

文章编号: 1000-7032(2018)03-0301-06

## 铽镱双掺氧化镧钪粉体的合成及其光谱分析

李 剑<sup>1</sup>, 代雨航<sup>1</sup>, 朱忠丽<sup>1\*</sup>, 张 莹<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学 化学与环境工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 采用柠檬酸燃烧法制备了 Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米粉体, 确定了其制备的适宜条件。制得的粉体分散性较好, 粒径均匀, 平均粒径约为 55 nm。研究了掺杂不同摩尔分数 Ho<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup> 对粉体荧光光谱的影响, 980 nm 泵浦源激发下得到的粉体的上转换光谱显示, 粉体发出 484 nm 蓝光 (<sup>5</sup>F<sub>3</sub> → <sup>5</sup>I<sub>8</sub>)、551 nm 绿光 (<sup>5</sup>S<sub>2</sub>/<sup>5</sup>F<sub>4</sub> → <sup>5</sup>I<sub>8</sub>)、660 nm 红光 (<sup>5</sup>F<sub>5</sub> → <sup>5</sup>I<sub>8</sub>)。并讨论了掺杂离子 Ho<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> 的上转换发光机制。

**关键词:** 铽镱双掺氧化镧钪; 上转换光谱; 能级跃迁

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183903.0301

## Fabrication and Spectral Analysis of Ho<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> Co-doped (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powders

LI Jian<sup>1</sup>, DAI Yu-hang<sup>1</sup>, ZHU Zhong-li<sup>1\*</sup>, ZHANG Ying<sup>2</sup>

(1. Chemistry and Environmental Engineering College, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

**Abstract:** The powders of Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were prepared by citric acid combustion method. The preparation conditions of the powders were determined. The as-prepared particles are of near-spherical shape, and weak agglomeration, the average particle size was about 55 nm. The effects of different mole fraction Ho<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> on the fluorescence spectra of the powders were studied. Under the excitation of 980 nm, the powders can emit blue-ray appeared at 484 nm, corresponding to the energy level transition of Ho<sup>3+</sup> from <sup>5</sup>F<sub>3</sub> to <sup>5</sup>I<sub>8</sub>, green light appeared at 551 nm, corresponding to the energy level transition of Ho<sup>3+</sup> from <sup>5</sup>S<sub>2</sub>/<sup>5</sup>F<sub>4</sub> to <sup>5</sup>I<sub>8</sub>, and red light at 660 nm, corresponding to the energy level transition of Ho<sup>3+</sup> from <sup>5</sup>F<sub>5</sub> to <sup>5</sup>I<sub>8</sub>. The upconversion luminescence mechanism of Ho<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> in co-doped system was discussed.

**Key words:** holmium ytterbium co-doped lanthanum lutetium oxide; upconversion spectrum; energy transfer

### 1 引 言

透明陶瓷因制备方法简单、成本低、能均匀

掺杂高浓度稀土离子的优点而广泛应用于激光器、红外窗口、医疗器材等领域。立方相晶体结构的 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可以避免光在晶界上的散射, 掺稀土

收稿日期: 2017-08-15; 修订日期: 2017-10-11

基金项目: 吉林省科技发展计划(20170204028GX)资助项目

Supported by Science and Technology Development Project of Jilin Province(20170204028GX)

离子的  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  陶瓷是一种很好的固体激光器基质材料<sup>[1]</sup>。由于  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  熔点很高,不易烧结成陶瓷,我们选择向其中掺入  $\text{La}^{3+}$ 。 $\text{La}_2\text{O}_3$  与  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  可以形成二元固溶体,可使陶瓷烧结温度显著降低。 $\text{Ho}^{3+}$  能级丰富,是一种很好的激活离子,掺  $\text{Ho}^{3+}$  的激光材料可以发出对人眼安全的  $2\ \mu\text{m}$  激光,在光通信和医疗设备领域有很好的应用前景<sup>[2]</sup>。但是  $\text{Ho}^{3+}$  在  $980\ \text{nm}$  处的吸收截面很窄,能量利用率很低,而  $\text{Yb}^{3+}$  在  $980\ \text{nm}$  处具有很大的吸收截面, $\text{Yb}^{3+}$  吸收  $980\ \text{nm}$  泵浦源发出的光子的能量,吸收的能量有效传递给  $\text{Ho}^{3+}$ ,使得基质材料的发光相比于单掺  $\text{Ho}^{3+}$  时增强很多。

2010年, Li等<sup>[3]</sup>制得的  $\text{Ho, Yb: Y}_2\text{O}_3$  透明陶瓷在  $980\ \text{nm}$  光激发下获得峰宽  $26\ \text{nm}$  的  $2\ \mu\text{m}$  中红外发光。2011年, Sanghera等<sup>[4]</sup>研究的  $\text{Yb: Lu}_2\text{O}_3$  陶瓷获得了  $16\ \text{W}$  的输出功率,光转换斜率效率达  $74\%$ 。2014年, Ivanov等<sup>[5]</sup>制得的  $\text{Yb: (LaY)}_2\text{O}_3$  陶瓷在  $800\ \text{nm}$  处的透过率达到  $82.5\%$ 。2015年, Lin等<sup>[6]</sup>制得的  $20\% \text{Yb}^{3+}/1\% \text{Tm}^{3+}/1\% \text{Ho}^{3+}$  三掺  $\text{NaYF}_4$  微晶在  $980\ \text{nm}$  光激发下获得  $665\ \text{mW}$  的输出功率。

目前,关于  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体的研究较少,国内未见相关报道。本实验通过柠檬酸燃烧法制备了  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体,并对其制备条件及光谱特性进行了研究。

## 2 实 验

### 2.1 粉体制备

制备质量为  $2\ \text{g}$  的目标粉体。按照目标粉体中各稀土离子的量比称取一定量纯度为  $99.999\%$  的  $\text{Ho}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Yb}_2\text{O}_3$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Lu}_2\text{O}_3$  粉末,溶于  $15\ \text{mL}$  浓度为  $6\ \text{mol/L}$  的  $\text{HNO}_3$  中,在恒温水浴锅中  $80\ ^\circ\text{C}$  加热,使其充分溶解。依次加入称量好的柠檬酸(与目标粉体的量比为  $1.5:1$ )和聚乙二醇(稀土金属硝酸盐质量总和的  $1/9$ ),使其在溶液中充分溶解,形成透明溶液。加去离子水至  $150\ \text{mL}$ ,待溶液冷却至室温后,向其中加入浓氨水,调节溶液的  $\text{pH}$  值为  $8$ 。将溶液放在恒温磁力搅拌器上  $60\ ^\circ\text{C}$  搅拌至形成凝胶,  $280\ ^\circ\text{C}$  恒温干燥  $2\ \text{h}$ ,得到灰黑色粉末。将上述得到的粉末充分研磨后,在马弗炉中  $800\sim 1\ 100\ ^\circ\text{C}$  恒温煅烧  $2\ \text{h}$ ,得到  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  纳米粉体。

### 2.2 样品表征

采用 D/max-IIIB 型 X 射线衍射仪分析  $\text{La}^{3+}$  掺杂量不同对  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体结构的影响。用 XL30ESEM-FEG 型场发射扫描电镜观察不同煅烧温度制得的  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体的形貌。用 F-7000 型荧光光谱仪分析  $\text{Ho}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂量不同对  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体的激发和发射光谱的影响。采用 TRIAX541 型荧光光谱仪分析  $\text{Ho}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂量不同对  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体的上转换光谱的影响,激发光波长为  $980\ \text{nm}$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 煅烧温度的选取

图 1 和图 2 分别为不同温度煅烧得到的  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体的 XRD 谱图和 SEM 照片 ( $\text{La}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$  的摩尔分数分别为  $10\%$ 、 $1\%$ 、 $7\%$ )。图 1 显示不同煅烧温度得到的样品的衍射峰位置与立方相  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  的标准卡片 (JCPDS No. 12-0728) 基本一致,说明得到的目标粉体为立方晶系。随着煅烧温度的升高,粉体衍射峰的强度先增强后减弱,在  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  时达到最高,说明该煅烧温度下制得的粉体结晶度相较其他 3 组样品更高。图 2 中  $800\ ^\circ\text{C}$  时制得的粉体颗粒多呈现片状,大小不均匀; $900\ ^\circ\text{C}$  时的颗粒大小均匀,但团聚现象仍很严重; $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  时的粉体颗粒形状较为规则,团聚较少,平均粒径约为  $55\ \text{nm}$ ,其形貌是 4 组样品中最好的; $1\ 100\ ^\circ\text{C}$  时的粉体团聚现象相比  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  时有所加剧。综合图 1 和图 2,选定  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  为  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体制备的条件。

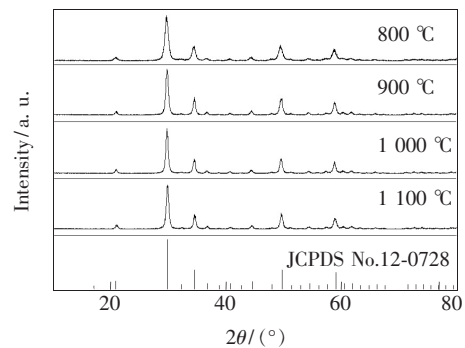


图 1 不同温度煅烧得到的  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  powders calcined at different temperature

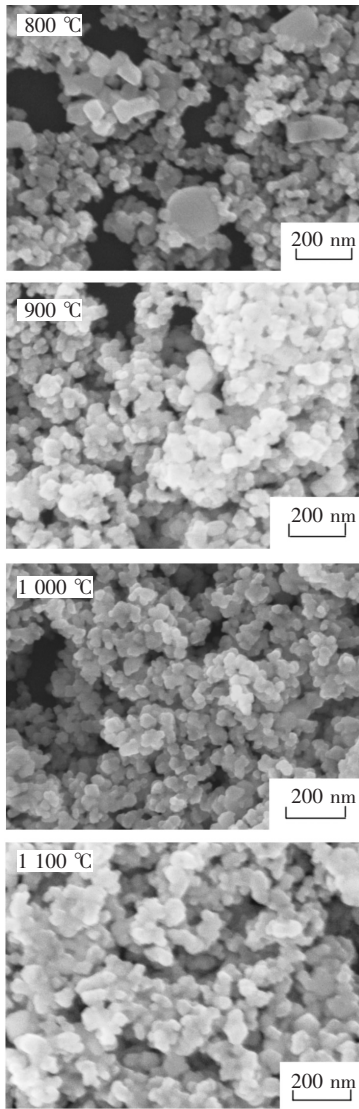


图 2 不同温度煅烧得到的 Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体的 SEM 图

Fig. 2 SEM photographs of Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders calcined at different temperature

### 3.2 La<sup>3+</sup> 摩尔分数的选取

图 3 为掺杂不同 La<sup>3+</sup> 摩尔分数的 Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体的 XRD 谱图(Ho<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup> 的摩尔分数分别为 1%、7%), 图中  $x(\text{La}^{3+})$  代表 La<sup>3+</sup> 的掺杂摩尔分数。由图 3 可以看出, La<sup>3+</sup> 摩尔分数为 5% 和 10% 时样品的衍射峰峰型尖锐无杂峰, 其位置均与 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 标准卡片(JCPDS No. 12-0728) 基本一致。La<sup>3+</sup> 掺杂摩尔分数为 15% ~ 25% 时样品的衍射峰出现劈裂, 说明该条件制得的 Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体出现晶格畸变。本研究选取 La<sup>3+</sup> 摩尔分数 10% 为 Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体的制备组成。

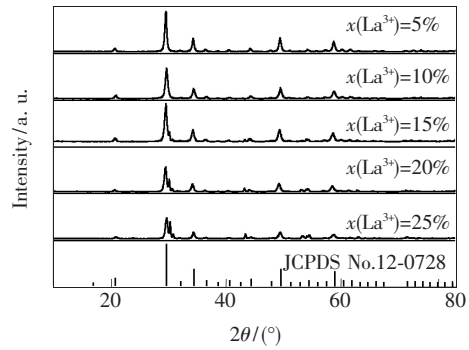


图 3 掺杂不同 La<sup>3+</sup> 摩尔分数的 Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体的 XRD 谱图

Fig. 3 XRD patterns of Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders doped with different La<sup>3+</sup> amounts

### 3.3 Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体的激发和发射光谱

图 4 是掺杂不同 Ho<sup>3+</sup> 摩尔分数的 Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体的激发和发射光谱, 图中  $x(\text{Ho}^{3+})$  代表 Ho<sup>3+</sup> 的掺杂摩尔分数。图 4(a) 显示在 360, 449, 464 nm 处出现较强激发峰, 分别归属于 Ho<sup>3+</sup> 的 <sup>5</sup>I<sub>8</sub> → <sup>3</sup>H<sub>6</sub>、<sup>5</sup>I<sub>8</sub> → <sup>5</sup>G<sub>6</sub>/<sup>5</sup>F<sub>1</sub>、<sup>5</sup>I<sub>8</sub> → <sup>5</sup>F<sub>2</sub> 跃迁<sup>[7-10]</sup>。图 4(b) 显示在 449 nm 波长激发下, 粉体发出 538 nm、

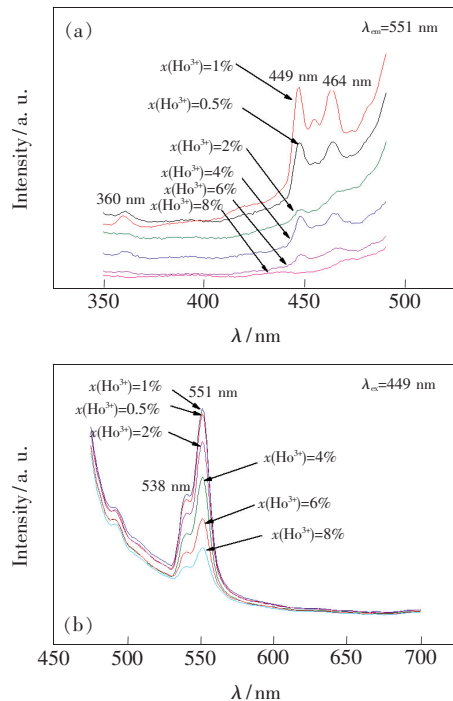


图 4 掺杂不同 Ho<sup>3+</sup> 摩尔分数的 Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体的激发(a)和发射(b)光谱

Fig. 4 Excitation (a) and emission (b) spectra of Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders doped with different Ho<sup>3+</sup> amounts

551 nm 的绿光, 归属于  $\text{Ho}^{3+}$  的  $^5\text{S}_2/^5\text{F}_4 \rightarrow ^5\text{I}_8$  能级跃迁<sup>[11]</sup>。激发峰和发射峰强度随  $\text{Ho}^{3+}$  掺杂量增加而变化的趋势一致, 都是先增强后减弱, 在  $\text{Ho}^{3+}$  摩尔分数为 1% 时强度达到最高值。  $\text{Ho}^{3+}$  掺杂量增加反而导致发光强度减弱, 这是由于随着  $\text{Ho}^{3+}$  浓度增大,  $\text{Ho}^{3+} - \text{Ho}^{3+}$  间距变小,  $\text{Ho}^{3+}$  间的交叉弛豫过程使得发光强度降低, 出现浓度猝灭的现象。

图 5 为掺杂不同  $\text{Yb}^{3+}$  摩尔分数的  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体的激发和发射光谱, 图中  $x(\text{Yb}^{3+})$  代表  $\text{Yb}^{3+}$  的掺杂摩尔分数。图 5(a) 显示在 360, 449, 464 nm 处出现较强激发峰, 峰的位置与图 4(a) 一致。图 5(b) 显示激发波长 449 nm 时发出 538 nm、551 nm 的绿光, 发射峰强度随  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂量增加而变化的趋势与图 5(a) 中激发峰强度变化趋势一致, 均随  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂量的增加而逐渐减弱。

对比图 4 和图 5 可以看出,  $\text{Ho}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂量的不同并没有改变激发峰和发射峰的形状与位置。

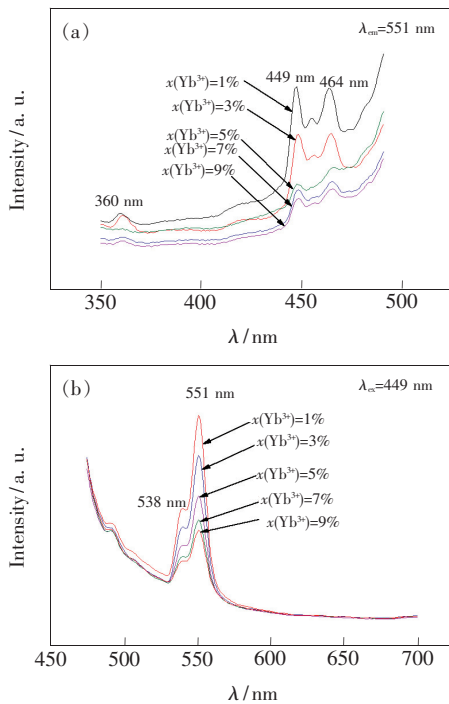


图 5 掺杂不同  $\text{Yb}^{3+}$  摩尔分数的  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体的激发 (a) 和发射 (b) 光谱

Fig. 5 Excitation (a) and emission (b) spectra of  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  doped with different  $\text{Yb}^{3+}$  amounts

### 3.4 $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$ 粉体的上转换光谱

图 6 为掺杂不同  $\text{Ho}^{3+}$  摩尔分数的  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体在 980 nm 激发源激发下得到的上转换光谱 ( $\text{Yb}^{3+}$  摩尔分数为 7%)。图 6 显示, 在 484 nm ( $^5\text{F}_3 \rightarrow ^5\text{I}_8$ )、551 nm ( $^5\text{S}_2/^5\text{F}_4 \rightarrow ^5\text{I}_8$ )、660 nm ( $^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8$ ) 处出现较强发射峰。绿光强度随  $\text{Ho}^{3+}$  掺杂量的升高, 先增大后减小, 在  $\text{Ho}^{3+}$  摩尔分数为 1% 时达到最高。说明  $\text{Ho}^{3+}$  摩尔分数大于 1% 时, 绿光发射随着  $\text{Ho}^{3+}$  掺杂量增加出现浓度猝灭现象。同时随着  $\text{Ho}^{3+}$  掺杂量的增加, 蓝光与绿光的强度比逐渐增大, 说明在 980 nm 光激发下,  $\text{Ho}^{3+}$  在  $^5\text{F}_3$  与  $^5\text{S}_2/^5\text{F}_4$  能级上的相对布居逐渐增大。660 nm 红光发射峰在  $\text{Ho}^{3+}$  摩尔分数为 0.5% 和 1% 时出现 Stark 分裂。综合  $\text{Ho}^{3+}$  掺杂摩尔分数不同的粉体的发射光谱表现, 确定  $\text{Ho}^{3+}$  摩尔分数为 1% 时更适宜制备光学性能较好的粉体<sup>[12]</sup>。

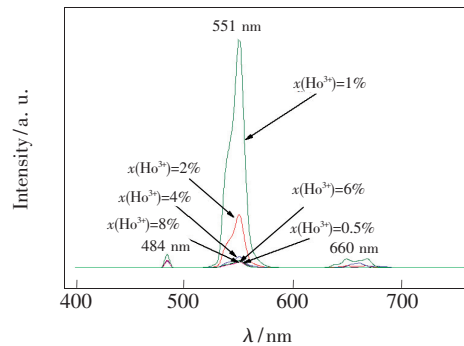


图 6 掺杂不同  $\text{Ho}^{3+}$  摩尔分数的  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体的上转换光谱

Fig. 6 Upconversion spectra of  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  doped with different  $\text{Ho}^{3+}$  amounts

图 7 为掺杂不同  $\text{Yb}^{3+}$  摩尔分数的  $\text{Ho, Yb: (LaLu)}_2\text{O}_3$  粉体在 980 nm 激发下得到的上转换光谱 ( $\text{Ho}^{3+}$  的摩尔分数为 1%)。图 7 中出现与图 6 形状、位置都相同的发射峰。图 7 中, 当  $\text{Yb}^{3+}$  摩尔分数从 1% 增加至 9% 时, 蓝光发射峰的强度几乎没有变化, 而绿光发射峰的强度则先增强后减弱, 在  $\text{Yb}^{3+}$  摩尔分数为 7% 时, 绿光强度达最高值。660 nm 处红光强度相比于蓝光和绿光要弱得多, 说明此时  $\text{Ho}^{3+}$  在  $^5\text{F}_5$  能级上的布居相对  $^5\text{S}_2/^5\text{F}_4$  能级要少很多。综合确定  $\text{Yb}^{3+}$  摩尔分数为 7% 时更适宜制备光学性能较好的粉体。

图 8 是  $\text{Ho}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  的能级图。由图 8 可以看出, 绿光的上转换发光机制为: (1)  $\text{Yb}^{3+}$  吸收 980 nm 激光器激发的光子, 发生  $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$  能级跃迁; (2)  $\text{Ho}^{3+}$  的  $^5\text{I}_8$  能级吸收来自  $\text{Yb}^{3+}$  的  $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$



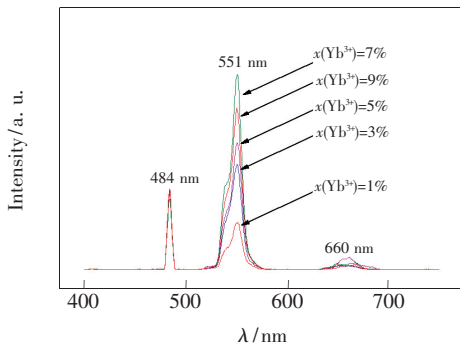


图7 掺杂不同Yb<sup>3+</sup>摩尔分数的Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉体的上转换光谱

Fig. 7 Upconversion spectrum of Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped with different Yb<sup>3+</sup> amounts

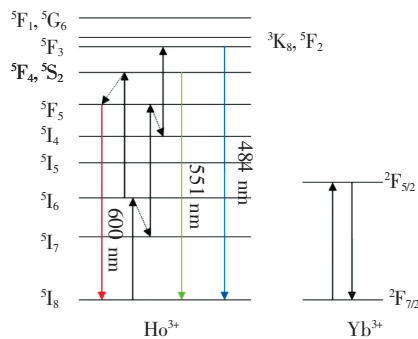


图8 Ho<sup>3+</sup>和Yb<sup>3+</sup>的能级图

Fig. 8 Schematic diagram for energy level transitions of Ho<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup>

能级跃迁的能量, 跃迁至<sup>5</sup>I<sub>6</sub>能级; (3) Ho<sup>3+</sup>的<sup>5</sup>I<sub>6</sub>能级再吸收来自Yb<sup>3+</sup>的<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>→<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>能级跃迁的

能量, 跃迁至<sup>5</sup>S<sub>2</sub>/<sup>5</sup>F<sub>4</sub>能级, 发生<sup>5</sup>S<sub>2</sub>/<sup>5</sup>F<sub>4</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>能级跃迁, 发出551 nm绿光。

660 nm红光辐射的机理为: Ho<sup>3+</sup>的<sup>5</sup>S<sub>2</sub>/<sup>5</sup>F<sub>4</sub>能级无辐射跃迁至<sup>5</sup>F<sub>5</sub>能级, 发生<sup>5</sup>F<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>能级跃迁, 发出红光<sup>[13]</sup>。484 nm蓝光发射的过程: Ho<sup>3+</sup>的<sup>5</sup>I<sub>6</sub>能级无辐射跃迁至<sup>5</sup>I<sub>7</sub>能级; <sup>5</sup>I<sub>7</sub>能级吸收Yb<sup>3+</sup>的<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>→<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>能级跃迁的能量, 跃迁至<sup>5</sup>F<sub>5</sub>能级; <sup>5</sup>F<sub>5</sub>能级无辐射跃迁至<sup>5</sup>I<sub>4</sub>, 再吸收Yb<sup>3+</sup>的<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>→<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>能级跃迁的能量, 跃迁至<sup>5</sup>F<sub>3</sub>能级, 然后发生<sup>5</sup>F<sub>3</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>能级跃迁, 发出蓝光<sup>[14]</sup>。

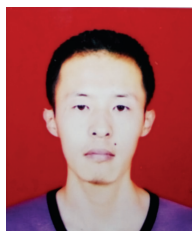
## 4 结 论

采用柠檬酸燃烧法制备了Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉体, 并确定了粉体制备的适宜条件: 煅烧温度为1 000 °C, La<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>的摩尔分数分别为10%、1%、7%。Ho, Yb: (LaLu)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉体在449 nm光激发下得到的发射光谱显示, Ho<sup>3+</sup>和Yb<sup>3+</sup>掺杂量的改变并没有引起发射峰形状和位置的改变, 随着Ho<sup>3+</sup>和Yb<sup>3+</sup>掺杂量的增加, 发射峰的强度先增强后减弱。980 nm光激发得到的上转换光谱显示, 粉体发出484 nm蓝光、551 nm绿光、660 nm红光。随着Ho<sup>3+</sup>掺杂量的增大, 晶体场发生变化, 980 nm光激发条件下, Ho<sup>3+</sup>在<sup>5</sup>F<sub>3</sub>与<sup>5</sup>S<sub>2</sub>/<sup>5</sup>F<sub>4</sub>能级上的相对布居逐渐增大, 使得蓝光与绿光的强度比逐渐增大。

## 参 考 文 献:

- [1] SEELEY Z M, DAI Z R, KUNTZ J D, *et al.*. Phase stabilization in transparent Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu ceramics by lattice expansion [J]. *Opt. Mater.*, 2012, 35:74-78.
- [2] HUANG D D, YANG Q H, WANG Y G, *et al.*. Spectral and laser properties of Yb and Ho co-doped (YLa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramic [J]. *Chin. Phys. B*, 2013, 22(3):037801-1-3.
- [3] LI W J, ZHOU S M, LIU N, *et al.*. Synthesis and spectral properties of Yb<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> co-doped yttria 2 μm transparent ceramics [J]. *Mater. Lett.*, 2010, 64:1344-1346.
- [4] SANGHERA J, FRANTZ J, WOOHONG K, *et al.*. 10% Yb<sup>3+</sup>-Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser with 74% efficiency [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(4):576-578.
- [5] IVANOV M, KOPYLOV Y, KRAVCHENKO V, *et al.*. Highly transparent ytterbium doped yttrium lanthanum oxide ceramics [J]. *J. Rare Earth*, 2014, 32(3):254-258.
- [6] LIN H, XU D K, TENG D D, *et al.*. Tunable multicolor and white-light upconversion luminescence in Yb<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> tri-doped NaYF<sub>4</sub> microcrystals [J]. *Res. Article*, 2015, 30:723-728.
- [7] 程宇琪, 李成仁, 牛淑云, 等. Ho<sup>3+</sup>单掺杂及其与Yb<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup>共掺杂硼硅酸盐玻璃上转换发光的光谱分析 [J]. *发光学报*, 2011, 32(5):433-439.

- CHENG Y Q, LI C R, NIU S Y, *et al.*. Spectral analysis of  $\text{Ho}^{3+}$ -doped and  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$  co-doped upconversion luminescence borosilicate glass [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(5):433-439. (in Chinese)
- [ 8 ] DEY C, KARMAKAR B. Enhanced green and orange photoluminescence of nanostructured CdS in glass nanocomposites by energy transfer From  $\text{Ho}^{3+}$  and  $\text{Eu}^{3+}$  ions [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2017, 32(1):1-7.
- [ 9 ] 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)
- [ 10 ] 冯治刚,夏海平,王成,等.  $\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  共掺  $\alpha\text{-NaYF}_4$  单晶体的光谱特性 [J]. *光子学报*, 2016, 45(5):0516005.
- FENG Z G, XIA H P, WANG C, *et al.*. Spectral properties of  $\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  co-doped  $\alpha\text{-NaYF}_4$  single crystals [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(5):0516005. (in Chinese)
- [ 11 ] VELÁZQUEZ J J, YANES A C, DEL CASTILLO J, *et al.*. Optical properties of  $\text{Ho}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$  co-doped nanostructured  $\text{SiO}_2\text{-LaF}_3$  glass-ceramics prepared by sol-gel method [J]. *Phys. Stat. Sol.*, 2007, 204(6):1762-1768.
- [ 12 ] LIM C S. Microwave-modified sol-gel process for microcrystalline  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2:\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  phosphors and their upconversion photoluminescence properties [J]. *J. Korean Ceram. Soc.*, 2015, 52(6):514-520.
- [ 13 ] ZHANG J Z, XIA H P, JIANG Y Z, *et al.*. Growth and down conversion luminescence of  $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped  $\alpha\text{-NaYF}_4$  single crystals by the Bridgman method using a KF flux [J]. *Cryst. Res. Technol.*, 2015, 50(7):574-579.
- [ 14 ] LIU M, WANG S W, TANG D Y, *et al.*. Preparation and upconversion luminescence of  $\text{YAG}(\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}):\text{Yb}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$  nanocrystals [J]. *J. Rare Earth*, 2009, 27(1):66-70.



李剑(1991 -),男,山西长治人,硕士研究生,2015年于晋中学院获得学士学位,主要从事无机光电功能材料的研究。

E-mail: 15714402161@163.com



朱忠丽(1972 -),女,吉林长春人,博士,教授,2005年于长春理工大学获得博士学位,主要从事无机光电功能材料的研究。

E-mail: zhuzhongli@126.com