

文章编号: 0253-2239(2010)07-1926-05

Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ 掺杂铋碲酸盐玻璃上转换白光

于晓波¹ 王乃芹¹ 赵 昕¹ 陈宝杰^{1,2} 李长敏¹ 林 海^{1,2}

(¹ 大连工业大学化工与材料学院, 辽宁 大连 116034; ² 香港城市大学电子工程系, 香港 九龙)

摘要 制备了具有多彩上转换荧光 Tm³⁺/Yb³⁺, Ho³⁺/Yb³⁺ 和 Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ 掺杂铋碲酸盐玻璃, 并研究了 974 nm 激光激发下的上转换荧光光谱。在 Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ 三掺杂体系中, 由于 Tm³⁺ 的上转换蓝光发射属三光子过程, 蓝光发光强度随激发功率增加而增长的速率大于绿光和红光。计算了 Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ 三掺样品上转换荧光的色坐标, 定性阐述了荧光色坐标与激发功率的关系, 揭示出随着激发功率的增大, 色坐标在 1931-CIE 色品图中向左下方移动趋势。研究结果表明, 在 Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ 三掺铋碲酸盐玻璃中, 通过功率调谐可以调整样品的上转换蓝光、绿光和红光强度比例, 实现上转换白光发射, 证实了 Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ 三掺铋碲酸盐玻璃是一种高效上转换材料, 在多彩显示和白光照明领域具有潜在的应用前景。

关键词 光学材料; Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ 掺杂铋碲酸盐玻璃; 荧光光谱; 上转换发光; 色坐标

中图分类号 TQ171; O433; O432.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.1926

Upconversion White Lighting in Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ Doped Bismuth Tellurite Glasses

Yu Xiaobo¹ Wang Naiqin¹ Zhao Xin¹ Chen Baojie^{1,2} Li Changmin¹ Lin Hai^{1,2}

(¹ School of Chemical Engineering and Materials, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)
(² Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract Tm³⁺/Yb³⁺, Ho³⁺/Yb³⁺ and Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ doped bismuth tellurite glasses exhibiting multicolor upconversion fluorescences are fabricated, and the upconversion fluorescence spectrum is investigated under 974 nm laser excitation. Because the blue upconversion luminescence of Tm³⁺ is a three-photon process, the increasing rate of blue emission is higher than the green and red ones in the Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ triply doped bismuth tellurite glasses. The color coordinates of the sample are calculated, and the dependence of color coordinates on the pumping power is described. With the pumping power increasing, the color coordinate marks move along the down-left direction in 1931-CIE chromaticity diagram. The results indicate that the relative ratios of green, red and blue emission intensities can be tuned by adjusting pumping power, and white lighting could be realized in Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ triply doped bismuth tellurite glasses. It confirms that Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ doped bismuth tellurite glasses are effective upconversion materials and will be potentially employed in the application field of multicolor display and white light illumination.

Key words optical material; Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ doped bismuth tellurite glasses; fluorescence spectrum; upconversion luminescence; color coordinates

1 引 言

近年来, 多色光源在固态三维显示和背景照明

等方面展示出诱人的应用前景, 备受人们关注。稀土离子由于其能级结构的特殊性和复杂性, 一直是

收稿日期: 2009-09-01; 收到修改稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(60977014)和辽宁省教育厅高等学校科学研究基金(2009A087, 20060162)资助课题。

作者简介: 于晓波(1979—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电子材料与器件等方面的研究。E-mail: wjs@dlpu.edu.cn

导师简介: 林 海(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电子材料与器件等方面的研究。E-mail: lhais@dlpu.edu.cn

研究的热点和焦点^[1-12]。众所周知, Pr^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} 和 Tm^{3+} 等掺杂的上转换发光材料可产生色彩丰富的可见光, 而利用上转换机制将近红外光通过非线性多光子过程转换成各种颜色的可见光, 又是产生可见色彩光的有效方法之一^[13-17]。到目前为止, 相关红外激光激发下同时产生蓝、绿和红三基色的混合上转换白光材料的报道并不多见, 且相当一部分研究主要针对低声子能量非氧化物玻璃^[18,19]。相比较而言, 碲酸盐玻璃具有更高的化学稳定性和热稳定性, 能够适应在恶劣环境的使用, 研究的实用化意义明显^[20,21]。源于多光子吸收过程的差异性, 稀土离子共掺上转换荧光发射可随激发功率变化呈现色彩变换, 从而实现对色彩的调节, 因此深入了解激发功率对共掺上转换发光的影响是十分必要的。

本文研究了 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺以及 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋碲酸盐玻璃在 974 nm 激光激发下的上转换荧光特性, 对上转换荧光强度与激发功率的关系进行了讨论, 计算出 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺样品上转换荧光的色坐标, 并分析了荧光色坐标与激发功率的关系。

2 实 验

稀土掺杂铋碲酸盐玻璃制备所需原料为高纯 Li_2CO_3 , K_2CO_3 , BaCO_3 , Bi_2O_3 , TeO_2 , Tm_2O_3 , Ho_2O_3 和 Yb_2O_3 , 基质摩尔分数比为 $n(\text{Li}_2\text{O}) : n(\text{K}_2\text{O}) : n(\text{BaO}) : n(\text{Bi}_2\text{O}_3) : n(\text{TeO}_2) = 7.5\% : 7.5\% : 5\% : 5\% : 75\%$ (LKBBT 玻璃), 三种稀土掺杂方式, 如表 1 所示。按上述计量比准确称量药品装入铂金坩埚, 充分混匀后于 200 °C 烘干 2 h 以去除生料中潜含的微量水分, 取出放入已加热到 840 °C 的马弗炉中熔融 20 min, 倒在铝模具上, 然后在 290 °C 下退火 2 h, 之后随炉冷却到室温。将获得的玻璃样品粗磨后两面抛光以供测试用。

表 1 Tm_2O_3 , Ho_2O_3 和 Yb_2O_3 三种稀土掺杂量占基质质量的份数, (质量分数单位: %)

Table 1 Fraction of triply doped rare-earth Tm_2O_3 , Ho_2O_3 and Yb_2O_3 in substrate quality, (mass fraction units: %)

Method of rare-earth doped	$m(\text{Tm}_2\text{O}_3)$	$m(\text{Ho}_2\text{O}_3)$	$m(\text{Yb}_2\text{O}_3)$
1	0.4	0	1.6
2	0	0.4	1.6
3	0.4	0.2	1.6

上转换荧光光谱测试采用 Perkin-Elmer 公司 LS 55 型光谱仪, R928 光电倍增管作为探测器, 附

带多模输出尾纤的 974 nm 的激光二极管作为抽运源。所有测试均在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 和 $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺铋碲酸盐玻璃的上转换荧光光谱

$\text{Tm}^{3+}(\text{Ho}^{3+})$ 的吸收波长和 974 nm 抽运光源不匹配, 因此, 不能产生 $\text{Tm}^{3+}(\text{Ho}^{3+})$ 的多光子步进吸收上转换荧光, 而 Yb^{3+} 的 ${}^2\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{5/2}$ 吸收与 980 nm 接近的抽运激光的光子能量却符合的很好。掺入 Yb^{3+} 后, Yb^{3+} 有效吸收激发能量并传递给 $\text{Tm}^{3+}(\text{Ho}^{3+})$, 使样品发出明亮的上转换荧光。图 1 为 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LKBBT 玻璃在 778 mW 功率 974 nm 波长激光激发下的上转换荧光光谱, 477 nm 蓝光, 650 nm 红光和 804 nm 近红外光发射分别对应 Tm^{3+} 的 ${}^1\text{G}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$, ${}^1\text{G}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ 和 ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ 的能级跃迁。其中 804 nm 红外发射很强, 但对视觉没有贡献。两个可见发射相对比较, 477 nm 蓝光上转换发射谱线很强, 其峰值强度是红光的近 8 倍, 因此肉眼感觉到的荧光发射为蓝色。

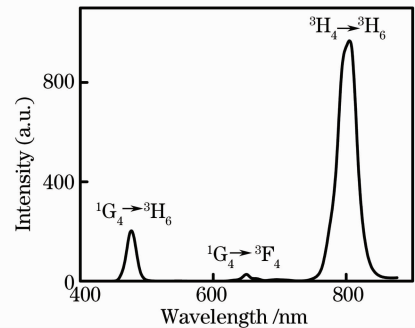


图 1 974 nm 激光激发下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺铋碲酸盐玻璃的上转换荧光光谱

Fig. 1 Upconversion fluorescence spectrum of $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped bismuth tellurite glasses under 974 nm laser excitation

在上转换发光过程中, 上转换荧光强度 I_u 随着激发功率 I_l 变化, 二者遵循如下关系:

$$I_u \propto I_l^m, \quad (1)$$

式中 m 为上转换发光过程需要的激发光光子数, 上转换荧光强度与激发功率之间是双对数线性关系, 其曲线斜率为 m 。图 2 给出了 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LKBBT 玻璃中蓝光、红光和近红外光的 3 条对数关系曲线, 在双对数坐标下它们的斜率值 (S) 分别为 2.905, 2.745 和 1.900, 表明 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LKBBT 玻璃中蓝光和红光发射为三光子过程, 近

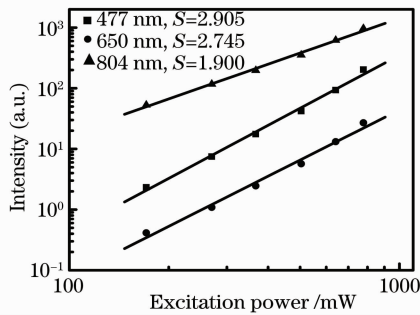


图 2 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺铋酸盐玻璃上转换荧光强度与 974 nm 激光激发功率的关系

Fig. 2 Dependence of the upconversion luminescence intensity of $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped bismuth tellurite glasses on 974 nm laser excitation power

红外光发射为双光子过程。

图 3 为 $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LKBBT 玻璃在 778 mW, 974 nm 激光激发下的上转换荧光光谱, 545 nm 绿光, 658 nm 红光和 754 nm 近红外光分别对应 $^5\text{F}_4, ^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{I}_8, ^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8$ 和 $^5\text{F}_4, ^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{I}_7$ 的能级跃迁。在 $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LKBBT 玻璃体系中, 754 nm 近红外发射很弱, 红色荧光与绿色荧光的峰值强度相当, 所以获得的上转换荧光为明亮的黄色。

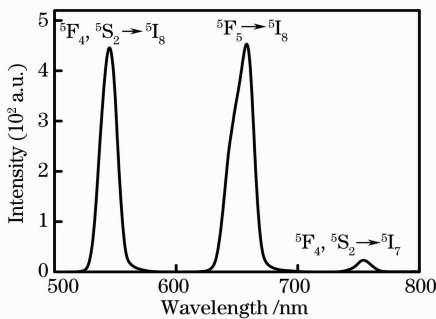


图 3 974 nm 激光激发下 $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺铋酸盐玻璃的上转换荧光光谱

Fig. 3 Upconversion fluorescence spectrum of $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped bismuth tellurite glasses under 974 nm laser excitation

$\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LKBBT 玻璃上转换谱线强度与激发功率之间的双对数关系如图 4 所示。在双对数坐标下, 绿光、红光和近红外光的强度-功率曲线斜率(S)分别为 2.036, 1.983 和 1.989, 接近于 2, 表明 $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LKBBT 玻璃的上转换荧光发射均为双光子过程。

3.2 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋酸盐玻璃的上转换荧光光谱

图 5 展示了在不同激发功率 974 nm 激光激发下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺 LKBBT 玻璃的上转换荧光

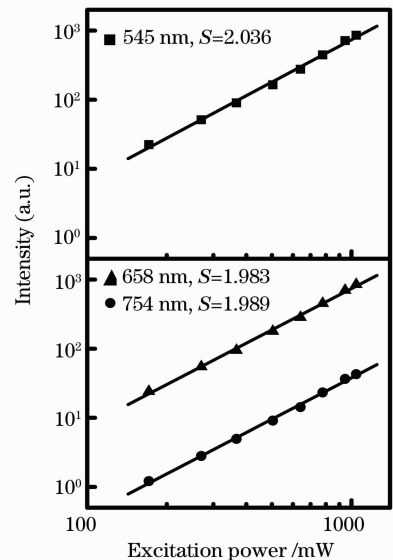


图 4 $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺铋酸盐玻璃上转换荧光强度与 974 nm 激光激发功率的关系

Fig. 4 Dependence of the upconversion luminescence intensity of $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped bismuth tellurite glasses on 974 nm laser excitation power

光谱, 由 477, 545, 657 和 804 nm (见图中插图部分) 发射峰组成, 通过前面的讨论可以知道, 477 nm 和 804 nm 发射对应 Tm^{3+} 的 $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 和 $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 能级跃迁, 545 nm 荧光峰对应 Ho^{3+} 的 $^5\text{F}_4, ^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{I}_8$ 能级跃迁, 而 657 nm 上转换红光是 Tm^{3+} 的 $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 和 Ho^{3+} 的 $^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8$ 能级跃迁的共同结果。

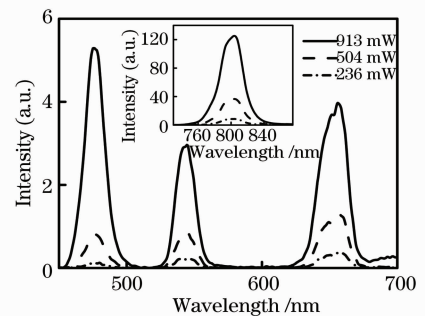


图 5 974 nm 激光激发下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋酸盐玻璃的上转换荧光光谱

Fig. 5 Upconversion fluorescence spectrum of $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ triply doped bismuth tellurite glasses under 974 nm laser excitation

在 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LKBBT 玻璃中, 由于 477 nm 蓝光发射为三光子过程, 随着激发功率的提高, 蓝光强度的增长速率大于绿光和红光。在 236 mW 和 504 mW 激发功率下, 蓝光上转换发射较绿光与红光弱, 其中红光荧光强度最强, 但肉眼对绿光最敏感, 因此感觉到的发光是黄白光。当激发

功率增加到 913 mW 时,477 nm 蓝光发射明显增强,其峰值强度大于绿光和红光,可以观察到玻璃样品发出相对纯正的白光。因此在 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LKBBT 玻璃中,通过调节激发功率,可以优化 974 nm 激光激发下的蓝光、绿光和红光的比例,从而输出组合白光。

3.3 不同功率激发下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋碲酸盐玻璃上转换荧光的色坐标和色温

色坐标是描述光源或发光体特性的基本参数。实验中,为得到相对准确的色坐标,采用参考卤素灯,对测得的荧光光谱进行了校正,获得相对光谱功率分布,根据 CIE-1931 标准公式^[22,23],计算了不同激发功率下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋碲酸盐玻璃上转换荧光的色坐标和色温。在 XYZ 表色系统中,色坐标 x, y, z 与三刺激值关系为

$$\begin{aligned} x &= X/(X+Y+Z), & y &= Y/(X+Y+Z), \\ z &= Z/(X+Y+Z), \end{aligned} \quad (2)$$

对于一个固定功率激发下光谱分布已知为 $P(\lambda)d\lambda$ 的光源来说,其三刺激值可表示为

$$\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} P(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda, & Y &= \int_{380}^{780} P(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda, \\ Z &= \int_{380}^{780} P(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 为光谱三刺激值。色温(C_T)与色坐标的关系可表示为

$$C_T = -437n^3 + 3601n^2 - 6861n + 5514.31, \quad (4)$$

式中 $n = (x - x_e)/(y - y_e), x_e = 0.3320, y_e = 0.1858$ 。表 2 为不同激发功率下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋碲酸盐玻璃上转换荧光色坐标和色温。随着激发功率的增大,荧光色坐标 x, y 值呈现出明显的减小趋势,色温表现为逐渐增大,表明激发功率的改变可以有效地调节样品的上转换荧光颜色。

表 2 不同激发功率下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋碲酸盐玻璃上转换荧光色坐标和色温

Table 2 Upconversion luminescence color coordinates and correlated color temperature (C_T) of $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ triply doped bismuth tellurite glasses under different excitation powers

Pump power /mW	x	y	C_T/K
236	0.424	0.419	3341
367	0.396	0.401	3781
504	0.385	0.389	3962
641	0.361	0.370	4522
778	0.340	0.351	5190
913	0.321	0.333	6047

不同激发功率下,上转换荧光的色坐标在 1931-CIE 色品图中的分布如图 6 所示。当激光激发功率为 236 mW 时,计算出上转换荧光色坐标 $x=0.424, y=0.419$,位于 CIE-1931 色品图白光区域的内。随着激发功率增大,上转换荧光色坐标向左下方移动,且当激光激发功率为 913 mW 时,色坐标为 $x=0.321, y=0.333$,与标准的等能白光坐标 $x=0.333, y=0.333$ 非常接近。实验结果表明,通过功率调谐,可以调整 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋碲酸盐玻璃的上转换蓝光、绿光和红光的强度比例,从而实现纯白色上转换荧光发射。

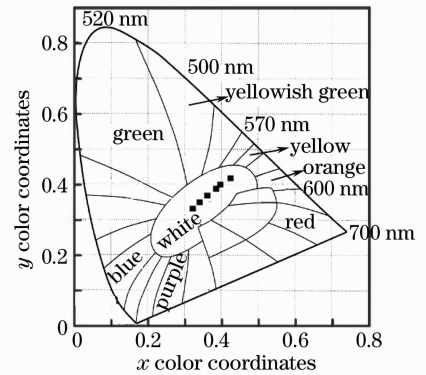


图 6 不同功率 974 nm 激光激发下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋碲酸盐玻璃上转换荧光色坐标在 1931-CIE 色品图中的分布

Fig. 6 Distribution of upconversion luminescence color coordinates of $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ triply doped bismuth tellurite glasses under 974 nm laser excitation with different powers in 1931-CIE chromaticity diagram

4 结 论

研究了 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 和 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋碲酸盐玻璃在 974 nm 激光激发下的上转换荧光光谱性质,讨论了上转换荧光强度与激发功率的关系,计算出 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺样品上转换荧光的色坐标,并对荧光色坐标与激发功率的关系进行了分析。由于 477 nm 蓝光发射为三光子过程,在 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺样品中,随着激发功率的提高,蓝光强度的增长速率大于绿光和红光。随着激发功率的增大,荧光色坐标在 1931-CIE 色品图中沿左下方移动,实验可以观察到玻璃样品发出明亮的白光。研究表明,在 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 三掺铋碲酸盐玻璃中,通过功率调谐可以调整样品的上转换蓝光、绿光和红光强度比例,可实现纯正上转换白光发射。

参 考 文 献

- Lin Qiongfeng, Xia Haiping, Wang Jinhao *et al.*. Spectral properties of Tm^{3+} -doped $SiO_2-Al_2O_3-PbF_2-AlF_3$ glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 305~310
林琼斐, 夏海平, 王金浩等. Tm^{3+} 掺杂 $SiO_2-Al_2O_3-PbF_2-AlF_3$ 玻璃的光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 305~310
- Meng Qingyu, Chen Baojiu, Xu Wu *et al.*. Study on concentration quenching and energy transfer in Ln^{3+} ($Ln = Tb, Tm, Eu$) in Y_2O_3 nanocrystal powders [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(1): 151~155
孟庆裕, 陈宝玖, 许武等. Y_2O_3 纳米晶体中 Ln^{3+} ($Ln = Tb, Tm, Eu$) 发光浓度猝灭及能量传递的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(1): 151~155
- Wei Xinjiao, Yang Zhongmin, Liu Yuehui *et al.*. Acid resistance and luminescence properties of Sm^{3+} in borosilicate glasses [J]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2007, **35**(10): 1406~1409
魏新皎, 杨中民, 刘粤惠等. 钐离子掺杂硼硅酸盐玻璃的耐酸性及发光性质[J]. *硅酸盐学报*, 2007, **35**(10): 1406~1409
- Yang Gangfeng, Li Tao. Broadband 1.53 μm emission in Er^{3+} -doped Ga-Bi-Pb-Ge heavy metal oxide glasses [J]. *J. Rare Earths*, 2008, **26**(5): 924~927
- Gan Zongsong, Yu Hua, Li Yanming *et al.*. Investigation on up-conversion luminescence of Tm^{3+} and Yb^{3+} codoped oxy-fluoro silicate glass ceramics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5699~5704
甘棕松, 余华, 李妍明等. Tm^{3+}/Yb^{3+} 共掺杂氟氧硅酸盐玻璃陶瓷蓝色上转换发光研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(9): 5699~5704
- Wang Xueying, Li Changmin, Yu Xiaobo *et al.*. Accurate measurement of quantum yields for visible emission transitions of Sm^{3+} [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 311~315
王雪影, 李长敏, 于晓波等. 稀土钐离子可见荧光量子产率的精确测试与计算[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 311~315
- Chen Xiaobo, Wang Yafei, Naruhito Sawanobori *et al.*. The upconversion luminescence of $Tm(0.35)Yb(5):FOV$ nanophase oxyfluoride vitroceraamics [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(8): 1730~1733
陈晓波, 王亚非, Naruhito Sawanobori等. 纳米相氟氧化物玻璃陶瓷 $Tm(0.35)Yb(5):FOV$ 的上转换发光[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(8): 1730~1733
- Daqin Chen, Yuansheng Wang, Kelu Zheng *et al.*. Bright upconversion white light emission in transparent glass ceramic embedding $Tm^{3+}/Er^{3+}/Yb^{3+}:\beta-YF_3$ nanocrystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(25): 251903
- Liao Meisong, Fang Yongzheng, Sun Hongtao *et al.*. Structure, thermal properties and spectral properties of Tm^{3+} -doped fluorophosphate glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 713~719
廖梅松, 房永征, 孙洪涛等. 掺铥氟磷酸玻璃的结构、热学性质和光谱性质[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 713~719
- Bei Jiafang, Qian Gujie, Liang Xiaoluan *et al.*. Luminescent properties of cerousion-doped germanate glasses [J]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2006, **34**(7): 827~841
贝家芳, 钱顾杰, 梁晓峦等. 三价铈离子掺杂锗酸盐玻璃的发光性能[J]. *硅酸盐学报*, 2006, **34**(7): 827~841
- Dong Qinglei, Zhang Liyan, Hu Lili. Crystalization stability and spectral properties of Yb^{3+} -doped alkaline metal modified fluorophosphates glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2383~2387
董擎雷, 张丽艳, 胡丽丽. 碱金属氟化物对掺 Yb^{3+} 氟磷酸盐玻璃析晶稳定和光谱性质的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2383~2387
- Zhao Suling, Hou Yanbing, Xu Zheng. Emission of $YLiF_4:Er^{3+}, Tm^{3+}, Yb^{3+}$ excited with different wavelength [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2006, **27**(2): 191~195
赵謨玲, 侯延冰, 徐征. 不同波长激发下 $YLiF_4:Er^{3+}, Tm^{3+}, Yb^{3+}$ 的发光[J]. *发光学报*, 2006, **27**(2): 191~195
- Cao Chunyan, Qin Weiping, Zhang Jisen *et al.*. Upconversion emission properties of $Tm^{3+}/Er^{3+}/Yb^{3+}$ tri-doped YF_3 powders depending on excitation power, annealed temperature and Tm^{3+} concentration [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2007, **28**(5): 705~709
曹春燕, 秦伟平, 张继森等. 激发功率、退火温度及 Tm^{3+} 浓度对 $Tm^{3+}/Er^{3+}/Yb^{3+}$ 三掺 YF_3 粉末上转换发光性质的影响[J]. *发光学报*, 2007, **28**(5): 705~709
- Ding Qinlei, Liu Zhengwei, Xia Yanqin *et al.*. Studies on the properties of frequency upconversion of Yb^{3+}/Er^{3+} codoped absolute oxides [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(4): 610~613
丁庆磊, 刘政威, 夏艳琴等. Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺杂纯氧化物材料上转换发光特性的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(4): 610~613
- Zhu Yumei, Zhu Jiqian, Bai Chaoying *et al.*. Upconversion luminescence of Ho^{3+} doped fluoride glasses [J]. *J. Materials Science & Engineering*, 2007, **25**(2): 245~248
朱玉梅, 朱基千, 白朝颖等. Ho^{3+} 掺杂浓度对氟化镱玻璃上转换发光性质的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2007, **25**(2): 245~248
- Cheng Lihong, Cao Wanghe, Xia Tian. Up-conversion luminescence of fluoro-oxide glass co-doped with Er^{3+} and Yb^{3+} under 980 nm excitation [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2004, **25**(4): 355~358
程丽红, 曹望和, 夏天. 980 nm 激光激发下 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 共掺杂氟氧玻璃的上转换发光 [J]. *发光学报*, 2004, **25**(4): 355~358
- Xu Shiqing, Jin Shangzhong, Zhao Shilong *et al.*. Upconversion luminescence of Tm^{3+}/Yb^{3+} -codoped oxyhalide tellurite glasses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2714~2718
徐时清, 金尚忠, 赵士龙等. Tm^{3+}/Yb^{3+} 共掺杂卤磷酸盐玻璃上转换发光研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2714~2718
- A. S. Gouveia-Neto, L. A. Bueno, R. F. do Nascimento *et al.*. White light generation by frequency upconversion in $Tm^{3+}/Ho^{3+}/Yb^{3+}$ -codoped fluorolead germanate glass [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(9): 091114
- N. K. Giri, D. K. Rai, S. B. Rai. Multicolor upconversion emission from $Tm^{3+} + Ho^{3+} + Yb^{3+}$ codoped tellurite glasson NIR excitations [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**: 437~441
- S. Berneschi, G. Nunzi Conti, I. Banyasz *et al.*. Ion beam irradiated channel waveguides in Er^{3+} -doped tellurite glass [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 121136
- Shixun Dai, Chunlei Yu, Gang Zhou *et al.*. Effect of OH^- content on emission properties in Er^{3+} -doped tellurite glasses [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2007, **354**(2008): 1357~1360
- C. S. McCamy. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates [J]. *Color Research & Application*, 1992, **17**(2): 142~144
- Zhang Hao, Xu Haisong. Comparative study of correlated color temperature algorithm for lighting sources [J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(1): 54~58
张浩, 徐海松. 光源相关色温算法的比较研究[J]. *光学仪器*, 2006, **28**(1): 54~58