

文章编号: 1000-7032(2015)11-1240-06

笼中阴离子基团对 Nd^{3+} 掺杂 C12A7 粉体红外发光的影响

陈雪岩, 杨 健, 张 猛, 祝汉成, 严端廷, 刘春光, 徐长山, 刘玉学*
(东北师范大学 物理学院, 吉林 长春 130024)

摘要: 采用自蔓延燃烧法制备了不同 Nd^{3+} 掺杂浓度的具有笼状结构的 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$) 粉体材料。在 808 nm 波长的激发下, 观测到了位于 887, 1 069, 1 340 nm 附近的 3 个近红外发射峰, 分别归属于 Nd^{3+} 的 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{J/2}$ ($J=9, 11, 13$) 跃迁。 Nd^{3+} 掺杂摩尔分数达到 0.5% 时, 红外光发射较强, 且没有观察到杂质相。在 H_2 气氛下对样品进行 1 300 °C 热处理之后, 笼中 OH^- 和 H^- 浓度增加, 笼子发生畸变, 晶粒尺寸变大, 样品的结晶性变好。通过在空气下热处理, 减少了高能振动基团 OH^- 的数目, 进一步增强了近红外光发射。变温光致发光谱测量结果表明, C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ 样品具有较高的热激活能, 在红外激光器上有潜在的应用前景。

关键词: C12A7; Nd^{3+} ; 笼中阴离子; 红外发光

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20153611.1240

Effect of Encaged-anion Groups on Infrared Luminescence of C12A7: Nd^{3+} Powders

CHEN Xue-yan, YANG Jian, ZHANG Meng, ZHU Han-cheng, YAN Duan-ting,
LIU Chun-guang, XU Chang-shan, LIU Yu-xue*

(School of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

* Corresponding Author, E-mail: yxliu@nenu.edu.cn

Abstract: C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ powders with unique nanocaged structure were synthesized by self-propagating combustion method. Upon 808 nm excitation, we can observe three peaks at 887, 1 069, 1 340 nm attributed to the transition ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{J/2}$ ($J = 9, 11, 13$) of Nd^{3+} , respectively. When Nd^{3+} mole fraction is 0.5%, the intense infrared luminescence can be obtained and no impurity phase is observed. After the annealing in H_2 ambient, the encaged OH^- and H^- concentrations and the grain size of C12A7 increase and the cages are distorted. The improvement of the crystallinity and the decrease of the non-radiative transition rate can enhance the near-infrared luminescence after the annealing in air. Based on the temperature-dependent emission spectra, the high thermal activation energies are obtained, indicating that C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ have potential applications in infrared laser.

Key words: C12A7; Nd^{3+} ; encaged anion; infrared luminescence

收稿日期: 2015-08-04; 修订日期: 2015-09-11

基金项目: 国家自然科学基金 (11074031, 11374047, 11304036) 资助项目

1 引言

基于稀土离子 Nd^{3+} 掺杂 YAG 和 YVO_4 氧化物的固体激光器在医疗、军事、材料加工等领域有重要的应用^[1-4]。特别是 Nd^{3+} 掺杂铝酸盐材料因发光效率高、化学性质稳定, 已得到广泛的应用^[5], 但该类材料同时存在制备温度较高、工艺复杂等缺点。为降低制备成本和简化工艺, 迫切需要获得新型 Nd^{3+} 掺杂铝酸盐基质材料。目前, 关于 Nd^{3+} 掺杂铝酸盐材料的研究主要围绕在探讨发光性质与晶粒尺寸、制备条件和掺杂机制等因素的依赖关系方面^[6-10], 关于铝酸盐基质中高能振动基团和 Nd^{3+} 周围局域环境对红外发光的影响还缺乏较系统的研究。具有笼状结构的 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C12A7) 材料是可能解决上述两个问题的较佳基质候选材料。C12A7 制备温度较低、成本低廉^[11], 目前已实现了 Er^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Sm^{3+} 等稀土离子的掺杂, 获得了较强的光发射^[12-15]。C12A7 具有独特的笼状结构, 弱束缚在笼中的 O^{2-} 能够被电子和 OH^- 、 H^- 等阴离子取代^[16], 从而调控 Nd^{3+} 离子周围的局域环境, 对红外发光产生影响。

本文采用自蔓延燃烧法制备了不同 Nd^{3+} 掺杂浓度的 C12A7: Nd^{3+} 发光材料。在 808 nm 激光的激发下, 观察到了位于近红外区的 887, 1 069, 1 340 nm 的 3 个 Nd^{3+} 发射峰。通过在 H_2 气氛下进行热处理, 笼中引入了高能振动基团 OH^- , 增加了晶粒尺寸, 获得了较强的近红外发光。随后, 对样品在空气下 400 °C 退火 1 h, 减少了高能振动基团 OH^- 的数目, 进一步增强了近红外光发射。对 C12A7: 0.5% Nd^{3+} 发光热稳定性的测试结果表明, 样品具有较高的热激活能, 在新型激光器上具有潜在的应用前景。

2 实验

2.1 材料制备

采用自蔓延燃烧法合成 C12A7: $x\%$ Nd^{3+} ($x = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$) 粉体。将原料 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (99.99%)、 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (99.99%)、 $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99.99%)、尿素、 β -丙氨酸按化学计量比称重, 放入氧化铝坩埚中, 于 60 °C 下加热并不断搅拌至原料充分溶化, 然后迅速放入高温炉中, 在 700 °C 自蔓延燃烧。将研磨后的燃

烧产物在空气中 1 000 °C 煅烧 6 h 以去除粉末中的有机物, 降至室温, 充分研磨后得到 Nd^{3+} 掺杂的七铝酸十二钙粉体 (C12A7: Nd^{3+})。为获得具有不同笼中 OH^- 浓度的样品, 将 C12A7: 0.5% Nd^{3+} 的样品在 H_2 气氛下 (20% H_2 /80% N_2 的混合气体) 退火 4 h, 随后再在空气气氛下 400 °C 热处理 1 h。

2.2 样品表征

采用日本理学电机工业株式会社的 D/MAX-2500 X 型 X 射线粉末衍射仪对样品进行物相结构分析, 辐射源为 Cu 靶 $\text{K}\alpha$ 射线 ($\lambda = 0.154 18 \text{ nm}$), 工作电压为 40 kV, 电流为 100 mA。利用美国 FEI 公司生产的 Quanta FEG 250 型扫描电子显微镜获得样品的表面形貌照片。利用北京卓立汉光仪器有限公司的 $\lambda 300$ 型光谱仪 (DIn-GaAs2600-TE 探测器) 测量样品的荧光发射光谱。利用德国 InnoLas 公司的光学参量振荡器和 LeCroy 公司的 62MXs-B 示波器测试样品寿命 (泵浦激光器为德国 InnoLas 公司 SpitLight 600YAG: Nd 激光器, 泵浦波长 355 nm, 脉冲宽度 7 ns, 探测使用滨松公司的 CR131A 光电倍增管)。所有测试均在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 XRD 与 SEM 结果分析

图 1 为不同 Nd^{3+} 摩尔分数掺杂的样品在 1 000 °C 煅烧 6 h 后的 XRD 谱。从图中可以看出, Nd^{3+} 摩尔分数在 0.1% ~ 0.5% 的样品 XRD 谱

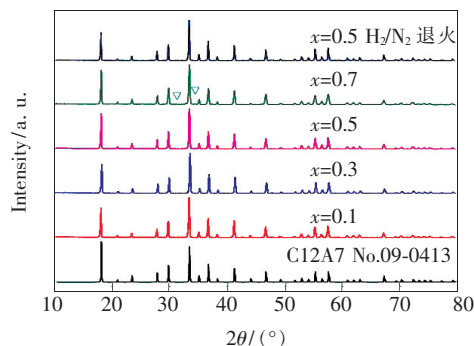


图 1 1 000 °C 煅烧 6 h 的 C12A7: $x\%$ Nd^{3+} ($x = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$) 样品的 XRD 谱及在 H_2 气氛下 1 300 °C 退火 4 h 样品的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of C12A7: $x\%$ Nd^{3+} ($x = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$) powders calcined at 1 000 °C for 6 h, and XRD patterns of C12A7: 0.5% Nd^{3+} powders annealed in H_2 atmosphere at 1 300 °C for 4 h.

中的衍射峰与标准卡片 JCPDS No. 09-0413 数据相一致,未观察到其他杂质的衍射峰,表明我们获得了较纯相的 C12A7。C12A7 中存在铝和钙两种阳离子,其离子半径分别为 0.039 nm (Al^{3+}) 和 0.099 nm (Ca^{2+}),由于 Nd^{3+} (0.098 nm) 的离子半径和 Ca^{2+} 的离子半径非常相近,故 Nd^{3+} 容易取代 Ca^{2+} 的格位掺到 C12A7 晶格中^[17]。当 Nd^{3+} 摩尔分数为 0.7% 时,一部分 Nd^{3+} 没有掺杂到 C12A7 的晶格中去,出现 $\text{CaNdAl}_3\text{O}_7$ 和 CaNdAlO_4 杂质衍射峰。

图 2 给出了 C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ ($x = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$) 粉末样品的 SEM 图像,图 2(a)、(c)、(e)、(g) 为空气中 1 000 °C 煅烧 6 h 的粉末样品;图 2(b)、(d)、(f)、(h) 为又经过 H_2 气氛下 1 300 °C 退火的粉末样品。对比后发现, H_2 退火后的所有样品的颗粒尺寸均增大,结晶性变好。

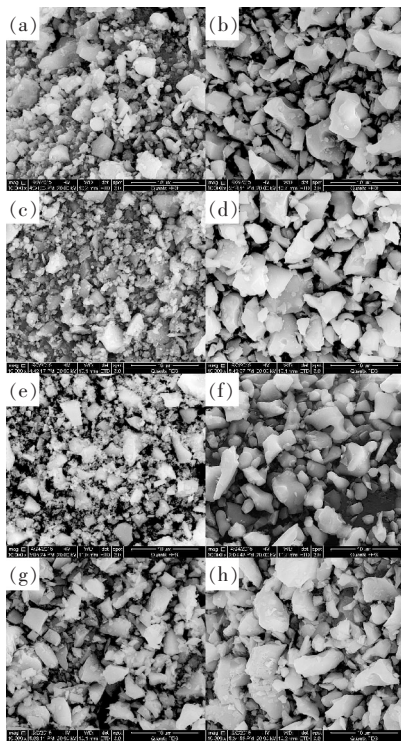


图 2 空气中 1 000 °C 煅烧 6 h 的 C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ 粉末样品的 SEM 图像, $x = 0.1$ (a), 0.3 (c), 0.5 (e), 0.7 (g); 以及 H_2 气氛下 1 300 °C 退火 4 h 的 C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ 粉末样品的 SEM 图像, $x = 0.1$ (b), 0.3 (d), 0.5 (f), 0.7 (h)。

Fig. 2 SEM images of C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ powders annealed at 1 000 °C in air for 6 h, $x = 0.1$ (a), 0.3 (c), 0.5 (e), 0.7 (g). And SEM images of C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ powders annealed at 1 300 °C in H_2 atmosphere for 4 h, $x = 0.1$ (b), 0.3 (d), 0.5 (f), 0.7 (h).

3.2 光致发光光谱分析

图 3(a) 是掺杂不同浓度 Nd^{3+} 样品的光致发光光谱。在 808 nm 激光激发下,观察到了 3 个发射峰,分别位于 887, 1 069, 1 340 nm 左右。最强光发射位于 1 069 nm, 所有的发射峰都归属为 Nd^{3+} 的特征发射^[18]。根据 Nd^{3+} 的电子跃迁对应的能级图(图 3(b)), 这些发射峰分别来源于 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ (887 nm)、 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ (1 069 nm) 和 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ (1 340 nm) 的能级跃迁。从图中可以看出,随着 Nd^{3+} 掺杂浓度的增加,样品中离子发光中心增多,发光强度逐渐增大。当 Nd^{3+} 摩尔分数达到 0.7% 时, Nd^{3+} 的发射强度达到最大,这可能是产生的杂质相导致的。此外,我们还观察到 Nd^{3+} 的每个发射峰都呈现多峰结构,其可归因于 Nd^{3+} 能级的 Stark 劈裂,这与 Benayas 等报道的 Nd^{3+} 掺杂 YAG 的结果相类似^[19]。

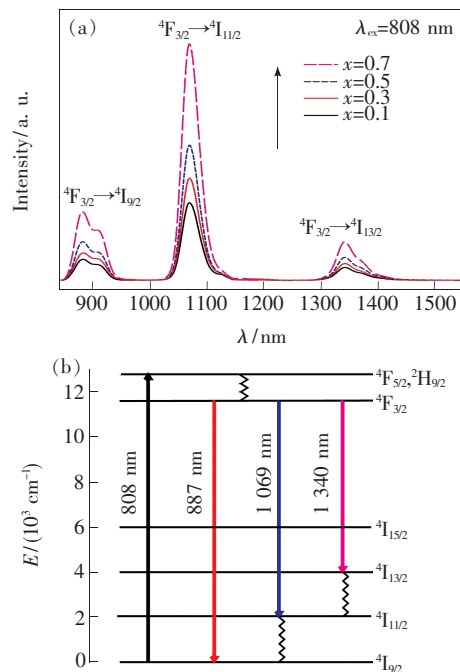
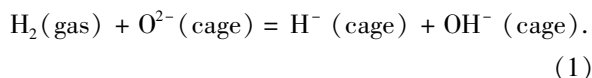


图 3 (a) 808 nm 激发下 C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ ($x = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$) 粉末的发射光谱; (b) 808 nm 激发下的 Nd^{3+} 能级图。

Fig. 3 (a) Emission spectra of C12A7: $x\% \text{Nd}^{3+}$ ($x = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$) powders under the excitation of 808 nm. (b) Energy level diagram of Nd^{3+} .

为了研究笼中阴离子基团的改变对 Nd^{3+} 近红外发光的影响,我们将 C12A7: 0.5% Nd^{3+} 的样品在 H_2 气氛下 1 300 °C 退火 4 h。退火后的样品仍然保持 C12A7 的纯相,如图 1 所示。此时 H^- 、

OH^- 被引入了纳米结构的笼子中, 反应方程式如下^[20]:



其光致发光谱如图 4 所示。由方程(1)可知, 退火处理后, 笼中引入了 OH^- 和 H^- 离子, 通常高能振动基团 OH^- 增多会显著地猝灭发光, 但是这里发光反而呈现增强的趋势。这种反常是高温退火后晶粒尺寸变大、结晶性变好导致的。以上结果与图 2 中电镜照片的结果是一致的。

为了进一步研究高能振动基团对 Nd^{3+} 在铝酸盐中发光的影响, 我们对退火后的 C12A7:0.5% Nd^{3+} 样品又在 400 °C 空气中加热 1 h, 发现 C12A7:0.5% Nd^{3+} 的 3 个近红外发射都进一步增强。根据文献[11], 方程式(1)存在逆过程, 即笼中 O^{2-} 浓度增加, 高能振动基团 OH^- 数目减少, 无辐射跃迁几率降低, 促使发光进一步增强。此外, 我们对空气下 400 °C 热处理样品的 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 的发射峰进行拟合, 发现可用峰值为 879 nm 和 910 nm 的两个发射峰来拟合, 如图 4 中插图所示。

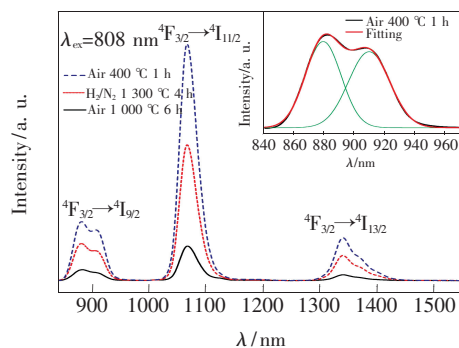


图 4 808 nm 激光激发下不同热处理条件下的 C12A7:0.5% Nd^{3+} 粉末的发射光谱。插图为空气下 400 °C 热处理样品的 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 发射峰的分峰拟合。

Fig. 4 Emission spectra of the annealed C12A7:0.5% Nd^{3+} samples upon 808 nm excitation. Inset is multi-peak separation of the emission spectrum of the annealed C12A7:0.5% Nd^{3+} at 400 °C by Gauss fitting.

3.3 发光动力学测试

为了进一步研究笼中阴离子基团对近红外发光的影响, 我们对 Nd^{3+} 掺杂摩尔分数为 0.5% 的样品的 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 的发光衰减过程进行了研究^[21]。我们用 580 nm 的脉冲激光激发样品, 为了避免 Stark 劈裂带来的影响, 选取 871 nm 作为监测波长(由图 4 插图所示, 位于 910 nm 的

发射峰在 871 nm 处光发射很弱, 这说明探测到的 871 nm 处的信号可认为均来源于位于 879 nm 的发射峰), 得到样品的荧光衰减曲线如图 5 所示。我们发现至少需要双 e 指数才能较好地拟合, 结果如表 1 所示。即: 所有 Nd^{3+} 的衰减可认为由两个过程组成, 说明 Nd^{3+} 至少处于两种不同的局域环境^[11], 这是 C12A7 笼中阴离子分布不均匀造成的。一种 Nd^{3+} 处于离 O^{2-} 较近的局域环境, 另一种处在离 OH^- 较近的局域环境。高能振动基团 OH^- 对 Nd^{3+} 的发光产生猝灭, 增加了无辐射跃迁几率, 所以在离 OH^- 较近的局域环境中的 Nd^{3+} 有较短的发光衰减时间(短寿命), 而离 O^{2-} 较近的局域环境中的 Nd^{3+} 有较长的发光衰减时间(长寿命)。我们发现: 当对空气中 1 000 °C 处理 6 h 的样品在氢气气氛下 1 300 °C 处理 4 h 后, 其短寿命从 3.2 μs 增加到 4.3 μs , 长寿命从 155.6 μs 增加到 175.9 μs 。结合电镜图片可以看出, 寿命的增加是 C12A7 粉末样品的结晶性变好导致的。随后在空气中 400 °C 热处理样品 1 h, 其长寿命从 175.9 μs 延长到 181.0 μs , 短寿命从 4.3 μs 延长到 4.6 μs 。这说明在空气下 400 °C 热处理发生了方程式(1)的逆过程, 即高能振动基团 OH^- 数目减少, 降低了无辐射跃迁几率, 从而使衰减时间增加, 导致近红外发光增强。这与图 4 中得到的结果是一致的。结果表明, 更好的结晶性和较低的无辐射跃迁几率是提高 Nd^{3+} 红外发光强度的有效手段。

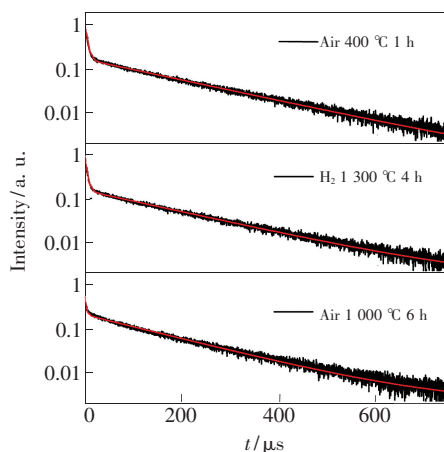


图 5 580 nm 激发的 871 nm 处的发光衰减曲线, 红线为双 e 指数寿命拟合结果。

Fig. 5 Decay curves of 871 nm emission of Nd^{3+} excited by 580 nm. The red line represents the fitting data using a bi-exponential function.

表 1 580 nm 激发下的样品的 871 nm 发射的寿命拟合参数

Table 1 Fitting parameters of the decay times of 871 nm emissions upon 580 nm excitation using a bi-exponential function

样品	$\tau_1/\mu\text{s}$	$\tau_2/\mu\text{s}$
Air 1 000 °C 6 h	3.2	155.6
H ₂ 1 300 °C 4 h	4.3	175.9
Air 400 °C 1 h	4.6	181.0

3.4 变温光致发光

为了研究样品的光致发光的热稳定性,我们在 808 nm 激光激发下对不同热处理的 C12A7:0.5% Nd³⁺ 样品进行了变温光致发光光谱测试。如图 6 所示,随着温度从室温升高到 483 K, Nd³⁺ 发射光谱中的 3 个发射峰的位置均无明显的移动,各峰峰形和相对强度也无明显的变化,但近红外发光强度随着温度的升高而降低。图 6 中插图部分为 1 069 nm 发光峰的相对积分强度随温度的变化曲线,红线是基于公式(2)的拟合结果:

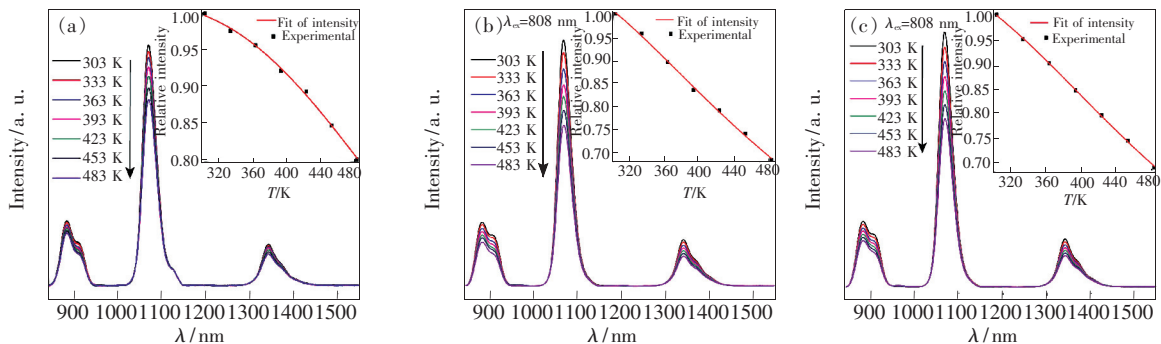


图 6 808 nm 激光激发不同条件热处理的 C12A7:0.5% Nd³⁺ 粉末的变温发射光谱。(a)空气中 1 000 °C 热处理 6 h;(b) H₂ 气氛下 1 300 °C 热处理 4 h;(c)空气中 400 °C 热处理 1 h。

Fig. 6 Temperature-dependent emission spectra of C12A7:0.5% Nd³⁺ annealed at different conditions under 808 nm excitation.

(a) 1 000 °C in air for 6 h. (b) 1 300 °C in H₂ atmosphere for 4 h. (c) 400 °C in air for 1 h.

4 结 论

采用自蔓延燃烧法制备了不同 Nd³⁺ 掺杂浓度的 C12A7:x% Nd³⁺ 粉体。在 808 nm 激光的激发下,C12A7:0.5% Nd³⁺ 得到了较强红外光发射。在 H₂ 气氛下对样品进行 1 300 °C 热处理,笼中引入了高能振动基团 OH⁻,研究了高能振动基团对

$$I(T) = I_0 / (1 + De^{-E_A/kT}), \quad (2)$$

公式中的 $I(T)$ 是发光峰的积分强度, D 是热激活能速率常数, I_0 是低温时的发光强度, K 是波尔兹曼常数, E_A 是热激活能^[22]。对实验数据拟合后,得到样品的热激活能 E_A 分别为 161.6, 117.6, 126.1 meV。我们发现,当对空气中 1 000 °C 处理 6 h 的样品在氢气气氛下 1 300 °C 处理 4 h 后,样品的热激活能减小,这可能是 O²⁻ 的浓度减少、笼中 H⁻ 和 OH⁻ 的浓度增加造成的。随后,我们在空气中 400 °C 热处理样品 1 h,样品的热激活能又增大。这是方程式(1)的逆过程发生,笼中 O²⁻ 的浓度增加、H⁻ 和 OH⁻ 的浓度减小导致的。热激活能随热处理过程的变化是与发光动力学测试的分析结果相一致的,可见笼中阴离子的变化可以对热激活能产生调制作用。我们还发现,所有样品的热激活能都在 110 meV 以上,表明 C12A7: Nd³⁺ 粉体热稳定性较好,其在固体激光器领域具有潜在的应用前景。

铝酸盐中 Nd³⁺ 红外发光的影响。通过发光动力学测试发现,更好的结晶性和较低的无辐射跃迁几率将进一步提高 Nd³⁺ 红外发光强度。对 C12A7:0.5% Nd³⁺ 样品的发光热稳定性测试结果表明,样品的热激活能均在 110 meV 以上,具有较好的热稳定性,在新型激光器开发上有潜在的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] Tajiri K, Daikuzono N, Joffe S N, *et al.* Photoradiation therapy in early gastrointestinal cancer [J]. *Gastrointest. Endosc.*, 1987, 33(2):88-90.
- [2] Taari K, Salo J, Kivisaari L, *et al.* Contact fibre Nd:YAG laser for partial nephrectomy: experimental study in pigs [J].

- Urol. Res.*, 1993, 21(4):301-304.
- [3] Quintino L, Miranda R M. Welding shape memory alloys with Nd: YAG lasers [J]. *Soldag. Insp.*, 2012, 17(3): 210-217.
- [4] Barbucha R, Kocik M, Tański M, *et al.* Femtosecond laser system for micromachining of the materials [J]. *SPIE*, 2014, 9447:94470J-1-6.
- [5] Yan Z. Emission stimulated by infrared radiation for some aluminate phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2001, 22(1):59-61 (in Chinese).
- [6] Ikesue A, Yoshida K. Influence of pore volume on laser performance of Nd: YAG ceramics [J]. *J. Mater. Sci.*, 1999, 34(6):1189-1195.
- [7] Kosyanov D Y, Baumer V N, Yavetskiy R P, *et al.* Nd³⁺: Y₃Al₅O₁₂ laser ceramics: Influence of the size of yttrium oxide particles on sintering [J]. *Crystallogr. Rep.*, 2015, 60(2):299-305.
- [8] Zhang X, Liu D, Wang J, *et al.* Fabrication and laser output of transparent Nd: YAG ceramics from microwave synthesized precursors [J]. *Rare Metals*, 2011, 30(6):607-615.
- [9] Yavetskiy R P, Baumer V N, Doroshenko A G, *et al.* Phase formation and densification peculiarities of Y₃Al₅O₁₂: Nd³⁺ during reactive sintering [J]. *J. Cryst. Growth*, 2014, 401:839-843.
- [10] Lupei A, Lupei V, Gheorghie C, *et al.* Disorder effects in Nd³⁺ doped strontium hexa-aluminate laser crystals [J]. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2006, 18(2):597-611.
- [11] Bian H Y, Liu Y X, Yan D T, *et al.* Spectral modulation through controlling anions in nanocaged phosphors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2013, 1(47):7896-7903.
- [12] Wang D, Liu Y X, Liu Y C, *et al.* Preparation and visible emission of Er-doped 12CaO · 7Al₂O₃ powder [J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2008, 8(3):1458-1463.
- [13] Sun J, Wang R, Wu L, *et al.* Preparation and upconversion luminescence characterization of Tm³⁺: Yb³⁺: Er³⁺: C12A7 polycrystal [J]. *Sci. Adv. Mater.*, 2012, 4(5-6):669-672.
- [14] Liu C G, Liu Y X, Wang D, *et al.* Characterization and luminescence of Eu³⁺ ions doped 12CaO · 7Al₂O₃ nanopowders [J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2011, 11(11):9946-9952.
- [15] Zhang X Y, Sun S Q, Yan D T, *et al.* Synthesis and photoluminescence characteristics of 12CaO · 7Al₂O₃/5CaO · 3Al₂O₃: Sm³⁺ red phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(8):911-916 (in Chinese).
- [16] Hayashi K, Sushko P V, Ramo D M, *et al.* Nanoporous crystal 12CaO · 7Al₂O₃: A playground for studies of ultraviolet optical absorption of negative ions [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2007, 111(8):1946-1956.
- [17] Gong L, Lin Z, Ning S, *et al.* Synthesis and characteristics of the C₁₂A₇-O⁻ nanoparticles by citric acid sol-gel combustion method [J]. *Mater. Lett.*, 2010, 64(11):1322-1324.
- [18] Harmer A, Linz A, Gabbe D. Fluorescence of Nd³⁺ in lithium yttrium fluoride [J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 1969, 30(6):1483-1491.
- [19] Benayas A, Del Rosal B, Pérez-Delgado A, *et al.* Nd: YAG near-infrared luminescent nanothermometers [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2015, 3(5):687-694.
- [20] Hayashi K, Matsuishi S, Kamiya T, *et al.* Light-induced conversion of an insulating refractory oxide into a persistent electronic conductor [J]. *Nature*, 2002, 419(6906):462-465.
- [21] Shanmugavelu B, Venkatramu V, Ravi Kanth Kumar V V. Optical properties of Nd³⁺ doped bismuth zinc borate glasses [J]. *Spectrochim. Acta A*, 2014, 122:422-427.
- [22] Đačanin L R, Lukić-Petrović S, Petrović D, *et al.* Temperature quenching of luminescence emission in Eu³⁺ and Sm³⁺ doped YNbO₄ powders [J]. *J. Lumin.*, 2014, 151:82-87.



陈雪岩 (1991 -), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 2013 年于湖南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: chenxy513@nenu.edu.cn



刘玉学 (1967 -), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 2001 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, 主要从事新型氧化物光电功能材料的研究。
E-mail: yxliu@nenu.edu.cn