

新型橙黄色荧光粉 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 的 制备及发光性能研究

赵 芬¹ 冯文林^{1,2} 程雪羚¹

(¹ 重庆理工大学光电信息学院, 重庆 400054
² 中国科学院国际材料物理中心, 辽宁 沈阳 110016)

摘要 采用高温固相法合成了 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 新型橙黄色荧光材料, 并对其结构、形貌和发光性质进行了研究。X 射线衍射(XRD)测量结果表明在 1200 °C 下制备的样品为纯相 SrMoO_4 晶体。样品的形貌在扫描电镜(SEM)显示下有不规则的外形但分散性良好。掺杂电荷补偿剂的荧光粉样品激发光谱由电荷转移跃迁(CT)带和 Pr^{3+} 离子的特征激发峰组成, 主激发峰位于 448 nm($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{P}_2$)、473 nm($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{P}_1$)和 487 nm($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{P}_0$); 其发射光谱由一系列锐谱峰组成, 分别位于 529 nm($^3\text{P}_1 \rightarrow ^3\text{H}_{4,5}$)、545 nm、553 nm($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_5$)、600 nm($^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_4$)、617 nm($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_5$)和 645 nm($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{F}_2$), 最强发射峰为 645 nm。 B^{3+} 和 Li^+ 的掺入, 能明显提高该荧光粉的激发与发射峰的强度, 最佳掺杂摩尔分数为 0.15% B^{3+} 和 0.35% Li^+ 。

关键词 材料; 高温固相法; 电荷补偿; $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$

中图分类号 O482.31 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0116002

Study on Synthesis and Luminescent Properties of a Novel Orange $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ Phosphor

Zhao Fen¹ Feng Wenlin^{1,2} Cheng Xueling¹

(¹ School of Optoelectronic Information, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China
² International Centre for Materials Physics, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)

Abstract A novel orange $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ phosphor is prepared via the high-temperature solid state reaction process, and its structure, morphology and luminescence properties are studied. The X-ray diffraction (XRD) patterns show that a pure SrMoO_4 crystal phase is obtained at 1200 °C. The morphology of the sample under scanning electron microscope (SEM) has good dispersity and irregular shapes. The excitation spectra are made up of charge transfer band and characteristic transitions of $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{P}_{2,1,0}$ (448, 473, 487 nm, respectively) of Pr^{3+} . The emission spectra of the $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ phosphors are characterized by peaks at 529($^3\text{P}_1 \rightarrow ^3\text{H}_{4,5}$), 545($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_5$), 553($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_5$), 600($^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_4$), 617($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_5$), 645 nm ($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{F}_2$). The strongest one appears at 645 nm. The intensity of excitation and emission peaks of $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}$ can be improved by doping B^{3+} and Li^+ . The optimum doping mole fractions are 0.15% B^{3+} and 0.35% Li^+ , respectively.

Key words materials; high-temperature solid-phase method; charge compensation; $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$

OCIS codes 160.2540; 160.4760; 300.2530

1 引 言

稀土掺杂的光学材料有着广泛的应用, 从而引起了许多研究人员的重视^[1-3]。其中, 橙黄色荧光

粉对于 LED 的应用起着重要作用, 它可以克服黄色荧光粉与蓝光芯片封装后形成的白光因缺少橙色成分导致的显色性差的问题。大量研究表明^[4-6], 化

收稿日期: 2013-07-18; 收到修改稿日期: 2013-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(11104366)、教育部重点科技项目(212139)、重庆市自然科学基金(CSTC2011jjA50015)

作者简介: 赵 芬(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电材料与器件方面的研究。E-mail: 416644511@qq.com

导师简介: 冯文林(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电材料与器件方面的研究。E-mail: wenlinfeng@126.com

(通信联系人)

学性质稳定的白钨矿钼酸盐体系是一种性能优异的发光基质材料。钼酸锶(SrMoO_4)具有很好的白钨矿晶格点阵结构,钼原子处在四面体对称的晶格中,由于其在发光材料及光电器件领域的广泛应用受到越来越多的关注。目前,通过化学掺杂方法来实现和提高荧光粉的发光性能已经成为一种新趋势^[7-8]。稀土氧化物材料在红外光谱区域的跃迁发射可以用于光纤通信^[9],而在可见光区的跃迁发射被广泛应用于 LED、场致发射显示及光致发光装置^[10-11]。这些材料能够在能带结构中的禁带区域形成较多氧空穴,这些空穴和自由电子不断复合,从而导致氧化物基荧光粉发光^[12-13]。而具有正交晶系的 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}$ 荧光粉体的发光特性被认为是三价 Pr^{3+} 替代部分二价 Sr^{2+} 时在晶格点阵中产生了多余氧空穴,这些空穴与电子复合产生辐射跃迁。另外,在掺杂替代中,杂质离子替代基质离子以后,由于离子半径、电负性等不同^[14],这种效应也可能会更加明显。

本文采用高温固相法合成荧光粉 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 材料。实验设计思想是:用 $\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 替代基质晶体中的 Sr^{2+} 离子晶位,与基质中 Sr^{2+} 离子半径($\approx 0.112 \text{ nm}^{[15]}$)和 Mo^{6+} 离子半径($\approx 0.062 \text{ nm}^{[15]}$)相比,由于 B^{3+} 的离子半径($\approx 0.023 \text{ nm}^{[15]}$)较小,通过 B^{3+} 的微掺杂,在反应中可降低晶格的紧密度,从而有利于激活离子 Pr^{3+} (离子半径约为 $0.1013 \text{ nm}^{[15]}$) 进入基质晶格。同时, Li^+ 离子的掺入,起电荷补偿的作用,可增强荧光粉的相对发光强度。即共掺杂 $\text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 的作用是有利于 Pr^{3+} 激活中心替代 Sr^{2+} 晶格,增加活化能和复合中心,从而增强辐射跃迁,有利于材料的发光。通过 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、激发与发射光谱的表征,对橙黄色荧光粉 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 的结构、形貌和发光性能进行了详细的研究。

2 实 验

2.1 样品制备

采用高温固相法制备 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 橙黄色荧光粉。首先将原料(均为分析纯) $\text{SrCO}_3, \text{MoO}_3, \text{Pr}_2\text{O}_3, \text{B}_2\text{O}_3, \text{LiCO}_3$ 按一定化学计量比称取,然后在玛瑙研钵里混合均匀并研磨 2 h,然后将研磨好的反应物在高温炉里 550°C 预煅烧 3 h,取出研磨 1 h,并在 1200°C 下煅烧 3 h,得到的产物充分研磨后就得到了橙黄色荧光粉样品。

2.2 表征

采用岛津 XRD-6000 型 X 射线衍射仪(加速电压为 40 kV ,管电流为 30 mA ,辐射源为 Cu 靶 $\text{K}\alpha$ 辐射)测试样品的结构,对合成的发光粉体物相进行测试分析。用扫描电子显微镜 (FE-SEM, HitachiSu-70 型)测试样品的形貌。用岛津 RF-5301 荧光分光光度计测量样品的激发光谱和发射光谱,以 150 W 氙灯为激发光源,激发波长范围为 $220\sim 700 \text{ nm}$,扫描范围为 $300\sim 800 \text{ nm}$ 。所有样品均在室温下测量。

3 结果与讨论

3.1 XRD 检测

图 1 为掺杂不同摩尔分数(下同)的 $\text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 粉体的 XRD 图谱,由 XRD 图谱表明掺杂 $\text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 的荧光粉体 $\text{Sr}_{0.998-x-y}\text{MoO}_4:0.2\% \text{Pr}^{3+}, x\text{B}^{3+}, y\text{Li}^+$ 与标准数据卡片 (SrMoO_4 PDF # 08-0482) 的相应峰值均一一对应,图中没有其他杂质峰存在,表明用这种方法制备的产物具有高的纯相。衍射峰比较尖锐,说明产物的结晶性良好,晶体结构并不受掺杂 $\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 的影响。由衍射三强峰及谢乐方程^[16-17]计算平均晶粒尺寸:

$$S = k\lambda / \beta \cos \theta, \quad (1)$$

式中 S 是 SrMoO_4 的平均晶粒尺寸, β 是衍射峰的半峰全宽, θ 为衍射角, k 为常数取 0.89 , λ (0.15406 nm) 为铜靶的 X 射线波长。根据三强峰 (112)、(004)、(204) 和谢乐方程计算出的平均晶粒尺寸为 34 nm 。

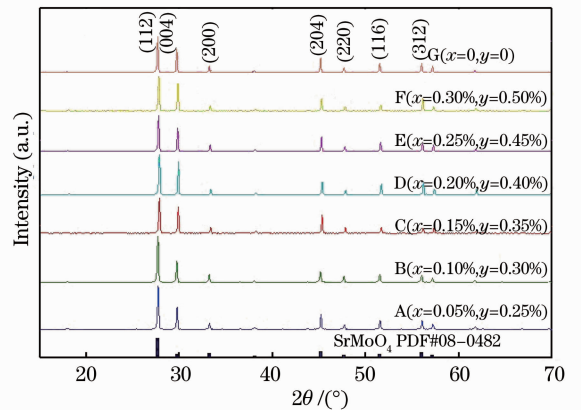


图 1 $\text{Sr}_{(0.998-x-y)}\text{MoO}_4:0.2\% \text{Pr}^{3+}, x\text{B}^{3+}, y\text{Li}^+$ 的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of $\text{Sr}_{(0.998-x-y)}\text{MoO}_4:0.2\% \text{Pr}^{3+}, x\text{B}^{3+}, y\text{Li}^+$

3.2 SEM 图

图 2 是荧光粉 $\text{Sr}_{0.993}\text{MoO}_4:0.2\% \text{Pr}^{3+}, 0.15\%$

$\text{B}^{3+}, 0.35\%\text{Li}^+$ 的场发射扫描电镜照片,从图中晶体形貌可以看出, $\text{Sr}_{0.993}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+}, 0.15\%\text{B}^{3+}, 0.35\%\text{Li}^+$ 样品的分散性较好,形状呈不规则状外形,粉粒大小约为 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 。由于微观晶粒在高温热反应时,会再结晶和聚合,因此,SEM 图片给出的荧光粉粉粒尺寸一般比 XRD 和谢乐方程计算所得的微观平均晶粒尺寸大^[18]。本实验制备的荧光粉粉粒大小与目前商用荧光粉荧光范围($1\sim$

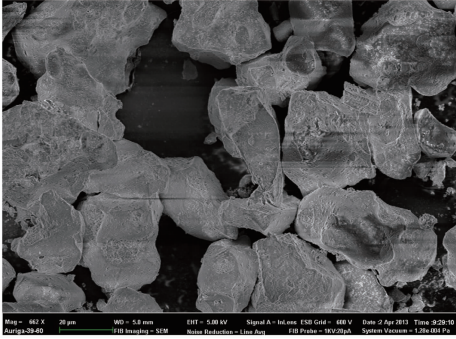


图 2 $\text{Sr}_{0.993}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+},$

$0.15\%\text{B}^{3+}, 0.35\%\text{Li}^+$ 样品的 SEM 图

Fig. 2 SEM image of $\text{Sr}_{0.993}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+},$

$0.15\%\text{B}^{3+}, 0.35\%\text{Li}^+$

$100\ \mu\text{m}$)是一致的。

3.3 样品的激发与发射光谱

图 3 是 $\text{Sr}_{0.998-x-y}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+}, x\text{B}^{3+}, y\text{Li}^+$ 掺杂不同浓度的 B^{3+} 和 Li^+ 的激发光谱($\lambda_{\text{em}} = 645\ \text{nm}$)。A-F 依次分别对应于不同化学计量比的 $\text{B}^{3+},\text{Li}^+$ 摩尔分数。激发谱包含了一个电荷转移带(CT, $220\sim 300\ \text{nm}$)和 Pr^{3+} 的三个特征激发跃迁,分别对应于 $^3\text{H}_4\rightarrow^3\text{P}_2$ ($448\ \text{nm}$)、 $^3\text{H}_4\rightarrow^3\text{P}_1$ ($473\ \text{nm}$) 和 $^3\text{H}_4\rightarrow^3\text{P}_0$ ($487\ \text{nm}$) 的电子吸收。吸收带的变化是由于材料能带结构的微小变化而引起的,光致激发谱表明 $\text{Sr}_{0.993}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+}, 0.15\%\text{B}^{3+}, 0.35\%\text{Li}^+$ 的激发跃迁最强。原因可能是由于 Li^+ 离子掺杂倾向于产生的电荷补偿,而 B^{3+} 离子掺杂替代后局域结构变形从而会产生点缺陷,这些缺陷中心可捕获和释放载流子从而导致橙黄光的发射。在能级系统中引入 B^{3+} 和 Li^+ 离子,可减少非辐射中心的能量密度,确保更多的载流子能量补充给 Pr^{3+} 发光中心,这样就会有更少数量的载流子被猝灭在非辐射中心,因此 B^{3+} 和 Li^+ 的掺杂可导致 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}$ 的发射增强。

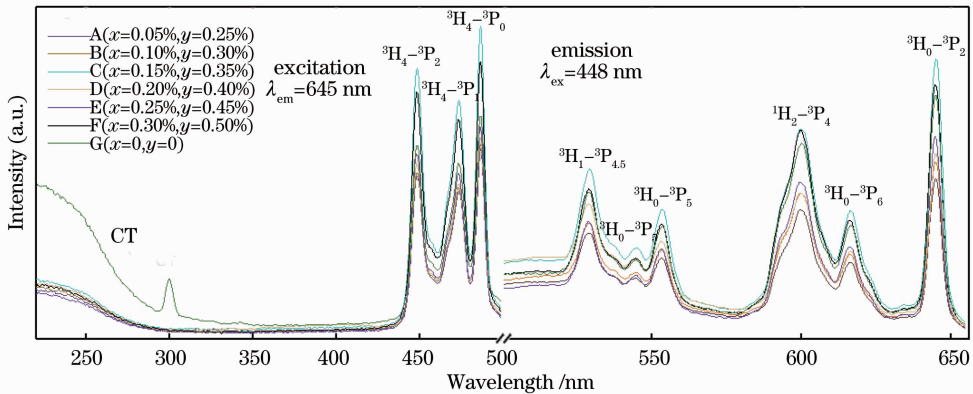


图 3 $\text{Sr}_{(0.998-x-y)}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+}, x\text{B}^{3+}, y\text{Li}^+$ 的激发与发射光谱

Fig. 3 Excitation and emission spectra of $\text{Sr}_{(0.998-x-y)}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+}, x\text{B}^{3+}, y\text{Li}^+$

从图 3 可以看出, $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 的较强橙黄色发射波长位于 $550\sim 600\ \text{nm}$ 之间。监测波长(λ_{ex})为 $448\ \text{nm}$,其发射光谱由一系列锐谱峰组成,分别位于 $529\ \text{nm}$ ($^3\text{P}_1\rightarrow^3\text{H}_{4,5}$)、 $545\ \text{nm}$, $553\ \text{nm}$ ($^3\text{P}_0\rightarrow^3\text{H}_5$)、 $600\ \text{nm}$ ($^1\text{D}_2\rightarrow^3\text{H}_4$)、 $617\ \text{nm}$ ($^3\text{P}_0\rightarrow^3\text{H}_6$) 和 $645\ \text{nm}$ ($^3\text{P}_0\rightarrow^3\text{F}_2$),最强发射峰为 $645\ \text{nm}$ 。

图 4 为掺杂 $\text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 相对应的光致发光光谱(PL)的相对强度范围,光致发光光谱的几个主要跃迁带的变化趋势大体相同,其相对发光强度由掺杂 B^{3+} 离子摩尔浓度从 $x=0.05\%\sim 0.15\%$ 一直增加(对 Li^+ ,则是从 $0.25\%\sim 0.35\%$),到达光致发射谱

峰的最大强度($x=0.15\%, y=0.35\%$)后,发光就逐渐猝灭。由掺杂缺陷结构理论可知,少量掺杂可一定程度上维持晶体完整性并在杂质格点上造成局域结构畸变^[19],因此宇称选律放宽,从而导致 Pr^{3+} 离子的禁戒跃迁解除,发光强度变大。但掺杂过高会更大程度改变 SrMoO_4 的晶体结构,引起晶体结构相变,以致进一步增加浓度有可能使得发光性质发生变化。掺杂不同微量浓度 B^{3+} 和 Li^+ 的 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 系统可抑制非辐射过程从而提高 Pr^{3+} 发光,电荷不平衡是由于三价 Pr^{3+} 和 B^{3+} 离子占据二价 Sr^{2+} 离子从而在 SrMoO_4 晶格点

阵上失衡, Li^+ 掺杂以后在一定程度上补偿了这种不平衡, 增强了荧光粉的发光性能。

此外, 发光色度是表征发光材料特性的一个基本参数。图 5 为样品在蓝光区 ($\lambda_{\text{em}} = 448 \text{ nm}$) 激发下的国际照明委员会 (CIE) 色度图。结果表明, 掺杂 B^{3+} , Li^+ 的 $\text{Sr}_{0.993}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+}, 0.15\%\text{B}^{3+}$,

$0.35\%\text{Li}^+$ 的色坐标为 $x=0.52, y=0.44$, 与主波长在 587 nm 的橙光色坐标 ($x=0.500, y=0.415$) 接近, 具有较高纯度的橙黄光。因此, 该橙黄色荧光粉可作为新一代白光 LED 的潜在替代材料, 能有效改善白光 LED 的显色性及使用性能。

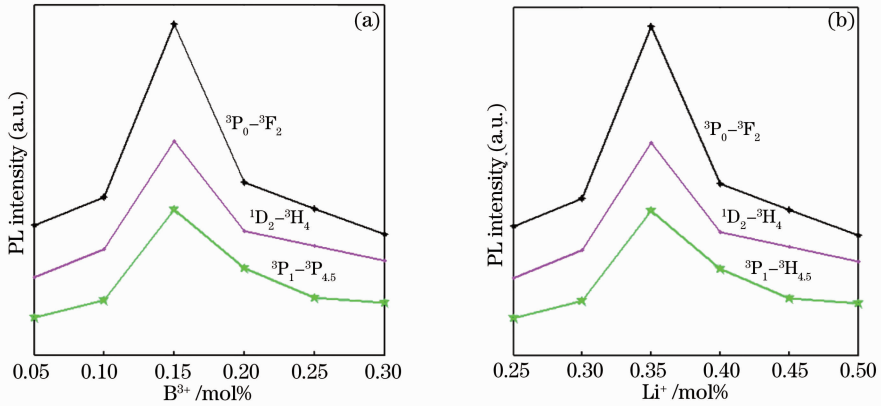


图 4 B^{3+} , Li^+ 的不同掺杂量对发射谱的影响

Fig. 4 Different B^{3+} , Li^+ concentrations as a function of emission spectra

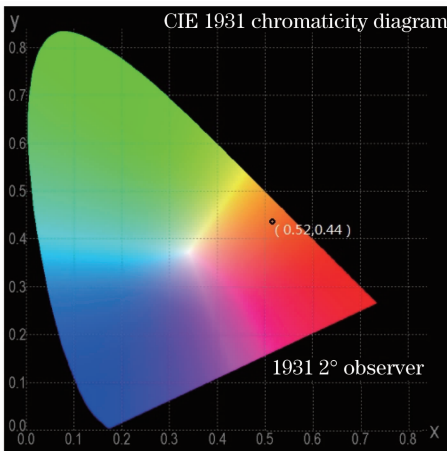


图 5 $\text{Sr}_{0.993}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+}, 0.15\%\text{B}^{3+}$, $0.35\%\text{Li}^+$ 的 CIE 色坐标图

Fig. 5 CIE chromaticity coordinates of $\text{Sr}_{0.993}\text{MoO}_4:0.2\%\text{Pr}^{3+}, 0.15\%\text{B}^{3+}, 0.35\%\text{Li}^+$ phosphor

4 结 论

采用高温固相法合成了 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 新型橙黄色荧光材料, 并对其结构、形貌和发光性质进行了研究。制备的 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 样品具有纯的 SrMoO_4 白钨矿结构, 平均晶粒大小由 XRD 和谢乐方程确定为 34 nm 。表面形貌呈不规则状但分散性较好。样品的激发光谱在 $220 \sim 300 \text{ nm}$ 波段内有较强的电荷转移, Pr^{3+} 特征激发谱线分别位于 448 nm ($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{P}_2$)、 473 nm ($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{P}_1$) 和 487 nm

($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{P}_0$); 其发射光谱由一系列锐谱组成, 分别位于 529 nm ($^3\text{P}_1 \rightarrow ^3\text{H}_{4.5}$)、 545 nm 、 553 nm ($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_5$)、 600 nm ($^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_4$)、 617 nm ($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_6$) 和 645 nm ($^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{F}_2$), 最强发射峰为 645 nm 。 B^{3+} 和 Li^+ 的掺入, 能提高 $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}$ 的激发与发射峰的强度, 最佳掺杂摩尔分数分别为 $0.15\%\text{B}^{3+}$ 和 $0.35\%\text{Li}^+$ 。研究结果表明, $\text{SrMoO}_4:\text{Pr}^{3+}, \text{B}^{3+}, \text{Li}^+$ 有潜力应用于三基色白光 LED 中的橙黄色成分以改善其显色指数。

参 考 文 献

- Zhu Yadong, Zhou Pu, Zhang Hanwei, *et al.*. Analysis of maximum extractable power of $2 \mu\text{m}$ holmium-doped silica fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0614004. 朱亚东, 周朴, 张汉伟, 等. $2 \mu\text{m}$ 硅基掺钬光纤激光器极限功率分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0614004.
- Cui Zhiguang, Ye Renguang, Deng Degang, *et al.*. Optical properties of $\text{Eu}^{2+}\text{-Dy}^{3+}$ co-doped SrSiO_3 transparent glass ceramics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0216001. 崔志广, 叶仁广, 邓德刚, 等. $\text{Eu}^{2+}/\text{Dy}^{3+}$ 共掺 SrSiO_3 透明微晶玻璃的光学性质[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0216001.
- Yang Jingwei, Wang Li, Wu Xianyou, *et al.*. Numerical simulation and experimental study on thermal effects of $2.94 \mu\text{m}$ Er:YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0614002. 杨经纬, 王礼, 吴先友, 等. $2.94 \mu\text{m}$ Er:YAG 激光热效应数值模拟及实验研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0614002.
- Feng Wenlin, Jin Ye, Wu Ying, *et al.*. Co-precipitation synthesis and photoluminescence properties of $\text{Ba}_{1-x}\text{MoO}_4:x\text{Eu}^{3+}$ red phosphors [J]. *Journal of Luminescence*, 2013, 134: 614-617.
- Yang Yuling, Li Xueming, Feng Wenlin, *et al.*. Synthesis and characteristic of $\text{CaMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ red phosphor for W-LED by co-

- precipitation [J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(10): 1015–1019.
- 杨玉玲, 黎学明, 冯文林, 等. $\text{CaMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 红色荧光粉化学共沉淀合成与表征 [J]. 无机材料学报, 2010, 25(10): 1015–1019.
- 6 Li Zhaomei, Zhong Yingjuan, Gao Shaokang. Luminescent properties of red phosphors $\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2:\text{Eu}^{3+}$ for white light emitting diodes [J]. Journal of Rare Earths, 2012, 30(10): 990–994.
- 7 Zheng Jiming, Xu Yan, Lü Feng, *et al.*. Preparation and luminescent properties of one-dimensional nanorods $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ phosphors [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1116002.
- 郑继明, 徐 琰, 吕 锋, 等. $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ 一维纳米棒的合成及性能研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1116002.
- 8 Li Yali, Wang Chaonan, Song Guohua, *et al.*. Luminescent properties of red phosphors prepared by sol-gel and microwave radiation methods [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0316001.
- 李雅丽, 王超男, 宋国华, 等. 溶胶-凝胶法和微波辐射法制备红色荧光粉及发光性质的研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0316001.
- 9 Zhang Long, Lin Fengying, Qi Changhong, *et al.*. Spectroscopic properties of Er^{3+} and $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -doped $\text{LaLiP}_4\text{O}_{12}$ glasses [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(6): 757–761.
- 张 龙, 林凤英, 祁长鸿, 等. Er^{3+} 单掺及 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 双掺 $\text{LaLiP}_4\text{O}_{12}$ 玻璃光谱性质研究 [J]. 光学学报, 2001, 21(6): 757–761.
- 10 Cui Desheng, Guo Weiling, Cui Bifeng, *et al.*. Preparation and temperature-variation properties of high color rendering index LED [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0123005.
- 崔德胜, 郭伟玲, 崔碧峰, 等. 高显色白光 LED 的制备及其变温特性 [J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0123005.
- 11 Feng Xiaohui, Meng Qingyu, Sun Jiangting, *et al.*. Luminescent properties of Eu^{3+} doped $\text{Gd}_2\text{W}_2\text{O}_9$ and $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3$ nanophosphors [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(3): 037806.
- 冯晓辉, 孟庆裕, 孙江亭, 等. Eu^{3+} 掺杂 $\text{Gd}_2\text{W}_2\text{O}_9$ 和 $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3$ 纳米荧光粉发光性质研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(3): 037806.
- 12 R Sahoo, S K Bhattacharya, R Debnath. A new type of charge compensating mechanism in $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}:\text{Eu}^{3+}$ phosphor [J]. J Solid State Chemistry, 2003, 175(2): 218–225.
- 13 Philippe Boutingaud, Rachid Mahiou, Enrico Cavalli, *et al.*. Red luminescence induced by intervalence charge transfer in Pr^{3+} -doped compounds [J]. Journal of Luminescence, 2007, 122-123: 430–433.
- 14 Zheng Wenchen. Local rotation angle in the structural phase transition for the Mn^{2+} ion in a CsCaCl_3 crystal [J]. Physica B, 1995, 215(2-3): 255–259.
- 15 R C Weast. CRC Handbook of Chemistry and Physics [M]. Boca Raton: CRC Press, 1989. F187.
- 16 Feng Wenlin. Preparation and luminescent properties of green $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ and blue $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Gd}^{3+}$ phosphors [J]. Materials Letters, 2013, 110: 91–93.
- 17 Lei Fang, Yan Bing. Hydrothermal synthesis and luminescence of $\text{CaMoO}_4:\text{RE}^{3+}$ ($\text{M} = \text{W}, \text{Mo}$; $\text{RE} = \text{Eu}, \text{Tb}$) submicro-phosphors [J]. J Solid State Chemistry, 2008, 181(4): 855–862.
- 18 Yang Yuling, Li Xueming, Feng Wenlin, *et al.*. Effect of surfactants on morphology and luminescent properties of $\text{CaMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ red phosphors [J]. J Alloys and Compounds, 2011, 509(3): 845–848.
- 19 Feng Wenlin, Zheng Wenchen, Liu Honggang. Crystal-Field Theory and Its Applications in Materials [M]. Chendu: Southwest Jiaotong University Press, 2011. 168, 175.
- 冯文林, 郑文琛, 刘虹刚. 晶体场理论及其在材料科学中的应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011. 168, 175.

栏目编辑: 李志兰