

Ce, Pr:YLuAG 原料合成、晶体生长及 LED 应用

牛雪姣¹, 徐家跃¹, 周鼎¹, 王树贤², 张怀金²

(1. 上海应用技术学院 材料科学与工程学院, 晶体生长研究所, 上海 201418; 2. 山东大学 晶体材料研究所, 济南 250100)

摘要: 采用共沉淀法合成了 Ce,Pr:YLuAG 粉末, 在 1450℃ 下煅烧可获得石榴石结构纯相。经过压制成型、固相烧结等工艺制备了多晶料棒, TEM 显示二次烧结获得的料棒具有良好的结晶性。采用光学浮区法生长了 Ce,Pr:YLuAG 晶体。晶体通体透明, 呈浅黄色, 肩部有少量裂纹。透过率达到 81.8%, 接近于理论值 84.2%。晶体在 460 nm 波长激发下呈现 530 nm 发射带和 610 nm 发射峰, 分别对应 Ce³⁺ 和 Pr³⁺ 的特征发射, 表明 Ce³⁺ 可以向 Pr³⁺ 进行能量转移; 在 487 nm 激发下晶体仅出现 Pr³⁺ 离子的特征发射峰。Ce,Pr:YLuAG 晶体色坐标为(0.474,0.495), 比商用 Ce:YAG 荧光粉更靠近红光区域, 可以弥补现有荧光粉不足, 更适合制造白光 LED。

关键词: 光学浮区法; 晶体生长; 掺杂; YLuAG 晶体

中图分类号: O799 文献标识码: A

Synthesis and Growth of Ce,Pr:YLuAG Crystal for LED Application

NIU Xue-jiao¹, XU Jia-Yue¹, ZHOU Ding¹, WANG Shu-Xian², ZHANG Huai-Jin²

(1. Institute of Crystal Growth, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 2. Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Ce,Pr:YLuAG pure phase powder was synthesized by co-precipitation method and calcined at 1450℃, which had a garnet structure. The feed rod was prepared by press forming and solid state sintering. TEM showed that the sintered rod had good crystallinity and density. Ce,Pr:YLuAG single crystal was grown by the floating zone method. The as-grown crystal was transparent with a pale yellow color, and small cracks were observed in the shoulder. The transmittance of the crystal is 81.8%, which is close to the theoretical value 84.2%. Under 460 nm excitation, Ce,Pr:YLuAG crystal shows the emission band of Ce³⁺ at 530 nm and peak of Pr³⁺ at 610 nm, which shows that Ce³⁺ can transfer the energy to Pr³⁺. However, only Pr³⁺ emission peak appears when it is excited at 487 nm. The color coordinate is located at (0.474, 0.495) which shifts to red zone compared with commercial Ce:YAG yellow phosphor. As a result, Ce,Pr:YLuAG crystal is more suitable to fabricate white LED.

Key words: floating zone method; crystal growth; doping; YLuAG crystal

白光发光二极管(LED)以其体积小、固态化、无污染、节能环保等优势正逐步取代节能灯进入照明领域^[1-2]。市场上最常用的白光 LED 大多是采用黄色荧光粉 Ce:YAG 与蓝光芯片耦合制成的, 但是

存在三个突出问题: 第一, 荧光粉涂抹不均匀会造成白光 LED 的光色一致性差^[3]; 第二, 封装胶长时间或在大功率条件下工作容易老化, 进而降低 LED 的使用寿命^[4]; 第三, 在现有 Ce:YAG 黄色荧光粉+

收稿日期: 2015-04-03; 收到修改稿日期: 2015-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(51472263); 上海市基础研究重点项目(11JC1412400)

National Natural Science Foundation of China (51472263); Key Project of Basic Research in Shanghai(11JC1412400)

作者简介: 牛雪姣(1989-), 女, 硕士研究生. E-mail: niuxuejiao102@163.com

通讯作者: 徐家跃, 教授. E-mail: xujia Yue@sit.edu.cn

蓝光芯片耦合制得的 LED 中, 由于缺少红光而使 LED 色温偏低^[5]。

近年来, 人们采用单晶代替 Ce:YAG 荧光粉制造白光 LED 单晶, 具有高的熔点和热导率以及稳定的物理化学特性^[6], 可用于制作大功率、长寿命 LED。此外, 采用能在蓝光激发下发射红光的稀土离子(如 Pr^{3+})与 Ce^{3+} 共掺的方法, 可以有效解决现有荧光粉红光不足的问题。华伟等^[7]制备了 Ce,Pr:YAG 单晶, 并对其性能进行了研究, 但是实验结果显示 Pr^{3+} 发光并不太明显。另外, 由于石榴石结构的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)系列晶体熔点高, 生长过程中容易形成各种缺陷, 特别是 Y 离子占据 Al 位形成的反位缺陷, 将严重影响晶体的发光效率和质量^[8]。Di 等^[9]研究发现, 掺入 Lu^{3+} 可以降低晶体内的反位缺陷。因此, Ce,Pr 共掺的 YLuAG 晶体有望成为 Ce:YAG 荧光粉的理想替代者。

YAG、LuAG 及其混合晶体 YLuAG 属于立方晶系石榴石结构, 熔点 2000°C 左右, 作为激光、闪烁晶体受到广泛关注, 通常采用提拉法和温度梯度法等方法生长^[10-12]。光学浮区法是研究高温氧化物晶体的有效手段, 可以快速生长出直径 10 mm 左右的晶体。本工作尝试湿化学法制备 Ce,Pr:YLuAG 多晶粉末, 采用光学浮区法成功生长了 Ce,Pr:YLuAG 晶体, 并研究了晶体的光谱特性及其在白光 LED 上的应用潜力。

1 原料合成

对于组成复杂、熔点较高(2000°C 以上)的高温氧化物 Ce,Pr:YLuAG, 采用传统的固相烧结方法很难制备出纯相的多晶料。为此, 实验选择共沉淀方法制备多晶料。以纯度为 99.99% 的 Lu_2O_3 、 Pr_2O_3 、 Ce_2O_3 、 $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ 、 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 作为原材料, 设计化学组成为: 基质 $\text{Y}_{1.5}\text{Lu}_{1.5}\text{Al}_5\text{O}_{12}$, Ce_2O_3 、 Pr_2O_3 分别为 0.5mol%。首先按化学计量比分别称量氧化物溶于分析纯硝酸中, 制成硝酸盐溶液, 然后与 $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液混合, 滴入少量的沉淀剂 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液(正滴法 3 mL/min), 调节 $\text{pH}=8\sim 9$, 用抽滤器进行抽滤, 去离子水洗涤 3 次, 无水乙醇漂洗 1 次。放入干燥箱 90°C 干燥 24 h, 研磨所得的前驱体, 最后放入马弗炉内分别在 1300°C 和 1450°C 煅烧 2 h, 得到相应的固体粉末。

采用 Rigoku X 射线衍射仪 (D/MAX 2000/PC) 对所得粉料进行物相分析, 如图 1 所示。图 1 表明, 在 1300°C 下煅烧得到的原料除了含有 YLuAG 石榴石结构的主相外, 还存在少量 YAlO_3 钙钛矿结构的杂项, 说明原料反应不够完全。提高煅烧温度到

1450°C 时, 杂项消失, 获得了石榴石结构的纯相 Ce,Pr:YLuAG 多晶粉料。合成料在静水压机上 68 MPa 压力下压制成 $\phi 5\text{ mm} \times (60\sim 70)\text{mm}$ 的致密料棒, 然后放入垂直旋转马弗炉内, 在 1600°C 下烧结 5~6 h, 得到致密的多晶料棒, 如插图所示。高温烧结后料棒粉末的 TEM 照片见图 2。图 2(a)给出了粉末形貌照片, 样品颗粒呈球形, 尺寸约为 10 nm; 图 2(b)是料棒粉末的高分辨 TEM 照片, 粉末颗粒具有清晰、完整的晶格图像。上述结果表明烧结后的原料棒有很好的结晶性。

2 晶体生长

实验采用型号为 FZ-T-12000-X-I-S-SU 的四椭球反射镜光学浮区生长炉, 最高温度可以达到 3000°C 。四个 3 kW 的氙灯作为加热源, 四个反射镜将四个氙灯发射的光聚焦在生长炉内形成狭窄的高温区。原料棒和籽晶在高温区融化形成熔区, 经收颈、放肩、等径生长、收尾和降温等步骤来完成晶体生长。整个晶体生长过程可通过图像采集系统进行监控。

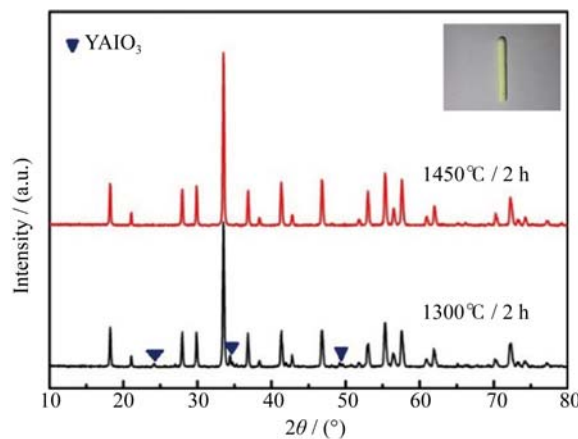


图 1 不同温度煅烧的 Ce,Pr:YLuAG 原料的 XRD 图谱(插图为原料棒)

Fig. 1 XRD patterns of Ce,Pr:YLuAG feed calcined at different temperatures (the inset showing a feed rod)

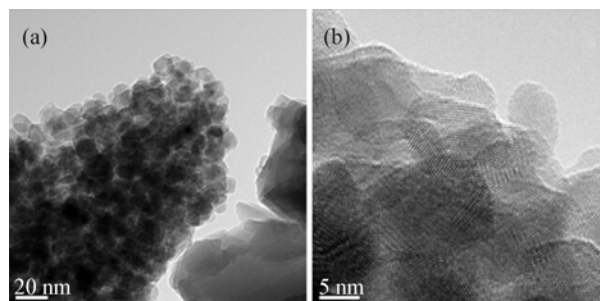


图 2 烧结后 Ce,Pr:YLuAG 料棒粉末的 TEM 照片

Fig. 2 TEM images of sintered Ce,Pr:YLuAG feed powders

2.1 工艺参数的选择

浮区法生长晶体不需要坩埚, 晶体的形状依靠熔体的表面张力来维持。由于缺少有效的测温手段, 一般来说接种和生长都只能靠现场观察和实验摸索。我们采用<111>取向的YAG籽晶, 经过多次实验, 基本掌握了适合 YLuAG 晶体生长的最佳工艺条件, 见表 1。

2.2 晶体品质鉴定

图 3 是光学浮区法生长的 Ce,Pr:YLuAG 晶体照片。晶体通体透明, 由于掺杂 Ce^{3+} 而呈浅黄色; 晶体直径有一定的波动, 这是因为在晶体生长过程中熔区的变化引起的。另外, 晶体放肩部位出现少量裂纹, 这是由于生长初期固液界面温度梯度过大而产生的应力集中引起的。将所得晶体沿垂直于生长方向切割、定向、抛光成厚度为 1 mm 的样品, 用于光谱和摇摆曲线测试。并将少量晶体样品研磨成粉末, 用于 X 射线粉末衍射分析。

采用 Rigoku X 射线衍射仪 (D/MAX 2000/PC) 测试了样品粉末的 XRD 图谱, 扫描范围 $10^{\circ}\sim80^{\circ}$, 测试条件为 Cu $K\alpha$ 射线源, 40 kV 加速电压, 20 mA 管电流。图 4 是晶体粉末的 XRD 图谱, 由图可见样品晶体粉末的衍射峰与纯 YAG 标准谱(JCPDF#33-0040)相吻合, 说明 Ce,Pr:YLuAG 晶体也具有石榴石结构, 晶格常数为 1.1957 nm, 介于 YAG(1.2009 nm) 和 LuAG(1.1912 nm)之间。图 5 是在 DX-9BG 型 X 射线衍射定向仪上测得的<111>取向晶片的双摇摆曲线。从图中可以看出, 其半高宽(FWHM)为 $14''$, 这表明该晶体具有较好的结晶质量。

表 1 Ce,Pr:YLuAG 晶体的生长参数	
Table 1 Growth parameters for Ce,Pr:YLuAG crystal	
Diameter of feed rod	4–5 mm
Length of feed rod	60–70 mm
Power of halogen lamp	3 kW
Rotation speed	15–20 r/min
Growth speed	5–7 mm/h
Atmosphere	O ₂
Heating rate	200℃/h
Cooling rate	300℃/h

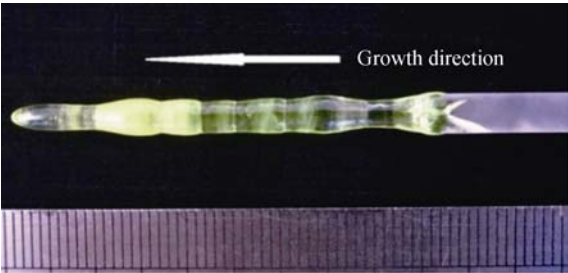


图 3 Ce,Pr:YLuAG 晶体照片
Fig. 3 Picture of as-grown Ce,Pr:YLuAG crystal

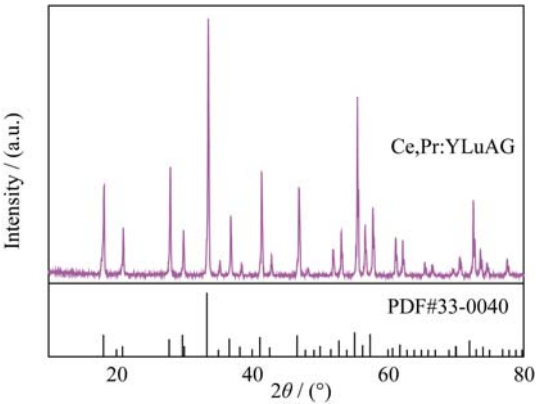


图 4 Ce,Pr:YLuAG 晶体粉末的 X 射线衍射图谱
Fig. 4 Powder XRD pattern of Ce,Pr:YLuAG crystal

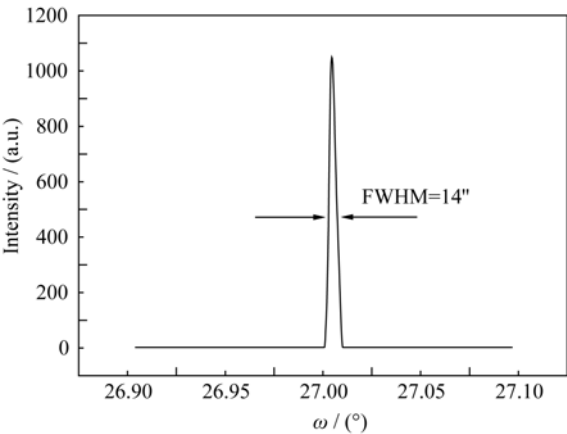


图 5 Ce,Pr:YLuAG 晶体的 X 射线摇摆曲线
Fig. 5 X-ray rocking curve of Ce,Pr:YLuAG crystal

3 结果与讨论

3.1 Ce,Pr:YLuAG 晶体的透过光谱

采用铂金埃尔默公司的 Lambda950 设备测试了晶体在 200~800 nm 的透过光谱, 如图 6 所示。Ce,Pr:YLuAG 晶体的主要吸收峰位于 200~610 nm 范围内, 在 240 nm 和 285 nm 处的两个强吸收峰对应于 Pr^{3+} 离子的 $4f^2(^3H_4)$ 能级到 $5d_{1,2}$ 能级的跃迁, 在 346 和 451 nm 处的两个吸收峰是 Ce^{3+} 的特征吸收峰, 分别是由 Ce^{3+} 的 $4f$ 基态 $^2F_{5/2}$ 到 $5d_1$ 和 $5d_2$ 能级的转变引起^[9]。相对于 Ce,Pr:YAG 晶体, Pr^{3+} 吸收峰位置 (238 和 288 nm) 及 Ce^{3+} 吸收峰位置 (340 和 460 nm) 都发生了偏移, 这可能是因为 $5d$ 能级受晶体场的影响较大, 而 Lu^{3+} 引入到 YAG 基质里改变了原有的晶体场强度, 使 $5d$ 能级分裂的 $5d_1$ 与 $5d_2$ 能级的间距增加而引起的。由于 451 nm 的吸收峰与蓝光芯片的发射峰相吻合, 而且 610 nm 的红光吸收很微弱, 这就有利于得到低色温的白光发光。相对 Ce:YAG 荧光

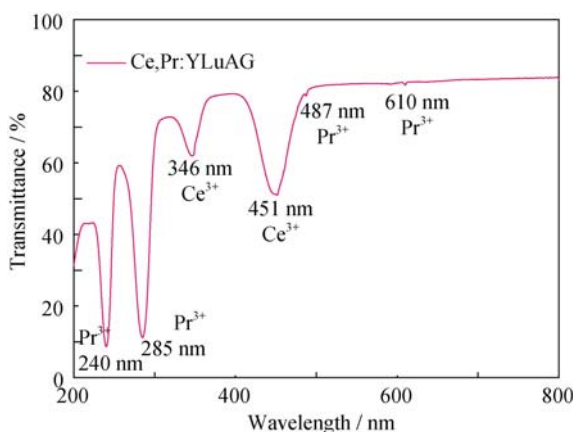


图 6 Ce,Pr:YLuAG 晶体的透过光谱

Fig. 6 Transmission spectrum of Ce,Pr:YLuAG crystal

粉, Ce,Pr:YLuAG 晶体更适合制造接近自然光的白光 LED。

根据 YAG 晶体的 Sellmeier 方程^[13]近似计算 Ce,Pr:YLuAG 晶体的理论透过率, 计算过程如下:

首先计算其折射率 n ,

$$n^2 = 2.08745 + \frac{1.2081\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02119} + \frac{17.2049\lambda^2}{\lambda^2 + 1404.45} \quad (1)$$

其中 λ 为入射波长(μm), n 为折射率。经计算得到 800 nm 处的折射率为 1.8287。忽略掺杂的稀土离子对透过率的影响, 再利用透过率公式^[14]计算其理论透过率:

$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (2)$$

其中 d 为晶体厚度; α 为晶体的吸收系数; $R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$ 代表反射系数, 经计算 $R=8.583 \times 10^{-2}$ 。当晶体没有吸收(即 $\alpha=0$)时, 它的透过率就是理论透过率。因此, 根据公式(2)计算出晶体在 800 nm 处的理论透过率 T 为 84.19%。图 6 显示 Ce,Pr:YLuAG 晶体的透过率

为 81.8%, 接近于理论值, 说明该晶体具有很好的光学质量。

3.2 Ce,Pr:YLuAG 晶体的激发和发射光谱

采用英国爱丁堡公司的 FLS920 荧光光谱仪测试了样品的荧光光谱, 如图 7 所示。Ce,Pr:YLuAG 晶体在 510 和 610 nm 波长监测下激发光谱见图 7(a, b), 当监测波长为 510 nm 时, 主要激发峰的中心位置分别位于 346 和 451 nm, 对应于 Ce^{3+} 离子的 $4f \rightarrow 5d$ 能级跃迁, 与透过光谱中相应的吸收峰相对应。与 Ce:YLuAG 相比, Ce,Pr:YLuAG 在 346 nm 的激发峰发生了红移(342 nm), 在 451 nm 的激发峰发生了蓝移(468 nm)^[15], 说明引入 Pr^{3+} 改变了 Ce^{3+} 的发光。位于 440~480 nm 之间的宽激发峰除了 451 nm 处的激发峰之外, 还包括 449、456、462、466、472 和 480 nm 六个峰, 它们是因为测试仪器中氙灯波长的波动造成的, 对光谱的分析不产生影响^[16]。图 7 的谱线(b)中, 在 610 nm 监测下所测得的激发光谱除了具有谱线(a)中 Ce^{3+} 的特征激发峰之外, 在 487 nm 还存在一个 $\text{Pr}^{3+}({}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{H}_4)$ 的强激发峰, 并且 346 和 451 nm 处的激发峰强度低于谱线(a)中相应的强度, 这说明了 Ce^{3+} 可以将部分能量传递给了 Pr^{3+} 。

图 7(c, d) 是 Ce,Pr:YLuAG 晶体在 460 和 487 nm 波长激发下的发射光谱, 在 $\lambda_{\text{ex}}=460$ nm 时, 样品在 470~600 nm 之间存在一个宽发射峰, 在 487 nm 处还有一个弱发射峰, 它们分别归属于 Ce^{3+} 和 Pr^{3+} 的能级跃迁。其中 487 nm 的蓝光可以用来补偿芯片的蓝光损失, 有利于提高白光 LED 的显色指数。610~660 nm 之间存在的几个尖峰是由 Pr^{3+} 的能级跃迁引起的, 其最强的发射峰位于 610 nm 处, 归属于 Pr^{3+} 的 ${}^1\text{D}_2 \rightarrow {}^3\text{H}_4$ 跃迁。晶体在 610 nm 处的自吸收很弱, 所以它可以补偿现有白光 LED 中的红光成分, 降低白光 LED 的显色指数。另外, 460 nm 的

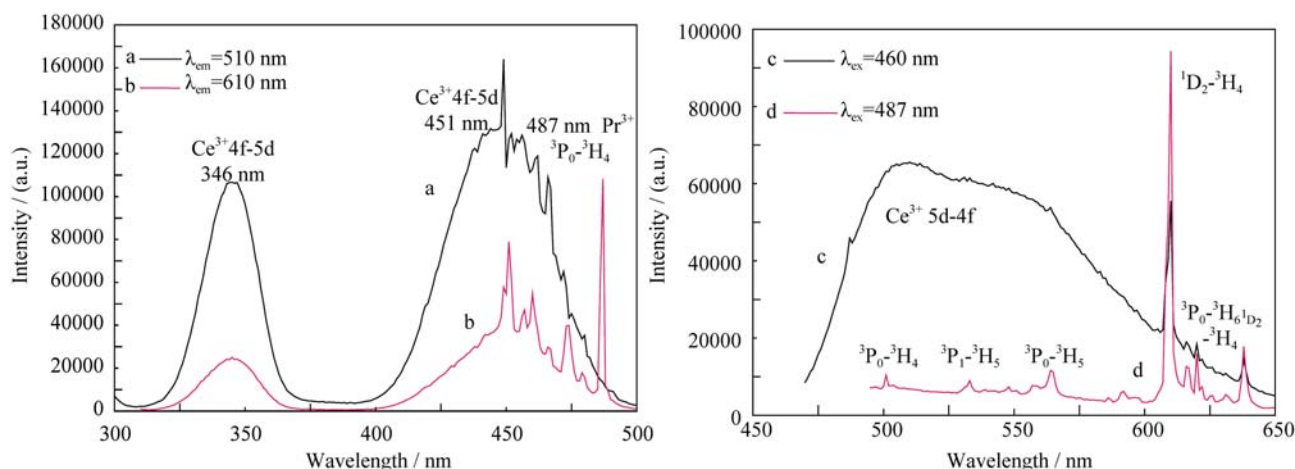


图 7 Ce,Pr:YLuAG 混晶的激发(a,b)和发射光谱(c,d)

Fig. 7 Excitation (a,b) and emission (c,d) spectra of Ce,Pr: YLuAG single crystal

光不能直接激发 Pr^{3+} , 表明 Ce^{3+} 离子可以向 Pr^{3+} 离子传递能量。在 487 nm 激发下, 只存在 Pr^{3+} 离子的发射峰, 而且在 600~650 nm 红光范围内的发射峰强度明显增强, 这说明 487 nm 的光不能激发 Ce^{3+} 发光, 而且 Pr^{3+} 离子几乎不向 Ce^{3+} 离子进行能量转移。

实验通过 CIE1931 软件计算得出 Ce,Pr:YLuAG 晶体的色坐标为 (0.474,0.495), 并将它与市售 Ce:YAG 荧光粉的色坐标(0.440,0.536)进行比较, 如图 8 所示。它们的色坐标均位于黄色区域, 而且样品的色坐标更偏向于红色, 其色温为 3035 K, 低于商用 Ce:YAG 黄色荧光粉的色温(3732 K), 可以更好地满足人类对白光照明的需求。

3.3 Ce,Pr:YLuAG 晶体的荧光寿命

图 9 给出了晶体在 346 和 450 nm 波长激发下 Pr^{3+} 发光的衰减曲线, 并对其进行了三指数曲线的拟合, 它们由慢成分、较慢成分及快成分三部分构成, $\lambda_{\text{ex}}=346$ nm 时, 对应值分别是 0.92、4.93、200.93 μs ; $\lambda_{\text{ex}}=450$ nm 时, 对应于 1.44、11.64、187.61 μs 。Ce,Pr:YLuAG 晶体的荧光寿命相对略长, 可用于白光 LED 照明领域。

4 结论

1) 采用共沉淀法制备了 Ce,Pr:YLuAG 纯相多晶粉末, 经压制成型和高温烧结等工艺制备了结晶性好和致密度高的多晶料棒。

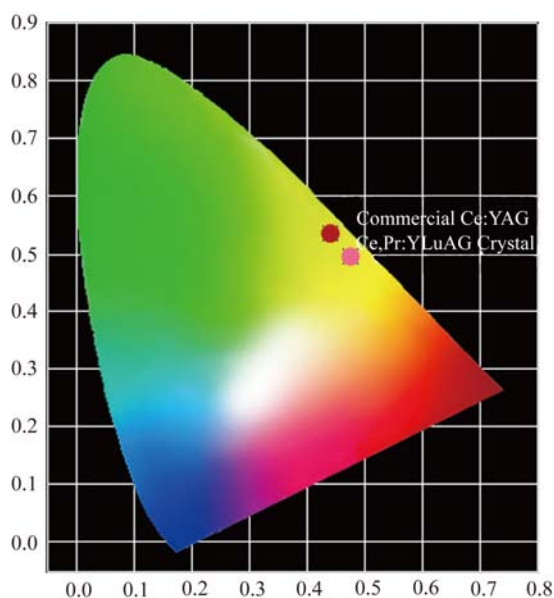


图 8 Ce,Pr:YLuAG 晶体及市售 Ce:YAG 荧光粉的色坐标
Fig. 8 CIE coordinates of Ce,Pr:YLuAG crystal and commercial Ce:YAG phosphor

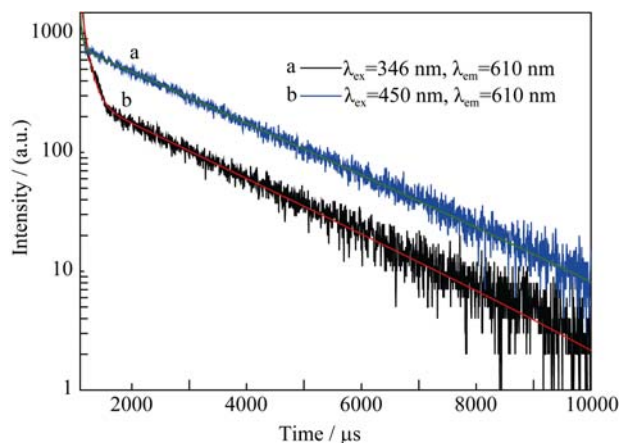


图 9 Ce,Pr:YLuAG 晶体的衰减曲线
Fig. 9 Decay curves of Ce,Pr:YLuAG crystal

2) 采用光学浮区法生长了 Ce,Pr:YLuAG 晶体, 晶体呈浅黄色, 半高峰宽(FWHM)为 $14''$; 晶体在 200~500 nm 内出现多个吸收峰, 500 nm 后晶体透过率大于 80%。

3) Lu^{3+} 离子部分替代 Y^{3+} 离子形成 YLuAG 晶体后, 使 YAG 晶体场发生改变, 导致 Ce^{3+} 和 Pr^{3+} 离子的特征激发峰与发射峰较单独掺杂时发生了偏移。Ce,Pr:YLuAG 晶体在 460 nm 波长激发下呈现 530 nm 发射带和 610 nm 发射峰, 分别对应 Ce^{3+} 和 Pr^{3+} 的特征发射; 在 487 nm 激发下晶体仅出现 Pr^{3+} 离子的特征发射峰。

4) Ce,Pr:YLuAG 晶体色坐标(0.474, 0.495)位于黄光区, 色温为 3035 K, 低于商用 Ce:YAG 黄色荧光粉的色温(3732 K), 正好弥补荧光粉不足, 更合适制造白光 LED。

参考文献:

- [1] PAN Y X, WANG W, LIU G K. Correlation between structure variation and luminescence red shift in YAG:Ce. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, **488**(2):638–642.
- [2] MAO Z, ZHU Y, ZENG Y, *et al.* Concentration quenching and resultant photoluminescence adjustment for $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Tb}^{3+}$ green-emitting phosphor. *Journal of Luminescence*, 2013, **143**: 587–591.
- [3] CUI ZHIGUANG, JIA GUOHUA, DENG DEGANG, *et al.* Synthesis and luminescence properties of glass ceramics containing $\text{MSiO}_3:\text{Eu}^{2+}$ (M=Ca, Sr, Ba) phosphors for white LED. *Journal of Luminescence*, 2012, **132**(1): 153–160.
- [4] KRAMES M R, SHCHEKIN O B, MUELLER M R, *et al.* Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting. *Journal of Display Technology*, 2007, **3**(2): 160–175.
- [5] WANG Q, DENG D, HUA Y. Potential tunable white-emitting

- phosphor $\text{LiSr}_4(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}^{3+},\text{Eu}^{2+}$ for ultraviolet light-emitting diodes. *Journal of Luminescence*, 2012, **132**(2): 434–438.
- [6] KLIMCZAKA M, MALINOWSKI M, SARNECKI J, *et al.* Luminescence properties in the visible of Dy:YAG/YAG planar wave guides. *Journal of Luminescence*, 2009, **129**(12):1869–1873.
- [7] HUA WEI, XIANG WEIDONG, DONG YONGJUN, *et al.* Spectra characteristics of new developed Ce,Pr doped YAG phosphor for white-LED. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 907–911.
- [8] FENG XIQI. Anti-site defects in YAG and LuAG crystals. *Journal of Inorganic Materials*, 2010, **25**(8): 785–794.
- [9] DI J Q, XU X D, XIA C T. Crystal growth and optical properties of LuYAG:Ce single crystal. *Journal of Crystal Growth*, 2012, **351**(1): 165–168.
- [10] KOSTI S, LAZAREVI Z Ž, RADOJEVI V, *et al.* Study of structural and optical properties of YAG and Nd:YAG single crystals. *Materials Research Bulletin*, 2015, **63**: 80–87.
- [11] PETR SCHAUER. Optimization of decay kinetics of YAG:Ce single crystal scintillators for S(T)EM electron detectors. *Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section B*, 2011, **269**(21): 2572–2577.
- [12] YANG XINBO, LI HONGJUN, BI QUNYU, *et al.* Growth of large-sized Ce:Y₃Al₅O₁₂ (Ce:YAG) scintillation crystal by the temperature gradient technique (TGT). *Journal of Crystal Growth*, 2009, **311**(14): 3692–3696.
- [13] SONG P X, ZHAO Z W, Xu X D, *et al.* Growth and properties of Tm:YAG crystals. *Journal of Crystal Growth*, 2004, **270**(3): 433–437.
- [14] ZELMON D E, SMALL D L, PAGE R. Refractive-index measurements of undoped yttrium aluminum garnet from 0.4–5.0 μm . *Applied Optics*, 1998, **37**(21): 4933–4935.
- [15] JIN B M, KIM I W, White W B, *et al.* Modification of UV-Vis optical absorption properties caused by MgO incorporation in MgO-doped LiNbO₃ crystals. *Materials Letters*, 1997, **30**(5): 385–388.
- [16] XIANG WEI-DONG, ZHAO BIN-YU, LIANG XIAO-JUAN, *et al.* Packaging technologies and luminescence properties of Ce:YAG single crystal for white light-emitting diode. *Journal of Inorganic Materials*, 2014, **29**(6): 614–620.