

文章编号 2095-1531(2015)04-0608-07

Ho, Yb: Tb₃ Ga₅ O₁₂ 纳米粉体制备及发光性能研究

徐嘉林, 金维召, 刘旺, 彭海益, 刘贺, 李春, 林海, 刘景和, 曾繁明*
(长春理工大学光电功能材料教育部工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要:以Tb₄O₇和Ga₂O₃(化学计量比为3:5)、Ho₂O₃、Yb₂O₃为原料,其中Yb³⁺的掺杂浓度为8at.%,Ho³⁺的掺杂浓度分别为0.5at.%、1at.%、1.5at.%、2.0at.%,以碳酸氢铵为沉淀剂,在1200℃下烧结10h得到了Ho, Yb: Tb₃ Ga₅ O₁₂ (Ho, Yb: TGG)纳米粉体。对样品进行了XRD物相分析、热重-差热分析、红外光谱分析以及扫描电镜分析、上转换发射光谱分析。实验结果表明,温度为1200℃下样品平均晶粒尺寸为38.10nm。在泵浦源为980nm激发下, Ho³⁺掺杂浓度为1.5at.%, Yb³⁺掺杂浓度为8at.%时,在红、绿、蓝波段范围内出现了明显的上转换发光现象,并对其形成机理进行了讨论。分析认为, Ho³⁺由激发态⁵S₂, ⁵F₄向基态⁵I₈跃迁,实现了绿光输出,而Ho³⁺由激发态⁵F₅和⁵F₃向基态⁵I₈跃迁,分别实现了红光和蓝光输出。

关键词: Ho, Yb: TGG; 纳米粉体; 制备; 发光性能

中图分类号: 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20150804.0608

Preparation and luminescent properties of Ho, Yb: Tb₃ Ga₅ O₁₂ nano-powder

XU Jia-lin, JIN Wei-zhao, LIU Wang, PENG Hai-yi, LIU He, LI Chun,
LIN Hai, LIU Jing-he, ZENG Fan-ming*

(Engineering Research Center of Electric Functional Materials, Ministry of Education,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: zengfm@126.com

Abstract: With ammonium bicarbonate as the precipitating agent, using Tb₄O₇, Ga₂O₃, Ho₂O₃, Yb₂O₃ as raw materials (the stoichiometry of Tb₄O₇ and Ga₂O₃) is 3:5 and doping Yb³⁺ (8at.%) / Ho³⁺ (0.5at.%, 1at.%, 1.5at.%, 2.0at.% respectively), Ho, Yb: Tb₃ Ga₅ O₁₂ (Ho, Yb: TGG) nano-powder was sintered at 1200℃ for 10h to obtain a pure phase. The samples were characterized by XRD, TG-DTA, Infrared Spectroscopy (IRS), Scanning Electron Microscopy (SEM) and upconversion emission spectroscopy. The experimental results show that the average grain size of the samples is 38.10nm under the temperature of 1200℃. When the samples with Yb³⁺ (8at.%) / Ho³⁺ (1.5at.%) concentrations were used, there was a clear upconversion luminescence in the wavelength range of blue, green and red by 980nm LD. The formation mechanism was discussed at the same time. Analyse indicates that Ho³⁺ transits from excited states ⁵S₂ and ⁵F₄ to ground

收稿日期:2015-04-08; 修订日期:2015-05-15

基金项目: 吉林省创新创业训练计划资助项目 (No. 2014S017)

state 5I_8 , achieving the launch of green, and it transits from excited states 5F_5 and 5F_3 to ground state 5I_8 , achieving the launch of red and blue respectively.

Key words: Ho, Yb:TGG; nano-powder; preparation; luminescent properties

1 引言

近年来,蓝光、绿光、红光上转换材料在红外辐射探测、生物标记、彩色显示及全固态短波长激光器等方面具有广泛的应用^[1-4]。目前,由于氟化物具有声子能量低、上转换效率高、掺稀土离子浓度大等优点,掺稀土氟化物在上转换材料中占据着主导地位,但由于其化学稳定性及机械强度差,激光损伤阈值低,从而限制了其使用范围。而掺稀土氧化物具有稳定的化学性质和物理性质,且制备工艺简单,因而得到了广泛的关注^[5-6]。其中以Y₂O₃, Y₃Al₅O₁₂(YAG), ZnO及TiO₂等为基质的掺稀土氧化物上转换材料的报导较多^[6-8]。钽镓石榴石(Tb₃Ga₅O₁₂,简称TGG)是具有石榴石结构的氧化物,由于其具有四面体、八面体、十二面体的特殊结构特征,稀土离子进入晶格可取代位于12面体中心的c格位,可实现多种形式的掺杂。并且TGG声子能量(360 cm⁻¹)低于YAG的声子能量(780 cm⁻¹),减小了非辐射跃迁。因此, Ho, Yb:TGG的上转换效率有望高于Ho, Yb:YAG,并接近于氟化物的上转换效率^[9-12]。

Yb³⁺在980 nm处具有很强的吸收截面,通常被作为掺稀土离子上转换发光材料的敏化剂。而Ho³⁺由于其具有丰富的能级结构可以通过Yb³⁺的敏化作用实现高能级粒子数布居,从而实现蓝光、绿光、红光输出^[13]。2010年,姜丽霞等人利用溶胶-凝胶低温燃烧法制备了Ho, Yb:Gd₃Ga₅O₁₂(Ho, Yb:GGG)纳米粉体并对其发光机理进行了研究^[14]。但以Tb₃Ga₅O₁₂为基质,采用共沉淀法合成上转换纳米粉体却未见相关报道。本文利用共沉淀法合成Ho, Yb:TGG纳米粉体,并对其合成工艺及在980 nm泵浦光激发下的发光机理进行了研究。

2 实验

2.1 Ho, Yb:TGG 纳米粉体的制备

以Ho₂O₃(99.99%), Yb₂O₃(99.99%), Ga₂O₃(99.99%), Tb₄O₇(99.99%)为原料;化学试剂H₂O₂, HNO₃, 盐酸, 无水乙醇, 氨水, 碳酸氢铵为分析纯,其中,过氧化氢(H₂O₂)为还原剂,碳酸氢铵(NH₄HCO₃)为沉淀剂;Yb³⁺的掺杂浓度为8at.%, Ho³⁺的掺杂浓度分别为0.5at.%, 1at.%, 1.5at.%, 2.0at.%。按照精确的化学计量比称取适量原料,将其溶解于HNO₃溶液中充分搅拌至无色澄清,H₂O₂加入至Tb(NO₃)₃溶液中使溶液中的Tb⁴⁺全部转化为Tb³⁺,最终将溶液混合获得母盐溶液。利用NH₃·H₂O调节母盐溶液的pH值至3~4,并充分搅拌。按Tb₃Ga₅O₁₂中金属离子与NH₄HCO₃中阴离子比例为1:5~9称取NH₄HCO₃溶解于适量去离子水中,得到沉淀剂。利用反滴定法将母盐溶液滴定到NH₄HCO₃溶液中,最终得到白色絮状沉淀物。将白色沉淀物陈化24 h后进行抽滤,用去离子水和无水乙醇各冲洗3次,在恒温干燥箱中干燥,再放入马弗炉中在1000~1300℃之间煅烧10 h,最终得到Ho, Yb:Tb₃Ga₅O₁₂纳米粉体。

2.2 测试与表征

采用日本理学D/max-rA转靶经X射线粉末衍射(X-ray diffraction, XRD, CuK_α射线, λ = 0.15406 nm, 2θ角的扫描范围10°~80°,扫描步长为0.02,扫描速度为5°/min)分析样品粉体在不同的烧结温度下的物相组成;采用美国TA仪器公司SDT2960型同步热分析仪对样品进行热重分析(thermogravimetric-differential thermal analysis, TG-DTA);采用美国BIO-RAD公司FTS135型傅里叶变换红外光谱仪测量前驱体的红外光谱(fourier transform infrared spectrometer, FTIR);采用日本JEOL公司生产的JXA-840型

SEM分析(scanning electron microscope, SEM)煅烧后粉体表面形貌与微观结构;采用法国Jobin Yvon公司的稳态/瞬态荧光光谱仪(FLUOROLOG-3-TAU),利用980nm激光器测试纳米粉体的上转换发射光谱。

3 结果与讨论

3.1 XRD分析

图1是采用共沉淀法在不同温度下合成的Ho, Yb: Tb₃Ga₅O₁₂纳米粉体的XRD图谱。从图1中可以看出,所得的衍射峰数据与标准卡片(JCPDS 88-0575)的衍射峰数据一致,并无杂相存在,且 $2\theta = 28.90^\circ$ 、 32.40° 和 35.59° 处存在明显的衍射峰,分别对应着(400)、(420)和(422)晶面,即Ho, Yb: Tb₃Ga₅O₁₂的特征峰。在1000℃时基本形成了Ho, Yb: Tb₃Ga₅O₁₂相,但仍有较多杂峰出现,1100℃时杂峰减少,直到在1200℃获得了纯相的Ho, Yb: Tb₃Ga₅O₁₂纳米粉体。在烧结温度为1300℃下,粉体的XRD图谱与1200℃下粉体的XRD图谱并无明显变化。考虑到在高温下Ga₂O₃易于挥发,容易导致组分偏析不利于纳米粉体晶相的形成,因此确定烧结温度为1200℃。

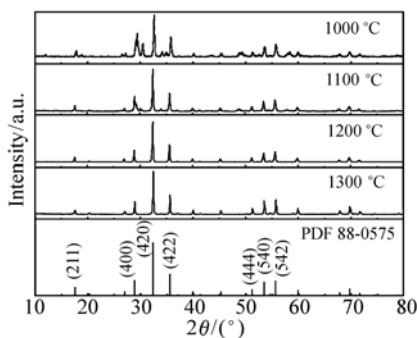


图1 不同温度下烧结的Ho, Yb: TGG纳米粉体及JCPDS标准XRD图谱的对照

Fig. 1 XRD patterns of Ho, Yb: TGG nano-powder at different sintering temperatures compared with JCPDS standard card

如图2,在Ho, Yb: TGG中, Ga原子有两种存在形式: Ga1占据(0,0,0)位置与6个O原子相连形成正八面体, Ga2占据(0.375, 0, 0.25)位置,其

中Ga2原子与4个O原子相连形成正四面体,而位于(0.027 10, 0.055 30, 0.650 8)位置的O原子又分别与Ga原子和M(M: Tb, Ho, Yb)原子相连,位于(0.125, 0, 0.25)位置的M原子又与8个O原子相连形成十二面体畸变立方体,所以掺铈的铽镓石榴石分子式为(Ho/Yb/Tb)₂₄Ga₄₀O₉₆,即1个晶胞中含有8个(Ho/Yb/Tb)₃Ga₅O₁₂分子,空间群为Ia-3d(230),仍属于立方晶系。

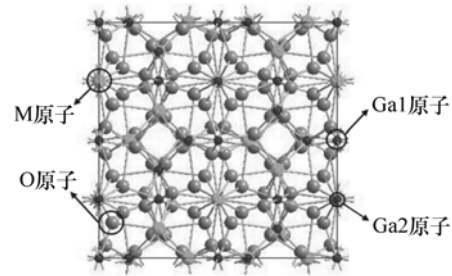


图2 Ho, Yb: TGG分子的球棍模型

Fig. 2 Ball-and-stick model of Ho, Yb: TGG

利用谢乐公式计算在不同温度下的晶粒尺寸:

$$D = K\lambda/\beta\cos\theta, \quad (1)$$

式中, D 为晶粒尺寸, K 是比例常数($K = 0.89$), λ 为X射线波长($\lambda = 0.151406$ nm), β 为衍射峰的半高宽FWHM, θ 为Ho, Yb: TGG最强特征峰的衍射角。不同温度下的晶粒尺寸如表1所示,从表中可以看出,晶粒在1000℃的平均尺寸为31.64 nm,在1100℃的平均尺寸为36.57 nm,在1200℃的平均尺寸为38.10 nm。

表1 Ho, Yb: TGG晶粒平均尺寸

Tab.1 Average grain size of the Ho, Yb: TGG

Temperature/°C	1 000	1 100	1 200
$2\theta/(\circ)$	32.645	32.446	32.397
$\beta/(\circ)$	0.257	0.267	0.205
Grain size/nm	31.64	36.57	38.10

3.2 TG-DTA分析

图3为以NH₄HCO₃作为沉淀剂所制备的前驱体在室温中加热到1450℃时的TG-DTA曲线。从图3中可以看出,失重可以分为2个部分,

在 360 °C 之前失重率为 25.4 % , 在 360 ~ 1 200 °C 之间失重率为 25.86 % , 在 1 200 °C 以后纳米粉体质量不在变化。结合 DTA 曲线, 可见在 243 °C 有一个明显的放热峰, 并且由 TG 曲线可知失重较为明显, 可推断出是由前驱体分解放热释放出 NH₃、CO₂ 和 H₂O 所致, 而在 800 ~ 1 000 °C 的放热峰是结晶水的脱水挥发以及碳酸铽分解所致。在 1 200 ~ 1 300 °C 之间的放热峰是由相变引起的, 而该相变导致了 Ho, Yb:TGG 晶相的生成。

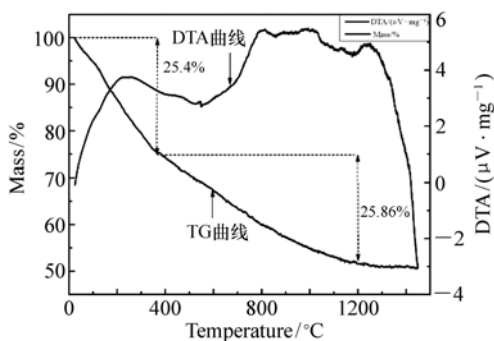


图3 Ho, Yb:TGG 前驱体的热重-差热曲线
Fig. 3 TG-DTA curves of Ho, Yb:TGG precursor

3.3 FTIR 分析

图4 中曲线 a 和 b 分别是共沉淀法所获得的 Ho, Yb:TGG 纳米粉体前驱体及在 1 200 °C 所得到试样的红外吸收光谱。从曲线 a 可以看到, 在 841、1 080 和 1 504 cm⁻¹ 处的吸收峰是由 CO₃²⁻ 的

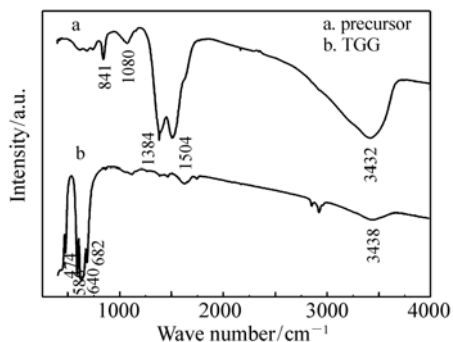


图4 Ho, Yb:TGG 前驱体及粉体的红外光谱图
Fig. 4 Infrared spectra of Ho, Yb:TGG precursor and powder

非对称伸缩振动和弯曲振动引起的。而在 1 384 cm⁻¹ 处的吸收峰是由残留的 NO₃⁻ 导致的, 在 3 432 cm⁻¹ 处的吸收峰对应着 H—O—H 的伸

展和振动。在曲线 b 中, 3 438 cm⁻¹ 处的吸收峰是由粉体中的吸附水所致, 而 586、640、682 cm⁻¹ 处的吸收峰是 O—M (M: Tb, Ho, Yb) 的非对称伸缩振动所致。由曲线 b 可以看出, 烧结后由 CO₃²⁻ 所产生的吸收峰基本完全消失, 与 XRD 图谱相结合, 说明此时已经形成了 Ho, Yb:TGG 相^[15-17]。

3.4 SEM 分析

图5 为 1 200 °C 下烧结的 Ho, Yb:TGG 纳米粉体的 SEM 照片, 可以看出, 在 1 200 °C 下的纳米粉体分散性较好, 颗粒之间的界面较为明显, 且 Ho, Yb:TGG 纳米粉体的粒径较为均匀, 与上述 XRD 结论相符。

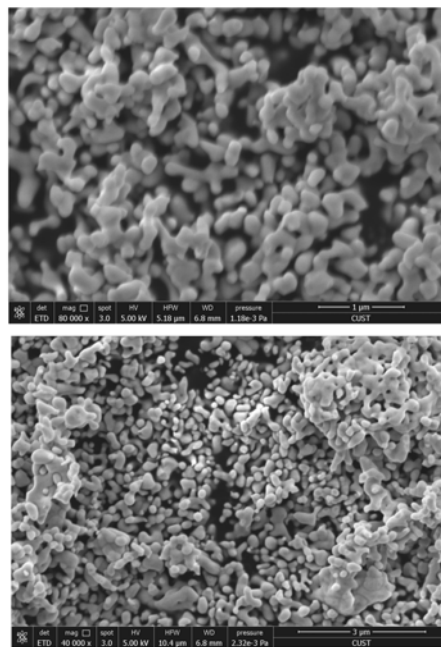


图5 1 200 °C 下烧结的 Ho, Yb:TGG 纳米粉体的 SEM 照片
Fig. 5 SEM photograph of Ho, Yb:TGG nano powder sintered at 1 200 °C

3.5 上转换发射光谱分析

图6 是在 980 nm 波长激发下 Ho, Yb:TGG 纳米粉体的上转换光谱。由图中可知, 在 Ho, Yb:TGG 样品中, 随着 Ho³⁺ 掺杂浓度的增大, 样品最强发射峰先减小后增大, Ho³⁺ 的掺杂浓度为 1.5 at% 时, 发光强度最大, 当 Ho³⁺ 的掺杂浓度为 2.0 at% 时, 发光强度明显减小, 这可能是掺杂离子浓度升高导致了浓度猝灭。在 530 ~ 570 nm 处有非常强的绿光发射峰, 其对应于⁵S₂, ⁵F₄ 激发态

到 5I_8 基态的跃迁,而在480~490 nm处的较明显的蓝光发射峰,其对应于 5F_3 激发态到 5I_8 基态的跃迁。在635~670 nm之间较弱的红光发射峰对应于 5F_5 激发态到 5I_8 基态的跃迁。其中绿光的发光强度是蓝光发光强度的4.88倍,是红光发光强度的27.6倍^[18]。因此,相对于Ho, Yb: GGG实现了绿光,红光及近红外波段的输出^[19], Ho, Yb: TGG实现了蓝光,绿光及红光的输出。

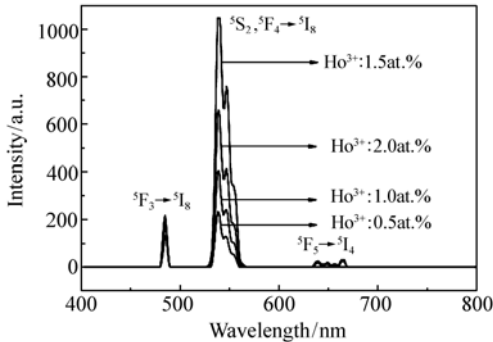


图6 在980 nm波长激发下的Ho, Yb: TGG纳米粉体的上转换发射光谱

Fig.6 Up-conversion emission spectra of Ho, Yb: TGG nano-powder under 980 nm excitation

由图7可知,红光上转换的路径有两条:一是位于基态 $^2F_{7/2}$ 能级吸收一个光子的能量从而跃迁至激发态 $^2F_{5/2}$,处于激发态的 Yb^{3+} 将能量传递给 Ho^{3+} 的 5I_7 能级,使其跃迁到激发态 5F_5 能级上,从 5F_5 能级向下跃迁至基态,从而实现红光输出。另一种是位于基态 $^2F_{7/2}$ 能级吸收一个光子的能量后跃迁至激发态 $^2F_{5/2}$,此时处于激发态的 Yb^{3+} 将能量传递给 Ho^{3+} 的 5I_6 能级,使之跃迁到激发态 5S_2 ,粒子经过无辐射弛豫向下跃迁至 5F_5 能级,最后回归基态并实现红光输出。而绿光上转换的过程为:基态 $^2F_{7/2}$ 能级上的粒子在吸收了980 nm泵浦源发射出的光子后,从基态跃迁至激发态 $^2F_{5/2}$,然后 Yb^{3+} 把能量传递给 Ho^{3+} ,使其激发到 5I_6 能级上,而 Ho^{3+} 在此能级上继续吸收 Yb^{3+} 的能量,从

而激发到能量更高的 5S_2 能级,最后向下跃迁至基态实现绿光的输出^[13]。实现蓝光上转换的过程为:基态的 $^2F_{7/2}$ 能级吸收了泵浦光子的能量跃迁至激发态 $^2F_{5/2}$,激发态的 Yb^{3+} 回归至基态将这部分能量传递给 Ho^{3+} ,使其从基态 5I_8 能级激发至 5I_5 能级,而该激发状态下的粒子继续吸收 Yb^{3+} 的能量,使其被激发到能量更高的 5F_3 能级上,最后向下跃迁至基态实现蓝光输出。

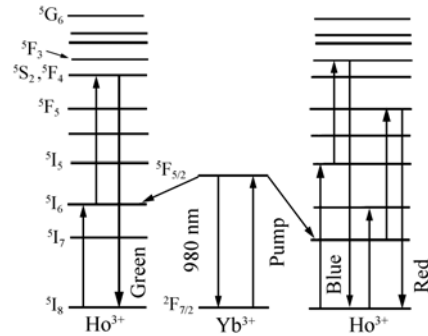


图7 Ho^{3+} , Yb^{3+} 离子能量传递示意图

Fig.7 Scheme of energy transfer between Ho^{3+} and Yb^{3+}

4 结论

以碳酸氢铵为沉淀剂,利用共沉淀法合成了Ho, Yb: TGG纳米粉体,前驱体在1 200 °C下烧结得到了晶粒的平均尺寸为38.10 nm的Ho, Yb: TGG纳米粉体,经过XRD物相分析、红外光谱分析及扫描电镜分析,证明1 200 °C下的TGG粉体已经完全形成Ho, Yb: TGG相,其纯度高,不含杂质化学键,粉体颗粒较细。在980 nm激发下,通过分析 Ho^{3+} 的上转换光谱,认为 Ho^{3+} 的 $^5F_5 \rightarrow ^5F_8$, ($^5S_2, ^5F_4$) $\rightarrow ^5I_8$, $^5F_3 \rightarrow ^5I_8$ 分别对应着红光,绿光,蓝光的上转换过程。在539 nm附近, Yb^{3+} 的掺杂浓度为8at.%, Ho^{3+} 的掺杂浓度为1.5 at.%时所获得的发光强度最高。

参考文献:

[1] 王伟. 稀土上转换发光材料的研究与应用[J]. 广州化工, 2014, 42(11): 32-35.

WANG W. Research and application of rare earth up-conversion luminescent materials[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(11): 32-35. (in Chinese)

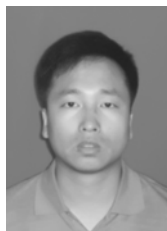
- [2] HE J L, ZHOU ZH G, ZHAN H, *et al.* Intense red fluorescence from Ho/Yb codoped tellurite glasses[J]. *J. Non-crystalline Solids*, 2014, 383:157-160.
- [3] 章健, 王士维, 安丽琼, 等. 980 nm LD 激发下 Yb³⁺, Er³⁺:Y₂O₃ 纳米晶粉体的上转换发光[J]. *发光学报*, 2005, 26(6):789-793.
ZHANG J, WANG SH W, AN L Q, *et al.* Up-conversion luminescence in Yb³⁺, Er³⁺:Y₂O₃ nano-crystalline powder excited by a 980 nm laser diode[J]. *Chin. J. Lumin*, 2005, 26(6):789-793. (in Chinese)
- [4] 郭艳艳, 吴杏华, 王殿元, 等. 980 nm LD 激发下稀土掺杂 Gd₂Ti₂O₇ 粉末上转换发光[J]. *中国稀土学报*, 2009, 27(6):735-738.
GUO Y Y, WU X H, WANG D Y, *et al.* Up-conversion emission in rare earth-doped Gd₂Ti₂O₇ excited by 980nm laser diode[J]. *J. Chinese Rare Earth Society*, 2009, 27(6):735-738. (in Chinese)
- [5] 徐东勇, 臧竞存. 上转换激光和上转换发光材料的研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2001, 30(2):209-209.
XU D Y, ZANG J C. Progress of study on up-conversion laser and luminescence materials[J]. *J. Synthetic Crystals*, 2001, 30(2):209-209. (in Chinese)
- [6] 李新跃, 邓建国, 刘东亮. 氧化物掺杂稀土的上转换材料研究进展[J]. *信阳师范学院学报*, 2011, 24(3):414-420.
LI X Y, DENG J G, LIU D L. Research progress of up-conversion materials of oxide matrix with doped rare earth[J]. *J. Xinyang Normal University*, 2011, 24(3):414-420. (in Chinese)
- [7] 杨林海, 宋宏伟, 于立新, 等. Y₂O₃:Ho/Yb 纳米晶的上转换发光性质[J]. *发光学报*, 2004, 25(6):710-714.
YAN L H, SONG H W, YU L X, *et al.* Up-conversion luminescence in nano-crystalline Y₂O₃ Ho/Yb[J]. *Chin. J. Lumin*, 2004, 25(6):710-714. (in Chinese)
- [8] 成诗恕, 程艳, 赵呈春, 等. Yb, Ho:YAG 晶体的生长及光谱性能[J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(2):332-360.
CHENG SH S, CHENG Y, ZHAN CH CH, *et al.* Growth and spectral properties of Ho, Yb:YAG crystal[J]. *J. Synthetic Crystals*, 2010, 39(2):332-360. (in Chinese)
- [9] KAMINSKII A A, EICHLER H J, REICHE P, *et al.* SRS risk potential in Faraday rotator Tb₃Ga₅O₁₂ crystals for high-peak power lasers[J]. *Laser Physics Letters*, 2005, 2(10):489-492.
- [10] 李锋锋, 张明熹, 沈毅, 等. 溶胶-凝胶法制备 YAG:Ho³⁺, Yb³⁺ 纳米晶[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2009, 37(4):1-6.
LI F F, ZHANG M X, SHEN Y, *et al.* Sol-Gel synthesis of YAG:Ho³⁺, Yb³⁺, nanocrystal[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2009, 37(4):1-6. (in Chinese)
- [11] 金晶, 夏海瑞, 孙尚倩, 等. Nd:YbVO₄ 晶体的拉曼光谱和荧光光谱研究[J]. *人工晶体学报*, 2008, 37(6):1330-1336.
JIN J, XIA H R, SUN SH Q, *et al.* Raman Spectroscopy and Fluorescent Spectra Investigation of Nd:YbVO₄ Crystal[J]. *J. Synthetic Crystals*, 2008, 37(6):1330-1336. (in Chinese)
- [12] YANG F ZH, YI G SH, CHEN D P, *et al.* Synthesis and up-conversion luminescence properties of nanocrystal Yb, Ho Co-doped sodium yttrium fluoride[J]. *Chemical J. Chinese Universities*, 2009, 25(9):1589-1592.
- [13] 李静, 王继杨, 苏静, 等. Ho³⁺, Yb³⁺:YAl₃(BO₃)₄ 晶体的光谱特性[J]. *光电子激光*, 2005, 16(9):1067-1070.
LI J, WANG J Y, SUN J, *et al.* Optical properties of Ho³⁺, Yb³⁺:YAl₃(BO₃)₄ crystal[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2005, 16(9):1067-1070. (in Chinese)
- [14] 姜丽霞, 孙晶, 于文生, 等. 溶胶凝胶低温燃烧法制备 Yb, Ho:Gd₃Ga₅O₁₂ 纳米粉体[J]. *硅酸盐通报*, 2010, 29(6):1329-1332.
JIANG L X, SUN J, YU W SH, *et al.* Preparation of Yb, Ho:Gd₃Ga₅O₁₂ nano-powdes by Sol-gel low temperature combustion method[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2010, 29(6):1329-1332. (in Chinese)
- [15] 孙海鹰, 张希艳, 王能利, 等. YAG 超细粉体的制备与表征[J]. *硅酸盐通报*, 2009, 28(1):200-203.
SUN H Y, ZHANG X Y, WANG N L, *et al.* Synthesis and characterization of YAG superfine powder[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 28(1):200-203. (in Chinese)
- [16] 李江, 潘裕柏, 张俊计, 等. 共沉淀法制备钇铝石榴石(YAG)纳米粉体[J]. *硅酸盐学报*, 2003, 31(5):490-493
LI J, PAN Y B, ZHANG J J, *et al.* Synthesizing Yttrium Aluminum Garnet(YAG) nano-powder by coprecipitation meth-

- od[J]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2003, 31(5):490-493. (in Chinese)
- [17] CHEN D Y, JORDAN E H, GELL M. Sol-gel combustion synthesis of nano-crystalline YAG powder from metal-organic precursors[J]. *J. American Ceramic Society*, 2008, 91(8):2759-2762.
- [18] QIU H L. Controlled Synthesis and up-conversion luminescence of lanthanide nanocrystals[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [19] KIRYANOV A V, ABOITES V, BELOVOLOV A M, *et al.*. Visible-to-near-IR luminescence at stepwise up-conversion in Yb, Ho: GGG under IR diode pumping[J]. *J. Luminescence*, 2003(102-103):715-721.

作者简介:



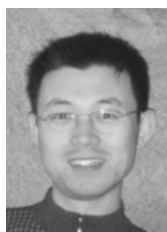
徐嘉林(1993—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要从事人工晶体及上转换发光材料方面的研究。E-mail:669832497@qq.com



李春(1982—),男,吉林松原人,博士后,讲师,主要从事上转换发光材料方面的研究。E-mail:lichun1210@126.com



金维召(1994—),男,吉林农安人,本科,主要从事人工晶体方面的研究。E-mail:2686539444@qq.com



林海(1979—),男,吉林长春人,博士,讲师,主要从事透明陶瓷方面的研究。E-mail:lihaihailin@126.com



刘旺(1993—),男,吉林德惠人,本科,主要从事人工晶体方面的研究。E-mail:361657854@qq.com



刘景和(1941—),男,吉林舒兰人,教授,博士生导师,主要从事人工晶体、透明陶瓷方面的研究。E-mail:liujinghe@126.com



彭海益(1994—),男,四川自贡人,本科,主要从事特种玻璃方面的研究。E-mail:532530335@qq.com



曾繁明(1976—),男,吉林长春人,博士后,教授,主要从事人工晶体方面的研究。E-mail:zengfm@126.com



刘贺(1991—),女,吉林德惠人,硕士研究生,主要从事人工晶体方面的研究。Email:15043068287@163.com