

Eu²⁺/Eu³⁺:Sr_{0.8}Ca_{0.2}BPO₅荧光粉的自还原合成及光学测温研究

邹兴旭

五邑大学应用物理与材料学院, 广东 江门

收稿日期: 2026年4月1日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月12日

摘要

非接触式实时温度监测在诸多领域具有重要的意义, 然而现有的温度器在分辨率和响应速度方面存在局限性。在本研究中, 我们利用自还原手段合成得到了混合价态Eu²⁺/Eu³⁺共掺杂Sr_{0.8}Ca_{0.2}BPO₅荧光粉, 利用该荧光粉双发射峰的特点实现了自参比荧光测温。在303 K到570 K的范围内, 该温度传感器的相对灵敏度和绝对灵敏度分别高达4.63% K⁻¹与0.00189 K⁻¹, 且具有高分辨率和快速响应特征, 验证了该荧光粉在非接触式温度传感领域的潜在应用价值。

关键词

荧光粉, 光学测温, 荧光强度比

Research on Self-Reduction Synthesis and Optical Thermometry of Eu²⁺/Eu³⁺:Sr_{0.8}Ca_{0.2}BPO₅ Phosphor

Xingxu Zou

School of Applied Physics and Materials, Wuyi University, Jiangmen Guangdong

Received: April 1, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 12, 2026

Abstract

Non-contact real-time temperature monitoring is of great significance in numerous fields; however, existing thermometers have limitations in terms of resolution and response speed. In this study, mixed-valence Eu²⁺/Eu³⁺ co-doped Sr_{0.8}Ca_{0.2}BPO₅ phosphors were synthesized via a self-reduction method. Leveraging the characteristic of dual emission peaks of these phosphors, self-referenced fluorescence thermometry was achieved. Within the temperature range of 303 K to 570 K, the relative

sensitivity and absolute sensitivity of this temperature sensor reached as high as $4.63\% \text{ K}^{-1}$ and 0.00189 K^{-1} , respectively, while exhibiting high resolution and rapid response features. These results validate the potential application value of this phosphor in the field of non-contact temperature sensing.

Keywords

Phosphor, Optical Thermometry, Fluorescence Intensity Ratio

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

温度在我们日常生活当中是一个十分重要的物理量，在我们日常生活的许多领域都起到不可替代的作用，所以对温度的精准测量也是十分重要的。传统接触式温度计普遍存在灵敏度不足、空间分辨率有限以及响应迟缓等问题，难以适应特殊情况与环境条件下的温度监测需求。因此，研发兼具高灵敏度、高空间分辨率与快速响应的非接触式测温技术显得尤为关键。基于稀土离子掺杂无机发光材料双发射峰荧光强度比实现温度监测的方法广泛受到科学家的关注。 Eu^{2+} 与 Eu^{3+} 是稀土发光材料中常用的激活离子，其发光分别源自 $5d \rightarrow 4f$ 与 $4f \rightarrow 4f$ 电子跃迁。由于这两类跃迁在热扰动下的荧光猝灭行为存在显著差异，所以它们常被用作荧光温度探针的理想激活剂。

本文采用高温固相法制备了一系列 $\text{Sr}_{0.8-x}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:x\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ ($0 \leq x \leq 0.04$)样品。借助X射线衍射、透射电子显微镜、场扫描电子显微镜及傅里叶变换红外光谱等手段，对其晶体结构与微观形貌进行了系统表征；利用X射线确定了Eu离子的价态分布，并结合电荷补偿机制阐释了 Eu^{3+} 向 Eu^{2+} 的自还原过程。通过室温发射光谱筛选出Eu离子的最佳掺杂量，并在300~573 K区间考察了其发射强度变化趋势，进而评估该体系在光学测温方面的应用潜力。

2. 实验与表征

2.1. 样品与表征

本实验原料均采用Aladdin试剂。将所有原料按照摩尔比称取，在玛瑙研钵中研磨大约30分钟。将前驱体在碳还原的气氛下在1300℃下烧结4小时，然后冷却得到样品。

2.2. 测试条件

(1) X射线衍射仪

采用铜靶材作为基底反射源，扫描范围为 10° 至 80° ，步长为 0.02° ，扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$ 。采用连续扫描模式，测试在室温下进行。

(2) 扫描电子显微镜和能量色散X射线光谱仪

样品微观形貌与元素分析在配备有能谱仪的JSM-6700F场发射扫描电子显微镜上进行EDS元素分析及面分布成像时，加速电压为15 kV，工作距离为15 mm，采集时间3分钟。

(3) 紫外-可见漫反射光谱仪

样品的光吸收性能在配备积分球的ShimadzuUV-2600光谱仪上测试。以硫酸钡为空白对照参比，在

紫外到近红外波长范围内测量漫反射光谱, 扫描间隔 1nm, 带宽 2nm。将测得的反射率通过 Kubelka-Munk 函数转化, 并通过 Tauc 绘图法(取 $n = 2$)估算样品的光学带隙。

(4) 量子效率测试仪

光致发光量子产率在配有 6 英寸积分球附件的 Horiba Fluorolog-3 荧光光谱仪上测量。使用 365 nm 连续激光器作为激发光源。粉末样品均匀填充于圆形样品皿中并压平。以 Spectralon 白板为参比。PLQY 值由仪器软件根据标准积分球光子计数法自动计算得出。

3. 结果与讨论

物相与结构

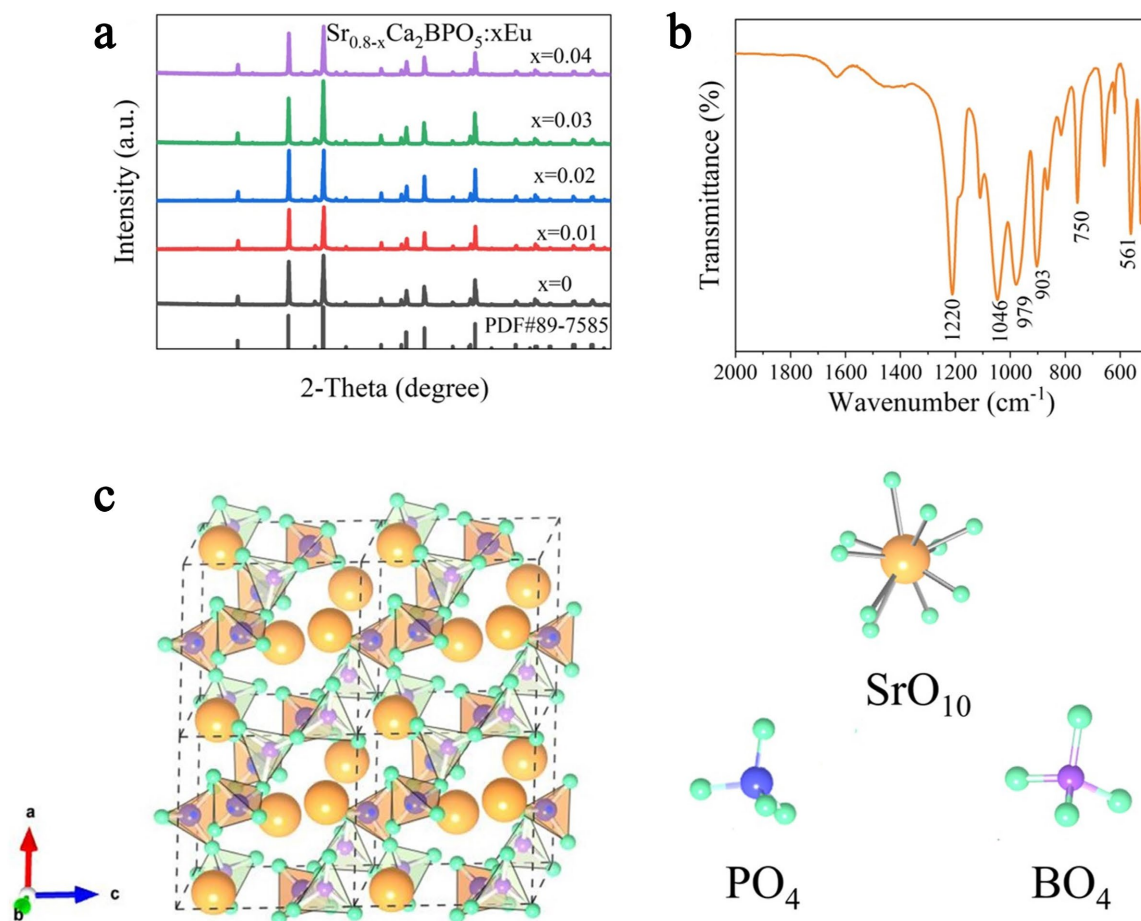


Figure 1. (a) XRD patterns of $\text{Sr}_{0.8-x}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:x\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ samples ($0 \leq x \leq 0.04$); (b) FTIR spectrum of $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:0.04\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ sample; (c) Crystal structure diagram of $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:0.04\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$, showing $[\text{SrO}_{10}]$ polyhedra, as well as $[\text{PO}_4]$ and $[\text{BO}_4]$ tetrahedra

图 1. (a) $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:x\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ ($0 \leq x \leq 0.04$)样品的 XRD 图谱; (b) $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:0.04\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 样品的 FTIR 光谱; (c) $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:0.04\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 的晶体结构图, $[\text{SrO}_{10}]$ 多面体, 以及 $[\text{PO}_4]$ 和 $[\text{BO}_4]$ 四面体

$\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5$ 基质属于六方晶系, 空间群为 $\text{P}3_121$ (No. 152) [1] [2], 该材料当中同时含有 $[\text{PO}_4]$ 与 $[\text{BO}_4]$ 刚性四面体基团, 其结构稳定, 锶和钙作为阳离子点位提供了丰富的晶体场配位。图 1(a)为 $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:x\% \text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ ($0.5 \leq x \leq 4$) 荧光粉的 X 射线衍射(XRD)图谱, 经过比较, 所制备荧光粉晶体当中的各个衍射峰与标准卡片(PDF#89-7585)一致, 表明该晶体结构保持稳定, 并且各衍射峰角度无明显偏

移,这说明即使引入少量 Eu 掺杂及 Ca 离子取代,该化合物仍保持 SrBPO₅原有的晶体结构。图 1(b)展示了 Sr_{0.8}Ca_{0.2}BPO₅:0.04Eu²⁺/Eu³⁺在室温下的傅里叶变换红外(FTIR 光谱):红外光谱分析进一步证实,样品中存在[BO₄]和[PO₄]两种四面体阴离子基团,在 1046 cm⁻¹处观测到的吸收特征,可归因于[PO₄]四面体结构内部的伸缩振动模式[3] [4]; 979 cm⁻¹、903 cm⁻¹和 750 cm⁻¹处的峰则来源于[BO₄]基团的伸缩振动[5]; 而 561 cm⁻¹附近的峰对应于[PO₄]与[BO₄]之间 P-O-B 键的弯曲振动[6] [7]。上述特征表明, Eu 掺杂及 Ca 固溶并未引起基质 FTIR 光谱峰形和峰位的显著变化,进一步印证了晶格结构的稳定性。图 1(c)给出了 Sr_{0.76}Ca_{0.2}BPO₅:0.04Eu²⁺/Eu³⁺的晶体结构示意图。该结构中,[PO₄]与[BO₄]四面体通过共享氧原子构成三维阴离子骨架。在该晶体结构中,Sr²⁺离子与周围十个氧原子配位,构成[SrO₁₀]多面体单元,其外围由[PO₄]和[BO₄]两类四面体结构所环绕[8]。

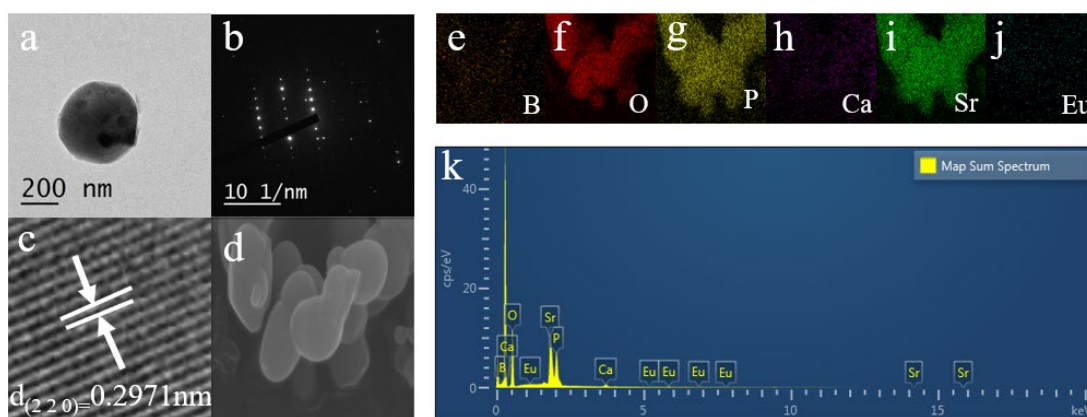


Figure 2. (a) TEM image of Sr_{0.76}Ca_{0.2}BPO₅:4%Eu²⁺/Eu³⁺; (b) HRTEM image; (c) SAED image; (d) SEM image; (k) EDS image; (e)~(j) SEM/EDS mapping images of Sr, Ca, B, P, O, and Eu elements

图 2. (a) Sr_{0.76}Ca_{0.2}BPO₅:4%Eu²⁺/Eu³⁺ TEM 图像; (b) HRTEM 图像; (c) 选区电子衍射(SAED)图像; (d) SEM 图像; (k) EDX 图谱; (e)~(j) Sr、Ca、B、P、O、Eu 元素的 SEM/EDS 映射图

为观察 Sr_{0.8}Ca_{0.2}BPO₅:0.04Eu²⁺/Eu³⁺荧光粉的微观形貌与元素分布,采用透射电子显微镜(TEM)和场发射扫描电子显微镜(SEM)对样品进行了微观层面上的观察与表征。TEM 和 SEM 图像分别见图 2(a)和图 2(d),TEM 结果显示,样品颗粒呈近圆形,粒径约在 200~500 nm 之间,且表面光滑,表明其结晶度较高。在单颗粒边缘采集的选择区电子衍射(SAED)图(图 2(c))显示出规则的点阵排列,进一步验证了材料的单晶特征。高分辨透射电镜(HRTEM)表征(图 2(b))可见清晰的晶格条纹,经计算其晶面间距为 0.2195 nm,与基体(2 2 0)晶面的衍射条件相符,说明 Eu 掺杂及 Ca 固溶未破坏基质的晶格结构。元素分布通过 EDS 能谱与元素面扫描进行分析。EDS 谱(图 2(k))确认样品由 Sr、B、P、O、Ca 和 Eu 组成,元素映射图(图 2(e)~(j))显示各元素在晶粒内均匀分布,表明该荧光粉具有结构完整性。

利用紫外-可见漫反射光谱(UV-Vis DRS)对系列样品的光吸收特性进行了系统分析,结果如图 3(a)所示。未掺杂的 SrBPO₅在紫外区仅表现出基质吸收,其主吸收峰位于 220 nm 附近,推测与基质内部缺陷相关。相比之下,在 Sr_{0.8}Ca_{0.2}BPO₅中引入 Eu²⁺/Eu³⁺共掺杂后,漫反射光谱在 200~410 nm 区间出现明显的宽带吸收特征。通过与 Eu²⁺激发谱对比,可确定该宽带吸收源于 Eu²⁺的 4f → 5d 电子跃迁。图 3(b)为基质的直接带隙 5.55 eV 符合磷酸盐带隙较大的特点。此外,在 220~240 nm 范围内检测到的吸收峰来自于 Eu³⁺的 4f → 4f 电荷迁移带(CTB)跃迁,同时,在 394 nm 处还观察到较弱的窄带吸收,可归因于 Eu³⁺的 7F⁰ → 5L⁶ 电子跃迁,说明样品中同时存在二价与三价铕离子。为进一步确认所制备样品中 Eu 离子的价态分布,采用 X 射线光电子能谱(XPS)进行表征。图 3(c)为 Sr_{0.8}Ca_{0.2}BPO₅:0.04Eu²⁺/Eu³⁺荧光粉的全谱

图,可清晰辨识出 Sr 3p、P 2p、B 1s、Ca 2p、O 1s 以及 Eu 3d 等元素的峰值。图 3(d)为 Eu 3d 高分辨精细谱,其中位于 1135.6 eV、1153.5 eV 和 1165.0 eV 的特征峰分别归属于 $\text{Eu}^{3+} 3d_{5/2}$ 、 $\text{Eu}^{2+} 3d_{3/2}$ 和 $\text{Eu}^{3+} 3d_{3/2}$,直接证明了样品中二价与三价铕离子共存。

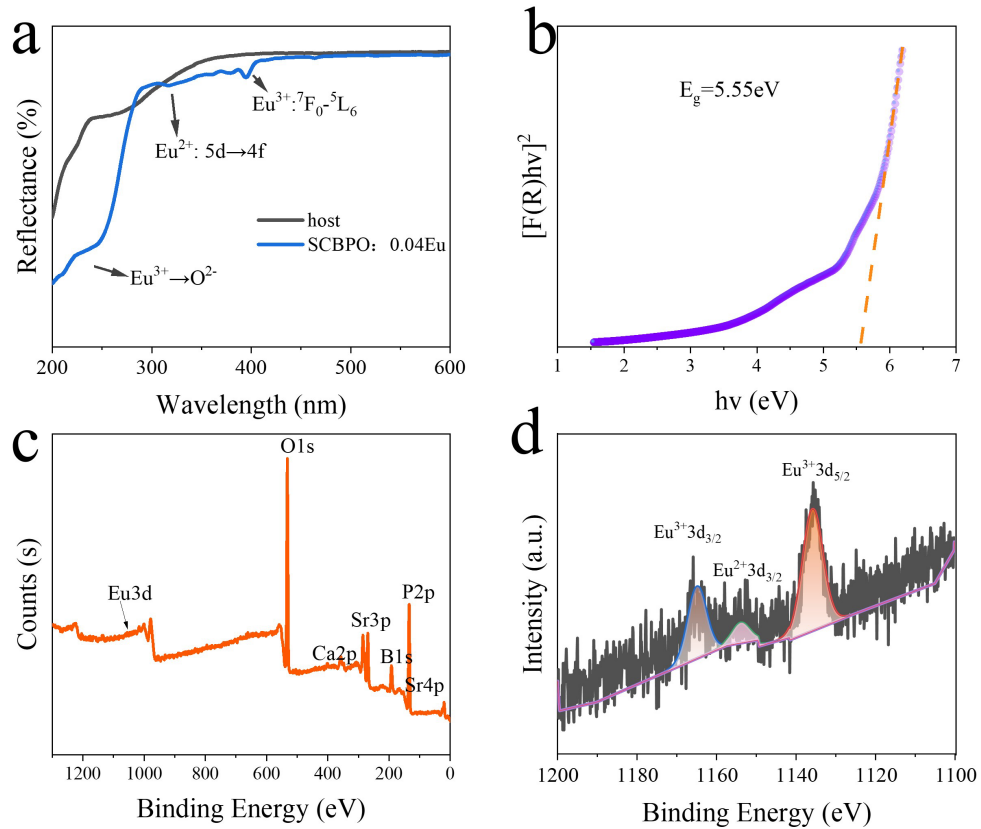
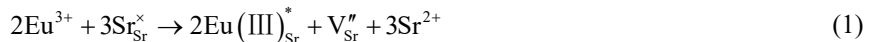


Figure 3. (a) UV-Vis diffuse reflectance spectrum of $\text{Sr}_{0.76}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:0.04\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$; (b) Direct bandgap; (c) XPS spectrum of the sample; (d) XPS spectrum of the Eu 3d core level

图 3. (a) $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:0.04\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 的紫外 - 可见漫反射光谱; (b) 直接带隙; (c) 样品的 XPS 光谱; (d) Eu 3d 核心层的光谱

结合 XPS 与紫外 - 可见漫反射光谱(UV-Vis DRS)分析结果可推断, $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:0.04\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 荧光粉中,部分 Eu^{3+} 离子在空气气氛下能够发生自还原,转化为 Eu^{2+} 。根据离子半径匹配原则, Eu^{2+} 倾向于取代晶格中的 Sr^{2+} 位点,形成不等价取代。这种取代导致局部正电荷过剩,为维持体系的电荷平衡,会引入带两个负电荷的阳离子空位作为电荷补偿缺陷。在此机制中,空位作为电子供体,而 Eu 相关缺陷则表现为电子受体,从而促进 Eu^{3+} 向 Eu^{2+} 的还原。该过程可用下列反应方程描述[9] [10]:



其中, V_{Sr}'' 代表 Sr 空位本身带负电,但在高温或还原气氛(如 H_2 、碳粉)中,空位可捕获或释放电子以达到更稳定的状态; $\text{Sr}_{\text{Sr}}^{\times}$ 是 Sr 晶格位点上的中性 Sr 离子(\times 表示无电荷); $\text{Eu}(\text{III})_{\text{Sr}}^*$ 代表 Eu^{3+} 取代 Sr 晶格位点形成的缺陷; $\text{V}_{\text{Sr}}^{\times}$ 代表中性的 Sr 空位; $\text{Eu}(\text{II})_{\text{Sr}}^*$ 代表 Eu^{2+} 取代 Sr 晶格位点形成的缺陷。

图 4(a)是在 388 nm 和 699 nm 不同监测波长下分别测得 $\text{Sr}_{0.76}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:0.04\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 荧光粉的激发光谱, 以 388 nm 为监测波长时, 激发谱在 240~370 nm 区间呈现宽带特征, 可归因于 Eu^{2+} 的 $5d \rightarrow 4f$ 电子跃迁; 若以 588 nm 为监测波长, 则在 240~300 nm 范围内出现另一宽带激发峰, 该峰源于 Eu^{3+} 与 O^{2-} 之间的电荷迁移带(CTB)跃迁, Eu^{2+} 与 Eu^{3+} 的激发光谱相交于 283 nm 处, 表明可以使用 283 nm 激发波长同时激发材料当中的 Eu^{2+} 与 Eu^{3+} 。图 4(b)展示了该荧光粉在 283 nm 激发下的发射光谱, 该荧光粉可同时呈现 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 的特征峰, 位于 388 nm 的发射带源于 Eu^{2+} 的 $5d \rightarrow 4f$ 能级间跃迁; 而 588 nm 到 699 nm 之间四个不同发射峰位处的发射带, 则分别对应 Eu^{3+} 的 ${}^5\text{D}_0\text{-}7\text{F}_J$ ($J = 1, 2, 3, 4$) 跃迁。图 4(c)是不同 Eu 浓度的发射光谱, 可以看出 Eu 浓度在 1%到 4%时, 发光强度呈现上升趋势, 当浓度超过 4%时, 由于相邻 Eu 离子之间距离减小, 离子间相互作用增强, 无辐射跃迁概率增大, 导致浓度猝灭, 样品发光强度减弱。为评估该荧光粉在光学测温领域的应用潜力, 在 303 K 到 573 K 温度区间内对其进行了变温发射光谱测试, 结果如图 4(d)所示。图 4(e)为 Eu^{2+} 在 388 nm 与 Eu^{3+} 离子在 699 nm 处发射峰强度随温度变化的柱状图, 展示了 Eu^{2+} 在 388 nm 与 Eu^{3+} 在 699 nm 处发射峰积分强度随温度变化而变化的趋势。 Eu^{2+} 的发光来自 $5d \rightarrow 4f$ 跃迁, $5d$ 能级为裸露的轨道, 受晶体场环境影响显著, 对温度极为敏感。升温会加剧晶格振动, 使 $5d$ 能级的电子与声子相互作用增强, 非辐射弛豫概率提高, 导致辐射跃迁概率下降, 因此 388 nm 处的发射强度随温度持续减弱。而 Eu^{3+} 的跃迁属于 $4f$ 内部跃迁, 受晶体场环境影响较小, 发射强度受温度影响较小。图 4(f)为 3 次循环下的升/降温强度统计点线图, 反映出样品良好的循环稳定性。

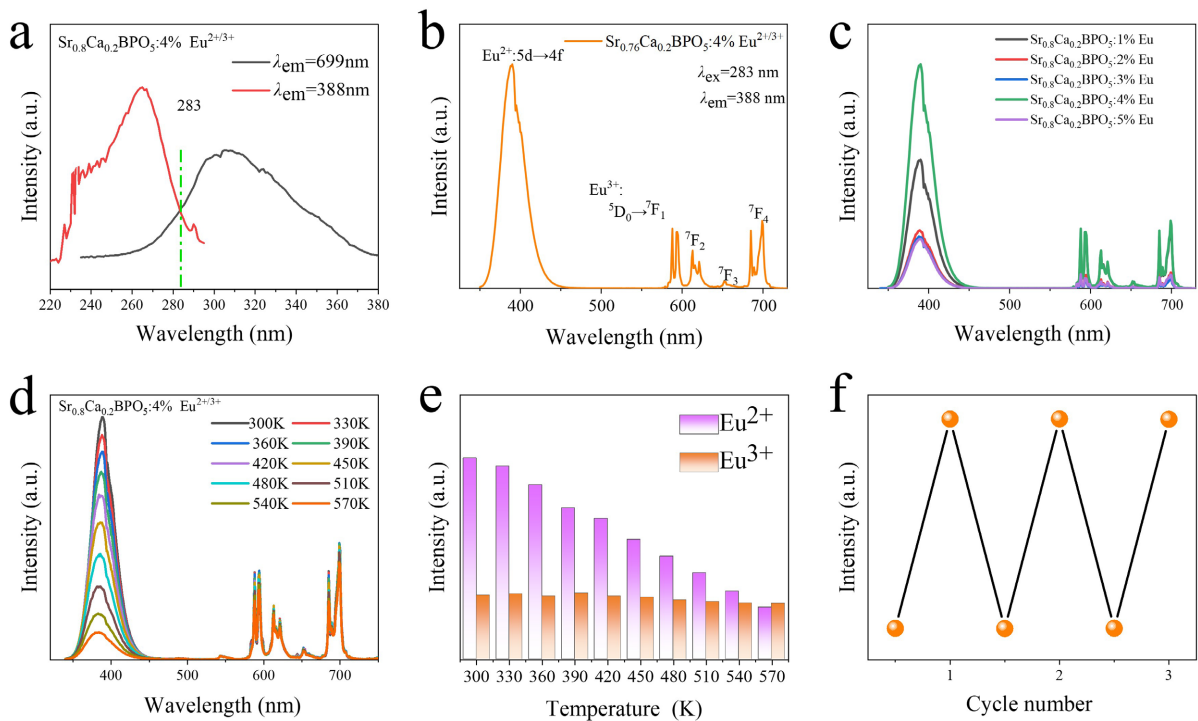


Figure 4. (a) Excitation spectra of sample monitored at 388 nm and 699 nm; (b) Emission spectrum of sample; (c) Emission spectra at different concentrations; (d) Emission intensity of sample in the temperature range of 300 K to 570 K; (e) Bar chart of the intensity changes of Eu^{2+} and Eu^{3+} in the temperature range of 300 K to 570 K; (f) Changes in FIR over three cycles
图 4. (a) 样品在监测 388 nm 与 699 nm 下的激发光谱; (b) 发射光谱; (c) 不同浓度的发射光谱; (d) 在 300 K~570 K 范围内的发射强度; (e) Eu^{2+} 与 Eu^{3+} 与 300 K~570 K 范围内的柱状强度变化图; (f) 三次循环的 fir 变化

灵敏度在非接触式光学测温中是一个非常重要的指标参数。相对灵敏度与绝对灵敏度被定义为荧光

强度比随温度的变化率，可以用下列公式进行计算[11][12]:

$$S_a = \left| \frac{\delta FIR}{\delta T} \right| = \left| A \exp\left(-\frac{T}{B}\right) \right| \times \frac{1}{B} \quad (4)$$

$$S_r = \left| \frac{1}{FIR} \frac{\delta FIR}{\delta T} \right| \quad (5)$$

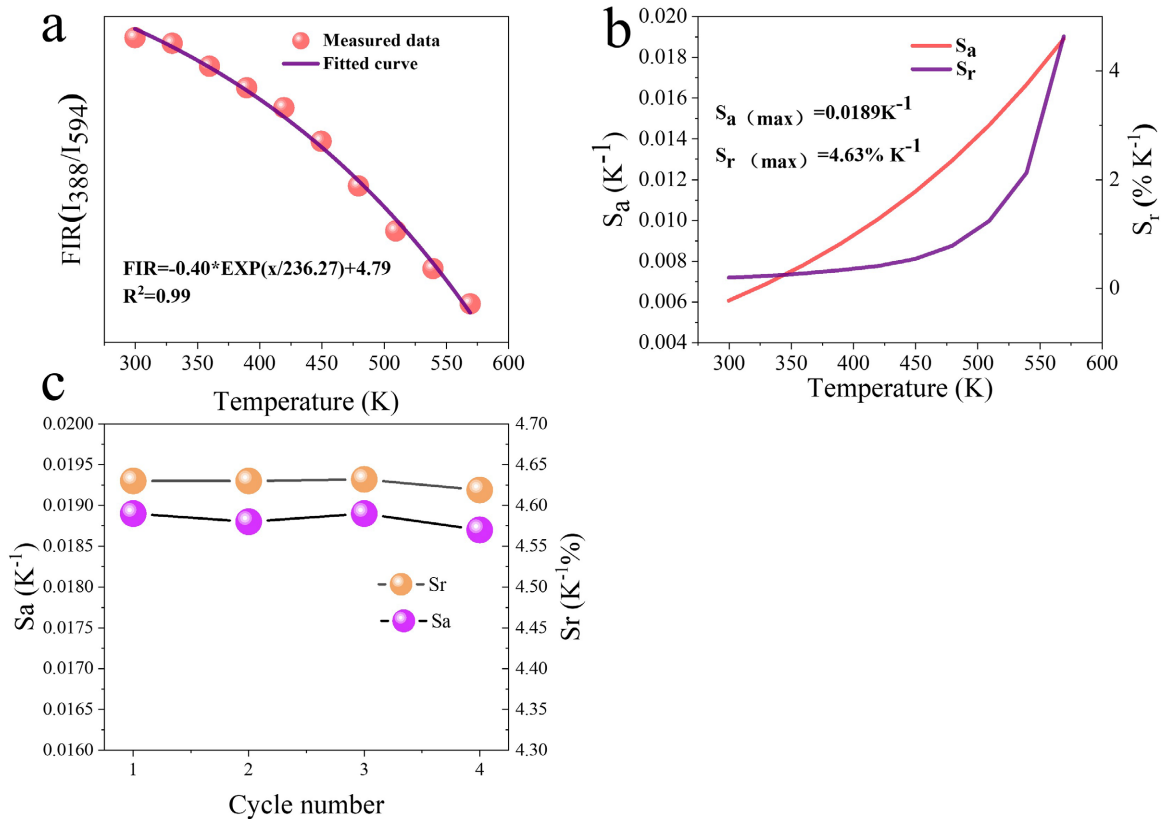


Figure 5. (a) Relationship between the fluorescence intensity ratio (FIR, I_{388}/I_{699}) and temperature T for phosphor; (b) Relationship between the values of S_a , S_r and temperature T for sample; (c) S_a and S_r during multiple cycles

图 5. (a) 荧光粉的 FIR (I_{388}/I_{699})与温度 T 的关系图; (b) 样品 S_a 、 S_r 值与温度 T 的关系图; (c) 多次循环的 S_a 与 S_r

Table 1. Comparison of FIR-based rare earth ion materials for temperature sensing

表 1. 基于 FIR 技术稀土离子用于温度传感材料比较

| 材料 | S_a (K^{-1}) | S_r ($\%K^{-1}$) | 温度范围 |
|--|--------------------|----------------------|---------|
| $Ca_{14}Al_{10}Zn_6O_{35}:Bi^{3+}/Mn^{4+}$ | 0.0014 | 1.21 | 303~563 |
| $LiSr_4(BO_3)_3:Ce^{3+}/Eu^{2+}$ | 0.057 | / | 280~480 |
| $Sc_2O_3:Eu^{2+}/Eu^{3+}$ | / | 3.06 | 77~267 |
| $LaAlO_3:Eu^{2+}/Eu^{3+}$ | 0.014 | 1.193 | 293~473 |
| $Sr_4Al_{14}O_{25}:Eu^{2+}/Eu^{3+}$ | 0.015 | 1.10 | 298~523 |
| $Ca_2Al_2SiO_7:Eu^{2+}/Eu^{3+}$ | 0.024 | 2.46 | 303~443 |
| $Sr_{0.8}Co_{0.2}BPO_5:Eu^{2+}/Eu^{3+}$ | 0.00189 | 4.633 | 303~573 |

图 5(a)展示了材料荧光强度比值(FIR)随温度变化而变化的拟合曲线。结果显示, 当温度从 303 K 升高至 573 K 时, FIR 呈逐渐下降趋势。图 5(b)呈现了相对灵敏度(Sr)与绝对灵敏度(Sa)的计算结果, 在 573 K 时, 该荧光粉的最大相对灵敏度达到 $4.63\% \text{ K}^{-1}$, 最大绝对灵敏度为 0.00189 K^{-1} , 优于近期报道的激活离子掺杂荧光粉(见表 1)。图 5(c)统计了 4 次循环测试中的 FIR 强度变化, 结果表明样品具有良好的循环稳定性。综合上述数据可知, 所制备的荧光粉展现出优异的温度响应特性, 在光学测温应用中具有良好的潜力。

4. 结论

通过高温固相法在空气环境下制备了 $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{BPO}_5:0.04\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 样品, 对荧光粉的晶体结构、形貌以及微观结构进行表征并通过电荷守恒补偿模型揭示了铕离子自还原机理。在 283 nm 紫外激发下, 发射光谱存在 388 nm 和 699 nm 的双峰, 源于 $\text{Eu}^{2+} 4f \rightarrow 5d$ 与 $\text{Eu}^{3+} 4f \rightarrow 4f$ 的不同跃迁。在 303 K 到 573 K 温度范围内, 其发射峰的响应存在明显差异, 699 nm 处发射峰表现出良好的热稳定性, 而 388 nm 处发射强度随着温度升高而迅速下降, 表明样品在基于荧光强度比的非接触式光学测温领域有很大的潜力。通过计算, 在 573 K 时, 荧光粉的最大相对灵敏度值与最大绝对灵敏度值分别为 $4.63\% \text{ K}^{-1}$ 与 0.00189 K^{-1} , 上述数据反映出, 该荧光粉在温度响应方面具有突出的性能, 在基于光学的温度探测领域展现出可观的应用前景。

参考文献

- [1] Huang, Y., Jang, K., Zhao, W., Cho, E., Lee, H.S., Wang, X., *et al.* (2007) Irradiation-Induced Reduction and Luminescence Properties of Sm^{2+} Doped in BaBPO_5 . *Journal of Solid State Chemistry*, **180**, 3325-3332. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.09.030>
- [2] Vinodkumar, P., Jaiganesh, G., Panda, S., Padhi, R.K., Madhusoodanan, U. and Panigrahi, B.S. (2021) Color Tuning from Green to Orange-Red in $\text{SrBPO}_5: \text{UO}_2^{2+}/\text{Pr}^{3+}$ Phosphor via Energy Transfer for Solid-State Lighting Applications. *Results in Physics*, **21**, Article 103757. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103757>
- [3] Song, Y., You, H., Yang, M., Zheng, Y., Liu, K., Jia, G., *et al.* (2010) Facile Synthesis and Luminescence of $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}^{2+}$ Nanorod Bundles via a Hydrothermal Route. *Inorganic Chemistry*, **49**, 1674-1678. <https://doi.org/10.1021/ic902081r>
- [4] Wu, Y., Wu, Y., Yu, L., Zou, Y., Gao, Z., Guo, Q., *et al.* (2020) In-Air Self-Reduction Synthesis and Colour Tunable Luminescence from $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}-\text{Eu}^{3+}$ Excited Using Ultraviolet Light. *Luminescence*, **35**, 1199-1205. <https://doi.org/10.1002/bio.3829>
- [5] Palaspar, R.S., Sonekar, R.P. and Omanwar, S.K. (2016) NUV Excited Luminescence of Eu^{3+} Doped Inorganic $\text{NaCa}_{0.5}\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$ Phosphor via Slow Evaporation Technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **27**, 9335-9340. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4973-8>
- [6] Łagowska, B., Waclawska, I., Sitarz, M. and Szumera, M. (2018) Spectroscopic Studies of Structural Interactions in Silicate-Borate-Phosphate Glass. *Journal of Molecular Structure*, **1171**, 110-116. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.05.085>
- [7] Sun, H., Zhang, L., Xu, S., Dai, S., Zhang, J., Hu, L., *et al.* (2005) Structure and Thermal Stability of Novel Fluorophosphate Glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, **391**, 151-155. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.07.071>
- [8] Yu, H., Su, W., Chen, L., Deng, D. and Xu, S. (2019) Excellent Temperature Sensing Characteristics of Europium Ions Self-Reduction $\text{Sr}_3\text{P}_4\text{O}_{13}$ Phosphors for Ratiometric Luminescence Thermometer. *Journal of Alloys and Compounds*, **806**, 833-840. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.338>
- [9] Xu, Y., Sun, Z., Wei, Y., Jia, M., Hou, B., Li, X., *et al.* (2020) Optical Properties of the $\text{Ca}_{2}\text{Al}_3\text{O}_7$ Phosphor with Dual-activator $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ for Multifunctional Applications. *Journal of the American Ceramic Society*, **103**, 5721-5730. <https://doi.org/10.1111/jace.17289>
- [10] Lin, Y., Niu, Z., Han, Y., Li, C., Zhou, W., Zhang, J., *et al.* (2017) The Self-Reduction Ability of RE^{3+} in Orthosilicate ($\text{RE} = \text{Eu}, \text{Tm}, \text{Yb}, \text{Sm}$): BaZnSiO_4 -Based Phosphors Prepared in Air and Its Luminescence. *Journal of Alloys and Compounds*, **690**, 267-273. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.079>
- [11] Kolesnikov, I.E., Mamonova, D.V., Kurochkin, M.A., Medvedev, V.A. and Kolesnikov, E.Y. (2022) Ratiometric Dual-Center $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ Nanothermometers with Enhanced Thermometric Performances. *Journal of Alloys and Compounds*, **922**, Article 166182. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166182>

-
- [12] Chen, B., Li, C., Deng, D., Ruan, F., Wu, M., Wang, L., *et al.* (2019) Temperature Sensitive Properties of Eu²⁺/Eu³⁺ Dual-Emitting LaAlO₃ Phosphors. *Journal of Alloys and Compounds*, **792**, 702-712.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.013>