

文章编号: 1004-4353(2021)04-0309-06

可调色荧光粉 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ 的 发光性质及 Bi^{3+} 和 Sm^{3+} 离子间的能量传递机理

薛鹏, 宁航, 田莲花

(延边大学 理学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 采用高温固相法合成了系列 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ 荧光粉, 并对其发光性质以及 Bi^{3+} 、 Sm^{3+} 离子间的能量传递机理进行了研究. 结果显示, 当以 Bi^{3+} 的 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$ 激发位置(338 nm)激发 Bi^{3+} 和 Sm^{3+} 共掺杂 LaSrZnNbO_6 荧光粉时, 在 LaSrZnNbO_6 荧光粉的发射光谱中同时出现了 Bi^{3+} 和 Sm^{3+} 的发射峰, 表明在 LaSrZnNbO_6 基质中存在 $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ 的能量传递. 经计算, Bi^{3+} 离子和 Sm^{3+} 离子间的能量传递效率可达到 86.9%. 通过改变 Bi^{3+} 离子和 Sm^{3+} 离子的掺杂浓度可以使 LaSrZnNbO_6 荧光粉的 CIE 色坐标由蓝光区域移动至粉白光区域, 表明通过调节掺杂浓度可制备出颜色可调谐的荧光粉.

关键词: 荧光粉; 高温固相法; 能量传递; 激发光谱; 发射光谱

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

Luminescence properties and energy transfer mechanism between Bi^{3+} and Sm^{3+} of color-tunable $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ phosphors

XUE Peng, NING Hang, TIAN Lianhua

(College of Science, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: A series of $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+}/\text{Sm}^{3+}/\text{Bi}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ phosphors were synthesized by high temperature solid state reaction method. Their luminescence properties and energy transfer mechanism between Bi^{3+} and Sm^{3+} were investigated in this paper. The results show that the emission spectra of Bi^{3+} and Sm^{3+} co-doped LaSrZnNbO_6 phosphors exhibits both of Bi^{3+} and Sm^{3+} emission peaks with excited at the excitation wavelength of 338 nm which is the $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$ transition of Bi^{3+} . It indicates that $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ energy transfer exists in LaSrZnNbO_6 host. By calculating, the energy transfer efficiency between Bi^{3+} and Sm^{3+} ions can reach 86.9%. The CIE coordinates of LaSrZnNbO_6 phosphors can be moved from the blue region to the pink-white region by changing the doping concentration of Bi^{3+} and Sm^{3+} ions, indicating that color-tunable phosphor can be prepared by adjusting the doping concentration.

Keywords: phosphor; high temperature solid state reaction method; energy transfer; excitation spectra; emission spectra

由于稀土离子掺杂的无机发光材料可以产生多种发光颜色, 因此其在固态照明、光学温度传感器、显示器件等领域得到了广泛关注^[1-3]. 近年来, 一些学者通过共掺杂多种激活剂制备了多种颜色可调谐的荧光粉, 这些掺杂离子主要由 $\text{Ce}^{3+}-\text{Tb}^{3+}$ 、 $\text{Bi}^{3+}-\text{Eu}^{3+}$ 、 $\text{Bi}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ 、 $\text{Tb}^{3+}-\text{Eu}^{3+}$ 等组成^[4-7]. 研究表明,

收稿日期: 2021-08-11

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20180893KJ)

第一作者: 薛鹏(1995—), 男, 在读硕士, 研究方向为发光学.

通信作者: 田莲花(1972—), 女, 博士, 教授, 研究方向为发光学.

通常情况下 Sm^{3+} 在 400 nm 附近处会出现一个强烈的吸收带, 在 520~750 nm 处会产生橙红色发射^[8] (由 Sm^{3+} 的 $^4\text{G}_{5/2} \rightarrow ^6\text{H}_{5/2}$ 、 $^4\text{G}_{5/2} \rightarrow ^6\text{H}_{7/2}$ 和 $^4\text{G}_{5/2} \rightarrow ^6\text{H}_{9/2}$ 跃迁引起). 基于 Sm^{3+} 的该特性, 一些学者将 Sm^{3+} 作为激活剂制备了多种荧光粉, 如 $\text{Ba}_2\text{GdNbO}_6:\text{Sm}^{3+}$ 、 $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{ZnW}_2\text{O}_{12}:\text{Sm}^{3+}$ 、 $\text{GdNbTiO}_6:\text{Sm}^{3+}$ 等^[9-11]. Bi^{3+} 的发射带通常位于 300~500 nm 范围内. 由于这一范围与 Sm^{3+} 的激发带范围存在较大重合, 因此当 Bi^{3+} 与 Sm^{3+} 共掺时很可能会存在能量传递现象, 进而实现多颜色可调谐发射^[12]. 近年来, 铌酸盐因具有优异的化学稳定性、离子导电性以及光电特性等受到学者的关注^[13-14], 但在相关研究中将铌酸盐 LaSrZnNbO_6 作为基质并对其发光性质进行研究得较少; 因此, 本文以 LaSrZnNbO_6 作为基质制备了系列 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+}/\text{Sm}^{3+}/\text{Bi}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ 荧光粉, 并对其发光性质和能量传递机理进行了研究.

1 实验

1.1 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+}/\text{Sm}^{3+}/\text{Bi}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ 荧光粉的制备

采用高温固相法合成系列 $\text{La}_{1-x}\text{SrZnNbO}_6:x\text{Bi}^{3+}$ ($x=0.01\sim0.11$) 和 $\text{La}_{0.91-y}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}, y\text{Sm}^{3+}$ ($y=0.005\sim0.09$) 荧光粉. 按照化学计量比称取如下起始试剂: La_2O_3 (99.99%)、 SrCO_3 (99.95%)、 ZnO (99.99%)、 Nb_2O_5 (99.9%)、 Bi_2O_3 (99.99%)、 Sm_2O_3 (99.99%), 然后将其放入玛瑙研钵中混合研磨 30 min, 再置于氧化铝坩埚中煅烧 2 h (在空气气氛下以 1350 °C 煅烧) 后冷却至室温即得最终产物.

1.2 样品表征

利用 Rigaku SmartLab SE 型 X 射线衍射仪测试样品的 X 射线衍射 (XRD) 图谱, 利用 Hitachi F-7000 荧光光谱仪测量样品的激发光谱和发射光谱 (以 450 W 的 Xe 灯作为激发光源), 利用 VESTA 软件绘制样品的晶体结构, 利用 CIE1931 软件计算样品色坐标并绘制图像.

2 结果与讨论

图 1 为基于无机晶体结构数据库 (No.150809) 绘制的 LaSrZnNbO_6 晶体结构图. 由图可以看出, LaSrZnNbO_6 晶体空间群为 $Fm-3m$, 晶胞参数为 $a=8.00100\text{ Å}$, $b=8.00100\text{ Å}$, $c=8.00100\text{ Å}$, $\beta=90.0000^\circ$, $V=512.1921\text{ Å}^3$, $Z=4$ ^[15]. 根据离子半径相似原理, 当 Bi^{3+} (1.03 Å) 和 Sm^{3+} (0.958 Å) 共掺入 LaSrZnNbO_6 中时其将占据 La^{3+} (1.16 Å) 格位.

为进一步验证 LaSrZnNbO_6 晶体的结构, 本文同时测试了 $\text{La}_{0.96}\text{SrZnNbO}_6:0.03\text{Bi}^{3+}, 0.01\text{Sm}^{3+}$ 和 $\text{La}_{0.97}\text{SrZnNbO}_6:0.03\text{Bi}^{3+}$ 的 XRD 数据. 图 2 为 ICSD No.150809 与样品的 XRD 图谱. 对比二者可知, 样品 XRD 图谱与标准数据相匹配, 且并未观察到杂质相. 该结果说明, 在 LaSrZnNbO_6 中掺入 Bi^{3+} 和 Sm^{3+} 后并未改变其晶体结构.

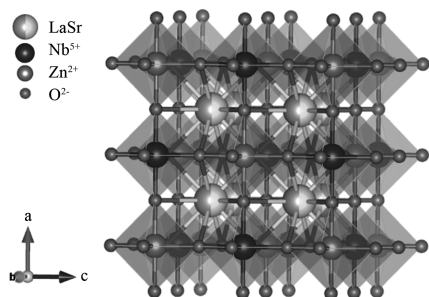


图 1 LaSrZnNbO_6 晶体的结构图

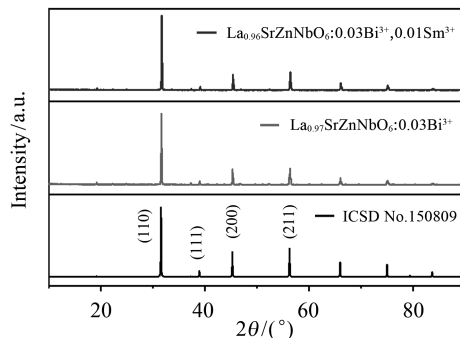


图 2 ICSD No.150809、 $\text{La}_{0.97}\text{SrZnNbO}_6:0.03\text{Bi}^{3+}$ 和 $\text{La}_{0.96}\text{SrZnNbO}_6:0.03\text{Bi}^{3+}, 0.01\text{Sm}^{3+}$ 的 XRD 图谱

图 3 为 $\text{La}_{0.91}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}$ 的激发光谱和发射光谱. 由图 3(a) 可以看出, 当 Bi^{3+} 掺入基质中

时,其激发光谱的强吸收带位于 338 nm 处,同时在 303 nm 处还有 1 个肩峰. 这 2 个峰(303、338 nm 处的峰)分别属于 $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Bi}^{3+}$ 的电荷转移带和 Bi^{3+} 的 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$ 的吸收. 由图 3(b)可以看出,在 338 nm 波长的激发下,样品在 432 nm 处有 1 个蓝光发射带. 该发射带属于 Bi^{3+} 的 $^3\text{P}_1 - ^1\text{S}_0$ 自旋允许跃迁^[16].

为了确定制备 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+}$ 荧光粉的最佳掺杂浓度,本文测定了 $\text{La}_{1-x}\text{SrZnNbO}_6:x\text{Bi}^{3+}$ 的发射光谱,如图 4 所示. 由图 4 可以看出,初始时发射强度随 Bi^{3+} 浓度的提高而提高,当 Bi^{3+} 的掺杂浓度为 0.09 时,其发射强度达到最大值;当进一步提高 Bi^{3+} 掺杂浓度时,其发射强度开始降低,并随后发生浓度猝灭现象.

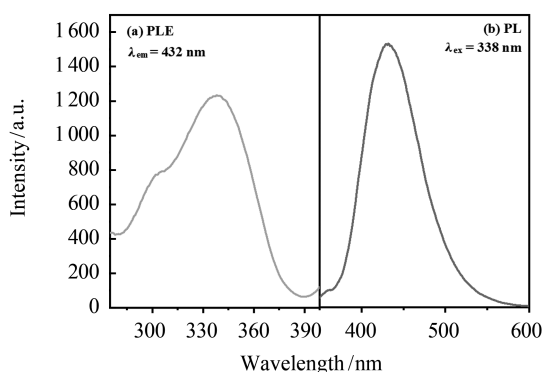


图3 $\text{La}_{0.91}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}$ 的激发光谱(a)和发射光谱(b)

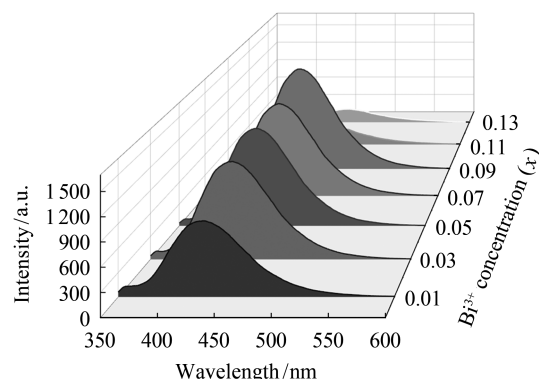


图4 $\text{La}_{1-x}\text{SrZnNbO}_6:x\text{Bi}^{3+}$ ($x=0.01\sim0.13$) 的发射光谱

Sm^{3+} 掺杂 LaSrZnNbO_6 基质的激发光谱和发射光谱如图 5 所示. 由图 5 可以看出, $\text{La}_{0.99}\text{SrZnNbO}_6:0.01\text{Sm}^{3+}$ 的激发光谱由多条激发带组成, 其中 200~320 nm 处的宽带属于 $\text{O}^{2-}-\text{Sm}^{3+}$ 的电荷迁移, 406 nm 处的最强发射峰是由 Sm^{3+} 的 $^6\text{H}_{5/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$ 跃迁导致的. 在 406 nm 的波长激发下, $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Sm}^{3+}$ 的发射光谱在 564、601、647 nm 处分别出现了 1 个发射峰, 其中 601 nm 处的峰最强. 这 3 个峰分别对应的是 Sm^{3+} 的 $^4\text{G}_{5/2} \rightarrow ^6\text{H}_{J/2}$ ($J=5,7,9$) 跃迁^[17-18]. 由上述可知, $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Sm}^{3+}$ 荧光粉可发射出橙红光.

为了调控发光颜色, 在 LaSrZnNbO_6 基质中共掺杂了 Bi^{3+} 和 Sm^{3+} , 其激发光谱和发射光谱如图 6 所示. 图 6(a) 为 $\text{La}_{0.9}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}, 0.01\text{Sm}^{3+}$ 的激发光谱, 图 6(b) 为 $\text{La}_{0.91-y}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}, y\text{Sm}^{3+}$ ($y=0.005\sim0.09$) 的发射光谱. 由图 6(a) 可以看出, 当以 Sm^{3+} 离子的发射(601 nm)为监测波长时, $\text{La}_{0.9}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}, 0.01\text{Sm}^{3+}$ 的激发光谱中除了存在 Sm^{3+} 离子的激发峰之外, 还出现了 Bi^{3+} 离子的激发峰. 由图 6(b) 可以看出, 当以 Bi^{3+} 离子的激发波长激发样品时, 所有光谱中均出现了 Bi^{3+} 和 Sm^{3+} 的发射峰, 且 Bi^{3+} 离子的发射强度随 Sm^{3+} 掺杂浓度的增加而单调降低; 当 Sm^{3+} 离子的掺杂浓度达到 0.03 时, Sm^{3+} 离子的发射强度达到最大值, 并随后发生浓度猝灭现象. 上述结果进一步证明了 $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ 的能量传递^[19].

为进一步研究 $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ 的能量传递, 对 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+}$ 的发射光谱和 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Sm}^{3+}$ 的激发光谱(图 7)进行了对比. 由图 7 可知, 二者的光谱存在较大的重叠, 这进一步说明在 LaSrZnNbO_6 中存在 $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ 的能量传递.

$\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ 荧光粉的发光性质和 $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ 的能量传递机理如图 8 所示. 由图 8 可以看出, 在 338 nm 的激发条件下, 电子由 Bi^{3+} 离子的 $^1\text{S}_0$ 基态跃迁到 $^1\text{P}_1$ 能级, 然后再通过无辐射跃迁

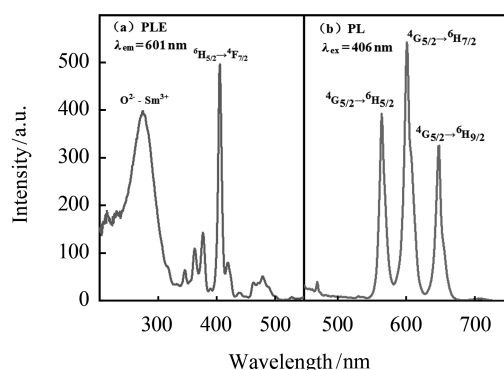


图5 $\text{La}_{0.99}\text{SrZnNbO}_6:0.01\text{Sm}^{3+}$ 的激发光谱(a)和发射光谱(b)

弛豫到 Bi^{3+} 离子的 $^3\text{P}_1$ 能级. 然后, 其中一部分电子将返回 Bi^{3+} 离子的 $^1\text{S}_0$ 基态, 在 432 nm 处产生蓝光发射; 而另一部分将会通过能量传递过程转移到与 Bi^{3+} 离子的 $^3\text{P}_1$ 能级相近的 Sm^{3+} 能级上. 最后, 电子由 Sm^{3+} 离子的 $^4\text{G}_{5/2}$ 能级跃迁到 $^6\text{H}_{5/2}$ 、 $^6\text{H}_{7/2}$ 、 $^6\text{H}_{9/2}$ 能级, 分别在 564、601、647 nm 处产生不同的橙光和红光发射^[20].

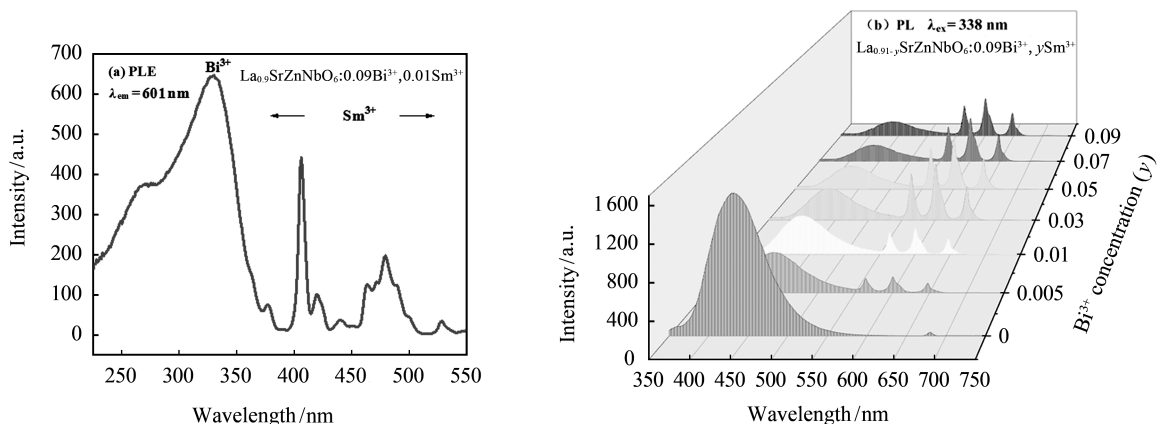


图 6 $\text{La}_{0.9}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}, 0.01\text{Sm}^{3+}$ 的激发光谱 (a) 和 $\text{La}_{0.91-y}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}, y\text{Sm}^{3+}$ ($y=0.005\sim 0.09$) 的发射光谱 (b)

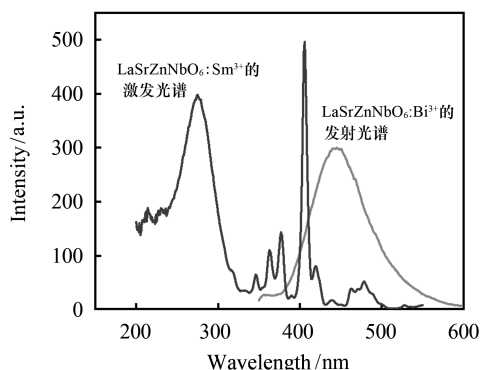


图 7 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+}$ 的发射光谱和 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Sm}^{3+}$ 的激发光谱

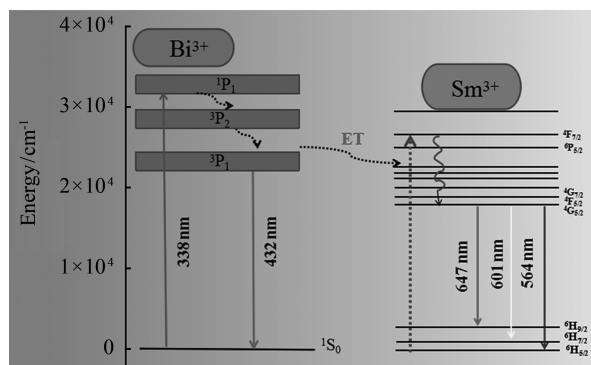


图 8 在 LaSrZnNbO_6 基质中 $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ 的能级传递原理图

在 $\text{La}_{0.91-y}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}, y\text{Sm}^{3+}$ 荧光粉中, $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ 的能量传递效率可由公式 $\eta_{\text{ET}} = 1 - \frac{I_s}{I_{s0}}$ 计算获得^[21]. 式中 I_s 和 I_{s0} 分别为 $\text{La}_{0.91-y}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}, y\text{Sm}^{3+}$ 和 $\text{La}_{0.91}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}$ 荧光粉在 432 nm 处的发光强度. η_{ET} 的计算结果如图 9 所示. 由图可以看出, $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ 的能量传递效率最高达到 86.90%, 这说明 Bi^{3+} 和 Sm^{3+} 离子在 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ 荧光粉中发生了有效的能量传递.

由于 Bi^{3+} 离子和 Sm^{3+} 离子的发射强度与其浓度密切相关, 因此可通过调节 Bi^{3+} 和 Sm^{3+} 离子的掺杂浓度来实现颜色可调谐的荧光粉. 图 10 为 $\text{La}_{0.91-y}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+}, y\text{Sm}^{3+}$ ($y=0.005\sim 0.09$) 和 $\text{La}_{0.99}\text{SrZnNbO}_6:0.01\text{Sm}^{3+}$ 荧光粉的 CIE 色度图. 由图 10 可知, CIE 的色坐标由 (0.152 5, 0.074 4) 移动到 (0.351 2, 0.271 3), 颜色由蓝光区逐渐向粉白光区移动. 由此表明通过调节 Bi^{3+} 和 Sm^{3+} 的掺杂浓度可以实现荧光粉的颜色可调谐.

3 结论

本文利用高温固相法合成了系列颜色可调谐的 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+}$ 和 $\text{La}_{0.91-y}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+},$

$y\text{Sm}^{3+}$ 荧光粉. 研究表明, Bi^{3+} 的最佳掺杂浓度为 0.09. $\text{La}_{0.91-y}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+},y\text{Sm}^{3+}$ 的发射光谱中同时含有 Bi^{3+} 离子和 Sm^{3+} 离子的发射带,且当 Sm^{3+} 离子的掺杂浓度增加时 Bi^{3+} 离子的发射强度逐渐降低,这表明在 LaSrZnNbO_6 中存在 $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$ 的能量传递. 通过计算显示 Bi^{3+} 离子和 Sm^{3+} 离子间的能量传递效率可达到 86.90%. 通过改变 Bi^{3+} 离子和 Sm^{3+} 离子的掺杂浓度可以使荧光粉的 CIE 色坐标由 (0.1525, 0.0744) 移动到 (0.3512, 0.2713),即通过改变 Bi^{3+} 离子和 Sm^{3+} 离子的掺杂浓度可以实现荧光粉的颜色可调. 本文实验结果可为 $\text{LaSrZnNbO}_6:\text{Bi}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ 荧光粉在白色发光二极管方面的应用提供理论参考.

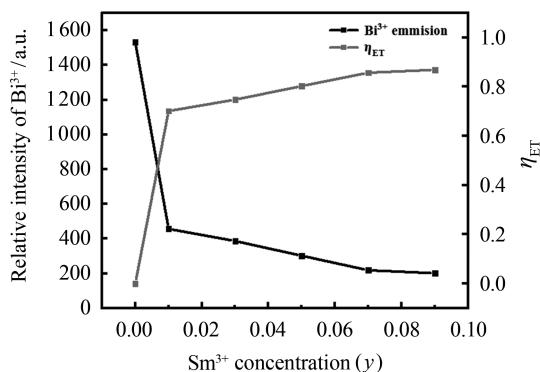


图9 Bi^{3+} 的发射强度和能量传递效率与 Sm^{3+} 掺杂浓度的关系

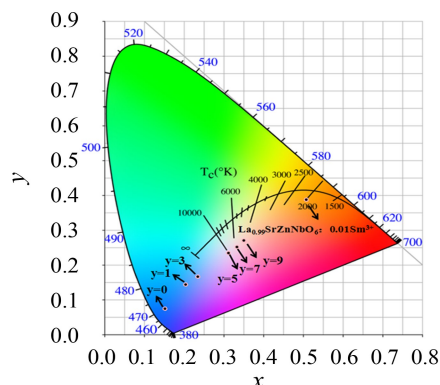


图10 $\text{La}_{0.91-y}\text{SrZnNbO}_6:0.09\text{Bi}^{3+},y\text{Sm}^{3+}$ 和 $\text{La}_{0.99}\text{SrZnNbO}_6:0.01\text{Sm}^{3+}$ 的 CIE 色度图

参考文献:

- [1] LI D C, ZHU G P, ZHAO X L. High efficiently color-tunable emission in $\text{KTb}(\text{CO}_3)_2:\text{Eu}^{3+}$ phosphors[J]. Optical Materials, 2021,119:111310.
- [2] CAO R P, REN Y, CHEN T, et al. Emission improvement and tunable emission properties of $\text{SrZrSi}_2\text{O}_7:\text{R}(\text{R}=\text{Sm}^{3+}$ and $\text{Sm}^{3+}/\text{Bi}^{3+})$ phosphors[J]. J Lumin, 2020,225:117350.
- [3] ZHANG Y, ZHANG X J, ZHENG L L, et al. Energy transfer and tunable emission of $\text{Ca}_{14}\text{Al}_{10}\text{Zn}_6\text{O}_{35}:\text{Bi}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ phosphor[J]. Materials Research Bulletin, 2018,100:56-61.
- [4] WU X L, JIAO Y H, HAI O, et al. Photoluminescence, energy transfer, color tunable properties of $\text{Sr}_3\text{La}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce},\text{Tb}$ phosphors[J]. J Alloys Compd, 2018,730:521-527.
- [5] ZHAO W Y, QI S M, LIU J, et al. Luminescence properties and energy transfer of a color-tunable $\text{Y}_2\text{GeO}_5:\text{Bi}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ phosphor[J]. J Alloys Compd, 2019,787:469-475.
- [6] HAN C, TAN J, XIONG A, et al. Tunable luminescence property and optical temperature sensing performance of Bi^{3+} and Sm^{3+} co-doped $\text{Ca}_2\text{YZr}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ phosphors[J]. Optical Materials, 2021,118:111232.
- [7] WANG Z Y, CHEN J, LI Q, et al. Multi-color luminescence and energy transfer behavior of $\text{Ba}_3\text{Lu}_4\text{O}_9:\text{Tb}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ phosphor for solid-state lighting[J]. Chem Phys Lett, 2021,771:138481.
- [8] OUERTANI G, FERHI M, HORCHANI-NAIFER K, et al. Effect of Sm^{3+} concentration and excitation wavelength on spectroscopic properties of $\text{GdPO}_4:\text{Sm}^{3+}$ phosphor[J]. J Alloys Compd, 2021,885:161178.
- [9] ZHANG X, CUI R R, ZHANG J, et al. Structural and photoluminescence properties of a novel $\text{Ba}_2\text{GdNbO}_6:\text{Sm}^{3+}$ phosphor[J]. Optik, 2021,245:167646.
- [10] CAO R P, WANG W H, REN Y, et al. Synthesis, energy transfer and tunable emission properties of $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{ZnW}_2\text{O}_{12}:\text{Sm}^{3+}$ phosphors[J]. J Lumin, 2021,235:118054.
- [11] HAN C, LI X P, DUAN Y Y Y, et al. Photoluminescence, optical transition properties and temperature-induced shift of charge transfer band and temperature sensing property of $\text{GdNbTiO}_6:\text{Sm}^{3+}$ phosphors[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2021,260:119951.
- [12] YUAN B, SONG Y H, KONG L, et al. The sensitized luminescence and tunable color of single-component $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Bi}^{3+}/\text{Sm}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ phosphor via energy transfer for white-light emitting diodes[J]. Physica B: Condensed Matter, 2018,550:75-89.

4 结论

本文利用 5 种模型对 YJ280 液力变矩器的内流场和外特性进行了 CFD 计算,并将其结果与台架试验结果进行了对比分析.结果表明:SBES、DES-IDDES 模型可捕捉到丰富的液力变矩器内流场涡结构的细节信息,而 LES-KET 模型捕捉到的涡结构相对最为完整.5 种模型对变距比和效率的预测精度均在 10% 以内.在不同速比工况下 SST $k-\omega$ 模型的预测精度在各模型中相对最佳.本文研究结果可为正确选择湍流模型预测液力变矩器的外特性和内流场的精度提供参考.

参考文献:

- [1] LIU C B, BU W Y, XU D, et al. Application of hybrid RANS/LES turbulence models in rotor-stator fluid machinery: a comparative study [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2017, 27(12): 2717-2743.
 - [2] LIU C B, BU W Y, WANG T J. Numerical investigation on effects of thermophysical properties on fluid flow in hydraulic retarder [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114: 1146-1158.
 - [3] BU W Y, SHEN G, QIU H F, et al. Investigation on the dynamic influence of thermophysical properties of transmission medium on the internal flow field for hydraulic retarder [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 1367-1376.
 - [4] LIU C B, LI J, BU W Y, et al. Large eddy simulation for improvement of performance estimation and turbulent flow analysis in a hydrodynamic torque converter [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2018, 12(1): 635-651.
 - [5] LIU C B, LI J, BU W Y, et al. Application of scale-resolving simulation to a hydraulic coupling, a hydraulic retarder, and a hydraulic torque converter [J]. Journal of Zhejiang University: Science A (Applied Physics & Engineering), 2018, 19(12): 904-925.
 - [6] LIU C B, SHENG C, YANG H L, et al. Design and optimization of bionic janus blade in hydraulic torque converter for drag reduction [J]. Journal of Bionics Engineering, 2018, 1: 160-172.
 - [7] 闫清东, 李晋, 魏巍. 工作油液温度对液力变矩器性能影响计算流体力学分析及试验研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 118-125.
 - [8] WU G Q, WANG L J. Application of dual-blade stator to low-speed ratio performance improvement of torque converters [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2016, 29(2): 293-300.
 - [9] 徐志轩. 液力变矩器内流场尺度解析求解方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- ~~~~~
- (上接第 313 页)
- [13] HU G Q, YI S P, FANG Z X, et al. Luminescence properties of high thermal stability $\text{Sr}_2\text{LaNbO}_6: x\text{Ln}^{3+}$ ($\text{Ln}^{3+} = \text{Eu}^{3+}/\text{Sm}^{3+}$) phosphors with double-perovskite structures [J]. Optical Materials, 2019, 98: 109428.
 - [14] PAVITRA E, RAJU G S R, GHOREISHIAN S M, et al. Novel orange-emitting $\text{Ba}_2\text{LaNbO}_6: \text{Eu}^{3+}$ nanophosphors for NUV-based WLEDs and photocatalytic water purification [J]. Ceram Int, 2019, 45: 4781-4789.
 - [15] GANGULI A K, GROVER V, THIRUMA M. New double perovskites having low dielectric loss: LaBaZnTaO_6 , LaSrZnNbO_6 , and $\text{Ba}_2\text{Zn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{TaO}_6$ [J]. Materials Research Bulletin, 2001, 36: 1967-1975.
 - [16] LIU M L, TIAN L H. Luminescence characteristics and energy transfer of $\text{CaSnO}_3: \text{Pr}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$ phosphors [J]. Optik, 2021, 242: 166866.
 - [17] RAN W G, WANG L L, LI H B, et al. Luminescence properties and energy transfer of $\text{CdWO}_4: \text{Sm}^{3+}, \text{Bi}^{3+}, \text{M}^{3+}$ ($\text{M} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) phosphors for white LEDs [J]. Ceram Int, 2015, 41: 4301-4307.
 - [18] NATARAJAN V, DHOBAL A R, LU C H. Preparation and characterization of tunable $\text{YVO}_4: \text{Bi}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ phosphors [J]. J Lumin, 2009, 129: 290-293.
 - [19] LI Q F, ZHANG S A, LIN W X, et al. A warm white emission of $\text{Bi}^{3+}-\text{Eu}^{3+}$ and $\text{Bi}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ codoping $\text{Lu}_2\text{Ge}_2\text{O}_7$ phosphors by energy transfer of Bi^{3+} -sensitized $\text{Eu}^{3+}/\text{Sm}^{3+}$ [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 228: 117755.
 - [20] CAO R P, XU H D, LUO W J, et al. Synthesis, energy transfer and luminescence properties of $\text{Ca}_2\text{MgWO}_6: \text{Sm}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$ phosphor [J]. Materials Research Bulletin, 2016, 81: 27-32.
 - [21] CHEN H, WANG Y H. Energy transfer and photo/cathodoluminescence performances investigation of a luminescent material $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ co-doped $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ for multifunctional applications [J]. J Alloys Compd, 2020, 847: 156530.