

# Dy<sup>3+</sup>掺杂 Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub> 单基质荧光粉的白光照明与温度传感特性\*

赵瑾<sup>1)†</sup> 涂茹婷<sup>1)</sup> 刘馥妮<sup>1)</sup> 禄靖雯<sup>1)</sup> 付永诚<sup>1)</sup> 王宇<sup>1)</sup>  
李廷政<sup>1)</sup> 冷稚华<sup>2)</sup>

1) (西安建筑科技大学理学院, 西安 710055)

2) (西安建筑科技大学化学与化工学院, 西安 710055)

(2025 年 7 月 7 日收到; 2025 年 8 月 2 日收到修改稿)

稀土离子掺杂荧光粉在照明、显示、防伪和光学测温等领域具有广阔的应用前景. 本文采用高温固相法制备了 Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>: xDy<sup>3+</sup> ( $x = 0.01-0.11$ ) 系列荧光粉. 通过 X 射线衍射和扫描电子显微镜对样品的晶体结构和微观形貌进行了表征, 并采用荧光光谱和荧光寿命衰减曲线对其发光特性和能量传递机制进行了系统研究. 在 350 nm 近紫外光激发下, 样品的发光强度随 Dy<sup>3+</sup> 掺杂浓度增加呈现先递增后递减的变化趋势, 在  $x = 0.07$  时达到最大值. Dy<sup>3+</sup> 浓度增加导致非辐射跃迁增强, 荧光寿命逐渐降低. Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>: 0.07Dy<sup>3+</sup> 在 150 °C 高温下发光强度仍为室温时的 87.6%, 展现出优异的热稳定性. 利用最佳样品与近紫外 LED 芯片封装所得白光 LED 器件性能优良, 其相关色温为 5680 K, 色坐标位于 (0.3275, 0.3883). 此外, 基于荧光强度比技术的温度传感特性研究表明, 该材料具备良好的光学测温潜力, 最大相对灵敏度达到 1.72%/K. 结果表明, Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>: Dy<sup>3+</sup> 荧光粉在固态照明及光学温度传感领域具有潜在的应用价值.

**关键词:** Dy<sup>3+</sup>, 荧光粉, 发光二极管, 光学温度传感

**PACS:** 42.70.-a, 33.50.Dq, 78.55.-m, 07.20.Dt

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250886

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250886

## 1 引言

与传统照明相比, 发光二极管 (light emitting diodes, LED) 凭借其绿色环保、寿命长、能耗低、体积小、发光效率高等优势, 已成为照明产业的核心发展方向<sup>[1-3]</sup>. 目前白光 LED 实现路径主要可分为 3 种: 一是采用红、绿、蓝 RGB 三色芯片组合实现白光发射, 由于 3 种芯片驱动电流不同并且发光衰减速率存在差异, 致使制作工艺复杂, 容易引发色彩漂移现象<sup>[4]</sup>; 二是利用蓝光芯片和黄色荧光粉

(YAG: Ce<sup>3+</sup>) 组合, 由于红光的缺失导致色温较高、显色指数低<sup>[5]</sup>; 三是利用近紫外 (n-UV) 芯片激发红绿蓝三色荧光粉, 由于红色和蓝色荧光粉对蓝色光的再吸收导致发光效率较低<sup>[6]</sup>. 因此, 研发性能良好的单一基质白光荧光粉, 对推进固态照明技术发展具有重要战略意义.

发光材料通常由基质与激活剂构成, 基质的选择在荧光粉的应用中起着十分重要的作用. 在众多基质材料中, 磷酸盐因能量转换率高、资源丰富、价格低廉、合成温度低、物理化学性质稳定等显著优势, 在科研及产业领域受到了广泛关注<sup>[7-9]</sup>. 磷酸

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11804265)、陕西省重点科技创新团队项目 (批准号: 2022TD-30) 和陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2024JC-YBMS-384) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaojin@xauat.edu.cn

盐种类丰富, 依据其化学结构特性, 可分为焦磷酸盐、偏磷酸盐和正磷酸盐, 不同 P—O 键的键长可形成多样化的配位环境<sup>[10]</sup>. 其中正磷酸盐的低声子能量特性, 可减少非辐射弛豫、提升稀土离子发光效率<sup>[11]</sup>. 稀土离子  $Dy^{3+}$  具有独特的发光特性, 能够产生黄色、蓝色以及红色特征发射. 其蓝色和黄色发射带的强度具有显著的环境依赖性, 可通过精准调控蓝光与黄光相对强度比实现白光发射. 当  $Dy^{3+}$  占据非反演对称中心格位时黄色发射带更强, 当占据反演对称中心格位时蓝色发射带更强<sup>[12]</sup>. 这种特性为通过单掺杂实现白光调控提供了可能, 如  $Cs_2Li_3Sr_2B_3(PO_4)_6 \cdot Dy^{3+}$ <sup>[13]</sup>,  $Na_3Ca_{3.85}Gd_{0.06}(TeO_3)(PO_4)_3 \cdot Dy^{3+}$ <sup>[14]</sup>,  $Ba_3(ZnB_5O_{10})PO_4 \cdot Dy^{3+}$ <sup>[15]</sup>,  $KNaCa_2(PO_4)_2 \cdot Dy^{3+}$ <sup>[16]</sup>. 因此, 选取适宜掺杂  $Dy^{3+}$  的宿主材料, 对于实现高质量的白光发射至关重要.

本研究采用高温固相法合成了一系列  $Ca_7NaY(PO_4)_6 \cdot xDy^{3+}$  (CNYP:  $Dy^{3+}$ ) 荧光粉材料, 通过多种表征手段系统研究了不同  $Dy^{3+}$  掺杂浓度对材料晶体结构、光致发光性能、能量传递机制以及色度坐标的影响规律. 考察了量子效率与热稳定性等关键性能参数, 利用最佳样品封装了白光 LED, 同时评估了该荧光粉在固态照明和温度传感领域的应用价值.

## 2 实验

本文采用高温固相法制备了 CNYP:  $xDy^{3+}$  ( $x = 0.01-0.11$ ) 荧光粉, 实验原料为碳酸钡 ( $CaCO_3$ , A.R.)、碳酸钠 ( $Na_2CO_3$ , A.R.)、氧化钇 ( $Y_2O_3$ , 99.99%)、磷酸二氢铵 ( $NH_4H_2PO_4$ , A.R.)、

氧化镱 ( $Dy_2O_3$ , 99.9%). 首先根据化学计量比称量所需原料, 将研磨均匀的原料进行预烧处理. 取出样品并再次充分研磨, 随后以 1400 °C, 4 h 煅烧, 冷却后再次研磨至粉末状.

X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 测试采用 Bruker D8 型衍射仪, 发射源为 Cu 靶,  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ , 最大扫描范围是  $-10^\circ-168^\circ$ , 工作电压 40 kV, 电流 40 mA. 为了详细研究样品的形貌, 使用型号为 TY 2020005190 的扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 进行表征, SEM 二次电子像分辨率分别达到 0.5 nm (15 kV) 和 0.9 nm (1 kV, 非减速模式), 保证了对样品形貌的精细观察, 借助与该 SEM 相连的能量色散光谱仪 (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS) 检测样品元素组成. 使用 Edinburgh-FLS 920 荧光分光光度计测量样品的光致发光光谱、荧光寿命和变温光谱.

## 3 结果与讨论

### 3.1 晶体结构分析

图 1(a) 所示为  $Ca_7NaY(PO_4)_6 \cdot xDy^{3+}$  ( $x = 0.03, 0.07, 0.11$ ) 的 XRD 图谱, 样品的 XRD 衍射图样与标准卡片 (PDF#00-009-0169) 一致, 表明所得的样品为纯相<sup>[17]</sup>. 图 1(b) 为 CNYP: 0.07  $Dy^{3+}$  的结构精修图谱, 其中黑色叉 ( $\times$ ) 代表实验值, 红色线条为计算值, 蓝色实线表示实验值与计算值的差值, 绿色竖线代表布拉格衍射位置. 精修得到的可靠性因子  $R_{wp}$  和  $R_p$  分别为 6.92% 和 4.94%, 均小于 10%,  $\chi^2 = 1.92$ , 这些参数表明 XRD 精修结

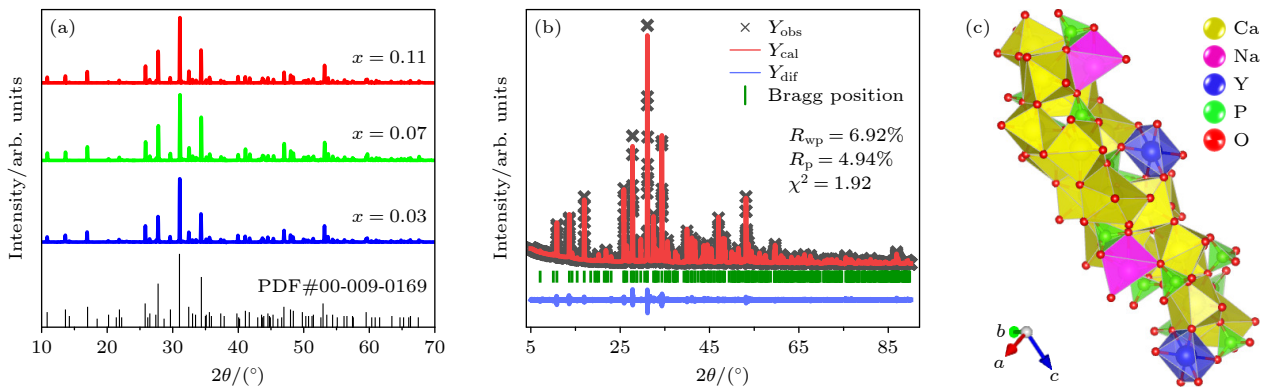


图 1 (a) CNYP:  $xDy^{3+}$  ( $x = 0.03, 0.07, 0.11$ ) 的 XRD 图样与标准卡对比图; (b) CNYP: 0.07  $Dy^{3+}$  的精修图谱; (c) 晶体结构图  
Fig. 1. (a) XRD pattern of CNYP:  $xDy^{3+}$  ( $x = 0.03, 0.07, 0.11$ ) compared with standard card; (b) Rietveld refinement of CNYP: 0.07  $Dy^{3+}$ ; (c) crystal structure of host.

果具有较高的可靠性. 图 1(c) 为基质的晶体结构图, 其晶胞参数为  $a = 10.429 \text{ \AA}$ ,  $b = 10.429 \text{ \AA}$ ,  $c = 37.38 \text{ \AA}$ ,  $V = 3520.91 \text{ \AA}^3$ ; 为六方晶系,  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$ ,  $Z = 21$ . 1 个 P 与 4 个 O 构成四面体结构, Ca 占 M1, M2 和 M3 位点, Na 占 M4 位点,  $Y^{3+}$  占 M5 位点, Na 和 Y 周围有 6 个 O 原子, 配位数为 6 [17,18]. 半径差异百分比公式为 [19]:

$$D_r = \frac{R_m(CN) - R_d(CN)}{R_m(CN)}, \quad (1)$$

式中,  $R_m$  是被取代的阳离子半径,  $R_d$  是掺杂离子半径,  $CN$  是配位数. 当半径百分比公式的值小于 30% 时, 表明离子可以被替代 [20]. 已知  $Ca^{2+}$  ( $CN = 7$ ,  $r = 1.06 \text{ \AA}$ ;  $CN = 8$ ,  $r = 1.12 \text{ \AA}$ ) 和  $Dy^{3+}$  ( $CN = 7$ ,  $r = 1.97 \text{ \AA}$ ;  $CN = 8$ ,  $r = 1.03 \text{ \AA}$ ), 分别计算得到  $D_{r1} = 8.49\%$  和  $D_{r2} = 20.03\%$ ;  $Y^{3+}$  ( $CN = 6$ ,  $r = 0.900 \text{ \AA}$ ) 和  $Dy^{3+}$  ( $CN = 6$ ,  $r = 0.912 \text{ \AA}$ ), 计算得出  $D_{r3} = 1.33\%$ . 对比发现  $Dy^{3+}$  和  $Y^{3+}$  的半径差异百分比更小, 离子半径接近且电荷一致, 表明在  $Ca_7NaY(PO_4)_6$  基质中  $Y^{3+}$  更容易被  $Dy^{3+}$  取代.

为精确表征样品中各元素的微观分布特性, 采用 SEM 结合 EDS 对样品进行元素分布表征.

图 2(a)–(f) 是 CNYP: 0.07  $Dy^{3+}$  的元素分布 SEM 图像, 可知 Ca, Na, Y, Dy, P 和 O 六种元素均被检测且所有元素均匀分布, 表明  $Dy^{3+}$  已均匀掺杂于宿主晶格内部, Na 元素分布不明显是因为 Na 的能量比较低 [21]. 图 2(g), (h) 是 CNYP: 0.07  $Dy^{3+}$  的不同放大倍数的微观结构图, 该荧光粉颗粒大小分布不均匀且呈现不规则形态, 这种特性增大了吸收截面同时有效降低了激发光的散射与反射现象, 进而可以提升光致发光效率 [22]. 图 2(i) 的 EDS 能谱分析结果表明, 样品中仅检测到 Ca, Na, Y, Dy, P 和 O 元素, 未发现其他杂质元素的存在. 该结果证实了样品具有较高的化学纯度, 同时为  $Dy^{3+}$  离子成功掺入基质晶格提供了实验证据.

### 3.2 荧光光谱分析

图 3(a) 是在 571 nm 监测下 CNYP:  $x Dy^{3+}$  ( $x = 0.01–0.11$ ) 的激发光谱, 激发光谱的特征峰分别位于 295 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4D_{7/2}$ ), 324 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{3/2}$ ), 338 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$ ), 350 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{7/2}$ ), 364 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{5/2}$ ), 388 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$ ), 427 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$ ), 453 nm ( ${}^6H_{15/2} \rightarrow$

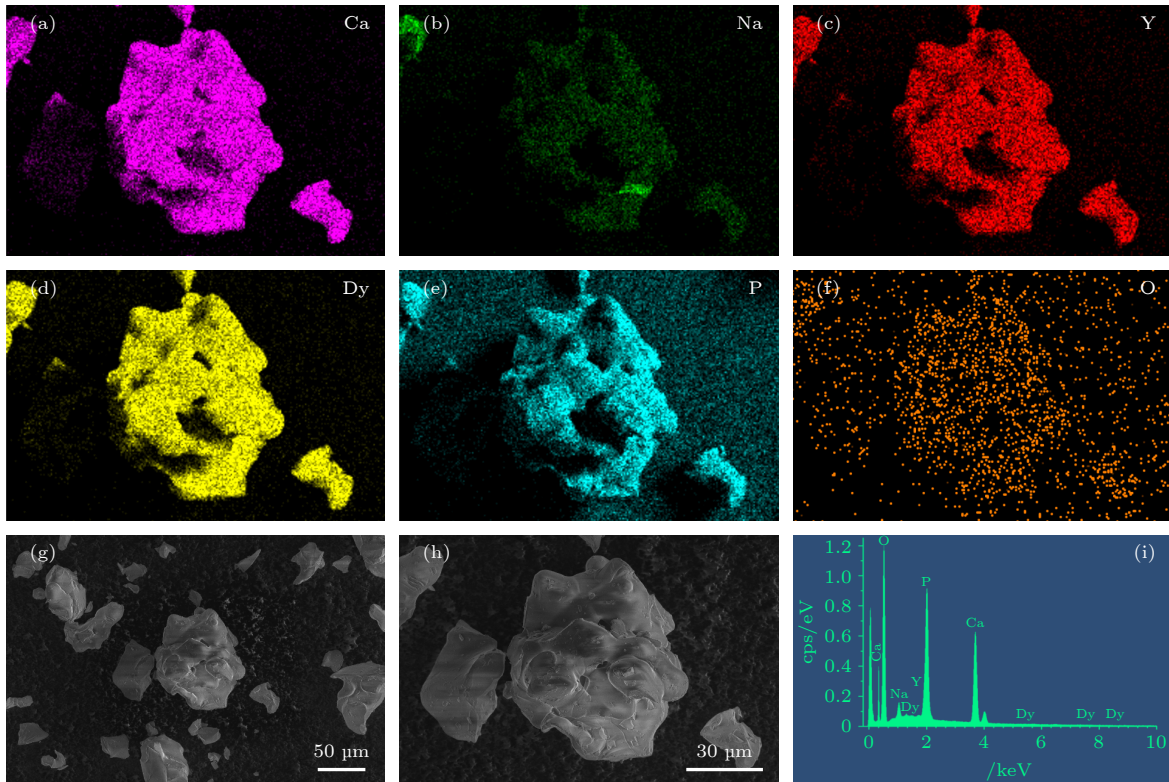


图 2 CNYP: 0.07  $Dy^{3+}$  的形态分析 (a)–(f) 元素分布图; (g), (h) SEM 图; (i) EDS 光谱

Fig. 2. Morphology analysis of CNYP: 0.07  $Dy^{3+}$ : (a)–(f) Elemental distribution map; (g), (h) SEM images; (i) EDS spectrum.

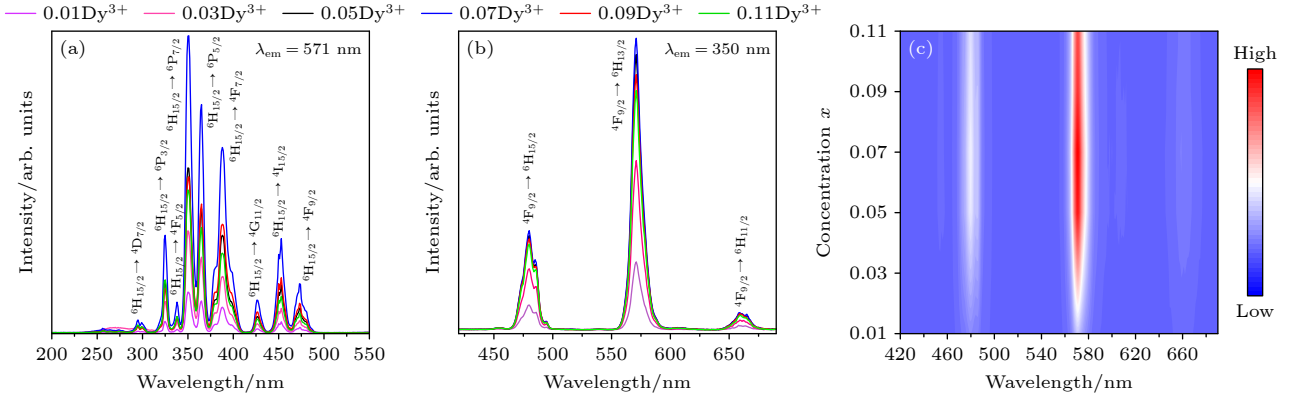

 图 3 CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) 样品的荧光光谱 (a) 激发光谱; (b) 发射光谱; (c) 发射光谱对应的等高线图

 Fig. 3. Fluorescence spectra of CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) samples: (a) Excitation spectra; (b) emission spectra; (c) contour plot corresponding to the emission spectra.

$^4\text{I}_{15/2}$ ) 和 474 nm ( $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$ )<sup>[23–25]</sup>. 图 3(b) 展示了在 350 nm 激发下不同  $\text{Dy}^{3+}$  浓度样品的发射光谱, 在 480 nm (蓝色), 571 nm (黄色) 和 659 nm (红色) 处有 3 个特征发射峰, 分别归属于  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{15/2}$ ,  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$ ,  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{11/2}$  的能级跃迁. 图 3(c) 为发射光谱对应的等高线图, 随着  $\text{Dy}^{3+}$  浓度的增大其发光强度呈现先递增再递减的趋势. 这是由于随着  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂浓度的增大, 发光中心数量不断增多, 导致发光强度逐渐增强; 但当浓度超过  $x = 0.07$  时, 非辐射跃迁占据主导, 引发浓度猝灭效应, 从而使发光强度降低<sup>[26]</sup>.

图 4(a), (b) 是 CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) 的三维发射光谱立体图和积分发射强度柱状图, 更加直观地反映了随着  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂浓度的增大, 发光强度先递增后递减的趋势, 原因是激活剂浓度升高致离子间距缩短, 发生了非辐射能量跃迁<sup>[27]</sup>. 进一步通过临界距离公式进行计算<sup>[28]</sup>:

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

式中,  $R_c$  代表临界距离,  $V$  代表单胞体积,  $X_c$  代表最佳浓度,  $N$  代表单胞中阳离子数<sup>[28]</sup>. 当  $R_c$  值小于 5 Å 时为交换相互作用, 当  $R_c$  的值大于 5 Å 时为电多级相互作用<sup>[29]</sup>. 经计算得到  $R_c = 11.49$  Å, 说明非辐射能量传递主要为电多级相互作用. 为了阐明  $\text{Dy}^{3+}$  的浓度猝灭机制, 利用 Dexter 能量传递公式进行计算<sup>[30]</sup>:

$$\lg(I/x) = -\frac{Q}{3} \lg x + A, \quad (3)$$

其中,  $I$  代表发光强度、 $x$  是掺杂  $\text{Dy}^{3+}$  浓度、 $A$  为常

数<sup>[30]</sup>.  $Q$  值不同, 对应的电多级相互作用不同: 偶极-偶极 ( $Q = 6$ ); 偶极-四极 ( $Q = 8$ ); 四极-四极 ( $Q = 10$ )<sup>[31,32]</sup>. 图 4(c) 是根据  $\lg(x)$  与  $\lg(I/x)$  的关系拟合曲线图, 经过计算  $Q$  值约为 4.74, 和 6 最为接近, 由此得出浓度猝灭机理为偶极与偶极相互作用.

当  $\text{Dy}^{3+}$  所处对称晶格位置时, 位于 480 nm 处的蓝色发射带最强, 磁偶极跃迁 ( $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{15/2}$ ) 会成为主导的跃迁形式; 当  $\text{Dy}^{3+}$  所处非对称中心位置时, 位于 571 nm 处的黄色发射带最强, 电偶极跃迁 ( $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$ ) 占主导地位<sup>[33]</sup>. 图 4(d) 是不同浓度样品在 480 nm 和 571 nm 处发射峰积分面积关系图, 根据柱状图 571 nm 黄光比 480 nm 的蓝光更强, 说明  $\text{Dy}^{3+}$  在该磷酸盐基质中占据非对称晶格位置.

### 3.3 荧光衰减曲线

为进一步描述荧光粉的能量传递机制, 图 5(a) 给出了 CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) 的荧光衰减曲线, 可利用下式拟合寿命<sup>[34]</sup>:

$$I_t = A \exp(-t/\tau) + I_0, \quad (4)$$

其中  $\tau$  代表荧光寿命,  $A$  是衰减幅度,  $I_0$  为  $t = 0$  时发射强度,  $I_t$  为  $t$  时发射强度. CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) 样品的荧光寿命从 0.614 ms 到 0.429 ms 单调递减. 图 5(b) 柱状图直观地展示了荧光寿命随着  $\text{Dy}^{3+}$  浓度增加而递减的趋势. 随着掺杂浓度的提高, 离子间相互作用增强, 非辐射能量传递过程加剧, 从而导致荧光粉的荧光寿命逐渐缩短<sup>[35]</sup>.

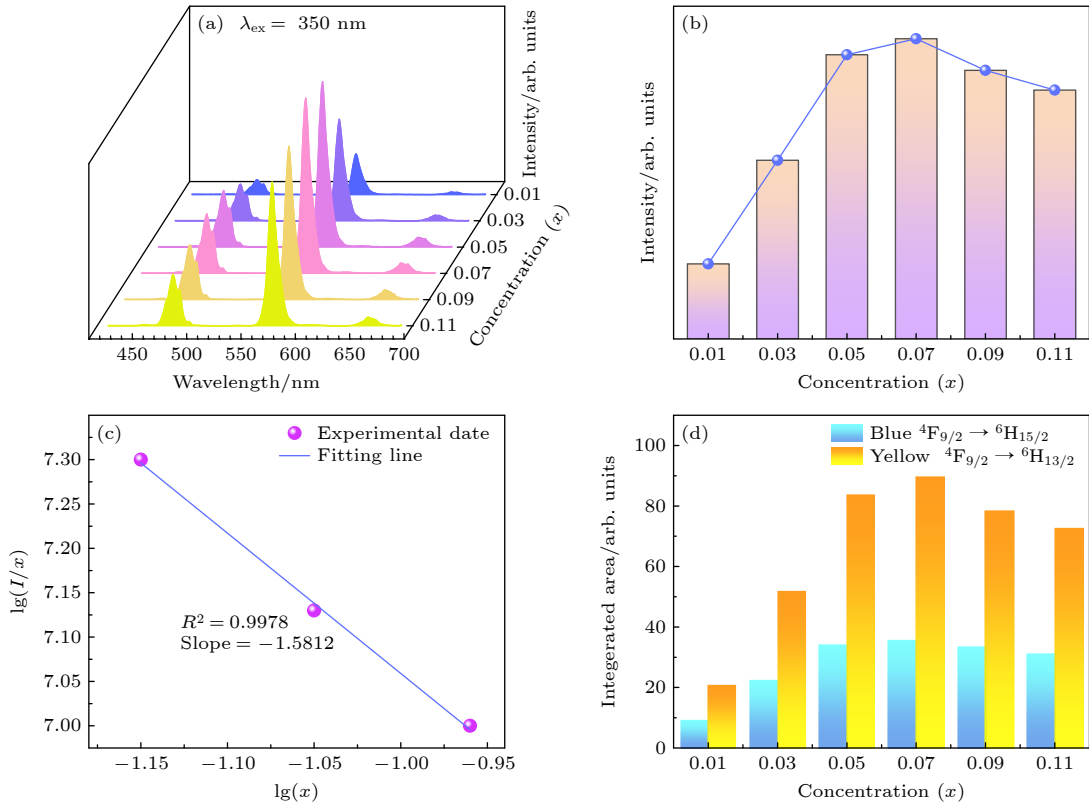


图 4 (a) CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) 的三维发射光谱 ( $\lambda_{\text{ex}} = 350 \text{ nm}$ ); (b) 积分发射强度与  $\text{Dy}^{3+}$  浓度柱状图; (c)  $\lg(I/x)$  与  $\lg(x)$  的线性拟合关系图; (d) 480 nm 与 571 nm 处的相对发光强度

Fig. 4. (a) Photoluminescence emission spectra of CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) ( $\lambda_{\text{ex}} = 350 \text{ nm}$ ); (b) the histogram between integrated emission intensity and  $\text{Dy}^{3+}$  concentration; (c) linear fitting diagram of  $\lg(I/x)$  and  $\lg(x)$ ; (d) relative luminescence intensity at 480 nm and 571 nm.

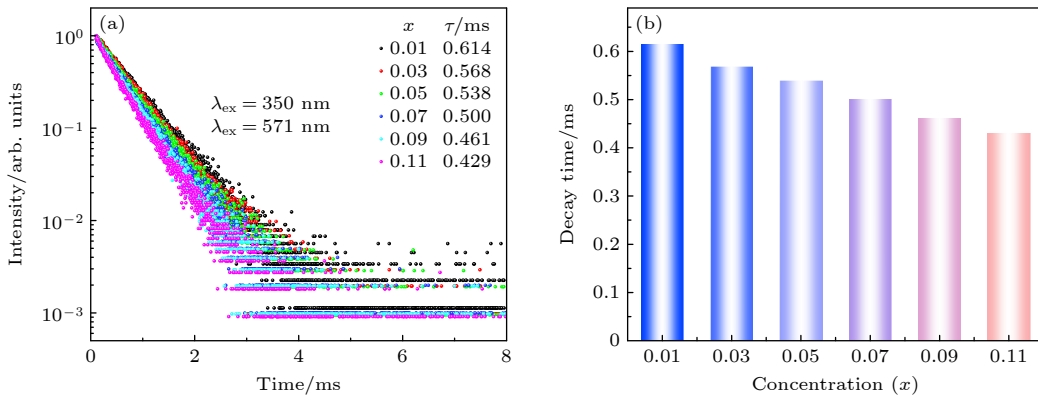


图 5 (a) CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) 荧光衰减曲线; (b) 荧光寿命与  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂浓度的关系

Fig. 5. (a) Lifetime decay curves of CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ); (b) dependence of the lifetime on the  $\text{Dy}^{3+}$  concentration.

图 6(a) 为  $\text{Dy}^{3+}$  的能级跃迁图, 展现了  $\text{Dy}^{3+}$  离子的能级跃迁过程和发光特性. 处于  ${}^6\text{H}_{15/2}$  基态的电子, 在紫外或近紫外激发下吸收能量跃迁到  ${}^4\text{D}_{7/2}$ ,  ${}^6\text{P}_{3/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{5/2}$ ,  ${}^6\text{P}_{7/2}$ ,  ${}^6\text{P}_{5/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{7/2}$ ,  ${}^4\text{G}_{11/2}$ ,  ${}^4\text{I}_{15/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{9/2}$  激发态上. 处于激发态的电子通过非辐射弛豫跃迁至  ${}^4\text{F}_{9/2}$  能级上, 这部分能量通过交叉弛豫消散掉, 接着通过辐射跃迁至  ${}^6\text{H}_{15/2}$ ,  ${}^6\text{H}_{13/2}$  和  ${}^6\text{H}_{11/2}$  能级. 图 6(b) 是发射跃迁对应的彩色发射光

谱图, 展示了  $\text{Dy}^{3+}$  离子在可见光区域的典型发射光谱, 可清晰观察到产生对应波长为 480 nm (蓝色)、571 nm (黄色)、659 nm (红色) 的发射带.

### 3.4 CIE 色坐标

图 7(a) 展示了不同  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂浓度样品的 CIE 坐标图, 所有样品均处于黄色发光区域. 图 7(b) 所示为不同浓度样品的  $(x, y)$  色度坐标值, 方差反

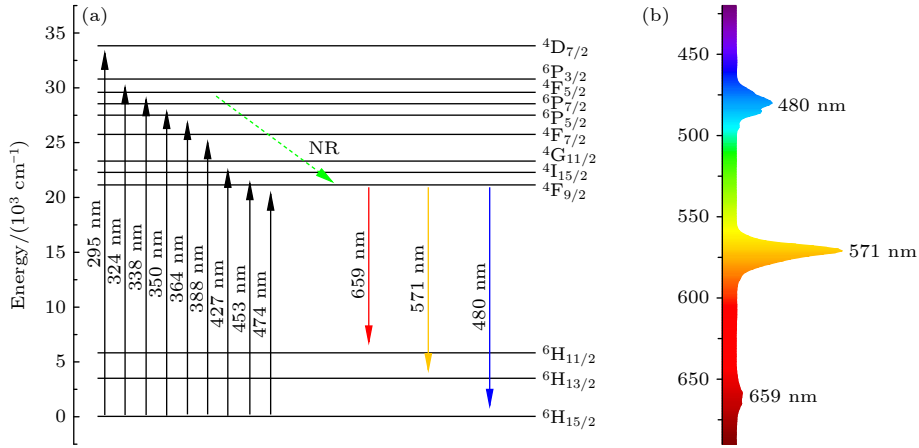


图 6 (a) Dy<sup>3+</sup>的能级跃迁图; (b) 彩色光谱图

Fig. 6. (a) Energy level diagram of Dy<sup>3+</sup>; (b) color spectrum diagram.

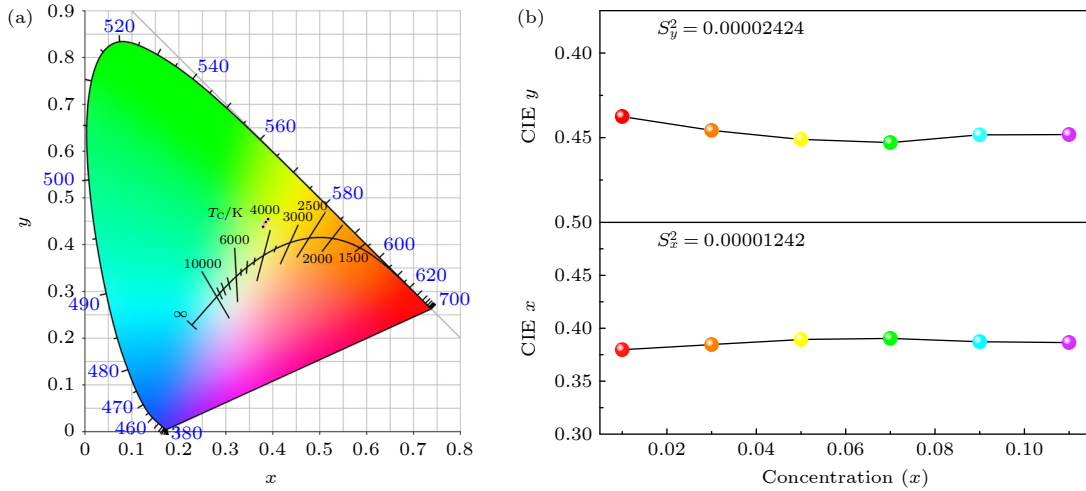


图 7 (a) CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) 的 CIE 坐标; (b) 不同浓度样品的色度坐标值

Fig. 7. (a) CIE coordinates of CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ); (b) colorimetric coordinate values of different concentrations.

映了数据的离散程度, 利用方差公式<sup>[36]</sup>:

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \left[ (x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2 \right], \quad (5)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \left[ (y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2 \right], \quad (6)$$

计算得到  $S_x^2 = 0.00002424$  和  $S_y^2 = 0.00001242$ , 方差数值较小说明增加 Dy<sup>3+</sup>浓度对发光色度影响比较小. 根据 McCamy 经验公式, 计算荧光粉的相关色温<sup>[37]</sup>:

$$\text{CCT} = -449n^3 + 3525n^2 - 6823.2n + 5520.3, \quad (7)$$

其中  $n = (x - x_e)/(y - y_e)$ ,  $x$  和  $y$  为样品色度坐标,  $x_e = 0.3320$ ,  $y_e = 0.1858$ . CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) 样品的色度坐标和色温如表 1 所示, CNYP: 0.07 Dy<sup>3+</sup>的色温 4015 K 接近自然光色温

(自然光色温 3278—5110 K), 能够平衡舒适感和清晰度, 满足不同场景下的照明需求.

表 1 CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$ 的色度坐标和 CCT 色温

Table 1. CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  chromaticity coordinates and CCT color temperature.

No.	Concentration	$x$	$y$	CCT/K
1	0.01	0.3897	0.4375	4219
2	0.03	0.3846	0.4457	4130
3	0.05	0.3894	0.4510	4033
4	0.07	0.3905	0.4529	4015
5	0.09	0.3872	0.4483	4075
6	0.11	0.3865	0.4482	4093

### 3.5 热稳定性和量子效率

在 LED 的实际应用中, 荧光粉的热稳定性是一项关键性能指标. 图 8(a), (b) 为变温发射光谱及对应的 3D 图, 在 350 nm 激发下, 从 298—448 K

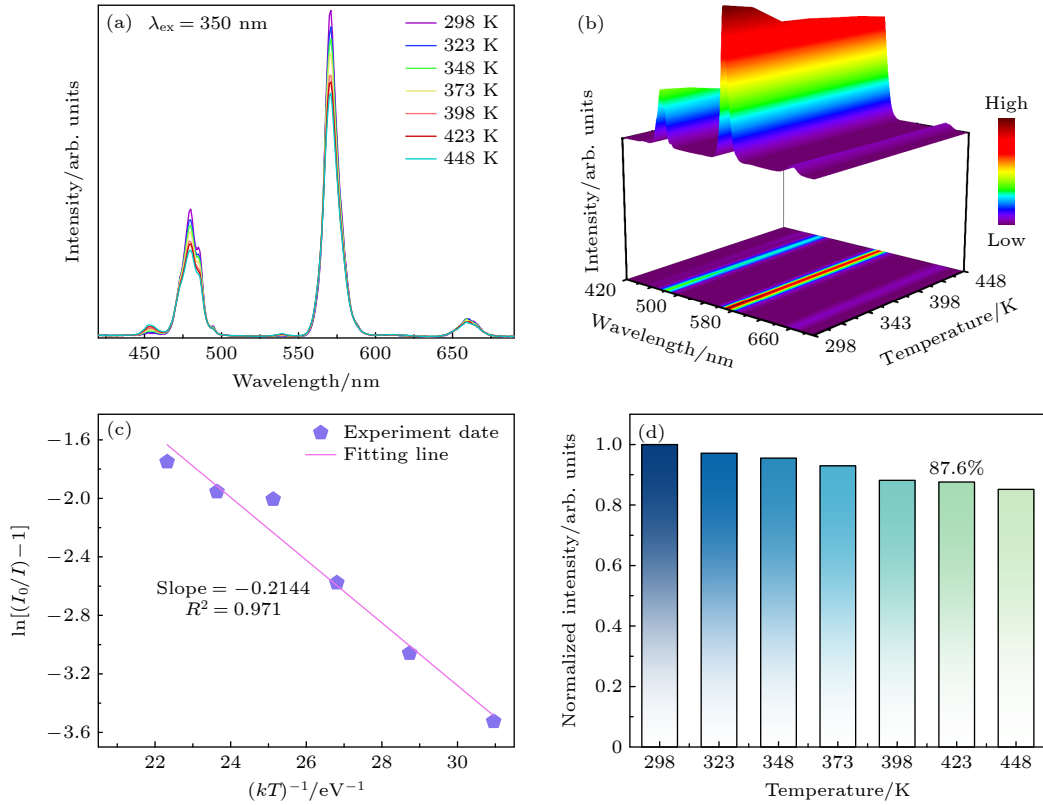


图 8 (a) CNYP: 0.07Dy<sup>3+</sup> 荧光粉在不同温度下的发射光谱; (b) 荧光强度 3D 图; (c)  $\ln[(I_0/I) - 1]$  与  $1/(kT)$  线性拟合关系; (d) 归一化发光强度随温度变化柱状图

Fig. 8. (a) Emission spectra of CNYP: 0.07Dy<sup>3+</sup> phosphors at different temperatures; (b) 3D graph of fluorescence intensity; (c) the linear fitting relationship between  $\ln[(I_0/I) - 1]$  and  $1/(kT)$ ; (d) bar chart of normalized luminous intensity varying with temperatures.

(25—175 °C) 的积分发光强度逐渐减弱, 这是由于发生了热猝灭效应<sup>[38]</sup>. 利用下式计算活化能<sup>[39]</sup>:

$$I = \frac{I_0}{1 + C \exp(-E_a/(kT))}, \quad (8)$$

式中,  $E_a$  表示活化能、 $T$  表示温度、 $I_0$  和  $I$  表示在室温和在  $T$  温度时的发光强度、 $k$  ( $k = 8.629 \times 10^{-5}$  eV/K) 代表玻尔兹曼常数<sup>[39,40]</sup>. 图 8(c) 通过  $\ln[(I_0/I) - 1]$  与  $1/kT$  关系拟合得活化能  $E_a = 0.2144$  eV. 图 8(d) 是归一化发光强度随温度变化柱状图, 当温度达到 423 K (150 °C) 时荧光粉发光强度仍然为常温下发光强度的 87.6%, 表明样品具有优异的热稳定性.

图 9 为 CNYP: 0.07 Dy<sup>3+</sup> 的量子效率测试图, 插图为 450—650 nm 的放大图, 内量子效率及外量子效率可通过下式进行计算<sup>[1]</sup>:

$$\text{IQE} = \int L_S / \left( \int E_R - \int E_S \right), \quad (9)$$

$$\text{AE} = \left( \int E_R - \int E_S \right) / \int E_R, \quad (10)$$

$$\text{EQE} = \text{IQE} \times \text{AE}, \quad (11)$$

其中  $L_S$  表示样品的发射光谱,  $E_R$  表示以 BaSO<sub>4</sub> 为参比时的激发光积分强度,  $E_S$  表示积分球放置样品时的激发光强度积分, AE 为吸收效率, IQE 为内量子效率, EQE 为外量子效率. 计算得 CNYP: 0.07 Dy<sup>3+</sup> 材料的内量子效率为 46.40%, 外量子效

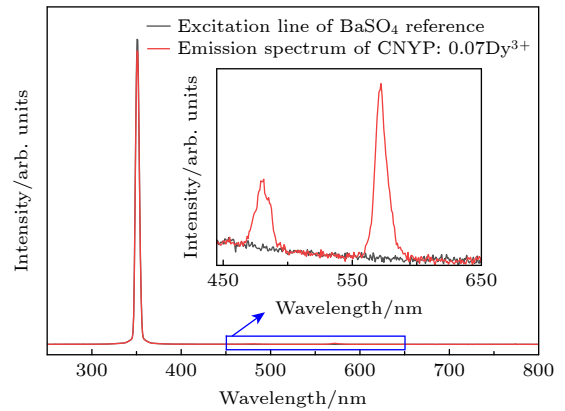


图 9 CNYP: 0.07 Dy<sup>3+</sup> 的量子效率测试图, 插图为部分放大图  
Fig. 9. Quantum efficiency of CNYP: 0.07 Dy<sup>3+</sup>, the illustration is a partial enlarged graph.

率为 1.68%。已报道的  $\text{CaGdSbWO}_8$ :  $\text{Dy}^{3+}$  荧光粉的内量子效率为 29.15% [41],  $\text{La}(\text{BO}_3, \text{PO}_4)$ :  $\text{Dy}^{3+}$  为 20.60% [42],  $\text{LiNb}_{0.6}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ : 0.02  $\text{Dy}^{3+}$  为 36.46% [43], 对比表明该荧光粉具备较高的量子效率。

### 3.6 W-LED 和光学温度计的应用

为评估所制备荧光粉在实际应用中的发光性能, 采用 365 nm 近紫外芯片与 CNYP: 0.07  $\text{Dy}^{3+}$  荧光粉组合封装了白光 LED 器件. 图 10 展示了该器件的电致发光光谱及相关性能表征结果. 400 nm 附近的光谱来源于芯片光谱, 480 nm 和 571 nm 处为  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂荧光粉的发射峰, 左侧插图展示了 W-LED 器件的色度坐标为 (0.3275, 0.3883)、其色温为 5680 K、显色指数为 85、电光转换效率为 13.6%. 右侧插图为在 3.2 V 电压下点亮的 W-LED 器件数码照片, 可观察到该器件发出明亮的白光。

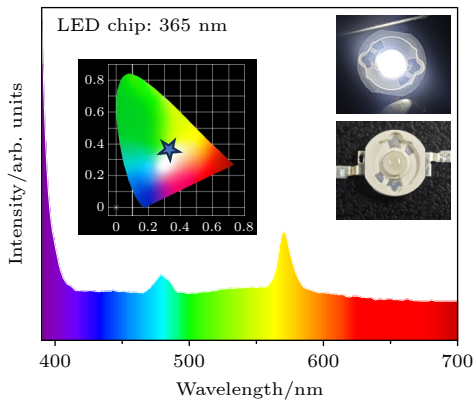


图 10 采用 365 nm 芯片和 CNYP: 0.07  $\text{Dy}^{3+}$  荧光粉封装的 W-LED 器件  
Fig. 10. W-LED device encapsulated with 365 nm chip and CNYP: 0.07  $\text{Dy}^{3+}$  phosphor.

荧光温度传感技术是基于发光特性与温度之间的关联, 通过捕捉并分析这些发光特性的变化来达成温度表征目的的一种方法. 图 11(a) 展示了 CNYP: 0.07  $\text{Dy}^{3+}$  荧光粉在 298—448 K 下 440—500 nm 波段的发射光谱图, 左侧插图为 420—690 nm 全波段发射光谱的三维立体图. 随着温度的升高, 样品整体发射强度逐渐减弱, 而 452 nm 处的发射强度却随温度升高而增强. 图 11(b) 对比说明了 452 nm ( ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$ ) 和 480 nm ( ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$ ) 发射峰的发光强度随温度升高呈现相反变化趋势. 这是由于  $\text{Dy}^{3+}$  的  ${}^4\text{I}_{15/2}$  和  ${}^4\text{F}_{9/2}$  能级之间的能量差  $\Delta E$  为  $1149 \text{ cm}^{-1}$  满足热耦合条件, 构成热耦合能级对, 随着温度的升高电

子将在热耦合能级对  ${}^4\text{I}_{15/2}$  和  ${}^4\text{F}_{9/2}$  能级重新分布, 在  ${}^4\text{I}_{15/2}$  的电子数量会增加,  ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$  跃迁加强, 而在  ${}^4\text{F}_{9/2}$  电子数量会减少 [45–47]. 根据  ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$  和  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$  对温度的不同感应, 可用于光学温度传感的 FIR 技术. FIR 和温度的关系用下式表示 [47]:

$$\text{FIR} = \frac{I_{452}}{I_{480}} = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) + C, \quad (12)$$

式中  $A$  和  $C$  为拟合的常数,  $\Delta E$  为  ${}^4\text{I}_{15/2}$  和  ${}^4\text{F}_{9/2}$  之间的能级差. 图 11(c) 为荧光强度比随温度变化的拟合关系,  $R^2 = 0.9997$  显示了拟合结果的可靠性. 这一结果明确证实了  ${}^4\text{I}_{15/2}$  和  ${}^4\text{F}_{9/2}$  能级间粒子数分布严格遵循玻尔兹曼分布规律. 一般用绝对灵敏度 ( $S_a$ ) 和相对灵敏度 ( $S_r$ ) 来描述温度传感性能, 绝对灵敏度反映了光学传感器对温度变化的响应程度, 相对灵敏度指的是温度每变化一个单位时, 发光材料的某一参数相对于原来的量变化了多少, 其反映了传感器输出参数变化的相对程度.  $S_a$  和  $S_r$  可用下式计算 [48]:

$$S_a = \left| \frac{\partial(\text{FIR})}{\partial(T)} \right| = \text{FIR} \times \frac{\Delta E}{kT^2}, \quad (13)$$

$$S_r = \left| \frac{1}{\text{FIR}} \times \frac{\partial(\text{FIR})}{\partial(T)} \right| = \frac{\Delta E}{kT^2}. \quad (14)$$

图 11(d) 是绝对灵敏度和相对灵敏度随温度变化关系图. 可见随着温度的升高, 绝对灵敏度  $S_a$  逐渐递增, 相对灵敏度  $S_r$  不断降低. 在比较不同类型的传感器时, 相对灵敏度是一个重要的参数. CNYP:  $\text{Dy}^{3+}$  的最大相对灵敏度达到  $1.72\% \text{ K}^{-1}$ , 这一数值优于表 2 中大多数已报道的  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂

表 2 以 FIR 技术为基础的温敏型  $\text{Dy}^{3+}$  激活荧光粉的最大  $S_r$  值比较

Table 2. Comparison of maximum  $S_r$  values of temperature-sensitive  $\text{Dy}^{3+}$  activated phosphors based on FIR technique.

Sensing materials	Temperature range/K	$S_r$ max/ (%·K <sup>-1</sup> )	Ref.
$\text{Ca}_7\text{NaY}(\text{PO}_4)_6$ : $\text{Dy}^{3+}$	298—448	1.72	This work
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2\text{SiO}_4$ : $\text{Dy}^{3+}$	296—1073	1.75	[2]
$\text{KNaCa}_2(\text{PO}_4)_2$ : $\text{Dy}^{3+}$	90—230/ 250—500	2.57/ 0.74	[16]
$\text{CaLa}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ : $\text{Dy}^{3+}$	298—548	1.67	[23]
$\text{Sr}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$ : $\text{Dy}^{3+}$	298—473	0.61	[32]
$\text{GdPO}_4$ : $\text{Dy}^{3+}$	290—530	1.55	[44]
$\text{Ca}_3\text{LuAl}_3\text{B}_4\text{O}_{15}$ : $\text{Dy}^{3+}$	300—500	1.46	[45]

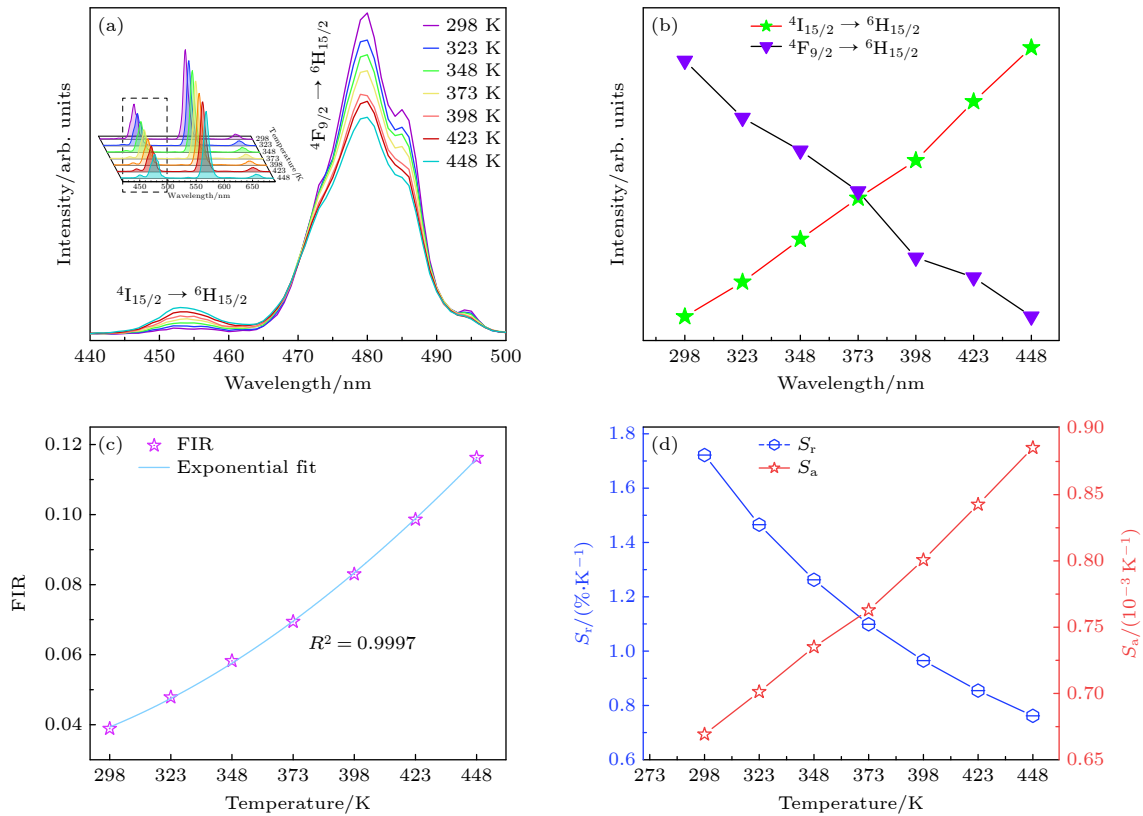


图 11 (a) CNYP: 0.07 Dy<sup>3+</sup> 荧光粉在 440—500 nm 波段的发射光谱图 (298—448 K); (b) 452 nm ( $4I_{15/2} \rightarrow 6H_{15/2}$ ) 和 480 nm ( $4F_{9/2} \rightarrow 6H_{15/2}$ ) 积分发射强度随温度变化关系; (c) 荧光强度比随温度变化关系; (d) 绝对灵敏度和相对灵敏度随温度变化关系

Fig. 11. (a) Emission spectra of the CNYP: 0.07 Dy<sup>3+</sup> phosphor in the wavelength range of 440–500 nm at different temperatures (298–448 K); (b) the luminous intensity changes of the  $4I_{15/2} \rightarrow 6H_{15/2}$  and  $4F_{9/2} \rightarrow 6H_{15/2}$ ; (c) fluorescence intensity ratio as a function of temperatures; (d) absolute sensitivity and relative sensitivity as a function of temperatures.

温度传感材料. 结果表明, 所制备的荧光粉具有优异的温度灵敏度, CNYP: Dy<sup>3+</sup> 荧光粉有望成为非接触式光学温度传感领域的候选材料.

## 4 结 论

本文采用高温固相法合成了系列 CNYP: Dy<sup>3+</sup> 荧光粉, 通过 XRD, SEM 表征证实 Dy<sup>3+</sup> 成功掺入基质晶格中且所得样品为纯相. 在 350 nm 激发下, CNYP:  $x\text{Dy}^{3+}$  ( $x = 0.01\text{--}0.11$ ) 产生蓝光 480 nm ( $4F_{9/2} \rightarrow 6H_{15/2}$ ) 和黄光 571 nm ( $4F_{9/2} \rightarrow 6H_{13/2}$ ) 的特征发射, 发射强度在  $x = 0.07$  之前逐渐上升, 之后由于浓度猝灭不断衰减. 随着 Dy<sup>3+</sup> 浓度的增大, 寿命从 0.614 ms 逐渐减短至 0.429 ms, 这归因于离子间距缩短导致非辐射能量转移增强. 变温光谱研究表明该材料具有优异的热稳定性, 在 150 °C 时发光强度保持室温的 87.6%. 基于热耦合能级对 ( $4I_{15/2}$  与  $4F_{9/2}$ ) 的荧光强度比温度传感特性分析表明, 在 298—448 K (25—175 °C) 范围内最大

相对灵敏度  $S_r$  达到  $1.72\% \text{ K}^{-1}$ , 表现出良好的光学测温潜力. 利用 CNYP: Dy<sup>3+</sup> 封装的 W-LED 器件 CIE 位于白色光区、色温为 5680 K、显色指数为 85. 上述研究表明 CNYP: Dy<sup>3+</sup> 荧光粉兼具白光发光与温度传感双功能特性, 为开发新型多功能光学材料提供了重要参考.

## 参考文献

- [1] Hu J, Cui R R, Zhang J, Peng L H, Shi Y Z, Guo X 2024 *J. Rare Earths.* **42** 1855
- [2] Yu Z Q, Li X D, Wang J, Zhang S 2023 *Mater. Today Chem.* **33** 101739
- [3] Gu J Q, Xie F Y, Wang S Q, Xu D K, Zhang H, Xu H L, Zhong S L 2024 *Ceram. Int.* **50** 14127
- [4] Xie J H 2022 *Ph. D. Dissertation* (Jilin: Changchun University Of Science And Technology) (in Chinese) [谢吉煊 2022 博士学位论文 (吉林: 长春理工大学)]
- [5] Gao S F, Pan Y Y, Jia K Y, Han Pan, Xiong Y, Cheng S B 2024 *ACS Appl. Nano Mater.* **7** 20094
- [6] Zhao R L, Guo X, Zhang J, Zhang C, Deng C Y, Cui R R 2023 *Ceram. Int.* **49** 25795
- [7] Yu X F 2022 *Ph. D. Dissertation* (Jilin: Changchun University Of Science And Technology) (in Chinese) [于小芳

- 2022 博士学位论文 (吉林: 长春理工大学)]
- [8] Shi L Y, Zhao D, Zhang R J, Zhu S Y, Yu M H 2022 *Dalton Trans.* **51** 3686
- [9] Zhao F Y 2024 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Science and Technology Beijing) (in Chinese) [赵芳仪 2024 博士学位论文 (北京: 北京科技大学)]
- [10] Wani M A, Magray T F, Belekar R M 2023 *Inorg. Chem. Commun.* **158** 111703
- [11] Gao M, Li K, Yan Y H, Xin S Y, Dai H, Zhu G, Wang C 2021 *J. Mol. Struct.* **1228** 129471
- [12] Chen R J, Jiang X L, Zhang T Q, Zeng F M, Yang W L, Lin H, Liu L N, Li S S, Li C, Su Z M 2023 *J. Alloys Compd.* **966** 171558
- [13] Wang Y H, Lian X Z, Xu H W, Kang X J, Lv W 2022 *Chin. J. Lumin.* **43** 676 (in Chinese) [王一航, 连雪珠, 徐华伟, 康晓娇, 吕伟 2022 *发光学报* **43** 676]
- [14] Song R T, Tang H, Li J P, Niu Y F, Liu Y X, He J Y, Zhu J 2024 *Opt. Mater.* **148** 114859
- [15] Liu C L, Zheng Y K, Qin Y, Liang L L, Yang S Q, Li H, Jiang H M, Zhao X Y, Liu S L, Zhang H Z, Zhu J 2024 *Inorg. Chem.* **63** 6483
- [16] Jose J R, Jose T A, Ashok A J, Joseph C, Biju P R 2024 *J. Alloys Compd.* **1006** 176304
- [17] Zhong C S, Zhang L, Xu Y H, Wu X D, Yin S W, Zhang X B, You H P 2022 *Mater. Today Chem.* **26** 101233
- [18] Xia Z G, Liu Q L 2016 *Prog. Mater. Sci.* **84** 59
- [19] Zhang X, Cui R R, Zhang M, Pi Y W, Yin X X, Deng C Y 2024 *J. Alloys Compd.* **1002** 175471
- [20] Wei C, Zhang J, Sun Z, Ran J Y, Guo L, Sun J Y 2024 *J. Alloys Compd.* **971** 172686
- [21] Lu J W, Zhao J, Zhang Y C, Tu R T, Liu F N, Leng Z H 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 214204 (in Chinese) [禄靖雯, 赵瑾, 张永春, 涂茹婷, 刘馥妮, 冷稚华 2024 *物理学报* **73** 214204]
- [22] Jiang H X, Lv S C 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 177801 (in Chinese) [姜洪喜, 吕树臣 2021 *物理学报* **70** 177801]
- [23] Liu Q Y, Wu M H, Chen B L, Huang X M, Liu M Y, Liu Y F, Su K, Min X, Mi R Y, Huang Z H 2023 *Ceram. Int.* **49** 4971
- [24] Xi Q, Yin T, Zhang Y, Zhao H C, Wu Z P, Zhang Q Q, Wang D W, Guan L, Wang C S, Li X 2025 *J. Alloys Compd.* **1018** 179241
- [25] Tang H, Zhang X Y, Cheng L Q, Mi X Y, Liu Q S 2022 *J. Alloys Compd.* **898** 162758
- [26] Wang R Y 2024 *M. S. Thesis* (Jilin: Changchun University Of Science And Technology) (in Chinese) [王瑞阳 2024 硕士学位论文 (吉林: 长春理工大学)]
- [27] Zhang Y, Miao S H, Liang Y J, Liang C, Chen D X, Shan X H, Sun K N, Wang X J 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 136.
- [28] Wang Y Q, Li Y F, Du Y L, Liu G X, Liu S D, Wang J X, Dong X T 2025 *J. Mol. Struct.* **1324** 140971
- [29] Min Z Y, Zeng Q, Chen S M, Qin Y, Yao C F 2022 *J. Alloys Compd.* **924** 166497
- [30] Long S C, Tian M F, Zhang D, Luo X X, Xu W, Tian Y, Xin S Y 2024 *J. Mater. Chem. C.* **12** 19536
- [31] Guo J, Li S C, Kong J Y, Li Y X, Zhou L, Lou L Y, Lv Q Y, Tang R, Zheng L L, Deng B, Yu R J 2022 *Opt. Laser Technol.* **155** 108347
- [32] Wang Z Y, Ma L Y, Shao Y, Luo Y Z, Liao R C, Kong X M, Yang X Y 2025 *Ceram. Int.* **51** 19535
- [33] Luo J, Zhang Z Q, Xu J H, Qin Z T, Zhao Y S, He H, Li P N, Tang J F 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 017801 (in Chinese) [罗杰, 张子秋, 徐俊豪, 秦兆婷, 赵元帅, 何洪, 李冠男, 唐剑锋 2023 *物理学报* **72** 017801]
- [34] Zhang Y H, Sun B, Liu J, Zhang Z Y, Liu H 2023 *Dalton Trans.* **52** 13304
- [35] Gong C Y, Zheng Q J, Wan Z H, Yang J Y 2024 *MR* **38** 22100218 (in Chinese) [官春艳, 郑启涇, 万正环, 杨锦瑜 2024 *材料导报* **38** 22100218]
- [36] Chen J X, He D M, Wang W X, Li S L, Zou Z Q, Liu J H, Wang Y, Chen X Y, Zheng L L, Xie S A, Yu R J 2024 *J. Lumin.* **265** 120252
- [37] Li Y T, Xu S, Chen J, Wang X K, Gong S, Zhang X J, Liu H S, Chi Y D, Sun X R, Mahadevan C K 2024 *Ceram. Int.* **50** 25548
- [38] Wang J X, Li Z H, Zhao Y, Jiang X K, Zhou H W 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 187801 (in Chinese) [王佳旭, 李忠辉, 赵炎, 蒋小康, 周恒为 2024 *物理学报* **73** 187801]
- [39] Zhou J, Wang T S, Zhang W T, Huang X, Wang X M 2022 *Ceram. Int.* **48** 17053
- [40] Zhao W, Ping Z Y, Zheng Q H, Zhou W W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 247801 (in Chinese) [赵旺, 平兆艳, 郑庆华, 周薇薇 2018 *物理学报* **67** 247801]
- [41] Zhou L, Liu L, Yang R Q, Kong J Y, Li Y X, Zhao Y X, Du Y F, Li C L, Zou Z Q, Deng B, Yu R J 2023 *Inorg. Chem. Commun.* **148** 110316
- [42] Song R T, Zhang Z H, Li H, Luo Z Y, Yang J Y, Ma J, Xiang X F, Zeng Q, Zhu J 2023 *Ceram. Int.* **49** 6965
- [43] Chen S M, Zeng Q, Yao C F, Liu Y Y, Qin Y, Min Z Y 2022 *J. Lumin.* **244** 118697
- [44] Abbas M T, Khan S A, Mao J, Khan N Z, Qiu L, Ahmed J, Wei X, Chen Y, Alshehri S M, Agathopoulos S 2022 *J. Therm. Anal. Calorim.* **147** 11769
- [45] Gao F H, Khan W U, Khan W U, Ye Z Q, Zhang Y L 2023 *Ceram. Int.* **49** 8039
- [46] Wade S A, Collins S F, Baxter G W 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 4743
- [47] Yan Y B, Li S, Ding S S, Zhang B X, Sun H, Ju Q H, Yao L 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 097801 (in Chinese) [严涌颺, 李霜, 丁双双, 张冰雪, 孙浩, 鞠泉浩, 姚露 2024 *物理学报* **73** 097801]
- [48] Liao Z C, Cao B S, Li L P, Cong Y, He Y Y, Dong B 2023 *Appl. Mater. Today* **31** 101765

# White light illumination and temperature sensing characteristics of Dy<sup>3+</sup>-doped Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub> single-matrix phosphor\*

ZHAO Jin<sup>1)†</sup> TU Ruting<sup>1)</sup> LIU Funi<sup>1)</sup> LU Jingwen<sup>1)</sup> FU Yongcheng<sup>1)</sup>  
 WANG Yu<sup>1)</sup> LI Tingzheng<sup>1)</sup> LENG Zhihua<sup>2)</sup>

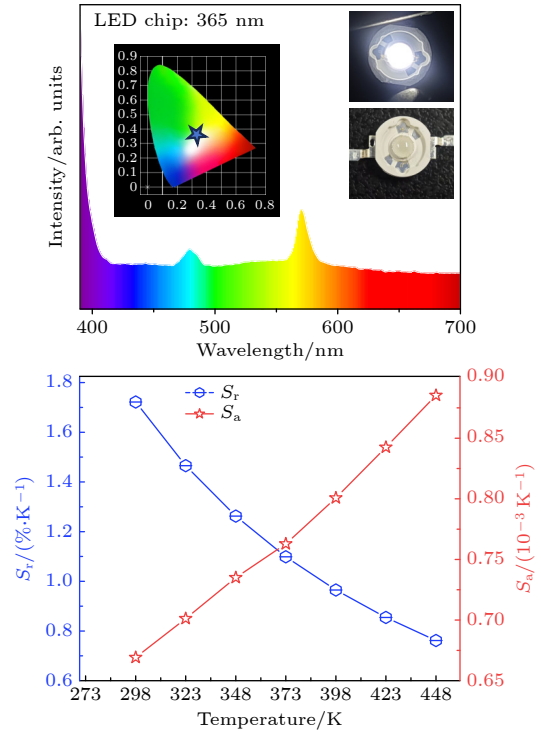
<sup>1)</sup> (College of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

<sup>2)</sup> (School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

( Received 7 July 2025; revised manuscript received 2 August 2025 )

## Abstract

Rare earth-activated phosphors have shown great potential applications in various fields, such as lighting, displays, anti-counterfeiting, and optical thermometry. This study aims to synthesize a series of Dy<sup>3+</sup>-doped Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub> phosphors through high-temperature solid-state reaction, focusing on developing multifunctional optical materials for lighting and temperature sensing. The phase purity and morphological characteristics of the obtained samples are confirmed by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. Luminescence properties and energy transfer mechanisms are systematically investigated through photoluminescence spectroscopy and fluorescence decay analysis. Under 350-nm near-ultraviolet excitation, the emission intensity of Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>:Dy<sup>3+</sup> increases with Dy<sup>3+</sup> concentration rising until reaching an optimal value at  $x = 0.07$ , beyond which concentration quenching occurs. This quenching behavior is attributed to enhanced non-radiative energy transfer at higher Dy<sup>3+</sup> concentrations, leading to a corresponding decrease in fluorescence lifetime. The optimized Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>:0.07Dy<sup>3+</sup> phosphor displays remarkable thermal stability, retaining 87.6% of its initial emission intensity at 150 °C. The white light emitting diode(LED) device fabricated using the obtained phosphor and near-UV LED chip shows excellent performance with a correlated color temperature of 5680 K, CIE coordinates of (0.3275, 0.3883) in the white light region and a color rendering index of 85. Furthermore, temperature-dependent fluorescence intensity ratio analysis reveals excellent optical thermometric performance, achieving a maximum relative sensitivity ( $S_r$ ) of 1.72 %/K. These results indicate that the Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>:Dy<sup>3+</sup> phosphor exhibits significant potential applications in single-matrix phosphor-converted white LEDs and high-precision optical thermometry.



**Keywords:** Dy<sup>3+</sup>, phosphor, light emitting diodes, optical temperature sensing

**PACS:** 42.70.-a, 33.50.Dq, 78.55.-m, 07.20.Dt

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250886

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250886

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11804265), the Key Science and Technology Innovation Team of Shaanxi Province, China (Grant No. 2022TD-30), and the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2024JC-YBMS-384).

† Corresponding author. E-mail: zhaojin@xauat.edu.cn



Dy<sup>3+</sup>掺杂Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>单基质荧光粉的白光照明与温度传感特性

赵瑾 涂茹婷 刘馥妮 禄靖雯 付永诚 王宇 李廷政 冷稚华

**White light illumination and temperature sensing characteristics of Dy<sup>3+</sup>-doped Ca<sub>7</sub>NaY(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub> single-matrix phosphor**

ZHAO Jin TU Ruting LIU Funi LU Jingwen FU Yongcheng WANG Yu LI Tingzheng LENG Zhihua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 204202 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250886

CSTR: 32037.14.aps.74.20250886

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250886>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

固态照明用Li<sub>2</sub>Gd<sub>4</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>7</sub>:Sm<sup>3+</sup>橙红色荧光粉的结构和发光特性

Structure and luminescence properties of Li<sub>2</sub>Gd<sub>4</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>7</sub>:Sm<sup>3+</sup> orange-red phosphor for solid-state lighting

物理学报. 2024, 73(21): 214204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241017>

锡基钙钛矿的研究进展及其在发光二极管中的应用

Recent progress of tin-based perovskites and their applications in light-emitting diodes

物理学报. 2021, 70(4): 048503 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201284>

稀土掺杂Gd<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>O<sub>11</sub>亚碲酸盐荧光粉的合成及其发光性能

Synthesis and luminescent properties of rare earths doped Gd<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>O<sub>11</sub> tellurite phosphors

物理学报. 2023, 72(1): 017801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221341>

Sm<sup>3+</sup>掺杂NaLa(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>单一基质白光荧光粉制备及发光性能

Synthesis and properties of Sm<sup>3+</sup> doped NaLa(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single matrix white phosphors

物理学报. 2021, 70(17): 177801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210493>

基于光谱法的发光二极管稳态热阻测量方法

Steady-state thermal resistance measurement of light-emitting diodes based on spectroscopic method

物理学报. 2021, 70(9): 098501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201093>

无注入型发光二极管的载流子输运模型研究

Carrier transport model of non-carrier-injection light-emitting diode

物理学报. 2023, 72(4): 048503 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221831>