

文章编号: 1000-7032(2023)11-1940-10

## Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:Tb<sup>3+</sup>荧光粉的发光特性

李 敏<sup>1</sup>, 孙晓园<sup>1\*</sup>, 范小暄<sup>1</sup>, 刘椿淼<sup>1</sup>, 娄文静<sup>1</sup>,  
田宛鹭<sup>1</sup>, 李昊翔<sup>1</sup>, 骆永石<sup>2</sup>

(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)

**摘要:** 采用高温固相法制备了颜色可调的Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:xTb<sup>3+</sup>荧光粉,并研究了其晶体结构、发光特性和浓度猝灭机理。研究了Tb<sup>3+</sup>浓度对样品发光性质的影响。在紫外光激发下,当x=0.01时,Tb<sup>3+</sup>的<sup>5</sup>D<sub>3</sub>-<sup>7</sup>F<sub>6</sub>跃迁强度最强,峰值位于381 nm;当x=0.15时,Tb<sup>3+</sup>的<sup>5</sup>D<sub>4</sub>-<sup>7</sup>F<sub>5</sub>跃迁强度最强,峰值位于545 nm。随着Tb<sup>3+</sup>掺杂浓度的升高,样品的发光颜色从蓝光变为黄绿光。分析了Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:xTb<sup>3+</sup>荧光粉的浓度猝灭机理。测量了荧光粉的荧光寿命、热稳定性、量子效率。结果表明,Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:xTb<sup>3+</sup>是一种新型的发光颜色可调的荧光粉。

**关键词:** 荧光粉; 光致发光; 颜色可调; Tb<sup>3+</sup>掺杂

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230147

## Photoluminescence Properties of Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:Tb<sup>3+</sup> Phosphor

LI Min<sup>1</sup>, SUN Xiaoyuan<sup>1\*</sup>, FAN Xiaoxuan<sup>1</sup>, LIU Chunmiao<sup>1</sup>,  
LOU Wenjing<sup>1</sup>, TIAN Wanlu<sup>1</sup>, LI Haoxiang<sup>1</sup>, LUO Yongshi<sup>2</sup>

(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)

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

**Abstract:** The phosphors Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:xTb<sup>3+</sup> were synthesized through the solid-state reaction technique. The structure, photoluminescence properties and concentration quenching mechanisms were researched. The dependence of photoluminescence intensities on Tb<sup>3+</sup> concentration was studied. Upon excitation with UV excitation, when the doping concentration x=0.01, the strongest peak located around 381 nm, which arise from <sup>5</sup>D<sub>3</sub>-<sup>7</sup>F<sub>6</sub> transition of Tb<sup>3+</sup>; when the doping concentration x=0.15, the strongest peak located around 545 nm, which arise from <sup>5</sup>D<sub>4</sub>-<sup>7</sup>F<sub>5</sub> transition of Tb<sup>3+</sup>. The luminescence color changes from blue to yellowish green by adjusting the doping concentration of Tb<sup>3+</sup>. The concentration quenching mechanisms of Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:xTb<sup>3+</sup> were studied. The lifetime, thermal stability and quantum efficiency were measured. The Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:xTb<sup>3+</sup> phosphor is a novel color-tunable phosphor.

**Key words:** phosphors; photoluminescence; color-tunable; Tb<sup>3+</sup> doped

## 1 引 言

稀土材料被广泛应用在绿色照明、航空航天、新能源汽车、高品质显示器、光学防伪等领域<sup>[1-5]</sup>。

在稀土材料的发展过程中,稀土发光材料得到了广泛研究<sup>[6-12]</sup>。稀土发光材料因其丰富的轨道能级和独特的4f电子跃迁,在发光性质上远胜于其他材料<sup>[13-18]</sup>。其中,Tb<sup>3+</sup>激活的发光材料已得到了

收稿日期: 2023-06-20; 修订日期: 2023-07-07

基金项目: 吉林省科技发展计划(YDZJ202101ZYTS176)

Supported by Science and Technology Developing Project of Jilin Province(YDZJ202101ZYTS176)

广泛的应用,如灯用荧光粉  $\text{LaPO}_4:\text{Ce}^{3+},\text{Tb}^{3+}$ <sup>[19]</sup>、增感屏荧光粉  $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ <sup>[20]</sup>、三基色荧光灯用荧光粉  $\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Tb}^{3+}$ <sup>[21]</sup>等。铝酸盐体系荧光粉因其化学和物理性质稳定、发光性能高、激发发射峰宽、制备工艺简易等特点被广泛研究<sup>[22-24]</sup>。Wang 等<sup>[25]</sup>首次报道了  $\text{Sr}_6\text{Y}_2\text{Al}_4\text{O}_{15}$  的晶体结构,并研究了  $\text{Sr}_6\text{Ln}_2\text{Al}_4\text{O}_{15}$  ( $\text{Ln}=\text{Tb},\text{Dy},\text{Ho},\text{Er},\text{Tm},\text{Yb},\text{Lu}$ ) 的晶胞参数。Yang 等<sup>[26]</sup>研究了  $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  共掺  $\text{Sr}_3\text{YAl}_2\text{O}_7.5$  和  $\text{Sr}_3\text{LuAl}_2\text{O}_7.5$  荧光粉的发光性质和能量传递机理。Tao 等<sup>[27]</sup>研究了  $\text{Sr}_3\text{LuAl}_2\text{O}_7.5:\text{Ce}^{3+}$  荧光粉的发光性质和热稳定性。Wang 等<sup>[28]</sup>研究了  $\text{Sr}_3\text{YAl}_2\text{O}_7.5:\text{Bi}^{3+},\text{Eu}^{3+}$  的发光性质、能量传递机理和热稳定性。Dalal 等<sup>[29]</sup>研究了  $\text{Sr}_6\text{Y}_2\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Eu}^{3+}$  的发光性质和热稳定性。但是,  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂的  $\text{Sr}_6\text{Lu}_2\text{Al}_4\text{O}_{15}$  荧光粉迄今为止尚未有研究报道。

本文成功制备了一系列适于紫外光激发的  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  样品,通过调节样品中  $\text{Tb}^{3+}$  的掺杂浓度,样品的发光颜色可以从蓝光变为黄绿光。研究了其晶体结构、发光性质、浓度猝灭机理、热稳定性和量子效率。

## 2 实 验

主要实验原料有:  $\text{SrCO}_3$  (AR)、 $\text{Lu}_2\text{O}_3$  (4N5)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (高纯)、 $\text{Tb}_4\text{O}_7$  (4N5)。通过高温固相法制备了一系列  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 样品。首先,按化学计量比称取相应的原料,在玛瑙研钵中充分研磨,将研磨均匀的原料装入刚玉坩埚,置于高温箱式马弗炉中,在还原气氛下,  $1500^\circ\text{C}$  恒温 4 h,随炉冷却至室温,将样品取出,研磨得到粉末样品。

物相分析采用 DX-2700 型号 X 射线衍射仪,采用日立 F-4600 测样品的激发光谱、发射光谱(用 Xe 灯作激发光源)。荧光寿命测量由 Tektronix-TDS 3052 数字示波器记录,利用 Continuum Surelite 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。使用日立 F-4600 测试样品的热稳定性(用 TCB1402C 高温粉末检测选配件控制温度)。样品的量子效率采用日立 F-7000 测得。

## 3 结果与讨论

### 3.1 样品的晶体结构分析

图 1 为样品  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x = 0.001,$

$0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 的 X 射线衍射图。样品的衍射峰与国际标准卡片 JCPDS 00-057-0779 ( $\text{Sr}_6\text{Al}_4\text{Lu}_2\text{O}_{15}$ ) 衍射峰的位置基本吻合,说明制备的样品晶体结构与  $\text{Sr}_6\text{Al}_4\text{Lu}_2\text{O}_{15}$  一致。图 2 为  $\text{Sr}_6\text{Al}_4\text{M}_2\text{O}_{15}$  ( $M=\text{Lu}, \text{Tb}$ ) 的晶体结构,  $\text{Sr}_6\text{Al}_4\text{Lu}_2\text{O}_{15}$  为单斜晶系,晶胞参数为  $a = 1.7487 \text{ nm}, b = 0.5714 \text{ nm}, c = 0.7637 \text{ nm}, \alpha = 90.0^\circ, \beta = 90.914^\circ, \gamma = 90.0^\circ$ 。

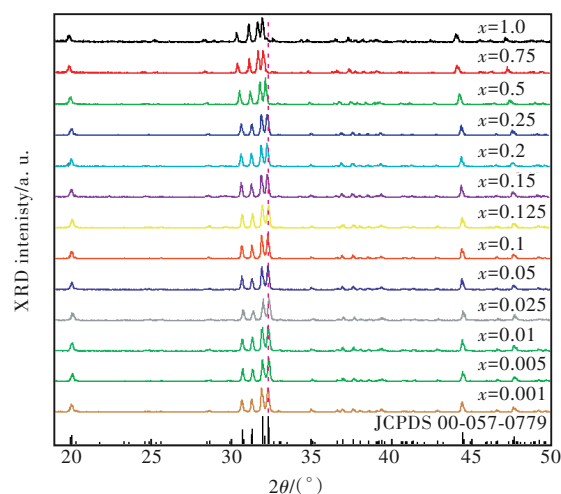


图 1  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  荧光粉的 XRD 衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of the  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  phosphors

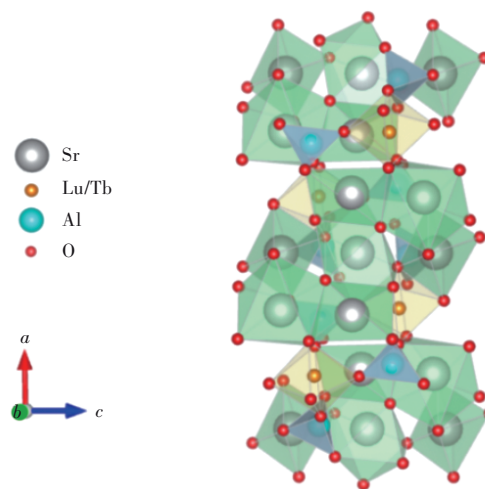


图 2  $\text{Sr}_6\text{Al}_4\text{M}_2\text{O}_{15}$  ( $M = \text{Lu}, \text{Tb}$ ) 的晶体结构图

Fig. 2 Crystal structure of  $\text{Sr}_6\text{Al}_4\text{M}_2\text{O}_{15}$  ( $M = \text{Lu}, \text{Tb}$ )

$\text{Lu}^{3+}$  与掺杂离子  $\text{Tb}^{3+}$  具有相同的电荷和相近的离子半径,当配位数为 6 时,  $\text{Tb}^{3+}$  半径 ( $r = 0.092 \text{ nm}$ ) 大于  $\text{Lu}^{3+}$  半径 ( $r = 0.086 \text{ nm}$ )<sup>[30]</sup>,因此,掺杂的  $\text{Tb}^{3+}$  可能会占据  $\text{Lu}^{3+}$  格位。从图 1 中可以看出,样品的 XRD 衍射峰逐渐向小角度偏移。在本样品中,较大离子半径的  $\text{Tb}^{3+}$  取代了较小离子半径的

Lu<sup>3+</sup>的格位,所以,样品的晶面间距 $d$ 随Tb<sup>3+</sup>掺杂浓度增加而增大。根据布拉格方程:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (1)$$

可以得出随样品晶面间距 $d$ 增大, $\theta$ 角变小。

### 3.2 发光性质

图3为Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: $x$ Tb<sup>3+</sup> ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ )的激发光谱,监测波长为381 nm,监测范围为200~360 nm,峰值位于268, 303, 315 nm,源于Tb<sup>3+</sup>的4f<sup>8</sup>-4f<sup>7</sup>5d跃迁。当Tb<sup>3+</sup>的一个电子从4f<sup>8</sup>组态跃迁至4f<sup>7</sup>5d<sup>1</sup>激发态时,它会产生两种不同的f-d跃迁:自旋允许和自旋禁戒的跃迁。通常自旋允许的<sup>7</sup>F<sub>J</sub>-<sup>7</sup>D<sub>J</sub>跃迁能量高、强度大,而自旋禁戒的<sup>7</sup>F<sub>J</sub>-<sup>9</sup>D<sub>J</sub>跃迁能量低、强度小。因此,图3中位于268 nm的激发峰来自于Tb<sup>3+</sup>自旋允许的<sup>7</sup>F<sub>J</sub>-<sup>7</sup>D<sub>J</sub>跃迁,而处于303, 315 nm的激发峰来自于Tb<sup>3+</sup>自旋禁戒的<sup>7</sup>F<sub>J</sub>-<sup>9</sup>D<sub>J</sub>跃迁<sup>[31-32]</sup>。随Tb<sup>3+</sup>掺杂浓度的升高,样品激发峰的强度先增强后减弱。 $x = 0.01$ 的样品位于268 nm附近的激发峰强度最强。

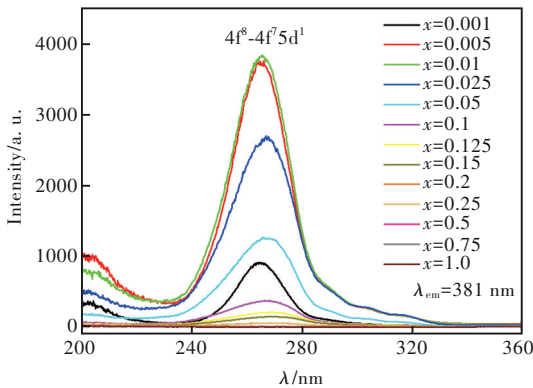


图3 Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: $x$ Tb<sup>3+</sup> ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ )样品的激发光谱, $\lambda_{em}=381$  nm。

Fig.3 Excitation spectra of the Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: $x$ Tb<sup>3+</sup> ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) phosphors,  $\lambda_{em}=381$  nm.

图4为Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: $x$ Tb<sup>3+</sup> ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ )的激发光谱,监测波长为545 nm,监测范围为200~400 nm。不同Tb<sup>3+</sup>掺杂浓度的样品激发光谱形状相似,都由较强的4f<sup>7</sup>5d<sup>1</sup>宽带吸收(200~336 nm)和较弱的4f-4f电子跃迁吸收(336~400 nm)两部分组成。峰值位于268 nm(<sup>7</sup>F<sub>6</sub>-<sup>7</sup>D<sub>J</sub>), 288, 303, 315 nm(<sup>7</sup>F<sub>6</sub>-<sup>9</sup>D<sub>J</sub>), 340 nm(<sup>7</sup>F<sub>6</sub>-<sup>5</sup>L<sub>7</sub>), 351 nm(<sup>7</sup>F<sub>6</sub>-<sup>5</sup>L<sub>9</sub>), 359 nm(<sup>7</sup>F<sub>6</sub>-<sup>5</sup>G<sub>5</sub>), 367 nm(<sup>7</sup>F<sub>6</sub>-<sup>5</sup>L<sub>10</sub>)和

376 nm(<sup>7</sup>F<sub>6</sub>-<sup>5</sup>G<sub>6</sub>)<sup>[31-40]</sup>。随着Tb<sup>3+</sup>掺杂浓度提高,样品激发峰的强度先增强后减弱。当 $x = 0.15$ 时,位于268 nm的激发峰的强度比其他样品大。当 $x = 0.5$ 时,位于302, 316 nm的激发峰的强度比其他样品大。

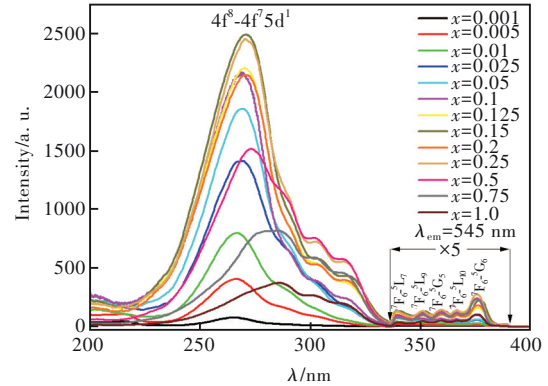


图4 Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: $x$ Tb<sup>3+</sup> ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ )样品的激发光谱, $\lambda_{em}=545$  nm。

Fig.4 Excitation spectra of the Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: $x$ Tb<sup>3+</sup> ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) phosphors,  $\lambda_{em}=545$  nm.

图5为激发波长268 nm时Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: $x$ Tb<sup>3+</sup> ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ )的发射光谱。掺杂不同浓度Tb<sup>3+</sup>离子的样品的发射光谱都由一系列锐峰组成。峰值位于381 nm、391 nm(<sup>5</sup>D<sub>3</sub>-<sup>7</sup>F<sub>6</sub>), 423 nm(<sup>5</sup>D<sub>3</sub>-<sup>7</sup>F<sub>5</sub>), 439 nm(<sup>5</sup>D<sub>3</sub>-<sup>7</sup>F<sub>4</sub>), 450 nm(<sup>5</sup>D<sub>3</sub>-<sup>7</sup>F<sub>3</sub>), 463 nm(<sup>5</sup>D<sub>3</sub>-<sup>7</sup>F<sub>2</sub>), 489 nm、504 nm(<sup>5</sup>D<sub>4</sub>-<sup>7</sup>F<sub>6</sub>), 545

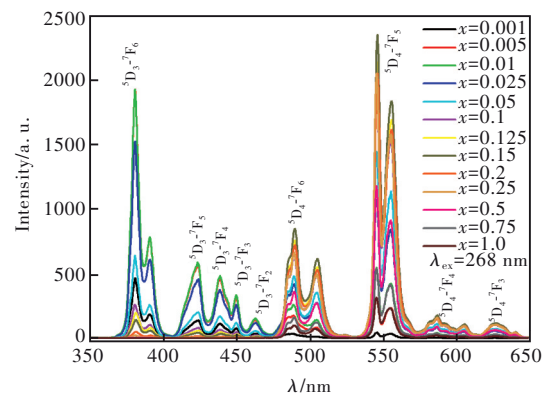


图5 Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: $x$ Tb<sup>3+</sup> ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ )样品的发射光谱, $\lambda_{ex}=268$  nm。

Fig.5 Photoluminescence spectra of the Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2-2x</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: $x$ Tb<sup>3+</sup> ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) phosphors,  $\lambda_{ex}=268$  nm.

nm、554 nm ( $^5\text{D}_4\text{-}^7\text{F}_5$ ), 581, 586, 596, 604 nm ( $^5\text{D}_4\text{-}^7\text{F}_4$ ), 626 nm ( $^5\text{D}_4\text{-}^7\text{F}_3$ )<sup>[33-40]</sup>。  $x=0.005$  和  $x=0.01$  的样品位于 381 nm 的发射峰发光强度相近。  $x=0.15$  的样品位于 545 nm 的发射峰发光强度最大。 当  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度较低时, 可以同时看到  $^5\text{D}_3\text{-}^7\text{F}_J$  ( $J=6, 5, 4, 3, 2$ ) 和  $^5\text{D}_4\text{-}^7\text{F}_J$  ( $J=6, 5, 4, 3$ ) 发射出的荧

光; 当  $x > 0.1$  时,  $^5\text{D}_3\text{-}^7\text{F}_J$  跃迁发光强度明显减弱。 这是由于  $^5\text{D}_3$  能级的粒子交叉弛豫过程被倒空到  $^5\text{D}_4$  能级的缘故。 图 6 是  $\text{Tb}^{3+}$  的能级图。  $\text{Tb}^{3+}$  主要猝灭过程是  $^5\text{D}_3 + ^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{D}_4 + ^7\text{F}_0$  的交叉弛豫过程, 随着  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度的升高,  $^5\text{D}_3$  能级发出的荧光逐渐减弱,  $^5\text{D}_4$  能级发出的荧光逐渐增强<sup>[41-42]</sup>。

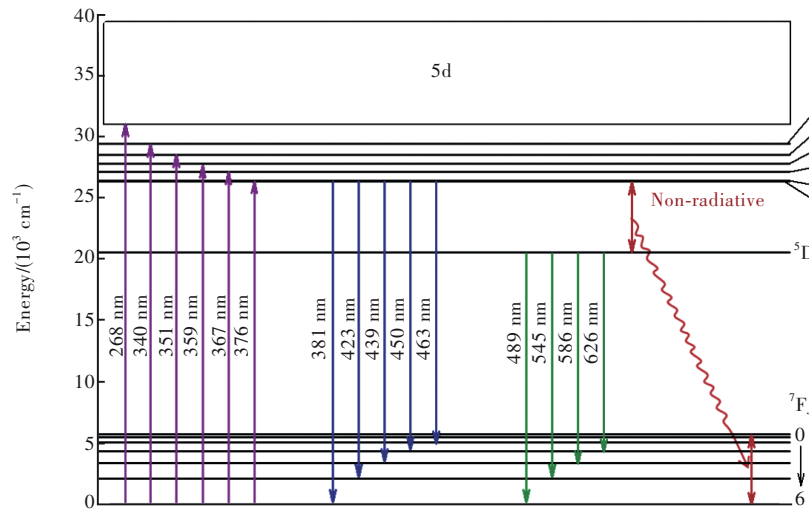


图 6  $\text{Tb}^{3+}$  的能级图

Fig.6 Energy level diagram of  $\text{Tb}^{3+}$

表 1 为样品  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 在 268 nm 激发下的 CIE 坐标。 图 7 为样品的色坐标图, 可以看出, 在紫外光激发下, 随着  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度的升高, 样品的发光颜色从蓝光变为黄绿光, 说明通过改变  $\text{Tb}^{3+}$  的掺杂浓度, 可以实现  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  体系样品发光颜色的调控。

表 1  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  样品的 CIE 坐标

Tab. 1 CIE of  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  phosphors

序号	$x$ 值	CIE ( $x, y$ )
A1	0.001	(0.183 7, 0.126 7)
A2	0.005	(0.195 9, 0.171 0)
A3	0.01	(0.212 6, 0.231 7)
A4	0.025	(0.247 5, 0.360 6)
A5	0.05	(0.281 7, 0.483 0)
A6	0.1	(0.301 9, 0.556 2)
A7	0.125	(0.304 2, 0.567 7)
A8	0.15	(0.304 2, 0.575 4)
A9	0.2	(0.308 7, 0.585 1)
A10	0.25	(0.310 6, 0.589 0)
A11	0.5	(0.314 2, 0.589 7)
A12	0.75	(0.312 0, 0.586 7)
A13	1.0	(0.304 1, 0.578 8)

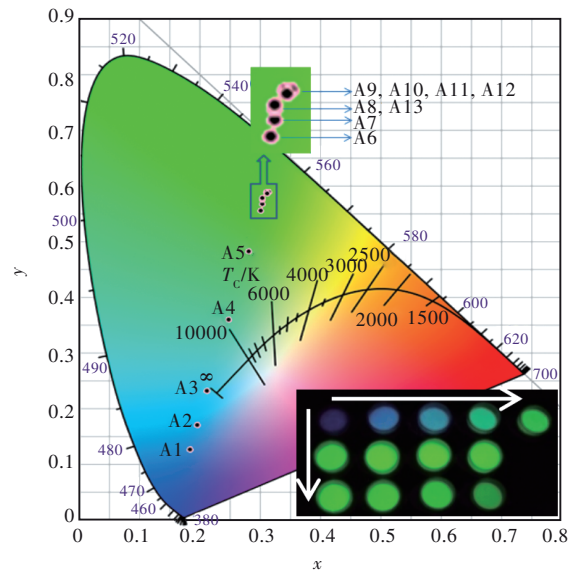


图 7  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) CIE 坐标图,  $\lambda_{\text{ex}}=268$  nm; 插图 为样品在 254 nm 紫外灯下的发光照片。

Fig.7 CIE chromaticity coordinates of  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) phosphors under 268 nm excitation. Inset shows the images of samples under 254 nm UV lamp.

### 3.3 浓度猝灭机理

图 8(a) 给出了  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 在 268 nm 激发下, 样品源于  $^5\text{D}_3$  能级跃迁发光的积分发光强度与  $\text{Tb}^{3+}$  浓度的关系, 积分范围为 360~470 nm。随  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度的增加, 样品的积分发光强度先增强后减弱。当  $x=0.01$  时, 样品的积分发光强度最强; 当  $0.01 < x < 0.1$  时, 样品  $^5\text{D}_3\text{-}^7\text{F}_j$  的发光强度急剧下降, 这是由于发生了浓度猝灭。当  $x \geq 0.25$  时, 样品的  $^5\text{D}_3\text{-}^7\text{F}_j$  跃迁几乎完全猝灭。猝灭临界浓度为 0.01。图 8(b) 给出了  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 在 268 nm 激发下, 471~650 nm 范围内  $^5\text{D}_4$  能级跃迁发光的积分发光强度与  $\text{Tb}^{3+}$  浓度的关系。随  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度的增加, 样品的积分发光强度先增强后减弱。当  $x < 0.15$  时,  $^5\text{D}_4\text{-}^7\text{F}_j$  的发光强度逐渐增强; 当  $x > 0.15$  时,  $^5\text{D}_4\text{-}^7\text{F}_j$  的发光强度逐渐减弱, 这是由于发生了浓度猝灭。猝灭临界浓度为 0.15。

$\text{Tb}^{3+}$  离子的浓度猝灭现象可以归因于  $\text{Tb}^{3+}$  离子之间的能量传递。能量传递主要有两种机制:

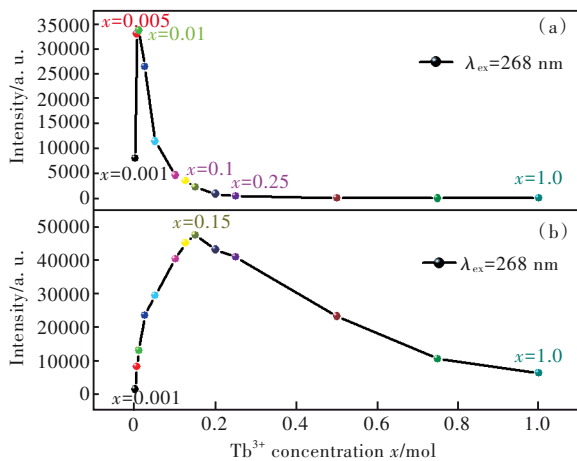


图 8 (a)  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 样品  $^5\text{D}_3$  能级跃迁强度随  $\text{Tb}^{3+}$  浓度的变化关系; (b)  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  样品  $^5\text{D}_4$  能级跃迁强度随  $\text{Tb}^{3+}$  浓度的变化关系。

Fig.8 (a)  $^5\text{D}_3$  energy level emission intensity of  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) with the  $\text{Tb}^{3+}$  concentrations. (b)  $^5\text{D}_4$  energy level emission intensity of  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  with the  $\text{Tb}^{3+}$  concentrations.

电多极相互作用和交换相互作用, 主要由临界距离  $R_c$  决定。Blasse<sup>[43]</sup> 推测晶体中能量传递的临界距离  $R_c$  的计算公式为:

$$R_c = 2 \left( \frac{3V}{4\pi X_c N} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

$V$  ( $V=0.763 \text{ nm}^3$ ) 为单位晶胞体积,  $N$  ( $N=4$ ) 为单位晶胞中激活剂离子占据的阳离子格点数,  $X_c$  是猝灭临界浓度。一般而言, 当  $R_c \leq 0.5 \text{ nm}$  时, 能量传递以交换相互作用为主; 当  $R_c > 0.5 \text{ nm}$  时, 能量传递主要归因于电多极相互作用。将上述数值代入公式(2)中, 计算得到  $R_{c1}=3.32 \text{ nm} > 0.5 \text{ nm}$ ,  $R_{c2}=1.34 \text{ nm} > 0.5 \text{ nm}$ 。所以  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  中  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^5\text{D}_3$  能级和  $^5\text{D}_4$  能级浓度猝灭的能量损失均为电多极-电多极相互作用。

Dexter<sup>[44]</sup> 曾指出, 在无机非导电性材料中, 激活剂的电多极-电多极相互作用所导致的浓度猝灭中, 发射光强度  $I$  与掺杂摩尔浓度  $x$  之间存在着以下关系:

$$\lg\left(\frac{I}{x}\right) = C - \left(\frac{\theta}{3}\right) \lg x, \quad (3)$$

其中,  $C$  为常数,  $\theta=6, 8, 10$  分别对应于电偶极-电偶极(d-d)、电偶极-电四极(d-q)、电四极-电四极(q-q)相互作用。作出  $\lg(I/x)$  与  $\lg x$  的关系曲线, 如图 9 所示, 通过线性拟合得出  $\lg(I/x)$  与  $\lg x$  呈线性关系。 $^5\text{D}_3$  能级的拟合斜率为  $-2.28953$ ,  $\theta_1=6.87$ , 近似等于 6;  $^5\text{D}_4$  能级的拟合斜率为  $-2.05347$ ,  $\theta_2=6.16$ , 近似等于 6。因此, 样品中  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^5\text{D}_3$  能级和  $^5\text{D}_4$  能级的猝灭机理均为电偶极-电偶极相互作用。

在 268 nm 光激发下, 监测 381 nm ( $^5\text{D}_3\text{-}^7\text{F}_6$ ) 和 545 nm ( $^5\text{D}_4\text{-}^7\text{F}_5$ ) 两个位置, 测得  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 的荧光衰减曲线, 如图 10 和图 11 所示。寿命由公式(4)计算得到:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} I(t) t dt}{\int_0^{\infty} I(t) dt}, \quad (4)$$

其中,  $I(t)$  代表  $t$  时刻的发光强度,  $\tau$  是荧光寿命。用公式(4)计算得出的寿命如图 12 所示。从图 12(a) 中可以看出, 随  $\text{Tb}^{3+}$  浓度的增加,  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  样品  $^5\text{D}_3\text{-}^7\text{F}_6$  跃迁发射的寿命总体呈现衰减的趋势, 当  $x \leq 0.1$  时, 样品荧光寿命衰减较快。从图 12(b) 中可以看出, 随  $\text{Tb}^{3+}$  浓度的增加, 样品  $^5\text{D}_4\text{-}^7\text{F}_5$  跃迁发射的寿命逐渐衰减。当  $x \leq 0.05$

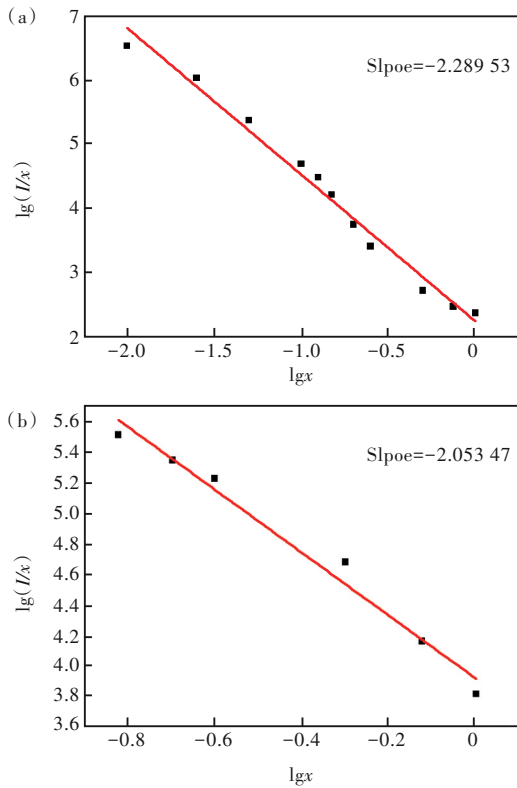


图 9 (a)  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 样品  $^5\text{D}_3$  能级的  $\lg(I/x)$  与  $\lg x$  关系曲线; (b)  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  样品  $^5\text{D}_4$  能级的  $\lg(I/x)$  与  $\lg x$  关系曲线。

Fig.9 (a) The plot of  $\lg(I/x)$  versus  $\lg x$  in  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) phosphors for  $^5\text{D}_3$  energy level. (b) The plot of  $\lg(I/x)$  versus  $\lg x$  in  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  phosphors for  $^5\text{D}_4$  energy level.

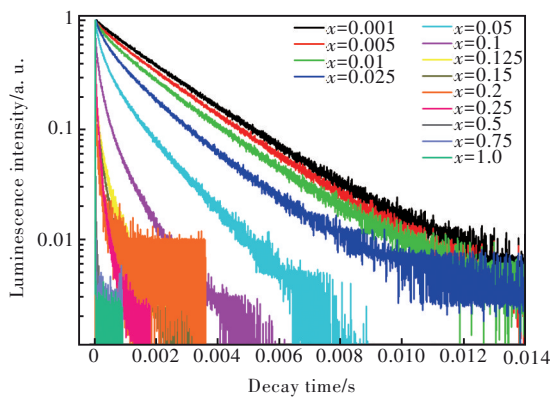


图 10  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 荧光寿命衰减曲线, 监测波长为  $381\text{ nm}$ ,  $\lambda_{\text{ex}} = 268\text{ nm}$ 。

Fig. 10 PL decay curves of the  $\text{Tb}^{3+}$  ions in  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) phosphors monitored at  $381\text{ nm}$ .  $\lambda_{\text{ex}} = 268\text{ nm}$ .

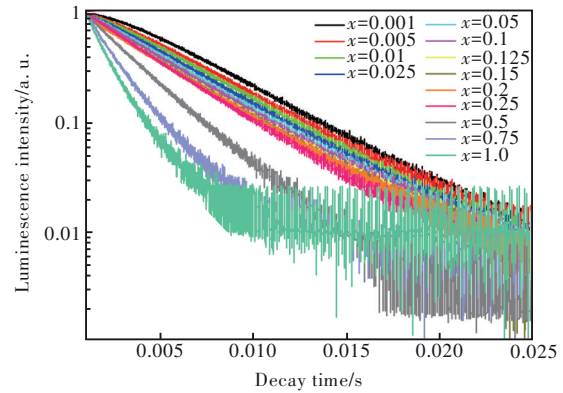


图 11  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 荧光寿命衰减曲线, 监测波长为  $545\text{ nm}$ ,  $\lambda_{\text{ex}} = 268\text{ nm}$ 。

Fig.11 PL decay curves of the  $\text{Tb}^{3+}$  ions in  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  ( $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) phosphors monitored at  $545\text{ nm}$ .  $\lambda_{\text{ex}} = 268\text{ nm}$ .

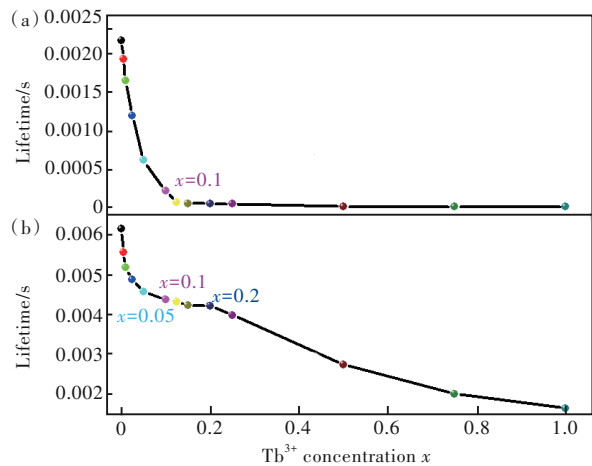


图 12 (a) 监测  $381\text{ nm}$  时  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  样品的寿命随  $\text{Tb}^{3+}$  浓度的变化关系; (b) 监测  $545\text{ nm}$  时样品的寿命随  $\text{Tb}^{3+}$  浓度的变化关系。  $\lambda_{\text{ex}} = 268\text{ nm}$ 。

Fig. 12 (a) Lifetime for  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  phosphors with the  $\text{Tb}^{3+}$  concentrations monitored at  $381\text{ nm}$ . (b) Lifetime for  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  phosphors with the  $\text{Tb}^{3+}$  concentrations monitored at  $545\text{ nm}$ .  $\lambda_{\text{ex}} = 268\text{ nm}$ .

时, 样品荧光寿命衰减较快; 当  $0.1 \leq x \leq 0.2$  时, 样品荧光寿命衰减缓慢。

表 2 给出了在监测  $381\text{ nm}$  和  $545\text{ nm}$  时  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:\text{Tb}^{3+}$  样品的寿命。监测  $381\text{ nm}$  时, 样品  $^5\text{D}_3-^7\text{F}_6$  跃迁发射的寿命为  $4.88 \times 10^{-3} \sim 2.18\text{ ms}$ ; 监测  $545\text{ nm}$  时, 样品  $^5\text{D}_4-^7\text{F}_5$  跃迁发射的寿命为  $1.65 \sim 6.15\text{ ms}$ 。随  $\text{Tb}^{3+}$  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, 并且  $^5\text{D}_3$  能级的寿命比  $^5\text{D}_4$  能级的寿命短, 这与荧光强度随浓

表 2 监测 381 nm 和 545 nm 时  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  样品的寿命

Tab. 2 Lifetime for  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  phosphors monitored at 381 nm and 545 nm

$x$ 值	监测 381 nm 的寿命/ms	监测 545 nm 的寿命/ms
0.001	2.18	6.15
0.005	1.94	5.57
0.01	1.65	5.19
0.025	1.20	4.88
0.05	$6.12 \times 10^{-1}$	4.58
0.1	$2.13 \times 10^{-1}$	4.38
0.125	$6.12 \times 10^{-2}$	4.33
0.15	$5.13 \times 10^{-2}$	4.23
0.2	$4.55 \times 10^{-2}$	4.22
0.25	$4.22 \times 10^{-2}$	3.99
0.5	$6.88 \times 10^{-3}$	2.75
0.75	$5.08 \times 10^{-3}$	2.02
1.0	$4.88 \times 10^{-3}$	1.65

度的变化情况一致。

### 3.4 热稳定性和量子效率

为研究样品的热稳定性,对  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{1.7}\text{Al}_4\text{O}_{15}:0.3\text{Tb}^{3+}$  样品在 298~483 K 不同温度下的发射光谱进行了测试。如图 13 所示,随着温度升高,样品的发光强度先增强后减弱。当温度为 323 K 和 343 K 时,样品的发光强度分别为初始发光强度的 102.4% 和 101.5%,说明样品具有负热猝灭的特性。当温度为 423 K 时,样品的发光强度为初始温度的 80.9%,说明样品具有良好的热稳定性。

为研究样品的量子效率,对  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{1.7}\text{Al}_4\text{O}_{15}:0.3\text{Tb}^{3+}$  样品的量子效率进行了测量。样品的内量子效率为 53.5%,外量子效率为 39.3%。

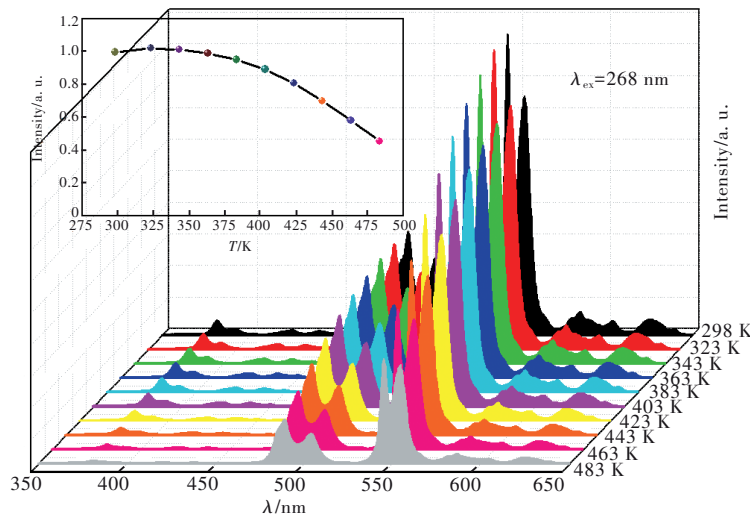


图 13  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{1.7}\text{Al}_4\text{O}_{15}:0.3\text{Tb}^{3+}$  在不同温度下的发射光谱,插图为不同温度下的积分发光强度。

Fig.13 The temperature-dependent luminescence intensities of  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{1.7}\text{Al}_4\text{O}_{15}:0.3\text{Tb}^{3+}$  phosphor. Inset shows the intensities on temperature.

## 4 结 论

本文采用高温固相法合成了  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  ( $x=0.001,0.005,0.01,0.025,0.05,0.1,0.125,0.15,0.2,0.25,0.5,0.75,1.0$ ) 系列荧光粉。研究了其晶体结构、发光性质、浓度猝灭机理、热稳定性和量子效率。在紫外光激发下, $x=0.01$  的样品,  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^5\text{D}_3\text{-}^7\text{F}_6$  跃迁强度最大,位于 381 nm; $x=0.15$  的样品,  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^5\text{D}_4\text{-}^7\text{F}_5$  跃迁强度最大,位于 545 nm。通过改变  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度,样品的发光颜色可以从蓝光变为黄绿光,色坐标从 (0.183 7, 0.126 7) 变化到 (0.314 2, 0.589 7)。样品  $^5\text{D}_3$  和  $^5\text{D}_4$  能级浓度猝灭机理均为电偶极-电偶极相互作用。通过测量样品的荧光寿命衰减

曲线,发现随着  $\text{Tb}^{3+}$  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,这与荧光强度随浓度的变化情况一致。  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{1.7}\text{Al}_4\text{O}_{15}:0.3\text{Tb}^{3+}$  样品具有良好的热稳定性,423 K 时,样品的发光强度为初始发光强度的 80.9%。  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{1.7}\text{Al}_4\text{O}_{15}:0.3\text{Tb}^{3+}$  内量子效率为 53.5%,外量子效率为 39.3%。  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  是一种适合于紫外激发的发光颜色可调的荧光粉。  $\text{Sr}_6\text{Lu}_{2-2x}\text{Al}_4\text{O}_{15}:x\text{Tb}^{3+}$  是潜在的可应用于黑光灯、彩色荧光灯的新型荧光粉。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230147>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] ZHAO H Y, XIA J L, YIN D D, *et al.* Rare earth incorporated electrode materials for advanced energy storage [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2019, 390: 32-49.
- [ 2 ] CHEN Y, ZHANG D L, PENG Z, *et al.* Review of research on the rare-earth doped piezoelectric materials [J]. *Front. Mater.*, 2021, 8: 679167.
- [ 3 ] ZHANG H, ZHANG H Q, PAN A Z, *et al.* Rare earth-free luminescent materials for WLEDs: recent progress and perspectives [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2021, 6(1): 2000648.
- [ 4 ] ESCUDERO A, BECERRO A I, CARRILLO-CARRIÓN C, *et al.* Rare earth based nanostructured materials: synthesis, functionalization, properties and bioimaging and biosensing applications [J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(5): 881-921.
- [ 5 ] CANG L M, QIAN Z Y, WANG J P, *et al.* Applications and functions of rare-earth ions in perovskite solar cells [J]. *Chin. Phys. B*, 2022, 31 (3): 038402.
- [ 6 ] WANG S Y, SUN Q, LI B, *et al.* High-efficiency and thermal-stable tunable blue-green-emitting  $\text{Ca}_3\text{Lu}(\text{AlO})_3(\text{BO}_3)_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  phosphors for near-UV-excited white LEDs [J]. *Dyes Pigm.*, 2018, 157: 314-320.
- [ 7 ] 谢会东, 谭玉荣, 苏彬彬, 等.  $\text{La}_{2-x-y}\text{MgTiO}_6:x\text{Dy}^{3+}, y\text{Eu}^{3+}$  白色荧光粉的荧光性能及能量传递 [J]. *发光学报*, 2019, 40 (6): 713-718.  
XIE H D, TAN Y R, SU B B, *et al.* Luminescent properties and energy transfer of  $\text{La}_{2-x-y}\text{MgTiO}_6:x\text{Dy}^{3+}, y\text{Eu}^{3+}$  white phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(6): 713-718. (in Chinese)
- [ 8 ] JIA Z W, YUAN C X, LIU Y F, *et al.* Strategies to approach high performance in  $\text{Cr}^{3+}$ -doped phosphors for high-power NIR-LED light sources [J]. *Light Sci. Appl.*, 2020, 9: 86.
- [ 9 ] 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)
- [ 10 ] 章伟, 何梦婷, 乔旭升, 等.  $\text{Mn}^{4+}$  激活的典型 LED 红色荧光粉研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42 (9): 1345-1364.  
ZHANG W, HE M T, QIAO X S, *et al.* Research progress of  $\text{Mn}^{4+}$  activated typical LED red phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42 (9): 1345-1364. (in Chinese)
- [ 11 ] WU X L, JI X Y, WANG Z L, *et al.* Improving thermal stability and quantum efficiency through solid solution for  $\text{Ce}^{3+}$ -activated  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$  phosphors [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 855: 157520.
- [ 12 ] QIAO X B, SEO H J. Phase transition, structural and spectroscopic properties of  $\text{Ba}_3\text{Y}(\text{BO}_3)_3$  phosphor [J]. *J. Alloys Compd.*, 2015, 637: 504-508.
- [ 13 ] 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)
- [ 14 ] KHAN W U, ZHOU L, LI X H, *et al.* Single phase white LED phosphor  $\text{Ca}_3\text{YAl}_3\text{B}_4\text{O}_{15}:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$  with superior performance: Color-tunable and energy transfer study [J]. *Chem. Eng. J.*, 2021, 410: 128455.
- [ 15 ] YANG C, LIU Q S, HUANG D X, *et al.* Study on the mechanism of improved luminescence in  $\text{SrB}_2\text{Si}_2\text{O}_8:\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  phosphor [J]. *J. Lumin.*, 2019, 214: 116541.
- [ 16 ] ZHANG Y, ZHANG X J, ZHANG H R, *et al.* Enhanced absorption of  $\text{Sr}_3\text{Lu}_2(\text{BO}_3)_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  phosphor with energy transfer for UV-pumped white LEDs [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 789: 215-220.
- [ 17 ] 尹学爱, 吕树臣.  $\text{Sr}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MoO}_4:\text{Tb}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$  荧光粉的颜色可调发光和温度传感特性 [J]. *发光学报*, 2023, 44 (4): 607-614.  
YIN X A, LYU S C. Color-tunable luminescence and temperature sensing behavior of  $\text{Sr}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MoO}_4:\text{Tb}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$  phosphor [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(4): 607-614. (in Chinese)
- [ 18 ] 冷稚华, 谭哲, 刘书宏. 发光颜色可调的  $\text{Ba}_3\text{YB}_9\text{O}_{18}:\text{Tb}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$  荧光粉及能量传递 [J]. *发光学报*, 2021, 42 (1): 83-90.  
LENG Z H, TAN Z, LIU S H. Tunable photoluminescence properties and energy transfer of  $\text{Ba}_3\text{YB}_9\text{O}_{18}:\text{Tb}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$



- phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(1): 83-90. (in Chinese)
- [ 19 ] HU X F, YAN S R, MA L, *et al.* Preparation of LaPO<sub>4</sub>: Ce, Tb phosphor with different morphologies and their fluorescence properties [J]. *Powder Technol.*, 2009, 192(1): 27-32.
- [ 20 ] XIA T, CAO W H, LUO X X, *et al.* Combustion synthesis and spectra characteristic of Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb<sup>3+</sup> and La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Eu<sup>3+</sup> X-ray phosphors [J]. *J. Mater. Res.*, 2005, 20(9): 2274-2278.
- [ 21 ] PARK B K, LEE S S, KANG J K, *et al.* Single-step solid-state synthesis of CeMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>:Tb phosphor [J]. *Bull. Korean Chem. Soc.*, 2007, 28(9): 1467-1471.
- [ 22 ] YIN L J, XIE W J, WANG M, *et al.* Insight into the evolution mechanism of carbon film and Eu valence in carbon coated BaMgAl<sub>10</sub>O<sub>17</sub>:Eu<sup>2+</sup> phosphor annealed in air [J]. *Ceram. Int.*, 2018, 44(8): 8898-8903.
- [ 23 ] ZHANG J C, ZHOU M J, LIU B T, *et al.* The ultraviolet irradiation degradation of fluorescent lamp used BaMgAl<sub>10</sub>O<sub>17</sub>:Eu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> phosphor [J]. *J. Lumin.*, 2012, 132(8): 1949-1952.
- [ 24 ] WANG L, SETO T, WANG Y H. A new efficient deep-red-emission phosphor Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Cr<sup>3+</sup>/Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> for plant growth [J]. *Dalton Trans.*, 2021, 50(10): 3542-3549.
- [ 25 ] WANG C H, GUO D F, LI Z F, *et al.* Crystal structure of Sr<sub>6</sub>Y<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:XRD refinements and first-principle calculations [J]. *J. Solid State Chem.*, 2012, 192: 195-200.
- [ 26 ] YANG J K, DING J W, XIAO S G, *et al.* Luminescence properties of Yb<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> co-doped Sr<sub>3</sub>YAl<sub>2</sub>O<sub>7.5</sub> and Sr<sub>3</sub>LuAl<sub>2</sub>O<sub>7.5</sub> powders [J]. *J. Alloys Compd.*, 2013, 577: 86-89.
- [ 27 ] TAO Z X, ZHANG W Q, QIN L, *et al.* A yellow-emitting nanophosphor of Ce<sup>3+</sup>-activated aluminate Sr<sub>3</sub>LuAl<sub>2</sub>O<sub>7.5</sub> [J]. *J. Alloys Compd.*, 2014, 588: 540-545.
- [ 28 ] WANG Y C, DING J Y, LI Y Y, *et al.* A novel single-phase warm white emission phosphor Sr<sub>3</sub>YAl<sub>2</sub>O<sub>7.5</sub>:Bi<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup> with energy transfer for UV white LEDs [J]. *RSC Adv.*, 2016, 6(48): 42618-42626.
- [ 29 ] DALAL H, SEHRAWAT P, SHEORAN M, *et al.* Optical, crystallographic and Judd-Ofelt analysis of europium doped Sr<sub>6</sub>Y<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub> nanocrystals for NUV-WLED fabrication [J]. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2022, 33(2): 767-781.
- [ 30 ] HAYNES W M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* [M]. 95th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014: 120.
- [ 31 ] 曹铷, 田莲花. Tb<sup>3+</sup>和 Ce<sup>3+</sup>在 Sr<sub>7</sub>Zr(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>基质中能量传递及发光特性研究 [J]. *发光学报*, 2017, 38(4): 450-456.
- CAO R, TIAN L H. Luminescence properties and energy transfer between Ce<sup>3+</sup> and Tb<sup>3+</sup> in Sr<sub>7</sub>Zr(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub> [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(4): 450-456. (in Chinese)
- [ 32 ] 朱宪忠, 储成林. Tb<sup>3+</sup>在 Lu<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub>中的光致发光性质及浓度猝灭机制 [J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(7): 963-968.
- ZHU X Z, CHU C L. Photoluminescent properties and mechanism of concentration quenching of Tb<sup>3+</sup> in Lu<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2015, 43(7): 963-968. (in Chinese)
- [ 33 ] 叶博, 李贵花, 王荣荣, 等. Na<sub>3</sub>Sc<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Tb<sup>3+</sup>反热猝灭荧光粉制备及其发光性能 [J]. *发光学报*, 2023, 44(4): 598-606.
- YE B, LI G H, WANG R R, *et al.* Preparation and luminescence properties for Na<sub>3</sub>Sc<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Tb<sup>3+</sup> phosphors with anti-thermal-quenching phenomenon [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(4): 598-606. (in Chinese)
- [ 34 ] ZHANG Z Y, ZHANG Y H, LI X L, *et al.* VUV-UV luminescence of magnetoplumbite: (Sr<sub>0.96-x</sub>Ba<sub>0.04</sub>)Al<sub>12-y</sub>Mg<sub>y</sub>O<sub>19</sub>:Tb<sub>x</sub> [J]. *J. Lumin.*, 2008, 128(3): 476-480.
- [ 35 ] HUANG X Y, LIANG J, RTIMI S, *et al.* Ultra-high color rendering warm-white light-emitting diodes based on an efficient green-emitting garnet phosphor for solid-state lighting [J]. *Chem. Eng. J.*, 2021, 405: 126950.
- [ 36 ] WANG S Y, DEVAKUMAR B, SUN Q, *et al.* Highly efficient near-UV-excitable Ca<sub>2</sub>YHf<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup> green-emitting garnet phosphors with potential application in high color rendering warm-white LEDs [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(13): 4408-4420.
- [ 37 ] LI L, TANG X H, WU Z J, *et al.* Simultaneously tuning emission color and realizing optical thermometry via efficient Tb<sup>3+</sup>→Eu<sup>3+</sup> energy transfer in whitlockite-type phosphate multifunctional phosphors [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 780: 266-275.
- [ 38 ] LI B, HUANG X Y, GUO H, *et al.* Energy transfer and tunable photoluminescence of LaBWO<sub>6</sub>:Tb<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup> phosphors for near-UV white LEDs [J]. *Dyes Pigm.*, 2018, 150: 67-72.
- [ 39 ] ANNADURAI G, JAYACHANDIRAN M, KENNEDY S M M, *et al.* Synthesis and photoluminescence properties of Ba<sub>2</sub>CaZn<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>17</sub>:Tb<sup>3+</sup> green phosphor [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2016, 208: 47-52.

- [ 40 ] YAHIAOUI Z, HASSAIRI M A, DAMMAK M, *et al.* Tunable luminescence and energy transfer properties in  $\text{YPO}_4:\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  phosphors [J]. *J. Lumin.* , 2018, 194: 96-101.
- [ 41 ] 张思远. 稀土离子的光谱学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 140.  
ZHANG S Y. *Spectroscopy of Rare Earth Ions* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 140. (in Chinese)
- [ 42 ] 欧奕意, 王笑军, 梁宏斌.  $\text{K}_3\text{La}(\text{PO}_4)_2$  基质中  $\text{Tb}^{3+}$  的发光和能量传递 [J]. 发光学报, 2022, 43(9): 1350-1360.  
OU Y Y, WANG X J, LIANG H B. Luminescence and energy transfer of  $\text{Tb}^{3+}$  in  $\text{K}_3\text{La}(\text{PO}_4)_2$  [J]. *Chin. J. Lumin.* , 2022, 43(9): 1350-1360. (in Chinese)
- [ 43 ] BLASSE G. Energy transfer in oxidic phosphors [J]. *Phys. Lett. A*, 1968, 28(6): 444-445.
- [ 44 ] DEXTER D L. A theory of sensitized luminescence in solids [J]. *J. Chem. Phys.* , 1953, 21(5): 836-850.



李敏 (1999-), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 2021 年于长春师范大学获得学士学位, 主要从事稀土发光材料的研究。  
E-mail: 13806419853@163.com



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