

用于红蓝光 LED 的 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}$, Mn^{2+} 荧光材料的热光衰性能

宋 俊¹ 陆启飞^{1,2} 孙 亮¹ 李 建¹ 王达健^{1,2}

(¹ 天津理工大学材料与科学学院材料物理研究所, 天津 300384
² 天津理工大学显示材料与光电子器件教育部重点实验室, 天津 300384)

摘要 研究了具有高发光量子效率的 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}$, Mn^{2+} 同步发射红蓝双光的荧光材料的光强随温度的变化关系。该荧光材料的同步红蓝光发射光谱由峰值为 430 nm 的 Eu^{2+} 的蓝光和 660 nm 的 Mn^{2+} 的红光两部分构成, 且与植物光合吸收光谱和光合有效光谱相匹配。在 293 K~473 K 温度范围内, 红蓝光均出现了热猝灭, 红光峰位随着温度的升高出现蓝移而蓝光的峰位保持不变, 反映了 Mn^{2+} 在基质中多格位占据和 Eu^{2+} - Mn^{2+} 之间的能量传递过程中电子与声子的相互作用本质。结果有助于加深对 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 荧光材料 Eu^{2+} - Mn^{2+} 间能量传递机制和热稳定性的理解, 对完善和发展生态照明荧光材料和器件具有参考价值。

关键词 材料; 热稳定性; 荧光材料; 发光二极管; 光合有效光谱

中图分类号 O472+.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1016002

Thermal Stability of a Dually Emitting- $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}$, Mn^{2+} Phosphor for Simultaneous Red and Blue Emission LEDs

Song Jun¹ Lu Qifei^{1,2} Sun Liang¹ Li Jian¹ Wang Dajian^{1,2}

(¹ Institute of Materials Physics, School of Materials Science and Engineering,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China
² Laboratory of Display Materials and Photoelectronic Devices, Ministry of Education,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract Dependence of light intensity on temperature is investigated for a dual emission $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}$, Mn^{2+} phosphor with a high quantum efficiency. The dual emission spectrum, which matches the photosynthetic absorption spectrum and photosynthetic effective spectrum, is composed of 660 nm-peaked red band and 430 nm-peaked blue band. Thermal quenching of both red and blue band emissions is observed from 293 K to 473 K. The peak position for red exists blue-shift with temperature increasing while that for blue remains unchanged. This phenomenon is most likely associated with a multi-lattice site occupation of Mn^{2+} and electron-phonon interaction in the host lattice involved in an energy transfer from Eu^{2+} to Mn^{2+} . The results provide further understanding of energy transfer between Eu^{2+} and Mn^{2+} and thermal quenching property of $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ and reference in the application of this phosphor and the fabricated bio-lighting devices.

Key words materials; thermal stability; phosphor; LED; photosynthetic active spectrum

OCIS codes 300.6280; 160.5690; 300.6470; 300.6550

1 引 言

用于白光照明和显示的发光二极管(LED)目前

采用荧光粉转换的技术方案, 其中光致发光荧光粉的发光强度和光谱位置会随着荧光粉或者器件的使

收稿日期: 2013-05-03; 收到修改稿日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(21076161, 50802062, 50872091)

作者简介: 宋 俊(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体稀土发光材料方面的研究。E-mail: 392890087@qq.com

导师简介: 王达健(1963—), 博士, 教授, 主要从事半导体稀土发光材料方面的研究。E-mail: djwang@tjut.edu.cn

(通信联系人)

用温度变化而变化^[1]。一般来说,随着温度的升高,发光强度会增加。但是,当温度达到某一特定值时,发光强度会下降,即发生热猝灭效应。对于不同的荧光材料,一些发光参数,例如:光谱分布,色坐标等会随着温度的升高而发生变化^[2-4]。尤其对于大功率 LED 器件,具有优良热稳定性的荧光材料和芯片要能够承受至少 373 K 的高温^[5-6]。发光材料的发光过程是辐射与非辐射之间的竞争过程,如果材料吸收的能量在辐射过程中没有发光而是以晶格热能量的形式耗尽,其发光强度会显著降低,与温度有关的热猝灭在本质上是由于发光材料在高温下导致非辐射过程的增加^[7-8]。对要研究的 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 荧光材料,此前本课题组成功地实现了具有 660 nm 特定波长的红光和 430 nm 的蓝光的同步发射,这种荧光材料很可能以较高的性价比优势在植物照明中得到应用^[9]。Kim 等^[10-14] 曾测量过可实现全谱白光发射的 $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 荧光材料的热猝灭效果,但是其报道的单相 $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 基质的观点不太恰当,此前已经证实 Kim 等^[15] 报道的 $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 中的 505 nm 绿光发射源于与主相 $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 共存的杂质相 Ba_2SiO_4 。对于具有同步红蓝双光发射的单相荧光体 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 的光热衰变效应,以前没有人考察过。本文用固相法制备了不含绿光相的样品,结合晶体结构,获得该荧光材料的发光热猝灭性能,对提高该荧光材料及其生物照明器件的性能有意义。

2 实 验

采用高温微波固相法制备含镁硅酸盐基质 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 荧光材料样品,采用本试验已经优化后的成分。制备所需的原料为: $\text{SrCO}_3, \text{BaCO}_3, \text{MnCO}_3, \text{MgO}, \text{SiO}_2$ 和 Eu_2O_3 , 化学纯度为 99.99%, 均采购自阿拉丁试剂公司。按照化学计量比称量药品,将称量好的反应物按体积比固体/无水乙醇体积比为 1:4 混合得到浆料,然后对此浆料超声分散 0.5 h,并在设定温度为 60 °C 的烘箱内烘干 3 h,然后将此混合物装入 Al_2O_3 坩埚中,再放入管式炉中,在 1300 °C~1400 °C 的高温,92% N_2 和 8% H_2 (体积分数)的还原气氛下灼烧 3 h,从而得到样品。荧光颗粒的 X 射线衍射(XRD)图像用日本理学公司 X 射线衍射仪(D/max-2500/pc, $\lambda_{\text{Cu-K}\alpha}=1.54062 \text{ nm}$)测量。样品的激发-发射光谱用荧光分光光度计(日立 F-4600, 日本)测量所得。

荧光粉热稳定性的测试使用的是 EX-1000 荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统,此系统可以测量荧光材料处于不同恒温条件(从室温至 200 °C)下,受不同波长(200~800 nm)的光辐射激发后产生的发射光的光谱功率分布,从而分析荧光材料较优的工作条件,控制和判定荧光粉的品质。热猝灭分析系统的主要原理是采用带可调狭缝的单色仪对全光谱光源(Xe 灯)进行分光,通过控制得到 200~800 nm 范围内带宽为 1~10 nm(可调)的单色激发光(辐射),激发光(辐射)以 20° 入射角照射在粉盘上,从而激发恒温条件下粉盘中的待测荧光材料样品使荧光材料受激发后发射具有一定光谱的光辐射,高精度快速光谱分析系统在粉盘的出射角为 20°(与入射角对称)方向上接受发射光辐射,并进行分析,从而得到待测荧光材料的发射相对亮度、光谱等光色参数。粉盘的温度从室温到 200 °C 可调,能全面、客观地分析荧光材料在实际工作条件下的工作状态,控制和判定荧光粉的品质。

3 结果与讨论

图 1 为成分优化后的 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 样品的典型 XRD 图样。可以观察到它与卡片粉末衍射文档(PDF) # 10-0075 中的衍射峰相吻合,表明制备的样品以 $\text{Sr}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 结晶成为晶体骨干,在给定制分中 Ba 部分取代 Sr 的格位从而形成了固溶体^[16]。值得一提的是并没有在主相 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 中发现易生成的杂质相 $(\text{Ba}, \text{Sr})_2\text{SiO}_4$, 该基质相正是高效绿光发射的根源,绿光是光合有效光谱不需要的,以前的研究对这个绿光相进行了专门研究^[15]。从 XRD 中还可以看到, $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 的固溶基质晶体结构与 $\text{Sr}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 一致, $\text{Sr}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 由若干层状结构组成,每层的结构都是由 MgO_6 八面体和 SiO_4 四面体共顶点交互形成,其中 Sr^{2+} 在晶胞结构中有三种格位,分别是位于层状结构中间的 12 配位的 Sr(I)格位和镶嵌于层状结构之中的 10 配位的 Sr(II)和 Sr(III)格位。当 Eu^{2+} 掺入 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 晶体结构中时,考虑到离子半径的大小, Eu^{2+} (0.135 nm, $n=10$)更倾向于取代 Sr^{2+} (0.136 nm, $n=10$)格位。

图 2 是 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 的光致发光激发谱(PLE)和光致发光谱(PL)图。 Eu^{2+} 的发射谱和 Mn^{2+} 的激发谱有较大的重叠,表明从 Eu^{2+} 到 Mn^{2+} 之间存在有效的共振能量传递^[9]。 Eu^{2+} 和 Mn^{2+} 的激发谱主要在 250~400 nm 之间,表明可以

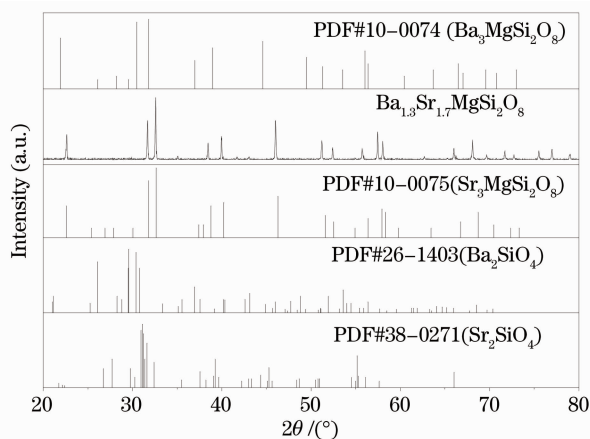


图 1 制备的 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 荧光粉的 XRD 图样与 PDF 卡片中 $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 和 $\text{Sr}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 的衍射图样

Fig. 1 XRD patterns of an as-prepared typical $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphor with those of $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ and $\text{Sr}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ from PDF cards

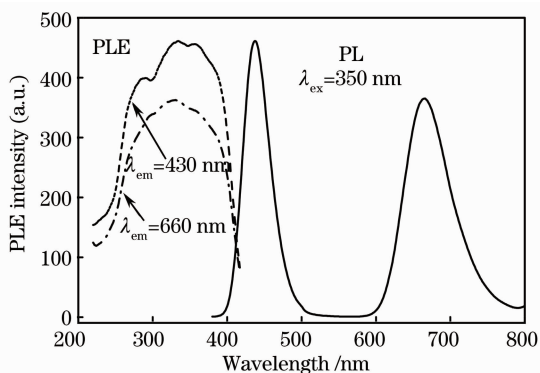


图 2 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 的 PL 和 PLE 图
Fig. 2 PL and PLE spectra of $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$

有效地吸收紫外光能量。 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 的发射光谱由同步发射的峰值为 430 nm 的蓝光和峰值为 660 nm 的红光两部分组成。不对称的 430 nm 蓝光的发射是由于主相中 Eu^{2+} 取代至少两个不同阳离子格位的 $4f^6 5d^1 \rightarrow 4f^7$ 电子转移引起的。这个蓝光波段能够通过高斯拟合成两个以 430 nm 和 446 nm 为中心的波段，它们的能量差值是 840 cm^{-1} 。 Mn^{2+} 的发射谱范围为 590~780 nm，半峰全宽为 71 nm。660 nm 的红光发射是因为 Mn^{2+} 中自旋禁带 ${}^4\text{T}_1(4\text{G}) \rightarrow {}^6\text{A}_1(6\text{S})$ 的跃迁造成的。

图 3 展示了 350 nm 波长激发下在 293 K~473 K 之间， $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 随温度变化的发射光谱图。可以看到，温度从 293 K 升高到 473 K，430 nm 峰位并无变化，而 660 nm 发射光峰位

发生了蓝移。对于 430 nm 的蓝光峰位，当 PL 值降到初始值一半时的温度 ($T_{0.5}$) 大致为 407 K，而红光峰位则高于 473 K。发光强度以及半峰全宽也都有明显变化。例如，当温度从 293 K 升高到 473 K，蓝光峰位的半峰全宽从 40.55 nm 展宽到 46.60 nm，而红光峰位的半峰全宽则从 71.02 nm 展宽到 80.78 nm。

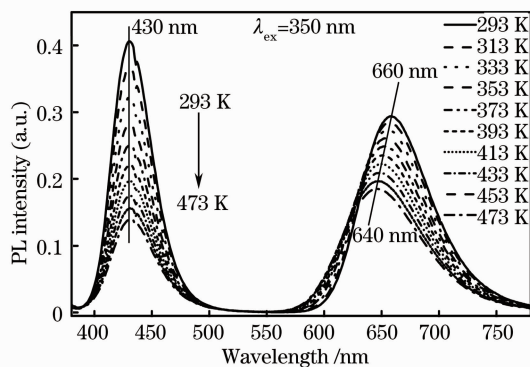


图 3 293 K~473 K 温度范围内 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 的发射光谱变化

Fig. 3 PL intensity variation of $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphor ranging from 293 K to 473 K

在 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 材料中，升高温度，红光的蓝移及半峰全宽的扩宽表明在主晶格中电子-光子相互作用对温度的依赖性^[16-17]。当温度较高时，电子-光子相互作用较强，导致发射光半峰全宽扩大。这种现象与现有的理论相吻合，即激发谱半峰全宽的温度依赖性 $W(T)$ 遵从^[18]

$$W(T) = W_0 \sqrt{\coth(\hbar\omega/2kT)}, \quad (1)$$

式中 W_0 表示 0 K 下的半峰全宽， $\hbar\omega$ 是影响电子转移的晶格震动能量， T 是开尔文温度。

随着温度的升高，蓝光的峰位并无移动，而红光的峰位则出现蓝移，这很可能是由于占据多格位的 Mn^{2+} 的热猝灭趋势不同以及从低能态能级到高能态能级的热辅助声子激发所致^[19-21]。 Mn^{2+} 主要占据 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ 晶格中的 Mg 格位，其次是 Ba 和 Sr 格位，660 nm 的红光发射曲线呈现一定的非对称性，温度的升高导致多发光中心的猝灭，同时， Mn^{2+} 中低能级的电子跃迁到高能级，而不会发生从激发态到基态的非辐射转移。当温度继续升高时，更多的电子占据高能级的激发态，激发态与基态的交点发生非辐射转移的概率仍然很低。从分析的结果看出，蓝移现象是伴随着温度的升高出现的^[22-23]。

图 4 揭示了温度从 293 K 升高至 473 K 过程中 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 荧光粉红光发射和蓝光发射积分面积的变化，可以看出，随着温度的升

高红光和蓝光积分面积值呈下降趋势。而且红光和蓝光强度呈现不同的衰减趋势,红光发射积分面积的衰减趋势明显比蓝的要缓慢。在 373 K 时,红光积分面积值衰减为初始值的 90.1%,蓝光衰减为 64.8%;473 K 时红光积分面积值衰减为初始值的 70.6%,蓝光衰减为 38.3%。图 5 揭示了计算所得的红光和蓝光发射的积分面积比例呈线性增长趋势。初始温度的比值为 1.27,373 K 时增加为 1.77,473 K 时增加为 2.35。

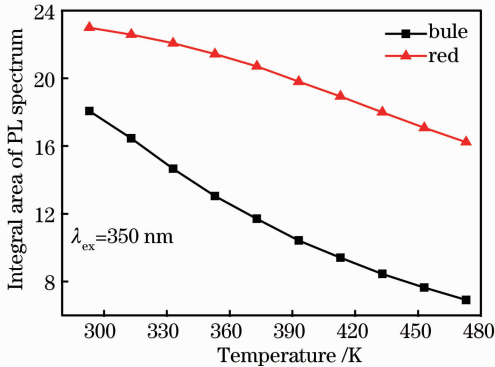


图 4 在 293 K~473 K 温度范围内, $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 红光和蓝光发射强度的积分面积的变化
Fig. 4 Integral area variation of PL for red and blue of $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphor ranging from 293 K to 473 K

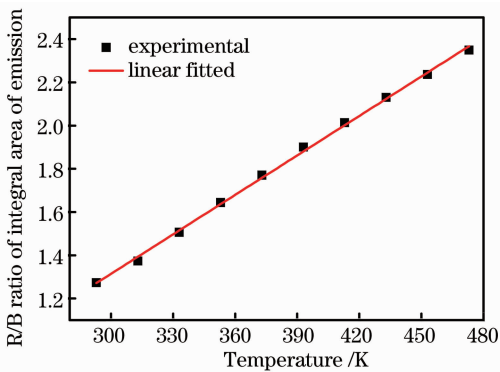


图 5 293 K~473 K 温度范围内, $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 红蓝发射光积分面积比值的变化
Fig. 5 Integral area ratio of the red to blue emission of $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphor ranging from 293 K to 473 K

4 结 论

在近紫外光激发下,实现了成分为 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 荧光材料的红蓝光同步发射,即峰值为 660 nm 的红光和 430 nm 的蓝光发

射;并消除了具有绿光发射的 $(\text{Ba}, \text{Sr})_2\text{SiO}_4$ 杂质相。红光和蓝光的发射强度都受到温度的影响,出现热猝灭现象;随着温度的升高,红光的峰位出现蓝移,而蓝光的峰位保持不变,指示了晶格中 Mn^{2+} 在 Mg 和 Ba、Sr 中可能的多点占据的红光猝灭,以及不同温度下电子-声子相互作用强度的变化关系。上述 $(\text{Ba}, \text{Sr})_3\text{MgSi}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 荧光粉的红蓝光同步发射随温度影响的关系为改善该含镁硅酸盐基质同步红蓝光荧光材料发光性质以及发展新型生物 LED 器件提供了参考。

参 考 文 献

- 1 P Dorenbos. Thermal quenching of Eu^{2+} 5d-4f luminescence in inorganic compounds [J]. *J Phys-Condens Mat*, 2005, 17(50): 8103-8111.
- 2 G Blasse. Thermal quenching of characteristic luminescence. II [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 1974, 9(2): 147-151.
- 3 G Blasse. Thermal quenching of characteristic fluorescence [J]. *J Chem Phys*, 1969, 51(8): 3529-3530.
- 4 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.
- 5 Qian Minhua, Lin Yandan, Sun Yaojie. Life prediction model for LEDs based on the hoto-electro-thermal-life theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0823001.
钱敏华,林燕丹,孙耀杰.基于光-电-热-寿命理论的LED寿命预测模型[J].*光学学报*, 2012, 32(8): 0823001.
- 6 Deng Hui, Lü Yijun, Gao Yulin, *et al.*. Thermal simulation of alternating current light emitting diodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0623001.
邓辉,吕毅军,高玉琳,等.交流发光二极管热特性的模拟分析[J].*光学学报*, 2012, 32(6): 0623001.
- 7 P Wang, J Song, H Tian, *et al.*. Thermal stability of luminous YAG:Ce bulk ceramic as a remote phosphor prepared through silica-stabilizing valence of activator in air [J]. *Optoelectron Lett*, 2012, 8(3): 201-204.
- 8 Li Cheng, Huo Yujing, He Shufang, *et al.*. Temperature induced spectral lines broadening and fluorescence quenching in Tm^{2+} :YAG crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(2): 243-248.
李成,霍玉晶,何淑芳,等. Tm^{2+} :YAG 晶体光谱的温度特性及荧光的温度淬灭[J].*光学学报*, 1999, 19(2): 243-248.
- 9 L Ma, D-J Wang, Z-Y Mao, *et al.*. Investigation of Eu-Mn energy transfer in $\text{A}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ ($\text{A} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$) for light-emitting diodes for plant cultivation [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(14): 144101.
- 10 J S Kim, P E Jeon, Y H Park, *et al.*. White-light generation through ultraviolet-emitting diode and white-emitting phosphor [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(17): 3696-3698.
- 11 J S Kim, P E Jeon, J C Choi, *et al.*. Warm-white-light emitting diode utilizing a single-phase full-color $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphor [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(15): 2931-2933.
- 12 J S Kim, J Y Kang, P E Jeon, *et al.*. GaN-based white-light-emitting diodes fabricated with a mixture of $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}$ and $\text{Sr}_2\text{SiO}_4 : \text{Eu}^{2+}$ phosphors [J]. *Japan J Appl Phys*, 2004, 43(3): 989-992.
- 13 J S Kim, Y H Park, J C Choi, *et al.*. Temperature-dependent

- emission spectrum of $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphor for white-light-emitting diode [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2005, 8(8): H65–H67.
- 14 J S Kim, A K Kwon, Y H Park, *et al.*. Luminescent and thermal properties of full-color emitting $\text{X}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ ($\text{X}=\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca}$) phosphors for white LED [J]. *Journal of Luminescence*, 2007, 122-123: 583–586.
- 15 L Ma, D J Wang, H M Zhang, *et al.*. The origin of 505 nm-peaked photoluminescence from $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphor for white-light-emitting diodes [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2008, 11(2): E1–E4.
- 16 W B Im, Y-I Kim, H S Yoo, *et al.*. Luminescent and structural properties of $(\text{Sr}_{1-x}, \text{Ba}_x)_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}$; effects of Ba content on the Eu^{2+} site preference for thermal stability [J]. *Inorganic Chemistry*, 2009, 48(2): 557–564.
- 17 Ding Wenge, Lu Yunxia, Sun Xue, *et al.*. Temperature-dependent photoluminescence of silicon-nanostructure thin film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0831002.
丁文革, 卢云霞, 孙 雪, 等. 纳米硅结构薄膜光致发光的温度依赖特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0831002.
- 18 B Henderson, G F Imbusch. *Optical Spectroscopy of Inorganic Solids* [M]. Oxford: Clarendon Press, 1989.
- 19 D Hsu, J L Skinner. On the thermal broadening of zero-phonon impurity lines in absorption and fluorescence-spectra [J]. *J Chem Phys*, 1984, 81(4): 1604–1613.
- 20 D Hsu, J L Skinner. Nonperturbative theory of temperature-dependent optical dephasing in crystals. 1. acoustic or optical phonons [J]. *J Chem Phys*, 1984, 81(12): 5471–5479.
- 21 D E McCumber, M D Sturge. Linewidth and temperature shift of R lines in ruby [J]. *J Appl Phys*, 1963, 34(6): 1682–1684.
- 22 J F Suyver, J J Kelly, A Meijerink. Temperature-induced line broadening, line narrowing and line shift in the luminescence of nanocrystalline $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ [J]. *Journal of Luminescence*, 2003, 104(3): 187–196.
- 23 Zhang Xisheng, Yan Chunyu, Yao Chenzhong, *et al.*. Temperature properties of fluorescence spectra in Tm^{3+} -doped LaOF and SiO_2 nano systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0316004.
张喜生, 晏春愉, 姚陈忠, 等. Tm^{3+} 掺杂的 LaOF 和 SiO_2 纳米体系中荧光光谱温度特性的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0316004.

栏目编辑：韩 峰