 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$ 荧光粉,分析了金属离子掺杂对 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$ 荧光粉的发光强度及 $\text{Pr}^{3+}$ 的 $^1\text{D}_2$ 能级寿命的影响。

## 2 实 验

按照化学配比 $\text{Lu}_2\text{O}_3:x \text{Pr}^{3+}$  ( $x = 0.05\%$ ,

0.1%, 0.3%, 0.5%, 0.7%, 0.9%)与 $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}, yM$  ( $y = 0.1\%, 0.5\%, 1\%, 2\%, 4\%, 8\%, 12\%, 16\%, 20\%$ ,  $M = \text{Li}^+, \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Ba}^{2+}$ ),以上离子掺杂均为摩尔分数。用AL104电子天平称取 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ (99.99%)、 $\text{Pr}_2\text{O}_3$ (99.99%)以及分析纯的 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ (99%)、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (96%)、 $\text{K}_2\text{CO}_3$ (99%)、 $\text{CaCO}_3$ (99%)、 $\text{BaCO}_3$ (99%)试剂。将混合物用玛瑙研钵研磨30 min后,装入石英坩埚,放入微波马弗炉在空气中 $800^\circ\text{C}$ 煅烧2 h获得荧光粉。

使用日本津岛XRD-6100衍射仪对粉体进行物相分析,用FLS920稳态/瞬态荧光光谱仪测量样品的激发光谱、发射光谱和能级衰减曲线。为消除激发光源的杂散光和倍频峰的影响,在观测光栅入口处放置了相应的滤光片。所用的仪器均进行了校正,测量均在室温下进行。

## 3 结果与讨论

### 3.1 晶体结构

图1是 $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}$ 与 $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}, yM$ 荧光粉的XRD图谱。所有样品的衍射峰与 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 标准卡片JCPDS No. 43-1021匹配良好。这说明 $\text{Pr}^{3+}$ 和少量金属离子 $M$ 的掺杂没有引起 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 基质立方晶相结构的改变,而是取代了部分 $\text{Lu}^{3+}$ 或位于填隙位中<sup>[13-14]</sup>。与 $\text{Lu}_2\text{O}_3:0.1\% \text{Pr}^{3+}$ 相比较,掺杂 $\text{Li}^+$ (12%)或 $\text{Na}^+$ (8%)样品的衍射峰相对强度增大,半高宽变窄。掺杂 $\text{K}^+$ (8%)

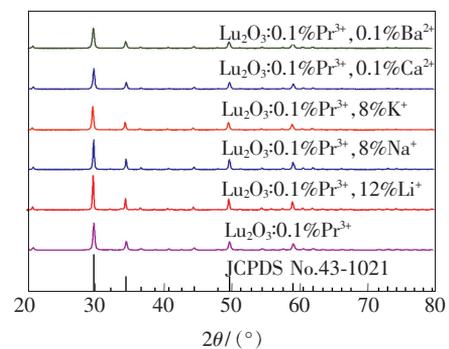


图1 金属离子掺杂 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$ 荧光粉的X射线衍射谱  
Fig. 1 XRD patterns of  $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Pr}^{3+}$  phosphor doped with metal ion

表1 不同摩尔分数的Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup>掺杂Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>的晶粒度比较Tab.1 Comparison of different mole fraction of Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> doped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup> grain size

| Li <sup>+</sup> /% | Size/nm | Na <sup>+</sup> /% | Size/nm | K <sup>+</sup> /% | Size/nm | Ca <sup>2+</sup> /% | Size/nm | Ba <sup>2+</sup> /% | Size/nm |
|--------------------|---------|--------------------|---------|-------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|
| 0                  | 33.1    | 0                  | 33.1    | 0                 | 33.1    | 0                   | 33.1    | 0                   | 33.1    |
| 0.5%               | 39.3    | 0.5%               | 34.9    | 0.5%              | 32.4    | 0.1%                | 30.8    | 0.1%                | 29.2    |
| 1%                 | 41.2    | 1%                 | 37.3    | 1%                | 33.6    | 0.5%                | 29.9    | 0.5%                | 28.6    |
| 2%                 | 45.2    | 2%                 | 39.5    | 2%                | 33.3    | 1%                  | 30.4    | 1%                  | 28.6    |
| 4%                 | 45.7    | 4%                 | 40.1    | 4%                | 34.3    | 2%                  | 30.5    | 2%                  | 29.1    |
| 8%                 | 46.6    | 8%                 | 42.1    | 8%                | 35.7    |                     |         |                     |         |
| 12%                | 46.2    | 12%                | 37.2    | 12%               | 33.2    |                     |         |                     |         |
| 16%                | 42.1    |                    |         |                   |         |                     |         |                     |         |
| 20%                | 39.3    |                    |         |                   |         |                     |         |                     |         |

样品衍射峰无明显变化。但是掺杂Ca<sup>2+</sup>(0.1%)或Ba<sup>2+</sup>(0.1%)样品的衍射峰相对强度明显减小,半高宽略有变宽。这表明掺杂的Li<sup>+</sup>或Na<sup>+</sup>将有效提高Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>晶粒的结晶性能,掺杂的Ca<sup>2+</sup>或Ba<sup>2+</sup>会降低Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>晶粒的结晶性能,掺杂的K<sup>+</sup>对Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>晶粒的结晶性无明显影响。根据Scherrer公式<sup>[9]</sup>计算获得Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>与Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>,yM(M=Li<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Ba<sup>2+</sup>)的平均晶粒度结果如表1所示。与Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>比较,分别掺杂Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>的样品的平均粒径尺寸均有所增加,掺杂K<sup>+</sup>的样品的平均粒径尺寸基本不变,掺杂Ca<sup>2+</sup>和Ba<sup>2+</sup>的样品的平均粒径尺寸略有减小,其中Li<sup>+</sup>掺杂后的样品的平均粒径尺寸增大最为明显。

### 3.2 光致发光特性

图2(a)是以632 nm作为发射波长监测得到的Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:xPr<sup>3+</sup>荧光粉的激发光谱。激发光谱中210 nm附近的激发对应的是Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基质吸收带<sup>[15]</sup>。272 nm附近的4f<sup>2</sup>-4f<sup>1</sup>5d<sup>1</sup>激发带属于电子从O<sup>2-</sup>的2p轨道向Pr<sup>3+</sup>的4f轨道电荷转移态(CT)<sup>[16]</sup>,随Pr<sup>3+</sup>浓度逐渐增加,激发强度呈现出先增大后减小的趋势,在Pr<sup>3+</sup>摩尔分数为0.1%时,激发强度达到最大值;当Pr<sup>3+</sup>掺杂摩尔分数大于0.1%时,Pr<sup>3+</sup>的激发强度逐渐减小,这是由于发生了Pr<sup>3+</sup>的浓度猝灭。450 nm以后Pr<sup>3+</sup>的4f-4f跃迁的激发带放大图在右上角,454,472,478,494 nm出现的系列激发峰源于Pr<sup>3+</sup>的<sup>3</sup>H<sub>4</sub>-<sup>3</sup>P<sub>2</sub>,<sup>3</sup>H<sub>4</sub>-<sup>1</sup>I<sub>6</sub>,<sup>3</sup>H<sub>4</sub>-<sup>3</sup>P<sub>1</sub>和<sup>3</sup>H<sub>4</sub>-<sup>3</sup>P<sub>0</sub>跃迁,其强度较小<sup>[11,15-16]</sup>,且激发强度不随Pr<sup>3+</sup>浓度的改变而改变。

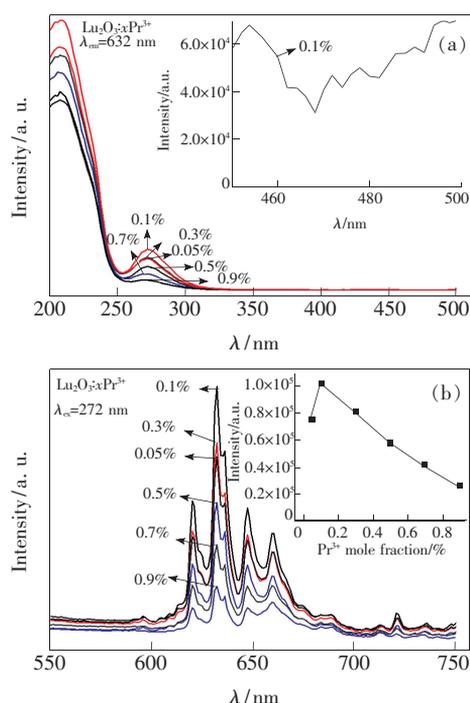
图2 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:xPr<sup>3+</sup>的激发光谱(a)与发射光谱(b)Fig.2 Excitation(a) and emission(b) spectra of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:xPr<sup>3+</sup>

图2(b)是以272 nm作为激发波长监测得到的Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:xPr<sup>3+</sup>荧光粉的发射光谱,右上角插图为系列Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:xPr<sup>3+</sup>荧光粉在632 nm处的发射峰强度变化规律。所有样品的发射光谱形状类似,主发射峰均位于632 nm,它来自于Pr<sup>3+</sup>的<sup>1</sup>D<sub>2</sub>-<sup>3</sup>H<sub>4</sub>跃迁发射。620,647,659 nm的发射峰是Pr<sup>3+</sup>的<sup>1</sup>D<sub>2</sub>-<sup>3</sup>H<sub>4</sub>跃迁引起,720 nm处的发射峰是由于Pr<sup>3+</sup>的<sup>1</sup>D<sub>2</sub>-<sup>3</sup>H<sub>5</sub>跃迁形成<sup>[11,15-16]</sup>。当Pr<sup>3+</sup>掺杂摩尔分数从0.05%增加到0.1%时,Pr<sup>3+</sup>的发射强度有所增大;当Pr<sup>3+</sup>掺杂摩尔分数大于0.1%时,Pr<sup>3+</sup>的发射强度逐渐减小。这是由于随着Pr<sup>3+</sup>浓

度增加,发光中心数量增加,荧光强度增大,当  $\text{Pr}^{3+}$  浓度继续增加,会产生浓度猝灭。

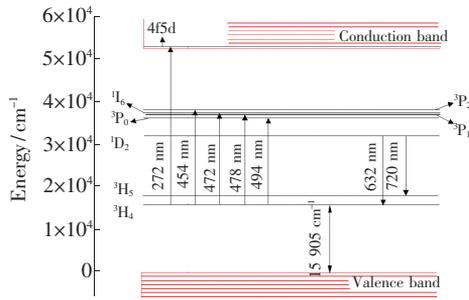


图 3  $\text{Pr}^{3+}$  在  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  基质中的能带结构及能级跃迁

Fig. 3 Energy band structure and energy level transition of  $\text{Pr}^{3+}$  in  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  matrix

基于对  $\text{Lu}_2\text{O}_3: x\text{Pr}^{3+}$  荧光粉的激发与发射光谱的测试,给出了  $\text{Pr}^{3+}$  在  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  基质中的能带结构及能级跃迁,如图 3 所示。 $\text{Lu}_2\text{O}_3$  价带和导带间能带间隙为  $6.5 \text{ eV}$  ( $52288 \text{ cm}^{-1}$ ),  $\text{Pr}^{3+}$  掺杂在  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  中,4f5d 对应的能级位置为  $52670 \text{ cm}^{-1}$ [17],由此可计算出基质  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  价带和  $\text{Pr}^{3+}$  的基态 ( $^3\text{H}_4$ ) 能级间隔 ( $15905 \text{ cm}^{-1}$ )。

图 4(a) 是以  $632 \text{ nm}$  作为发射波长监测得到的  $\text{Li}^+$  (12%)、 $\text{Na}^+$  (8%)、 $\text{K}^+$  (8%)、 $\text{Ca}^{2+}$  (0.1%)、 $\text{Ba}^{2+}$  (0.1%) 掺杂  $\text{Lu}_2\text{O}_3: 0.1\% \text{Pr}^{3+}$  荧光粉的激发光谱。由图 4(a) 可看出,所有的激发光谱形状一致。与  $\text{Lu}_2\text{O}_3: 0.1\% \text{Pr}^{3+}$  样品比较,分别共掺  $\text{Li}^+$  (12%)、 $\text{Na}^+$  (8%)、 $\text{K}^+$  (8%) 时,有效地提高了电荷转移态强度,共掺  $\text{Ca}^{2+}$  (0.1%) 或  $\text{Ba}^{2+}$  (0.1%) 时,电荷转移态强度有所降低。图 4(b) 是以  $272 \text{ nm}$  作为激发波长监测得到的  $\text{Li}^+$  (12%)、 $\text{Na}^+$  (8%)、 $\text{K}^+$  (8%)、 $\text{Ca}^{2+}$  (0.1%)、 $\text{Ba}^{2+}$  (0.1%) 掺杂  $\text{Lu}_2\text{O}_3: 0.1\% \text{Pr}^{3+}$  荧光粉的发射光谱。由图 4(b) 可看出,所有荧光粉的发射光谱形状相似,峰位没有改变,发光强度不同。

图 5(a) 是以  $632 \text{ nm}$  作为发射波长监测得到的系列  $\text{Lu}_2\text{O}_3: 0.1\% \text{Pr}^{3+}, yM$  荧光粉在  $272 \text{ nm}$  处的激发光强。由图可知,在  $\text{Lu}_2\text{O}_3: 0.1\% \text{Pr}^{3+}$  中掺杂适量的  $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  能提高样品的电荷转移态强度,其中以  $\text{Li}^+$  掺杂的提高效果最为明显。掺杂了  $\text{Ca}^{2+}$  或  $\text{Ba}^{2+}$  的样品电荷转移态强度均减弱。其原因是半径较小的  $\text{Li}^+$  (0.076 nm) 取代  $\text{Lu}^{3+}$  (0.086 nm) 进入基质后,可使晶格间距缩小,减小  $\text{Pr}^{3+}-\text{O}^{2-}$  间距,增大  $\text{Pr}^{3+}-\text{O}^{2-}$  电荷转移几

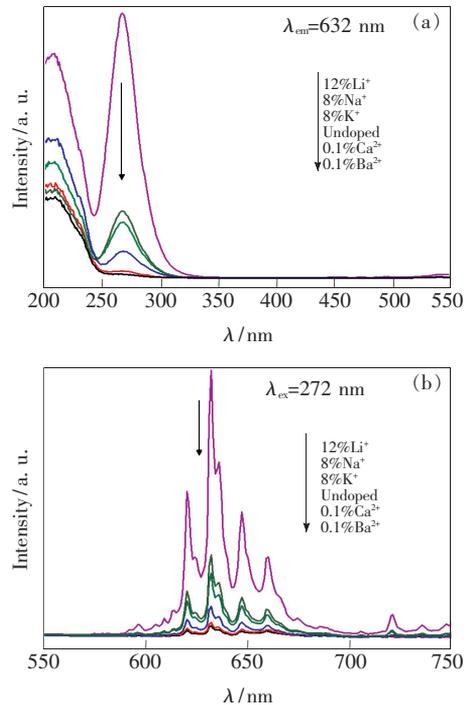


图 4  $\text{Li}^+$  (12%)、 $\text{Na}^+$  (8%)、 $\text{K}^+$  (8%)、 $\text{Ca}^{2+}$  (0.1%)、 $\text{Ba}^{2+}$  (0.1%) 掺杂  $\text{Lu}_2\text{O}_3: 0.1\% \text{Pr}^{3+}$  的激发光谱 (a) 与发射光谱 (b)。

Fig. 4 Excitation (a) and emission (b) spectra of  $\text{Li}^+$  (12%),  $\text{Na}^+$  (8%),  $\text{K}^+$  (8%),  $\text{Ca}^{2+}$  (0.1%),  $\text{Ba}^{2+}$  (0.1%) co-doped  $\text{Lu}_2\text{O}_3: 0.1\% \text{Pr}^{3+}$ .

率;而  $\text{Na}^+$  (0.102 nm)、 $\text{K}^+$  (0.138 nm)、 $\text{Ca}^{2+}$  (0.100 nm)、 $\text{Ba}^{2+}$  (0.135 nm) 的半径均大于  $\text{Lu}^{3+}$ , 掺杂以上离子会令晶格间距随掺杂离子半径的增大而增大,导致  $\text{Pr}^{3+}-\text{O}^{2-}$  间距增加,不利于  $\text{Pr}^{3+}-\text{O}^{2-}$  电荷转移。但同时掺入适量的  $\text{Li}^+$  (12%)、 $\text{Na}^+$  (8%)、 $\text{K}^+$  (8%) 能填补或部分填补纳米颗粒表面的悬键缺陷,促使激发光更易被纳米颗粒内部的发光中心离子吸收,导致掺杂了  $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  样品的激发增强[18]。但  $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  掺杂量继续增加时,可形成更多的缺陷结构,降低了发光中心对激发光的吸收。

图 5(b) 是以  $272 \text{ nm}$  作为激发波长监测得到的系列  $\text{Lu}_2\text{O}_3: 0.1\% \text{Pr}^{3+}, yM$  荧光粉在  $632 \text{ nm}$  处的发光强度。从图中可看出,随  $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  或  $\text{Ba}^{2+}$  掺杂浓度的增加,样品发光强度的变化规律与激发强度一致。 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  的最佳掺杂摩尔分数分别是 12%、8%、8%,此时样品发光最强。与  $\text{Lu}_2\text{O}_3: 0.1\% \text{Pr}^{3+}$  样品的发光强度比较,分别共掺杂 12% 的  $\text{Li}^+$ 、8% 的  $\text{Na}^+$ 、8% 的  $\text{K}^+$  获得样品的发光强度提高了 7.32、4.11、2.55 倍,掺杂

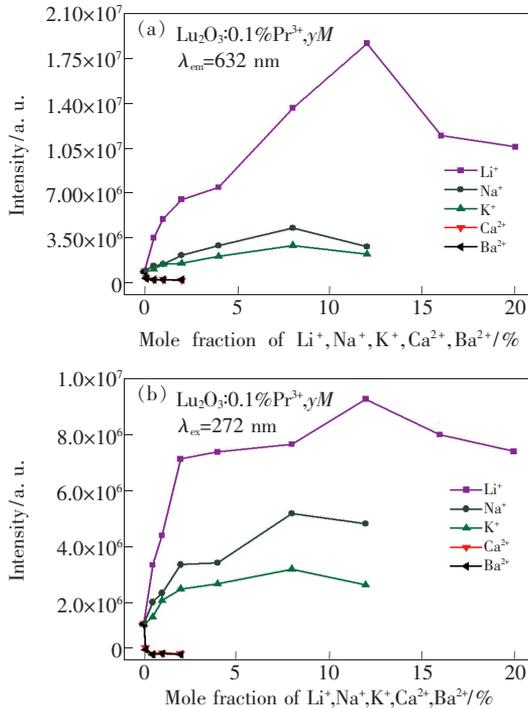


图5 不同掺杂摩尔分数的M对Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>,yM中Pr<sup>3+</sup>的激发峰强度(a)和发光强度(b)的影响

Fig. 5 Effects of M on the excitation intensity (a) and the luminescence intensity (b) of Pr<sup>3+</sup> in Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1% Pr<sup>3+</sup>, yM with different doping mole fraction

Ca<sup>2+</sup>或Ba<sup>2+</sup>的样品的发光均减弱。其原因如下:

首先,随着掺杂的Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>浓度增加,晶格畸变的逐渐增强有利于降低激活中心离子周围晶体场的对称性,可增强发射强度。当掺杂离子浓度继续增加时,产生过多的晶格缺陷<sup>[19]</sup>成为荧光猝灭中心,将吸收的能量以非辐射跃迁的方式释放,导致发射强度降低。

其次,掺杂的Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup>取代Lu<sup>3+</sup>会造成较大的晶格畸变,引起晶格能量增加。为使晶格能降到最低,激活剂Pr<sup>3+</sup>会尽可能均匀有序地分布于各超格子中,降低近邻离子的相互作用而造成的浓度猝灭,提高荧光粉的发光亮度<sup>[13]</sup>。相对而言,半径较小的Li<sup>+</sup>更易进入基质晶格,而Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup>相较于Li<sup>+</sup>而言半径较大,进入晶格的机会较小,对Pr<sup>3+</sup>均匀分布在各超格子的作用随半径增大依次减弱,所以发光强度随掺杂离子半径的增大而减小。并且由于Lu<sup>3+</sup>的半径大小介于Li<sup>+</sup>、Pr<sup>3+</sup>(0.099 nm)之间,所以当Li<sup>+</sup>、Pr<sup>3+</sup>共掺杂时可以对基质晶格进行有效的补偿,进一步减少晶格缺陷。而Na<sup>+</sup>、

K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>或Ba<sup>2+</sup>的半径均大于Lu<sup>3+</sup>和Pr<sup>3+</sup>,可能会使晶格缺陷增多,不利于基质晶格吸收,与图5(a)中激发光谱的基质吸收结果一致,这可能会导致无辐射弛豫的增加,从而降低荧光强度。另外,Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>在取代Lu<sup>3+</sup>时,为了保持体系电中性,将会在体系中产生电荷缺陷——氧空位<sup>[20]</sup>。掺杂适量的Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>可降低基质晶格中氧数量并提高氧空位浓度,氧空位浓度的增加可以降低基质竞争吸收,从而加快基质到激活剂的能量传递,提高激活剂的发光强度和发光效率。但金属离子掺杂量继续增加时,一方面可形成更多的缺陷结构,导致样品结晶度降低和非激活中心浓度提高,另一方面会产生过量的氧空位,非辐射跃迁概率增加,导致发光猝灭<sup>[21-22]</sup>。与掺杂Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>相比,Ca<sup>2+</sup>或Ba<sup>2+</sup>取代Lu<sup>3+</sup>时可能会使基质间隙氧含量增加,间隙氧会抑制发光作用,导致发光强度降低<sup>[23]</sup>。

最后,掺杂适量的Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>能填补(或部分填补)纳米颗粒表面的悬键缺陷,阻塞了无辐射弛豫通道,使发光增强。但过量掺杂的Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>可形成更多的缺陷结构,令发光减弱。Li<sup>+</sup>、

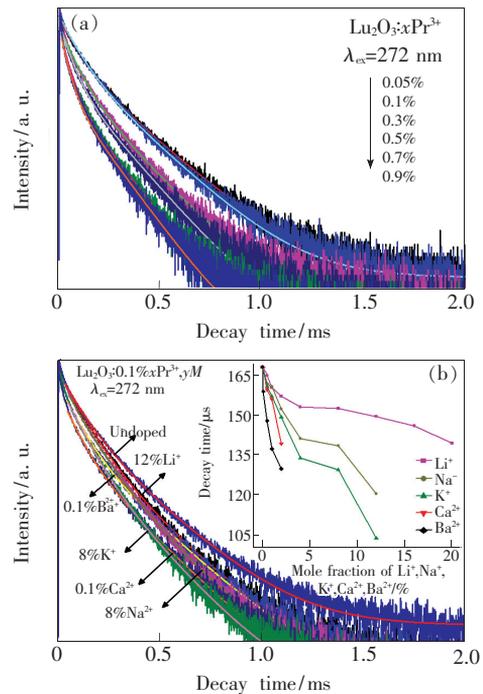


图6 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:xPr<sup>3+</sup>(a)与Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>,yM(b)中Pr<sup>3+</sup>的<sup>1</sup>D<sub>2</sub>能级衰减曲线

Fig. 6 <sup>1</sup>D<sub>2</sub> energy level decay curve of Pr<sup>3+</sup> in Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:xPr<sup>3+</sup>(a) and Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.1%Pr<sup>3+</sup>,yM(b)

Na<sup>+</sup> 掺杂还可起到助熔作用<sup>[24]</sup>, 增大了平均粒径, 导致样品的表面缺陷和表面无辐射弛豫中心减少, 使得样品的发光强度有所增强。

在 272 nm 激发下, 测量了 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: xPr<sup>3+</sup> 与 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.1% Pr<sup>3+</sup>, yM 荧光粉 Pr<sup>3+</sup> 的<sup>1</sup>D<sub>2</sub> 能级衰减曲线, 用双指数函数<sup>[25]</sup>拟合后的能级衰减曲线如图 6(a) 与 (b) 所示。

利用双指数函数拟合及计算, 得到 Pr<sup>3+</sup> 掺杂摩尔分数为 0.05%、0.1%、0.3%、0.5%、0.7% 和 0.9% 时, 单掺 Pr<sup>3+</sup> 样品的平均荧光寿命  $\tau$  分别为 179.2, 168.0, 146.6, 129.0, 110.0, 92.8 s, 随 Pr<sup>3+</sup> 离子浓度增加, 寿命缩短。由于离子之间的平均距离随 Pr<sup>3+</sup> 掺杂浓度的增加而缩短, 加快了到表面猝灭中心的能量传递过程, 并通过非辐射的形式损失能量, 使得荧光寿命变短<sup>[26-28]</sup>。利

用双指数函数拟合及计算获得 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.1% Pr<sup>3+</sup>, yM (M = Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup>) 样品中 Pr<sup>3+</sup> 的<sup>1</sup>D<sub>2</sub> 能级寿命如表 2 所示。与 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.1% Pr<sup>3+</sup> 样品中 Pr<sup>3+</sup> 的<sup>1</sup>D<sub>2</sub> 能级寿命相比, 在其中掺杂 Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup> 可使其相应能级寿命变短。在其中掺杂适量的 Li<sup>+</sup> (12%)、Na<sup>+</sup> (8%)、K<sup>+</sup> (8%) 能够提高基质晶格氧空位浓度, 促进能量转移的同时, 使晶体场对称性降低, 提高 Pr<sup>3+</sup> 辐射跃迁几率<sup>[21-22]</sup>, 最终导致发光强度增大和衰减时间缩短; 随着 Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 掺杂浓度继续增加, 过量的氧空位提高了非辐射跃迁概率, 最终导致发光猝灭和衰减时间的缩短。掺杂 Ca<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup> 使基质间隙氧含量增加, 晶格缺陷增多, 导致无辐射弛豫的速率增加, Pr<sup>3+</sup> 发光强度降低, 能级寿命变短。

表 2 不同摩尔分数的 Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup> 掺杂 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.1% Pr<sup>3+</sup> 的寿命比较

Tab. 2 Comparison of different mole fraction of Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> doped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.1% Pr<sup>3+</sup> lifetime

| Li <sup>+</sup> /% | $\tau/\mu\text{s}$ | Na <sup>+</sup> /% | $\tau/\mu\text{s}$ | K <sup>+</sup> /% | $\tau/\mu\text{s}$ | Ca <sup>2+</sup> /% | $\tau/\mu\text{s}$ | Ba <sup>2+</sup> /% | $\tau/\mu\text{s}$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 0                  | 168.0              | 0                  | 168.0              | 0                 | 168.0              | 0                   | 168.0              | 0                   | 168.0              |
| 0.5%               | 164.9              | 0.5%               | 161.6              | 0.5%              | 160.7              | 0.1%                | 167.8              | 0.1%                | 158.9              |
| 1%                 | 160.3              | 1%                 | 160.8              | 1%                | 157.1              | 0.5%                | 159.5              | 0.5%                | 147.8              |
| 2%                 | 157.0              | 2%                 | 152.2              | 2%                | 149.1              | 1%                  | 155.9              | 1%                  | 137.2              |
| 4%                 | 153.7              | 4%                 | 141.0              | 4%                | 133.6              | 2%                  | 139.5              | 2%                  | 129.7              |
| 8%                 | 152.5              | 8%                 | 138.4              | 8%                | 129.3              |                     |                    |                     |                    |
| 12%                | 149.4              | 12%                | 120.2              | 12%               | 103.4              |                     |                    |                     |                    |
| 16%                | 145.9              |                    |                    |                   |                    |                     |                    |                     |                    |
| 20%                | 139.3              |                    |                    |                   |                    |                     |                    |                     |                    |

## 4 结 论

用高温固相法制备了 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: xPr<sup>3+</sup> (x = 0.05%, 0.1%, 0.3%, 0.5%, 0.7%, 0.9%) 与 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.1% Pr<sup>3+</sup>, yM (y = 0.1%, 0.5%, 1%, 2%, 4%, 8%, 12%, 16%, 20%, M = Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup>) 荧光粉。结果显示, 实验中不同浓度的 Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup> 与 Pr<sup>3+</sup> 离子掺杂的 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 荧光粉仍为立方相结构。在 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: xPr<sup>3+</sup> 样品中, Pr<sup>3+</sup> 掺杂摩尔分数为 0.1% 时, 样品发光最强, 其荧光寿命随着 Pr<sup>3+</sup> 浓度的

增加而变短。与 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.1% Pr<sup>3+</sup> 样品在 632 nm 处的发光强度比较, 分别掺杂 12% 的 Li<sup>+</sup>、8% 的 Na<sup>+</sup>、8% 的 K<sup>+</sup> 获得样品的发光强度提高了 7.32, 4.11, 2.55 倍。掺杂适量的 Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 能够提高基质晶格氧空位浓度, 促进能量转移的同时使晶体场对称性降低, 加强 Pr<sup>3+</sup> 的<sup>1</sup>D<sub>2</sub>-<sup>3</sup>H<sub>4</sub> 电子跃迁几率, 最终导致发光强度增大和衰减时间缩短。掺杂 Ca<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup> 使 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.1% Pr<sup>3+</sup> 基质间隙氧含量增加, 晶格缺陷增多, 令无辐射弛豫的速率增加, 最终导致 Pr<sup>3+</sup> 发光强度降低, 荧光寿命变短。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 陈向阳, 张志军, 赵景泰. 闪烁材料——探索科学世界的一扇窗 [J]. 自然杂志, 2015, 37(3):165-174.  
CHEN X Y, ZHANG Z J, ZHAO J T. Scintillator: a window to explore mysterious scientific world [J]. *Chin. J. Nature*, 2015, 37(3):165-174. (in Chinese)
- [ 2 ] 洪广言. 稀土发光材料的研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2015, 44(10):2641-2651.  
HONG G Y. Research progress of rare earth luminescent materials [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2015, 44(10):2641-2651. (in Chinese)
- [ 3 ] KIM W, BAKER C, BOWMAN S, *et al.*. Laser oscillation from Ho<sup>3+</sup> doped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics [J]. *Opt. Mater. Express*, 2013, 3(7):913-919.
- [ 4 ] PRAKASAM M, VIRAPHONG O, MICHAU D, *et al.*. Critical parameters to obtain Yb<sup>3+</sup> doped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and ZnO transparent ceramics [J]. *Ceram. Int.*, 2014, 40(1):1859-1864.
- [ 5 ] DE JESÚS MORALES-RAMÍREZÁ, GARCÍA-MURILLO A, CARRILLO-ROMO F D J, *et al.*. Influence of annealing temperature on structural and optical properties of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>, transparent films [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2015, 70:173-178.
- [ 6 ] 王鹏贺, 王能利, 张希艳. 碳酸盐共沉淀法合成 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup> 纳米粉体及性能表征 [J]. 无机化学学报, 2012, 28(11):2335-2340.  
WANG P H, WANG N L, ZHANG X Y. Carbonate co-precipitation synthesis of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup> nano-powders and its property [J]. *Chin. J. Inorg. Chem.*, 2012, 28(11):2335-2340. (in Chinese)
- [ 7 ] TROJANPIEGZA J, ZYCH E, HÖLSÄ J, *et al.*. Spectroscopic properties of persistent luminescence phosphors: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Tb<sup>3+</sup>, M<sup>2+</sup> (M = Ca, Sr, Ba) [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2009, 113(47):20493-20498.
- [ 8 ] MORALES RAMÍREZ A, GARCÍA HERNÁNDEZ M, YEPEZ ÁVILA J, *et al.*. Eu<sup>3+</sup>, Bi<sup>3+</sup> codoped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopowders: synthesis and luminescent properties [J]. *J. Mater. Res.*, 2013, 28(10):1365-1371.
- [ 9 ] XIE J, DENG L, SHI Y, *et al.*. The influence of Pr<sup>3+</sup>, co-doping on the luminescent properties of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:5mol% Eu films [J]. *J. Lumin.*, 2011, 131(5):970-974.
- [ 10 ] KRSMANOVIC R, ANTIC Z, ZEKOVIC I, *et al.*. (Y<sub>0.5</sub>Lu<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> nanopowders; combustion synthesis, structure and optical properties [J]. *Radiat. Meas.*, 2010, 45(3-6):438-440.
- [ 11 ] YANG J, LI C, QUAN Z, *et al.*. Self-assembled 3D flowerlike Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Ln<sup>3+</sup> (Ln = Eu, Tb, Dy, Pr, Sm, Er, Ho, Tm) microarchitectures; ethylene glycol-mediated hydrothermal synthesis and luminescent properties [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112(33):12777-12785.
- [ 12 ] 洪广言. 稀土发光材料—基础与应用 [M]. 北京:科学出版社, 2011.  
HONG G Y. *Rare Earth Luminescent Materials—Foundation and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [ 13 ] 徐会兵, 庄卫东, 胡运生, 等. 碱金属离子掺杂对(Y,Gd)BO<sub>3</sub>:Tb 绿色荧光粉性能的影响 [C]. 2010 年全国冶金物理化学学术会议论文集, 中国, 马鞍山, 2010:268-272.  
XU H B, ZHUANG W D, HU Y S, *et al.*. Influence of alkaline metal ions doping on properties of (Y, Gd)BO<sub>3</sub>:Tb [C]. *Proceedings of The National Conference on Metallurgy and Physical Chemistry in 2010, Maanshan, China*, 2010: 268-272. (in Chinese)
- [ 14 ] 刘冰洁, 顾壮, 刘小林, 等. Li<sup>+</sup>, Zn<sup>2+</sup> 共掺杂对 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> 纳米粉结构和发光性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2007, 25(2):162-166.  
LIU B J, GU M, LIU X, *et al.*. Effect of Li<sup>+</sup> and Zn<sup>2+</sup> co-doping on luminescent properties of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> nanoparticles [J]. *J. Chin. Soc. Rare Earths*, 2007, 25(2):162-166. (in Chinese)
- [ 15 ] ALARCÓN-FLORES G, GARCÍA-HIPOLITO M, AGUILAR-FRUTIS M, *et al.*. Synthesis and characterization of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup>, phosphor powders by simple solvent evaporation [J]. *Ceram. Int.*, 2015, 41(1):743-748.
- [ 16 ] JIA D, WANG X J, YEN W M. Ground-state measurement of Pr<sup>3+</sup> in Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by photoconductivity [J]. *Phys. Solid State*, 2008, 50(9):1674-1676.
- [ 17 ] PASCUAL J L, BARANDIARÁN Z, SEIJO L. *Ab initio* theoretical study of luminescence properties of Pr<sup>3+</sup> doped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

- [J]. *Theoret. Chem. Accounts*, 2011, 129(3):545-554.
- [18] 刘广生, 丁玲红, 张伟凤.  $\text{Na}^+$  离子掺杂  $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Sm}^{3+}$  纳米晶的发光增强 [J]. *发光学报*, 2010, 31(5):706-711.  
LIU G S, DING L H, ZHANG W F. Enhanced photoluminescence of  $\text{Na}^+$ -doped  $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Sm}^{3+}$  nanocrystals [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2010, 31(5):706-711. (in Chinese)
- [19] 蒲勇, 朱达川, 韩涛. 蓝光激发白光 LED 用深红色荧光粉  $\text{Ca}_{1-x-y}\text{WO}_4:x\text{Pr}^{3+}, y\text{Li}^+$  的制备与表征 [J]. *发光学报*, 2012, 33(1):12-16.  
PU Y, ZHU D C, HAN T. Preparation and characterization of  $\text{Ca}_{1-x-y}\text{WO}_4:x\text{Pr}^{3+}, y\text{Li}^+$  deep red phosphors for white LEDs excited by blue light [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(1):12-16. (in Chinese)
- [20] 郑贤火. 非稀土金属离子掺杂对氧化钇粉末荧光性能的影响 [D]. 杭州:浙江理工大学, 2016.  
ZHENG X H. *Effects of Non-rare-earth Metal Ions Doping on The Fluorescent Properties of Yttrium Oxide Powder* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [21] 杨明珠. 稀土掺杂钇氧化物的发光性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.  
YANG M Z. *Optic Properties of Yttrium Oxide Doped with Rare Earth Ions* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [22] LI W, LEE J. Microwave-assisted sol-gel synthesis and photoluminescence characterization of  $\text{LaPO}_4:\text{Eu}^{3+}, \text{Li}^+$  nanophosphors [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112(31):11679-11684.
- [23] 肖莉红, 顾牡, 刘小林, 等.  $\text{Zn}^{2+}$  掺杂对  $\text{GdTao}_4:\text{Eu}^{3+}$  荧光粉结构和发光性能的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(6):1054-1057.  
XIAO L H, GU M, LIU X L, *et al.*. Effects of  $\text{Zn}^{2+}$  doping on the structural and luminescent properties of  $\text{GdTao}_4:\text{Eu}^{3+}$  phosphors [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 2007, 27(6):1054-1057. (in Chinese)
- [24] 金海杰, 田莲花.  $\text{Li}^+$  离子掺杂对红色发光材料  $\text{Y}_2(\text{W}, \text{Mo})\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}$  发光性能的影响 [J]. *发光学报*, 2011, 32(5):451-455.  
JIN H J, TIAN L H. Photoluminescence properties of  $\text{Y}_2(\text{W}, \text{Mo})\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}$  incorporated with  $\text{Li}^+$  ions [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(5):451-455. (in Chinese)
- [25] 陈文驹, 林美荣, 姜宏丽. 双指数荧光衰减动力学模型分析 [J]. *光学学报*, 1986, 6(12):1124-1129.  
CHEN W J, LIN M R, JIANG H L. Study on dynamic model of double exponential fluorescence decay [J]. *Acta Opt. Sinica*, 1986, 6(12):1124-1129. (in Chinese)
- [26] 李艳红, 张永明, 李鹏, 等.  $\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$  纳米晶的沉淀合成及发光性质 [J]. *功能材料与器件学报*, 2010, 16(1):73-76.  
LI Y H, ZHANG Y M, LI P, *et al.*. Synthesis of  $\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$  nanocrystals by a precipitation method and luminescence properties [J]. *J. Funct. Mater. Dev.*, 2010, 16(1):73-76. (in Chinese)
- [27] 伏振兴, 刘碧蕊.  $\text{La}_{1-x}\text{YO}_3:x\text{Pr}^{3+}$  荧光粉的溶液燃烧法合成及发光特性 [J]. *光子学报*, 2015, 44(8):0816003.  
FU Z X, LIU B R. Photoluminescence properties and preparation of  $\text{La}_{1-x}\text{YO}_3:x\text{Pr}^{3+}$  phosphors by solution-combustion [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015, 44(8):0816003. (in Chinese)
- [28] 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):139-144.  
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):139-144. (in Chinese)



庾娟(1990 -), 女, 四川广安人, 硕士研究生, 2015 年于新疆师范大学获得学士学位, 主要从事纳米发光材料的研究。

E-mail: 1498970687@qq.com



王林香(1979 -), 女, 甘肃秦安人, 博士, 副教授, 2010 年于中国科学技术大学获得博士学位, 主要从事纳米发光材料的研究。

E-mail: wanglinxiang23@126.com