文章编号:1674-2869(2024)03-0274-06

$SrLaLiTeO_6:Dy^{3+},Eu^{3+}$荧光粉的制备及发光性能研究

龚劲松,朱 齐,郑小州,夏鹏举,刘 凯,徐 慢,戴武斌*
武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:白光发光二极管(LED)的商业合成方案缺少红光成分,导致合成的白光色温较高、显色性差,因此开发性能优异的单相暖白光荧光粉成为白光LED领域研究的重要课题。以Dy^{3+}和Eu^{3+}为掺杂剂,$SrLaLiTeO_6$(SLLT)为基质,采用固相反应法制备了$SrLaLiTeO_6:Dy^{3+},Eu^{3+}$无机荧光粉,并通过X射线衍射仪、荧光分光光度计和色度坐标分析荧光粉的晶体结构及光学性能。结果表明:Dy^{3+}和Eu^{3+}成功进入SLLT晶体,无杂质产生;SLLT:0.07Dy^{3+},yEu^{3+}荧光粉在351 nm激发下能够同时发射蓝、黄、红光,证明了Dy^{3+}和Eu^{3+}之间存在能量传递,弥补了单掺Dy^{3+}荧光粉缺乏红色发射的缺陷;Eu^{3+}离子最佳掺杂浓度为0.05,此时的色度坐标为(0.391 9,0.380 9),色温为3 733 K,接近暖白光区域。因此,$SrLaLiTeO_6:Dy^{3+},Eu^{3+}$荧光粉是一种性能优异的暖白光LED荧光粉。

关键词:荧光粉;发光性能;$SrLaLiTeO_6:Dy^{3+},Eu^{3+}$;暖白光;固相反应
中图分类号:O482.31 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202303002

Preparation and luminescence properties of $SrLaLiTeO_6:Dy^{3+}$, Eu^{3+} phosphors

*GONG Jinsong, ZHU Qi, ZHENG Xiaozhou, XIA Pengju, LIU Kai, XU Man, DAI Wubin**
School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: The commercial synthesis scheme of white light emitting diode (LED) lacks a red light component, resulting in high color temperature and poor color rendering of the synthesized white light. Therefore, the development of single-phase warm white phosphors with excellent performance has always been an important research topic in the field of white LED. $SrLaLiTeO_6:Dy^{3+},Eu^{3+}$ inorganic phosphors were prepared by a solid state reaction method with Dy^{3+} and Eu^{3+} as dopants and $SrLaLiTeO_6$ (SLLT) as matrix. The crystal structure and optical properties of the phosphors were analyzed by X-ray diffraction, fluorospectrophotometry and chromaticity coordinates analysis. The results show that Dy^{3+} and Eu^{3+} successfully enter the SLLT crystal, which does not produce impurities. SLLT:0.07Dy^{3+},yEu^{3+} phosphors can simultaneously emit blue, yellow and red light under 351 nm excitation, which proves that there is an energy transfer between Dy^{3+} and Eu^{3+} to make up for the lack of red emission of single-doped Dy^{3+} phosphors. The optimum doping concentration of Eu^{3+} ion is 0.05, where the chromaticity coordinate is (0.391 9, 0.380 9), the correlated color temperature is 3 733 K, which is close to the warm white light region. Consequently, $SrLaLiTeO_6:Dy^{3+},Eu^{3+}$ phosphor is an excellent warm white LED phosphor.

Keywords: phosphor; luminescent property; $SrLaLiTeO_6:Dy^{3+},Eu^{3+}$; warm white light; solid state reaction

收稿日期:2023-03-01
基金项目:湖北省技术创新专项(2016ACA160);武汉工程大学博士启动基金(16QD28);武汉工程大学第十四届研究生教育创新基金(CX2022242)
作者简介:龚劲松,硕士研究生。Email:22105010093@stu.wit.edu.cn
***通信作者**:戴武斌,博士,教授。Email:wubin.dai@wit.edu.cn
引文格式:龚劲松,朱齐,郑小州,等. $SrLaLiTeO_6:Dy^{3+},Eu^{3+}$荧光粉的制备及发光性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(3):274-279.

白光发光二极管（light emitting diode，LED），因其成本低、转换效率高、稳定性强、节能、寿命长和易维护等优异性能[1-3]在20世纪后期迅速发展，广泛应用于照明和显示器等领域，逐渐取代了白炽灯和荧光灯等传统光源，被称为第四代照明光源[4]。目前绝大多数白光LED的商业合成方案是在蓝光芯片上涂覆黄光发射荧光粉（$Y_3A_{l5}O_{12}:Ce^{3+}$）[5]，但是白光成分中缺少红色[6]，导致合成样品的白光相关色温（correlated color temperature，CCT）较高，显色性差。因此，除了探索一种优异的红色荧光粉来补充红光发射之外[7]，也可以选择掺杂多种离子合成单基质荧光粉解决白光中红色波段缺失的问题[8]。

双钙钛矿具有$AA'BB'O_6$结构，AB位都能发生不同程度的取代，可以为稀土离子掺杂提供多种晶体场环境。其中，双钙钛矿型碲酸盐由于其稳定性和在晶格中离子选择的灵活性[9]，常作为发光中心的基质晶格，一直是荧光粉技术中研究的热门[10]。$SrLaLiTeO_6$（SLLT）属于单斜晶系，空间群为$P2_1/n$，SLLT作为一种低声子能量的材料，可以改善掺杂离子的电子能级之间的辐射跃迁，避免掺杂稀土离子的非辐射衰变[11]，是优良的荧光粉掺杂基质。三价镝离子（Dy^{3+}）作为优良的稀土激活剂，得益于Dy^{3+}离子的f-f跃迁，即磁偶极跃迁（$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{15/2}$）和电偶极跃迁（$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{13/2}$）分别在蓝光和黄光区域发光，光致发光激发下蓝光和黄光结合理论上可以产生白光，但单掺Dy^{3+}也存在光谱中缺少红光成分使得白光偏冷的问题[12]。三价铕离子（Eu^{3+}）的$^5D_0\rightarrow{}^7F_2$（红色）的电偶极跃迁，一直被用作红色荧光粉和红光发射组分的发光中心，可以补足红色波段的缺失[13]。因此，在$SLLT:Dy^{3+}$荧光粉中引入Eu^{3+}，控制两者掺杂离子的浓度，可以调谐发射的强度和波长，通过Dy^{3+}到Eu^{3+}离子的能量传递，实现蓝光、黄光和红光共同发射[14]。因而研究单相$SLLT:Dy^{3+},Eu^{3+}$暖白光LED荧光粉具有十分重要的意义和价值。

本研究采用高温固相法合成了Dy^{3+}和Eu^{3+}离子共掺SLLT荧光粉，并对其晶体结构和光致发光性能进行分析，研究双掺杂体系中Dy^{3+}到Eu^{3+}的能量传递过程，揭示不同能级之间可能存在的电子跃迁，从而获得处于其中的暖白光。

1　实验部分

1.1　试　剂

碳酸锶（$SrCO_3$，纯度为99.997%）、氧化镧（La_2O_3，纯度为99.997%）、碳酸锂（Li_2CO_3，纯度为99.997%）、氧化碲（TeO_2，纯度为99.997%）、氧化镝（Dy_2O_3，纯度为99.99%）和氧化铕（Eu_2O_3，纯度为99.99%）。

1.2　实验方法

通过高温固相法制备了系列$SLLT:xDy^{3+},yEu^{3+}$（x=0.00~0.09，y=0.00~0.35）荧光粉样品（掺杂率均在摩尔百分比的范围内）。按化学计量比称重后，将原料置于玛瑙研钵中加入无水乙醇后，研磨0.5 h，混合均匀后将所得粉体置于烘箱（80 ℃）烘干，干燥后的粉体置于坩埚中，然后放入高温炉预烧（煅烧温度为800 ℃，煅烧时间6 h），煅烧结束后冷却至室温，再次研磨后放入高温炉煅烧（煅烧温度为1 100 ℃，煅烧时间8 h），煅烧结束后冷却至室温，再经研磨得到目标荧光粉。

1.3　表征方法

采用X射线衍射（X-ray diffraction，XRD）仪（德国布鲁克公司，Bruker D8 ADVANCE）对样品的物相进行表征（辐射源为Cu靶$K\alpha$射线，管电压40 kV，管电流40 mA，λ=0.154 18 nm，步长0.02°，扫描范围10°~90°）。使用爱丁堡FLS920荧光光谱仪测试粉体的光致发光激发（photoluminescence excitation，PLE）和光致发光发射（photoluminescence，PL）光谱，研究样品的发光性质。

2　结果与讨论

2.1　XRD表征

图1（a）为SLLT基质晶体结构示意图，B位Li^+和Te^{6+}与6个O原子配位形成交替［LiO_6］和［TeO_6］八面体，［LiO_6］和［TeO_6］八面体的交替排列通过共角形成框架，A位Sr^{2+}和La^{3+}一比一占据八面体构成的间隙。2个B位离子由于离子半径不同，导致八面体出现了一定程度的倾斜，使得晶格畸变。图1（b）为不同掺杂浓度的样品的XRD和$SrEuLiTeO_6$（ICSD-67852）标准卡片的对比，右图是31.5°~32.5°的主峰的放大图。XRD结果表明，掺杂Dy^{3+}和Eu^{3+}的样品的衍射峰均符合标准卡片的单斜结构，未观察到来自杂质相的衍射峰，掺杂后基质晶格结构未发生大的变化，这表明掺杂的Dy^{3+}和Eu^{3+}成功进入了SLLT主晶格。掺杂离子在基质晶格中的取代可以由式（1）推断：

$$D_r=\frac{R_sC_N-R_dC_N}{R_sC_N} \tag{1}$$

式（1）中：C_N是配位数，D_r是离子半径的差值，R_s和R_d分别是置换离子和掺杂离子的离子半径。在配

位数相同时，$R(Dy^{3+})$ = 0.102 7 nm、$R(Eu^{3+})$ = 0.106 6 nm、$R(La^{3+})$ = 0.116 0 nm，根据式(1)可以推断 Dy^{3+} 和 Eu^{3+} 优先取代 La^{3+}，化学式为 $SrLa_{(1-x-y)}LiTeO_6:xDy^{3+},yEu^{3+}$，且 Dy^{3+}、Eu^{3+}、La^{3+} 离子均为三价，取代SLLT体系中的 La^{3+} 时不存在价态失衡问题，由于小半径离子取代大半径离子，晶胞体积会缩小，随着掺杂浓度的增加，衍射峰向高角度偏移。

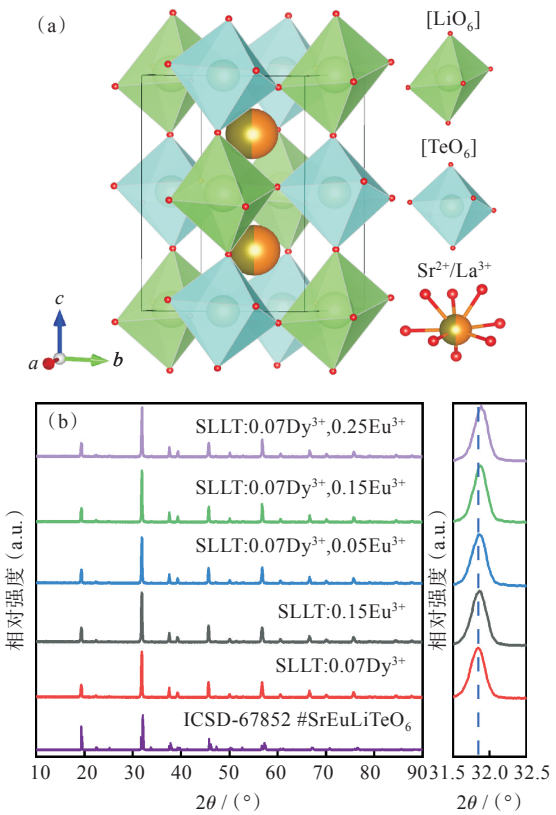

图1 (a)SLLT基质的晶体结构示意图；(b)SLLT:xDy^{3+},yEu^{3+}的XRD图

Fig. 1 (a)Schematic diagram of SLLT matrix crystal structure;(b)XRD patterns of SLLT:xDy^{3+},yEu^{3+}

2.2 发光性能研究

2.2.1 SLLT:Dy^{3+}荧光粉的发光性能 在常温下，SLLT:0.07Dy^{3+}荧光粉的PLE(575 nm监测)和PL(351 nm激发)光谱如图2(a)所示。SLLT:0.07Dy^{3+}的PLE光谱在300~500 nm之间有一系列特征激发尖峰，分别对应于 Dy^{3+} 的 $^6H_{15/2}\rightarrow{}^6P_{3/2}$(351 nm)、$^6P_{7/2}$(351 nm)、$^6P_{5/2}$(366 nm)、$^4I_{13/2}$(388 nm)、$^4G_{11/2}$(427 nm)、$^4I_{15/2}$(454 nm)、$^4F_{9/2}$(473 nm)能级跃迁，其中351 nm和388 nm的尖峰能够很好地适配紫外LED芯片[15]。SLLT:0.07Dy^{3+}的PL光谱在575和484 nm处的强发射尖峰，分别对应于 Dy^{3+} 的 $^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{13/2}$(蓝色)和 $^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{15/2}$(黄色)能级跃迁。

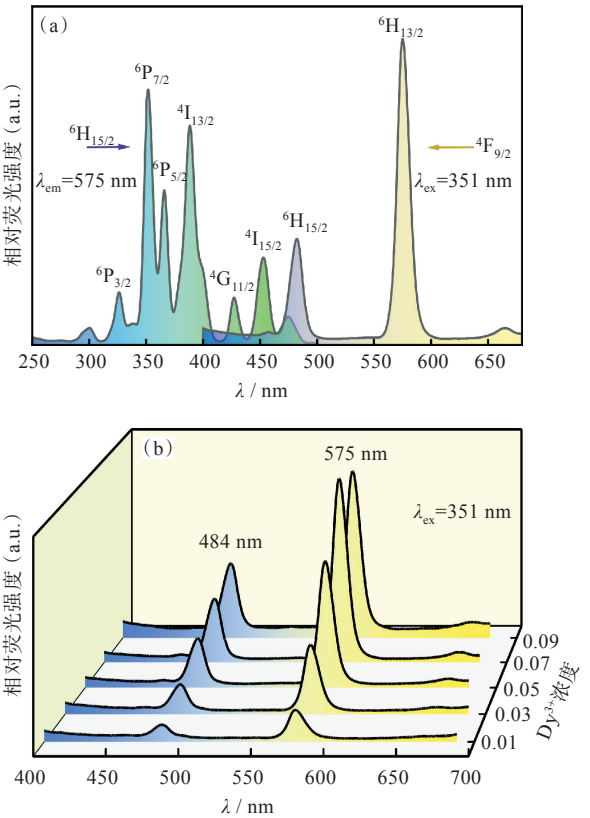

图2 (a)SLLT:0.07Dy^{3+}的PLE和PL光谱；(b)SLLT:xDy^{3+}的PL光谱

Fig. 2 (a)PLE and PL spectra of SLLT:0.07Dy^{3+};(b)PL spectra of SLLT:xDy^{3+}

图2(b)是SLLT:xDy^{3+}(x=0.01~0.09)随 Dy^{3+} 浓度变化的PL光谱，理论上，575 nm处的黄光发射可以与484 nm处的蓝光发射结合形成白光[16]，但是，Li^+ 和 Te^{6+} 处于 $AA'BB'O_6$ 中的B/B′位，且离子半径不同，[LiO_6]和[TeO_6]八面体降低了处于A/A′位的 Sr^{3+}/La^{3+} 的对称性[17]，Dy^{3+} 取代 La^{3+} 处于非反演对称中心，受发光中心的对称性的影响，黄光发射的相对强度较强且对浓度相对敏感[18]。随着 Dy^{3+} 浓度增加到0.07时，发生浓度猝灭，相邻发光中心之间的距离小于临界距离，非辐射跃迁的发光中心之间发生能量传递，导致发光强度下降。不同掺杂浓度SLLT:xDy^{3+}(x=0.01~0.09)荧光粉的色度坐标变化如图3所示。随着 Dy^{3+} 掺杂浓度的增加，色度坐标由白光区域(0.338 3，0.335 7)向黄光区域(0.397 6，0.415 7)移动，浓度猝灭后，色度坐标出现偏移，开始向白光区域(0.374 8，0.397 3)移动。

2.2.2 SLLT:Eu^{3+}荧光粉的发光性能 SLLT:yEu^{3+}的PLE(y=0.25)和PL(y=0.05、0.15、0.25、0.35)光谱如图4所示，在发射波长617 nm监测下，从250 nm到500 nm光谱范围内观察到若干激发带，其中宽激发带(250~350 nm)在288 nm处有最高峰，归属

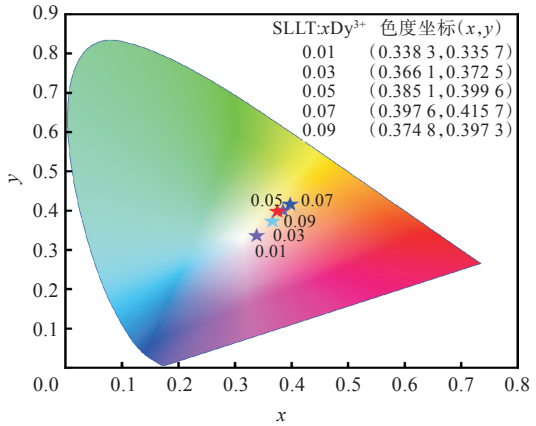

图 3　SLLT:xDy^{3+}的色度坐标的变化

Fig. 3　Changes of chromaticity coordinates of SLLT:xDy^{3+}

于周围阴离子(O^{2-})与掺杂的Eu^{3+}之间的电荷转移带。而 350~500 nm 波段由 396、464 nm 附近的若干尖锐峰组成，归属于Eu^{3+}的$^7F_0\rightarrow{}^5L_6$、$^7F_0\rightarrow{}^5D_2$能级跃迁。在波长 396 nm 激发下，样品发出明亮的红光，处于 593、617 nm 的发射峰分别归属于Eu^{3+}的$^5D_0\rightarrow{}^7F_1$、$^5D_0\rightarrow{}^7F_2$的能级跃迁。由于Eu^{3+}和Dy^{3+}匀占据基质晶格中的非反演对称晶体学格位，处于对称性较低的格位，$^5D_0\rightarrow{}^7F_2$(617 nm)的能级跃迁占主导地位。当Eu^{3+}浓度增加到y=0.25时，Eu^{3+}的发射峰强度逐步增加，进一步增加Eu^{3+}的浓度(y>0.25)，出现浓度猝灭现象，导致 PLE 和 PL 光谱强度降低。

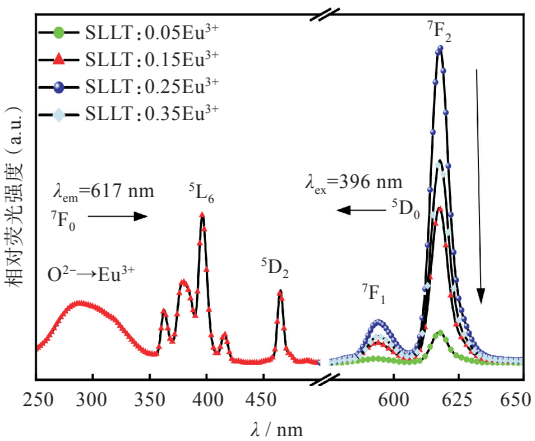

图 4　SLLT:yEu^{3+}的 PLE 和 PL 光谱

Fig. 4　PLE and PL spectra of SLLT:yEu^{3+}

2.2.3　SLLT:0.07Dy^{3+},yEu^{3+}荧光粉的发光性能及能量传递　图 5(a)为在波长 575 和 617 nm 监测下 SLLT:0.07Dy^{3+},0.05Eu^{3+}荧光粉的 PLE 光谱，与图 2(a)和图 4 对比发现：在波长 575 nm(Dy^{3+}的特征发射峰)监测下，PLE 光谱的峰形和位置未发生变化；在波长 617 nm(Eu^{3+}的特征发射峰)监测下，波长 351 nm 左右处出现了属于Dy^{3+}($^6H_{15/2}\rightarrow{}^6P_{3/2}$)的激发峰，说明$Dy^{3+}\rightarrow Eu^{3+}$之间存在能量传递。

选择Dy^{3+}的最强激发峰 351 nm 作为激发光源，研究$Dy^{3+}\rightarrow Eu^{3+}$之间的发光性能和能量传递。图 5(b)给出了在 351 nm 激发下Eu^{3+}掺杂浓度为 0.01~0.25 的 SLLT:0.07Dy^{3+},yEu^{3+}的 PL 光谱，样品的发射光谱中存在 3 个特征尖峰，分别位于 484、575 和 617 nm。对于 SLLT:0.07Dy^{3+},yEu^{3+}荧光粉，484和575 nm处的蓝黄色发射属于Dy^{3+}的$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{13/2}$和$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{15/2}$能级跃迁，617 nm 处的红色发射属于$Eu^{3+}$的$^5D_0\rightarrow{}^7F_2$能级跃迁，在掺杂浓度为 0.15 时，$Eu^{3+}$(617 nm)的发射强度最强。

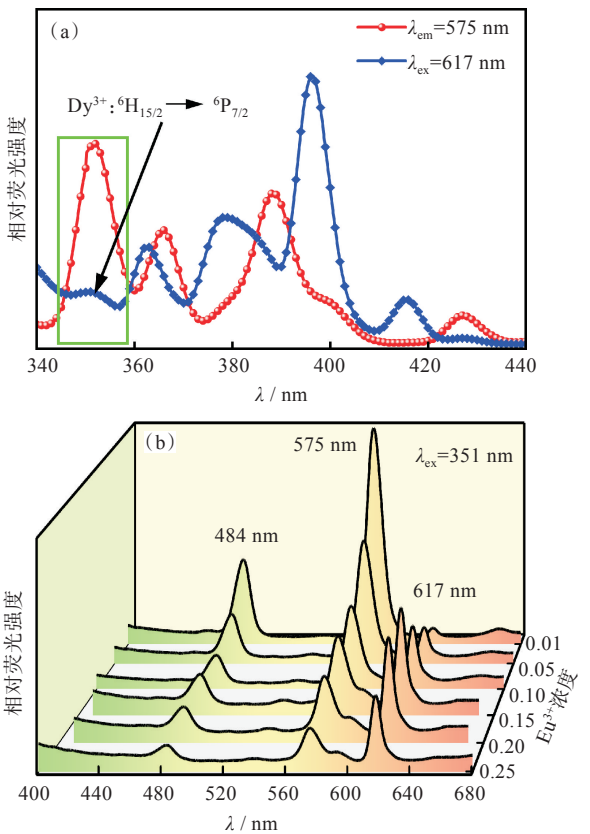

图 5　(a)SLLT:0.07Dy^{3+},0.05Eu^{3+}的 PLE 光谱；(b)SLLT:0.07Dy^{3+}, yEu^{3+}的 PL 光谱

Fig. 5　(a)PLE spectra of SLLT:0.07Dy^{3+},0.05Eu^{3+}; (b)PL spectra of SLLT:0.07Dy^{3+}, yEu^{3+}

SLLT:0.07Dy^{3+},yEu^{3+}荧光粉的$Dy^{3+}\rightarrow Eu^{3+}$能量转移效率、$Dy^{3+}$发光强度和$Eu^{3+}$发光强度与$Eu^{3+}$掺杂浓度的关系，如图 6 所示。随着$Eu^{3+}$掺杂浓度的增加，$Dy^{3+}$在 484 和 575 nm 处的峰逐渐减弱，而$Eu^{3+}$在 617 nm 处的峰逐渐增强，进一步说明了两者之间出现了能量传递。Dy^{3+}不仅作为激活剂，也作为敏化剂进行能量传递，随着Eu^{3+}浓度的增加，$Dy^{3+}\rightarrow Eu^{3+}$之间的能量传递效率逐渐增加(最大能量传递效率为 86.38%)，Eu^{3+}的发射强度不断

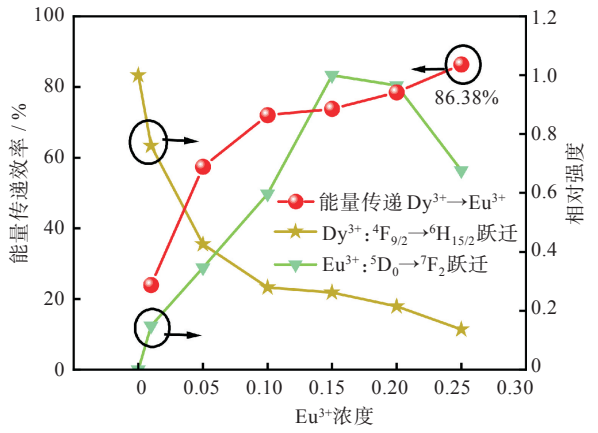

图6 Dy^{3+}→Eu^{3+}能量转移效率与Dy^{3+}和Eu^{3+}发光强度的关系

Fig. 6 Relationship between energy transfer efficiency of Dy^{3+}→Eu^{3+} and luminescence intensity of Dy^{3+} and Eu^{3+}

增加直至发生浓度猝灭。

表1显示了SLLT:0.07Dy^{3+},yEu^{3+}(y=0、0.01、0.05、0.1、0.15、0.2、0.25)的色度坐标和CCT随Eu^{3+}掺杂浓度的变化,色度坐标出现了偏转也证明了能量传递的发生。Eu^{3+}的加入补充缺失的红色部分,随着Eu^{3+}掺杂量的增加,色度坐标逐渐向暖白光区移动,CCT值出现先减小后增大的趋势,Eu^{3+}最佳掺杂浓度为0.05,此时的色度坐标为(0.391 9,0.380 9),CCT值为3 733 K,接近暖白光发射。CCT值采用McCamy[19]提出的公式计算:

$$T_{CCT}=-437n^3+3\,601n^2-6\,861n+5\,514.31 \quad (2)$$

式(2)中:$n=(x-x_a)/(y-y_a)$,x和y分别表示样品色度坐标的横坐标和纵坐标,$(x_a, y_a)=(0.332\,0, 0.185\,8)$。计算得到的CCT值列于表1中。

表1 SLLT:0.07Dy^{3+},yEu^{3+}的色度坐标和CCT的变化

Tab. 1 Changes of chromaticity coordinates and CCT of SLLT:0.07Dy^{3+}, yEu^{3+}

样品	色度坐标(x,y)	CCT / K
SLLT:0.07Dy^{3+}	(0.394 3,0.412 9)	3 894
SLLT:0.07Dy^{3+},0.01Eu^{3+}	(0.386 7,0.397 5)	3 974
SLLT:0.07Dy^{3+},0.05Eu^{3+}	(0.391 9,0.380 9)	3 733
SLLT:0.07Dy^{3+},0.10Eu^{3+}	(0.406 6,0.368 5)	3 415
SLLT:0.07Dy^{3+},0.15Eu^{3+}	(0.399 0,0.353 9)	3 232
SLLT:0.07Dy^{3+},0.20Eu^{3+}	(0.397 8,0.333 2)	3 094
SLLT:0.07Dy^{3+},0.25Eu^{3+}	(0.376 9,0.316 5)	3 566

图7为Dy^{3+}→Eu^{3+}的能量传递过程。在351 nm激发下,处于基态的$^6H_{15/2}$能级的电子吸收部分光子能量跃迁到更高的$^6P_{3/2}$、$^6P_{7/2}$、$^4I_{13/2}$和$^4G_{11/2}$激发态能级,然后弛豫到较低的$^4F_{9/2}$能级,电子从$^4F_{9/2}$能级进一步返回到$^6H_{15/2}$和$^6H_{13/2}$能级释放出能量,分别发射蓝光和黄光。同时,$^4F_{9/2}$和$^5D_0$能级之间的共振会导致Dy^{3+}离子的部分能量传递给Eu^{3+},Eu^{3+}基态部分电子被激发到$^5D_0$能级,处于$^5D_0$能级的大部分激发电子可以回到$^7F_2$能级,发射617 nm的红光和593 nm的橙光。

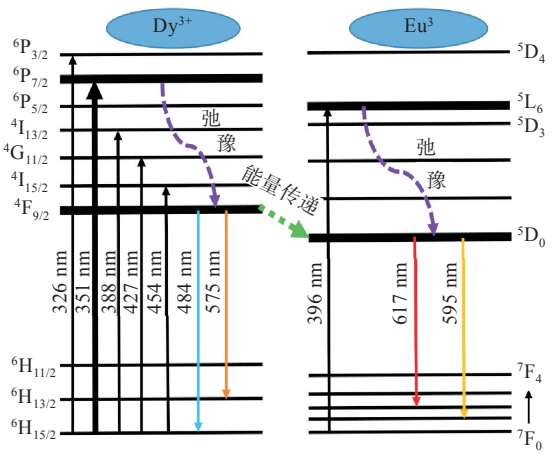

图7 SLLT中Dy^{3+}和Eu^{3+}能级图

Fig. 7 Energy level diagrams of Dy^{3+} and Eu^{3+} ions in SLLT

3 结 论

本研究采用高温固相法合成了SLLT:xDy^{3+},yEu^{3+}荧光粉。XRD图谱表明荧光粉的结构与标准卡片一致,无杂质产生。在351 nm紫外光激发下,SLLT:xDy^{3+}荧光粉在484 nm(蓝光)和575 nm(黄光)处有2个特征尖峰,随着Dy^{3+}浓度的增加,色度坐标先往黄色区域移动,继续增加浓度到0.07发生浓度猝灭,然后往白色区域移动。在396 nm近紫外光激发下,SLLT:yEu^{3+}的发射光谱为橙光发射(593 nm)和红光发射(617 nm),且浓度为0.25时发生浓度猝灭;Dy^{3+}和Eu^{3+}掺杂后受晶体场对称性的影响,对应的黄光和红光发射较强。当Dy^{3+}和Eu^{3+}离子共掺时,在351 nm激发下,SLLT:0.07Dy^{3+},yEu^{3+}荧光粉同时实现蓝光、黄光和红光发射,随着Eu^{3+}浓度的增加,Dy^{3+}的发射强度不断下降,色度坐标从黄光区域逐渐向暖白光区域移动,证明了Dy^{3+}和Eu^{3+}离子之间的能量传递,Eu^{3+}浓度在0.15时发生浓度猝灭;Eu^{3+}的最佳掺杂浓度为0.05,此时的色度坐标为(0.391 9,0.380 9),CCT值为3 733 K,位于暖白光区域。结果表明,单相SLLT:Dy^{3+},Eu^{3+}荧光粉在暖白光LED领域具有应用潜力。

参考文献

[1] GUPTA I, SINGH S, BHAGWAN S, et al. Rare earth (RE) doped phosphors and their emerging applications: a review [J]. Ceramics International, 2021, 47(14): 19282-19303.

[2] CHEN J W, XIANG H Y, WANG J, et al. Perovskite white light emitting diodes: progress, challenges, and opportunities [J]. ACS Nano, 2021, 15(11): 17150-17174.

[3] WANG X, WANG J, LI X Y, et al. Novel bismuth activated blue-emitting phosphor $Ba_2Y_5B_5O_{17}:Bi^{3+}$ with strong NUV excitation for WLEDs [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(36): 11227-11233.

[4] WANG R, XIANG H Y, CHEN J W, et al. Energy regulation in white-light-emitting diodes [J]. ACS Energy Letters, 2022, 7(6): 2173-2188.

[5] WU Y Q, CHI Z W, HE T. Codoping of Cr^{3+} in $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ phosphors for improving color rendering of white light-emitting diodes [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28(19): 14591-14595.

[6] CHEN D Q, ZHOU Y, ZHONG J S. A review on Mn^{4+} activators in solids for warm white light-emitting diodes [J]. RSC Advances, 2016, 6(89): 86285-86296.

[7] 陈洋，戴武斌，胡金，等.$Ca_{1-3x/2}A1_2Si_2O_8:xEu^{3+}$荧光粉的发光和光温传感特性[J].武汉工程大学学报，2021，43(4)：398-401.

[8] LI H, LIU H B, TAO X M, et al. Novel single component tri-rare-earth emitting MOF for warm white light LEDs [J]. Dalton Transactions, 2018, 47(25): 8427-8433.

[9] LÓPEZ M L, JEREZ A, PICO C, et al. Synthesis, crystal structure, and magnetic susceptibility of $MLnLiTeO_6$(M=Ca, Sr, Ba) [J]. Journal of Solid State Chemistry, 1993, 105(1): 19-26.

[10] ZHAO L, XU P, FAN F Y, et al. Synthesis and photoluminescence properties of Sm^{3+} and Dy^{3+} ions activated double perovskite Sr_2MgTeO_6 phosphors [J]. Journal of Luminescence, 2019, 207: 520-525.

[11] LAL S C, AISWARYA A M, SIBI K S, et al. Insights into the structure, photoluminescence and Judd-Ofelt analysis of red emitting $SrLaLiTeO_6:Eu^{3+}$ phosphors [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 1300-1308.

[12] CHE J Z, DENG B, SONG Q Y, et al. Synthesis and optical properties of novel double perovskite $Ca_2MgTeO_6:Dy^{3+}$, Na^+ phosphors for white LEDs [J]. Journal of Rare Earths, 2021, 39(6): 634-642.

[13] DUTTA S, SHARMA S K. Energy transfer between Dy^{3+} and Eu^{3+} in Dy^{3+}/Eu^{3+}-codoped Gd_2MoO_6 [J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(14): 6750-6760.

[14] YU C Y, YANG Z W, HUANG A J, et al. Photoluminescence properties of tellurite glasses doped Dy^{3+} and Eu^{3+} for the UV and blue converted WLEDs [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2017, 457: 1-8.

[15] 黄珂，刘丹妮，柳竣捷，等.稀土掺杂荧光粉的光学性能及其测温应用研究[J].武汉工程大学学报，2022，44(3)：288-292.

[16] HUANG W T, LIU Q, LI X B, et al. Dy^{3+}-doped $BaLaMgSbO_6$ double perovskite highly efficient white phosphor [J]. Ceramics International, 2019, 45(12): 15624-15628.

[17] CHEN H L, LIN P H, SHIH H R, et al. Synthesis and luminescence properties of (Dy^{3+}, Eu^{3+}) ions co-doped double-perovskite Ba_2LaNbO_6 phosphors [J]. Modern Physics Letters B, 2022, 36(15): 2241005.

[18] WU X L, ZHAO X L, REN Q, et al. Tuning of emission by effect of local symmetry in $BaLaLiWO_6:Dy^{3+}/Eu^{3+}$ for WLEDs [J]. Ceramics International, 2022, 48(13): 18793-18802.

[19] MCCAMY C S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates [J]. Color Research and Application, 1992, 17(2): 142-144.

本文编辑：苗　变