

文章编号:1674-9669(2024)05-0774-07 DOI:10.13264/j.cnki.yjskx.2024.05.018

引文格式:符彪, 颜昊坤, 李仁富, 等. 稀土掺杂铌酸钆白光上转换发光材料的构筑与发光机理[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(5): 774-780.

稀土掺杂铌酸钆白光上转换发光材料的构筑与发光机理

符彪, 颜昊坤, 李仁富, 冯刘振, 余依棋, 廖金生^{*}
(江西理工大学化学工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:采用水热法在温和的实验条件下制备了 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 上转换白光荧光粉。探究了煅烧温度对样品结构和发光性能的影响,并确定了 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉的较优煅烧温度。研究了不同稀土离子掺杂浓度对 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉发光性能的影响,并通过控制稀土离子掺杂浓度实现了对荧光粉发光颜色的调节。

关键词:水热法;稀土;上转换;铌酸钆;白光

中图分类号:TF111.12; TQ422 文献标志码:A

Synthesis and luminescence mechanism of rare earth doped gadolinium niobate for white light up-conversion luminescent materials

FU Biao, YAN Haokun, LI Renfu, FENG Liuzhen, YU Yiqi, LIAO Jinsheng^{*}

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ up-conversion white light phosphor was synthesized by hydrothermal method under mild experimental conditions. The effect of different calcination temperatures on the structure and luminescent properties of the samples was evaluated, confirming the optimal calcination temperature for $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ phosphor. The influence of doping concentrations of different rare earth ions on the luminescent performance of $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ phosphors was investigated, and the luminescent color adjustability of phosphors was achieved by controlling doping concentration.

Keywords: hydrothermal method; rare earth; up-conversion; GdNbO_4 ; white light

三价稀土离子(RE^{3+})具有丰富的激发态能级和窄的发射谱线,在生物成像、显示、传感、照明等诸多领域都具有应用前景^[1-5]。其中多色和白光发射的上转换发光(UCL)材料因其在安全防伪、信息储存、照明显示中的潜在应用而在UCL材料中备受关注^[6-9]。众所周知,在980 nm激光激发下, $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 掺杂的UCL材料可以获得蓝光发射,而 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 掺杂的UCL材料能够产生绿光和红光发射。因此,在近红外光激发下,通过在UCL基质中掺杂 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$,

可以同时获得蓝光、红光和绿光发射。进而可以通过控制 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 的掺杂浓度实现UCL白光发射^[10-12]。选择合适的基质对于实现UCL多色和白光发射UCL至关重要。到目前为止,已经报道了许多高效的UCL基质材料,如氟化物、氯化物、钼酸盐、钒酸盐等^[13-16]。铌酸盐具有优异的理化性质,在光电、铁电、光催化、锂电等领域都具有广泛的应用^[17-20],然而目前以铌酸盐作为基质的白光UCL材料报道的比较少,因此探索通过稀土离子掺杂铌酸盐制备白光

收稿日期:2023-11-07;修回日期:2023-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52362021);江西省自然科学重点基金资助项目(20224ACB204009)

通信作者:廖金生(1973—),博士,教授,主要从事稀土发光材料方向研究。E-mail: jsliao1209@126.com

UCL 材料具有重要意义。本文以 GdNbO_4 作为基质, 采用水热法制备了 $\text{GdNbO}_4: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 多发射荧光粉, 并对其光致发光性能和上转换机制做了初步研究与探讨。

1 实验部分

1.1 样品制备

1.1.1 柠檬酸铌的制备

首先在聚四氟乙烯烧杯中用适量的氢氟酸溶解 Nb_2O_5 , 在 120~140 °C 下磁力搅拌至 Nb_2O_5 完全溶解后自然冷却至室温。然后用浓氨水调节溶液的 pH 至 9, 得到白色絮状沉淀。将沉淀离心并用去离子水洗涤 3 次。最后在 80 °C 下将白色沉淀溶于柠檬酸溶液中, 得到柠檬酸铌溶液。

1.1.2 $\text{RE}(\text{NO}_3)_3$ 的制备

将按化学计量比的 Yb_2O_3 、 Er_2O_3 、 Tm_2O_3 和 Gd_2O_3 加入适量浓 HNO_3 与蒸馏水的混合溶液中, 在 120~140 °C 下搅拌直至溶液完全澄清透明, 便得到稀土硝酸盐的混合溶液。

1.1.3 $\text{GdNbO}_4: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 的制备

将上述溶液倒入聚四氟乙烯内衬中混合, 用磁力搅拌器搅拌 30 min。然后将 pH 调至 2.5 左右产生白色絮状沉淀, 继续搅拌 30 min。将聚四氟乙烯内衬放入反应釜中, 在 200 °C 烘箱中放置 12 h 并自然冷却至室温。将产物离心并用乙醇溶液(无水乙醇与去离子水的体积比为 1:1)洗涤 3 次后放入 80 °C 恒温鼓风干燥箱内烘干 16 h 得到土灰色固体, 随后用玛瑙研钵研磨成粉后装入刚玉坩埚中, 放入马弗炉中 1 000 °C 热处理 5 h, 最终得到 $\text{GdNbO}_4: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉。

1.2 样品表征

采用 Miniflex600 (Rigaku) X 射线衍射仪测定样品的晶体结构; 采用 JSM-6700F (JEOL) 扫描电子显微镜分析样品的形貌; 采用 F-4600 (Hitachi) 荧光光谱仪测试样品的发光性能; 采用 STA2 500 Regulus (NETZSCH) 测试样品的热重。

2 结果与讨论

2.1 热重分析

为了分析前驱体的反应过程, 对 $\text{GdNbO}_4: 20\% \text{Yb}^{3+}/1\% \text{Er}^{3+}/1\% \text{Tm}^{3+}$ 荧光粉样品前驱体进行了热重 (TG) 测试, 结果如图 1 所示。温度从室温升至 1 200 °C, 随着温度的升高, 样品不断

发生失重。失重过程可以分为 2 个阶段, 第 1 阶段是从室温到 850 °C, 前驱体的失重率为 44.5%, 这主要是归因于水分的蒸发、 HNO_3 与有机物的分解。第 2 阶段是 850~1 200 °C, 样品已无明显失重, 此阶段的前驱体已全部分解为相应的氧化物。

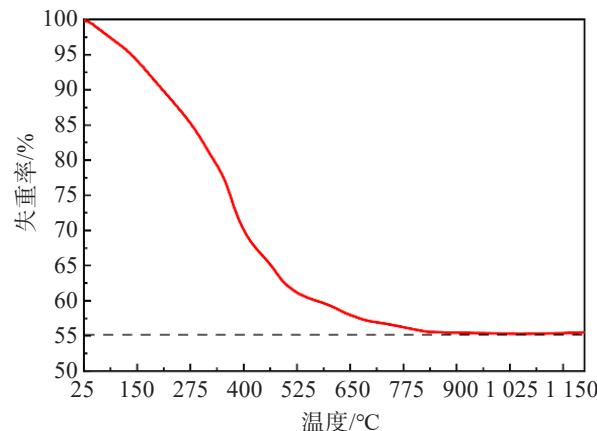


图 1 $\text{GdNbO}_4: 20\% \text{Yb}^{3+}/1\% \text{Er}^{3+}/1\% \text{Tm}^{3+}$ 荧光粉前驱体的热重曲线

Fig.1 Thermogravimetric curves of precursors for $\text{GdNbO}_4: 20\% \text{Yb}^{3+}/1\% \text{Er}^{3+}/1\% \text{Tm}^{3+}$ phosphor

2.2 $\text{GdNbO}_4: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉结构分析

图 2 所示为在不同温度下煅烧的 $\text{GdNbO}_4: 20\% \text{Yb}^{3+}/1\% \text{Er}^{3+}/1\% \text{Tm}^{3+}$ 荧光粉的 XRD 衍射图谱。由图 2 可知, 随着煅烧温度的升高, 物相纯度逐渐提高, 900 °C 以上煅烧产物的 XRD 衍射峰与 GdNbO_4 标准卡片 JCPDS 22-1104 完全吻合, 说明 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 成功引入了 GdNbO_4 的晶格中且没有产生杂相, 其晶系为单斜晶系。 $\text{GdNbO}_4: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉

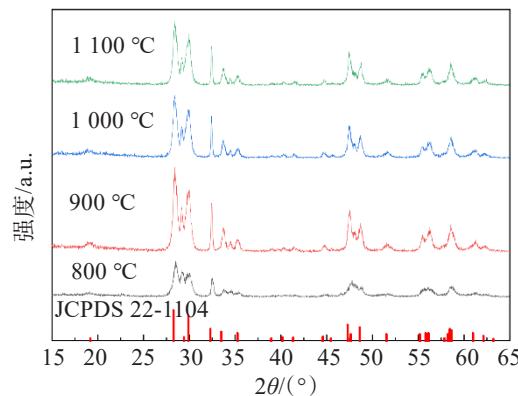


图 2 不同温度煅烧的 $\text{GdNbO}_4: 20\% \text{Yb}^{3+}/1\% \text{Er}^{3+}/1\% \text{Tm}^{3+}$ 荧光粉的 XRD 衍射图谱

Fig.2 XRD diffraction patterns of $\text{GdNbO}_4: 20\% \text{Yb}^{3+}/1\% \text{Er}^{3+}/1\% \text{Tm}^{3+}$ phosphors calcined at different temperatures

的XRD衍射峰的强度随煅烧温度的升高先增大后减小,当热处理温度为900 °C时,样品的衍射峰最强,说明此时样品的晶化程度最佳。

2.3 GdNbO₄:Yb³⁺/Er³⁺/Tm³⁺荧光粉形貌分析

图3(a)和图3(b)所示分别为GdNbO₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺/1%Tm³⁺荧光粉的扫描电镜图,可观察到由水热

法合成的样品形貌为不规则颗粒状,颗粒大小较为均匀,用电子尺测量得出该样品的平均尺寸约为4.3 μm。图3(c)所示为GdNbO₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺/1%Tm³⁺荧光粉的能谱,可以观察到Gd、Yb、Er、Tm、Nb、O共6种元素的特征峰。该结果证明Yb³⁺/Er³⁺/Tm³⁺成功掺入了GdNbO₄基质中。

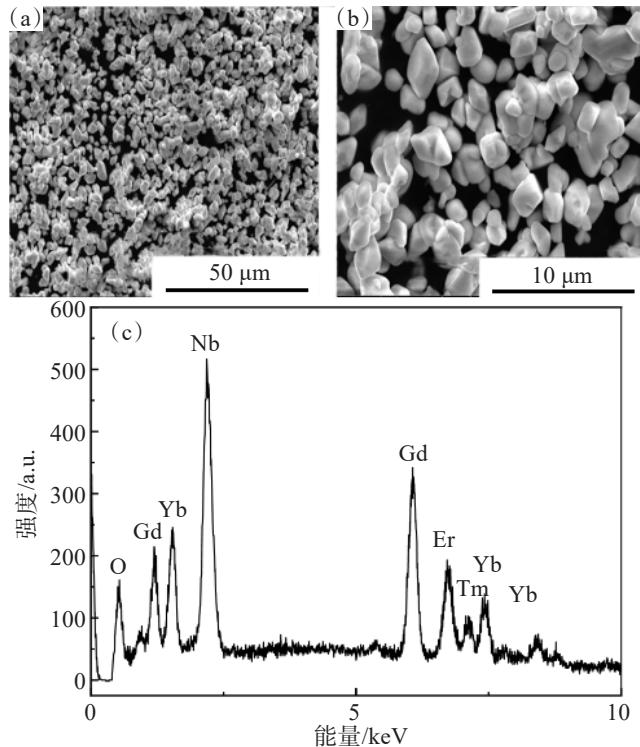


图3 GdNbO₄:20% Yb³⁺/1% Er³⁺/1% Tm³⁺荧光粉的扫描电镜图像(a)、(b)和X射线能谱(c)

Fig.3 SEM image (a), (b) and EDS pattern (c) of GdNbO₄:20% Yb³⁺/1% Er³⁺/1% Tm³⁺ phosphors

2.4 煅烧温度对发光性能的影响

图4所示为室温下GdNbO₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺/1%Tm³⁺荧光粉上转换发光强度与煅烧温度的关系。从光谱图中能明显观察到位于477 nm处的蓝光发射,554 nm的绿光发射和660 nm左右处的红光发射。蓝光发射归属于Tm³⁺的⁴G₁→³H₆跃迁,绿光发射和红光发射分别归属于Er³⁺的⁴S_{3/2}/²H_{11/2}→⁴I_{15/2}和⁴F_{9/2}→⁴I_{15/2}跃迁。样品的发光强度随着温度的升高先增强后减弱,在1 000 °C达到最大值。结合前面的XRD分析确定样品的较优煅烧温度为1 000 °C。

2.5 Tm³⁺的掺杂浓度对发光性能的影响

图5(a)展示了GdNbO₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺/xTm³⁺荧光粉上转换发光强度随Tm³⁺掺杂浓度的变化。从图5(a)中可以看出,当固定Yb³⁺和Er³⁺掺杂浓度分别为20% (摩尔百分数,下同) 和1%时,随着Tm³⁺掺杂浓度的增加,总体的发射强度会先增大后减小,在

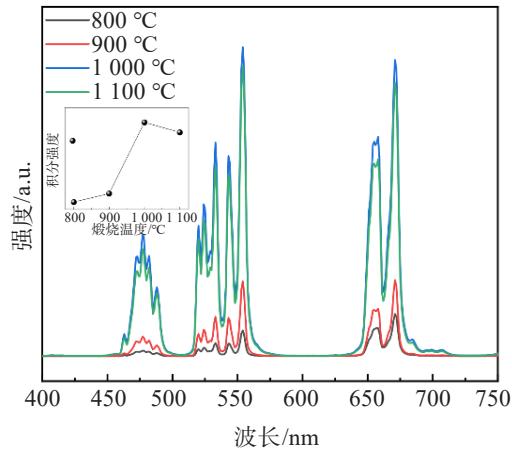


图4 不同温度煅烧的GdNbO₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺/1%Tm³⁺荧光粉上转换发射光谱

Fig.4 Up-conversion emission spectra of GdNbO₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺/1%Tm³⁺ phosphors calcined at different temperatures

0.5% 时达到最强。当浓度超过 0.5% 时发光强度急剧衰减, 这归因于掺杂浓度增加带来的浓度猝灭和交叉弛豫^[21], 因此确定 Tm³⁺较优掺杂浓度为 0.5%。图 5(b) 所示为不同 Tm³⁺ 掺杂浓度的 GdNbO₄: 20%Yb³⁺/1%Er³⁺/xTm³⁺ 荧光粉的 CIE 色坐

标图。随着 Tm³⁺ 掺杂浓度从 0.5% 增加到 4%, 稀土离子之间发生交叉弛豫的概率增加, 交叉弛豫对能量越高的发射的猝灭效果越明显, 因此对应的 CIE 色坐标从绿色区域先朝蓝色区域移动, 后又逐渐向红色区域移动。

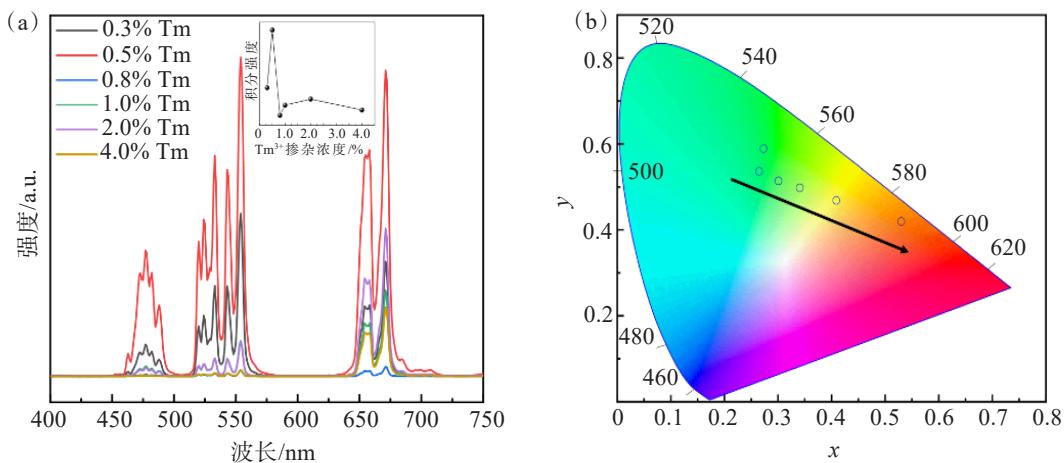


图 5 GdNbO₄: 20%Yb³⁺/1%Er³⁺/xTm³⁺ 荧光粉上转换发射光谱(a)及对应的色坐标(b)

Fig.5 Up-conversion emission spectra of GdNbO₄: 20% Yb³⁺/1% Er³⁺/xTm³⁺ phosphors (a) and corresponding chromaticity coordinates (b)

2.6 Er³⁺的掺杂浓度对发光性能的影响

图 6(a) 展示了 GdNbO₄: 20%Yb³⁺/xEr³⁺/0.5%Tm³⁺ 荧光粉上转换发光强度随 Er³⁺ 掺杂浓度的变化。当固定 Yb³⁺ 和 Tm³⁺ 的掺杂浓度分别为 20% 和 0.5%

时, 随着 Er³⁺ 掺杂浓度的增加, 荧光粉的发光强度先增加后减弱, 在 2% 时达到最大, 因此确定 Er³⁺ 较优掺杂浓度为 2%。对应的 CIE 色坐标如图 6(b) 所示。

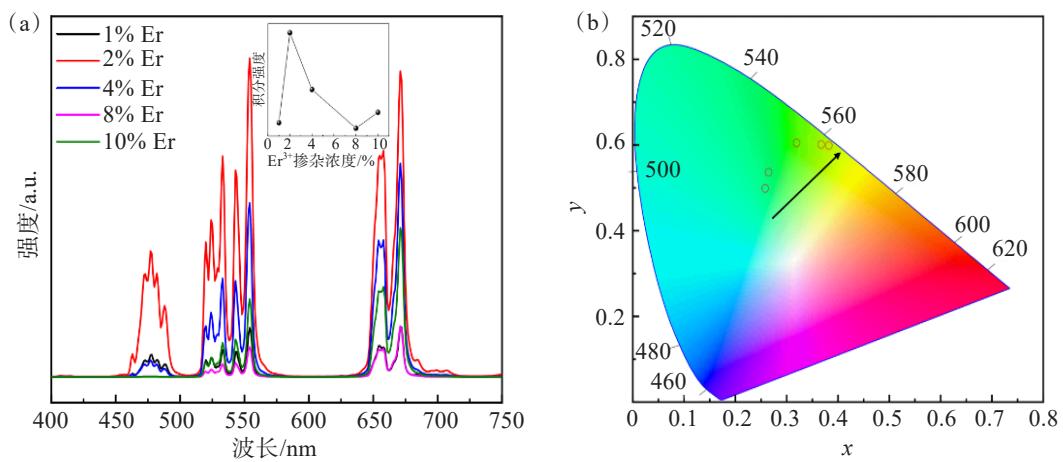


图 6 GdNbO₄: 20% Yb³⁺/x Er³⁺/0.5Tm³⁺ 荧光粉上转换发射光谱(a)及对应的色坐标(b)

Fig.6 Up-conversion emission spectra of GdNbO₄: 20%Yb³⁺/xEr³⁺/0.5Tm³⁺ phosphors (a) and corresponding chromaticity coordinates (b)

为了将红绿蓝三色光耦合成白光, 进一步对 Er³⁺ 的掺杂浓度进行了调整。红绿蓝三色光发射的积分强度随 Er³⁺ 掺杂浓度的变化以及对应的色坐标移动如图 7 所示。

从图 7(a) 可知当 Er³⁺ 掺杂浓度为 0.3% 时, 红绿蓝三色光发射的积分强度最接近, 对应的 CIE 色坐标如图 7(b) 中红星所标记, 此时荧光粉的发光颜色肉眼可见为白色。

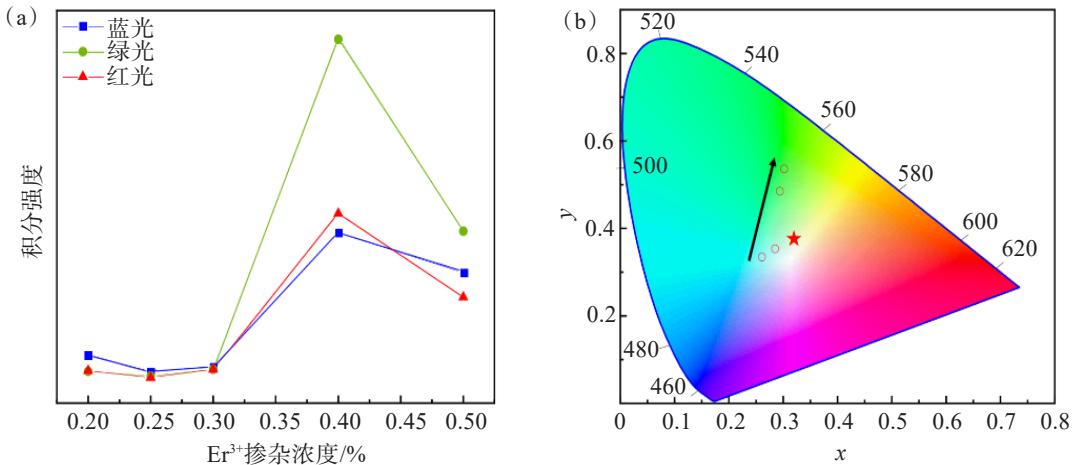


图7 $\text{GdNbO}_4:20\%\text{Yb}^{3+}/x\text{Er}^{3+}/0.5\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉上转换发射积分强度随 Er^{3+} 浓度的变化(a)及对应的色坐标(b)

Fig.7 Variation of integrated intensity of up-conversion emission of $\text{GdNbO}_4:20\%\text{Yb}^{3+}/x\text{Er}^{3+}/0.5\text{Tm}^{3+}$ phosphors with Er^{3+} concentration (a) and corresponding chromaticity coordinates (b)

2.7 Yb³⁺的掺杂浓度对发光性能的影响

图8(a)展示了 $\text{GdNbO}_4:x\text{Yb}^{3+}/2\%\text{Er}^{3+}/0.5\%\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉上转换发光强度随Yb³⁺掺杂浓度的变化。如图8(a)所示,当固定Er³⁺掺杂浓度为2%,Tm³⁺浓度为0.5%时,随着Yb³⁺掺杂浓度的增加,荧光粉的发射强度先

增强后减弱,较优掺杂浓度为20%。对应的CIE色坐标如图8(b)所示,随着Yb³⁺掺杂浓度从10%增加到25%,发光颜色逐渐蓝移,这是因为Yb³⁺掺杂浓度的增加对能量更高的上转换发射增益效果相对更加明显。

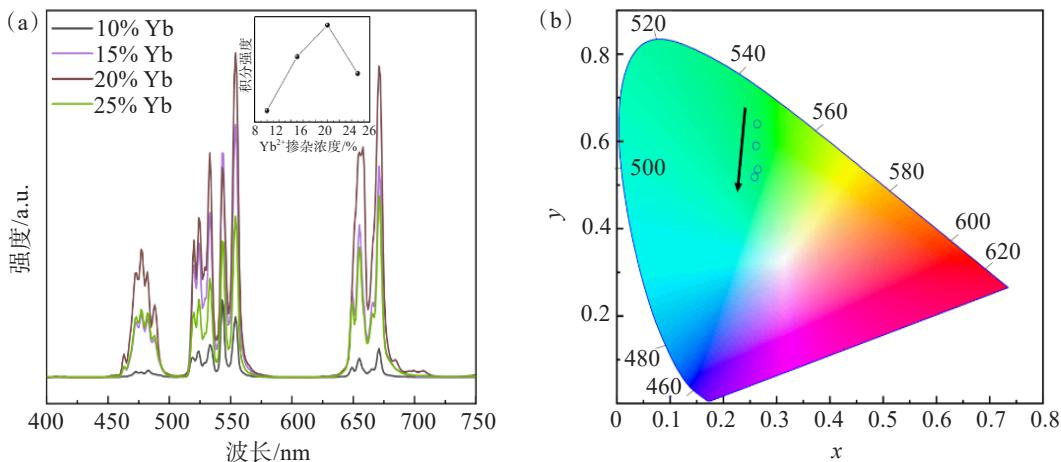


图8 $\text{GdNbO}_4:x\text{Yb}^{3+}/2\%\text{Er}^{3+}/0.5\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉上转换发射光谱(a)及对应的色坐标(b)

Fig.8 Up-conversion emission spectra of $\text{GdNbO}_4:x\text{Yb}^{3+}/2\%\text{Er}^{3+}/0.5\text{Tm}^{3+}$ phosphors (a) and corresponding chromaticity coordinates (b)

2.8 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉的上转换发光机理

为了探讨 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉的上转换发光机制,测试了不同功率的980 nm激光器激发下荧光粉的上转换发射光谱,结果如图9(a)所示。分别对蓝光、绿光和红光的发射峰进行积分,并对积分强度和功率取自然对数后的关系进行线性拟合,结果如图9(b)所示。由图9(b)可知,蓝光的线性拟合

斜率为2.68,绿光的线性拟合斜率为1.82,红光的线性拟合斜率为1.36。通过该拟合结果可知蓝光为三光子上转换过程,绿光与红光是双光子上转换过程。

根据发射光谱和光子级数拟合的结果,可以推断 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉的发光机理如图10所示。对于Er³⁺而言,在980 nm激光的激发下,Yb³⁺从 $^2\text{F}_{7/2}$ 基态能级跃迁到 $^2\text{F}_{5/2}$ 激发态能级,处于激发态

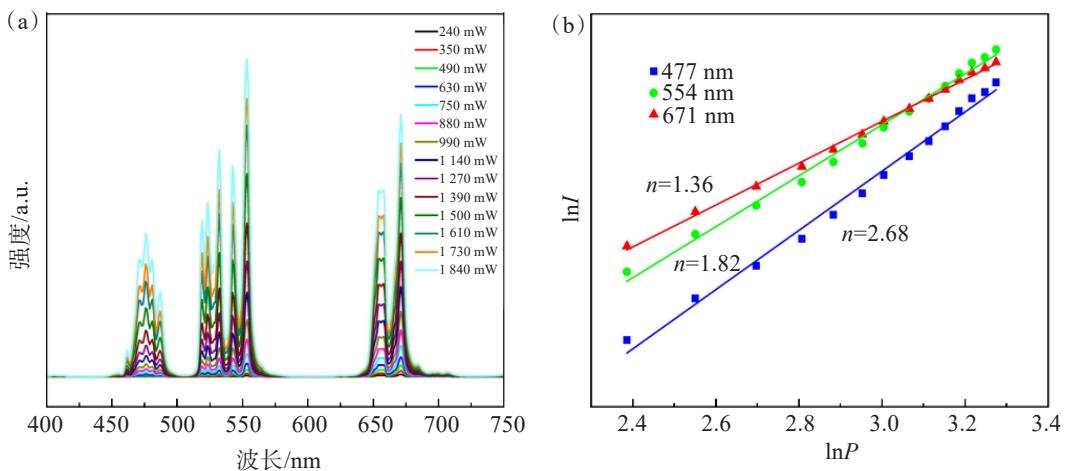


图 9 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉功率依赖的上转发射光谱(a)及对应的光子级数拟合(b)
Fig.9 Power dependent up-conversion emission spectra of $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ phosphors and corresponding photon order fitting

的 Yb^{3+} 将能量传递给相邻的 Er^{3+} , Er^{3+} 吸收一个光子的能量后首先从 ${}^4\text{I}_{15/2}$ 基态能级跃迁到 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 激发态能级。随后 Er^{3+} 一方面可以再吸收一个光子的能量跃迁到 ${}^4\text{F}_{7/2}$ 激发态能级, 紧接着无辐射弛豫到 ${}^2\text{H}_{11/2}/{}^4\text{S}_{3/2}$ 热耦合能级, 然后发生 ${}^2\text{H}_{11/2}\rightarrow{}^4\text{I}_{15/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2}\rightarrow{}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁, 从而辐射出波长为 533 nm 和 554 nm 的绿光。另一方面 Er^{3+} 可以从 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级无辐射弛豫到 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级, 再吸收一个光子的能量跃迁到 ${}^4\text{F}_{9/2}$ 能级, 然后发生 ${}^4\text{F}_{9/2}\rightarrow{}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁, 从而辐射出波长为 671 nm 的红光。对于 Tm^{3+} 而言, 处于 ${}^2\text{F}_{5/2}$ 激发态能级的 Yb^{3+} 将能量传递给相邻的 Tm^{3+} , Tm^{3+} 从 ${}^3\text{H}_6$ 基态能级跃迁至 ${}^3\text{H}_5$ 激发态能级, 然后无辐射弛豫至 ${}^3\text{F}_4$ 能级, 随后吸收一个光子的能量跃迁至 ${}^3\text{F}_2$ 激发态能级, 再经过无辐射弛豫至 ${}^3\text{H}_4$ 能级, 接着再吸收一个光子的能量跃迁至 ${}^1\text{G}_4$ 激发态能级, 最终发生 ${}^1\text{G}_4\rightarrow{}^3\text{F}_4$ 和 ${}^1\text{G}_4\rightarrow{}^3\text{H}_6$ 能级跃迁, 辐射出波长为 477 nm 的蓝光和 658 nm 的红光。

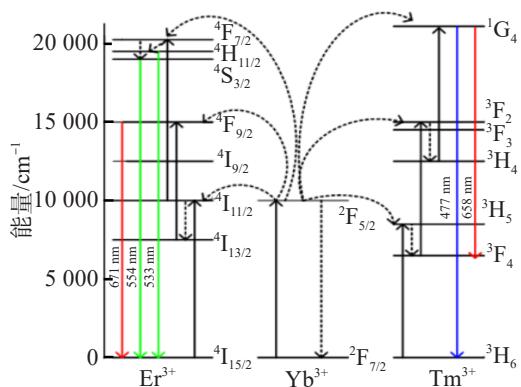


图 10 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉的发光机理
Fig.10 Luminescence mechanism of $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ phosphors

3 结 论

采用水热法成功合成了单斜相 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉, 探索了煅烧温度对物相和发光性能的影响, 确认了较优煅烧温度为 1 000 °C, 为 RENbO_4 类材料的合成提供了借鉴和参考。探索了稀土掺杂浓度对发光性能的影响, 确认了 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 的较优掺杂浓度分别为 20%、2% 和 0.5%, 并通过进一步调控 Er^{3+} 掺杂浓度获得了上转换白光发射, 结果表明 $\text{GdNbO}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 荧光粉在上转换白光照明领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献:

- [1] PEI P, CHEN Y, SUN C X, et al. X-ray-activated persistent luminescence nanomaterials for NIR-II imaging[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(9): 1011-1018.
- [2] HU T, GAO Y, JI X H, et al. Thermal quenching properties of narrow-band blue-emitting $\text{MBe}_2(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}^{2+}$ ($\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}$) phosphors towards backlight display applications[J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2020, 7(14): 2685-2691.
- [3] LIAO J S, WANG M H, LIN F L, et al. Thermally boosted upconversion and downshifting luminescence in $\text{Sc}_2(\text{MoO}_4)_3:\text{Yb}/\text{Er}$ with two-dimensional negative thermal expansion[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 2090.
- [4] GUPTA S K, ZUNIGA J P, ABDOU M, et al. Lanthanide-doped lanthanum hafnate nanoparticles as multicolor phosphors for warm white lighting and scintillators[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379: 122314.
- [5] LIAO J S, HAN Z, LIN F L, et al. Simultaneous thermal enhancement of upconversion and downshifting

- luminescence by negative thermal expansion in nonhygroscopic ZrSc(WO₄)₂PO₄: Yb/Er phosphors[J]. Inorganic Chemistry, 2023, 62(24): 9518-9527.
- [6] LIU H L, XU J H, WANG H, et al. Secure printing: tunable resonator-upconverted emission (TRUE) color printing and applications in optical security[J]. Advanced Materials, 2019, 31(15): 1807900.
- [7] XIE Y, SONG Y P, SUN G T, et al. Lanthanide-doped heterostructured nanocomposites toward advanced optical anti-counterfeiting and information storage[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(6): 1264-1273.
- [8] ZHANG C, YANG L, ZHAO J, et al. White-light emission from an integrated upconversion nanostructure: toward multicolor displays modulated by laser power[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2015, 127(39): 11693-11697.
- [9] ZHANG T Y, LIU L T, WANG R, et al. Multi-color luminescence and anticounterfeiting application of upconversion nanoparticle[J]. RSC Advances, 2023, 13(14): 9273-9280.
- [10] HASSAIRI M A, GARRIDO H A, DAMMAK M, et al. Tuning white upconversion emission in GdPO₄: Er/Yb/Tm phosphors[J]. Journal of Luminescence, 2018, 203: 707-713.
- [11] JIANG B, ZHU S, WANG W Y, et al. Room-temperature continuous-wave upconversion white microlaser using a rare-earth-doped microcavity[J]. ACS Photonics, 2022, 9(9): 2956-2962.
- [12] SHANG M M, LI C X, LIN J. How to produce white light in a single-phase host[J]. Chemical Society Reviews, 2014, 43(5): 1372-1386.
- [13] WANG L M, LI X Y, LI Z Q, et al. A new cubic phase for a NaYF₄ host matrix offering high upconversion luminescence efficiency[J]. Advanced Materials, 2015, 27(37): 5528-5533.
- [14] ALKAHTANI M H, ALGHANNAM F S, SANCHEZ C, et al. High efficiency upconversion nanophosphors for high-contrast bioimaging[J]. Nanotechnology, 2016, 27(48): 485501.
- [15] ZHU Y X, PAN G C, ZHAO J, et al. High-efficiency dual-mode polychromatic emission of rare-earth-based double perovskite with low phonon energy toward high-level anti-counterfeiting and information encryption[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(2): 2202019.
- [16] YANG X X, FU Z L, YANG Y M, et al. Optical temperature sensing behavior of high-efficiency upconversion: Er³⁺-Yb³⁺ co-doped NaY(MoO₄)₂ phosphor[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98(8): 2595-2600.
- [17] ZHU D, SHAO L B, YU M J, et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate[J]. Advances in Optics and Photonics, 2021, 13(2): 242-352.
- [18] XU X Y, WANG T X, CHEN P C, et al. Femtosecond laser writing of lithium niobate ferroelectric nanodomains[J]. Nature, 2022, 609: 496-501.
- [19] NAKATO T, ISHITOBI W, YABUCHI M, et al. Electrically induced alignment of semiconductor nanosheets in niobate-clay binary nanosheet colloids toward significantly enhanced photocatalysis[J]. Langmuir, 2021, 37(25): 7789-7800.
- [20] 刘芝君, 彭弯弯, 李之锋, 等. 钇掺杂对镍基正极材料 LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂电化学性能影响[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(2): 89-96.
- [21] 柴小君, 王明华, 李金琼, 等. Y₂MgTiO₆:Mn⁴⁺/Nd³⁺的制备及近红外发光性能[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(6): 48-56.

(责任编辑:王庆龙)