

文章编号: 1000-7032(2021)12-1872-10

# Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺 LuYO<sub>3</sub> 上转换荧光温度传感特性

张志宏<sup>1†</sup>, 周慧丽<sup>2†</sup>, 吴 锋<sup>1</sup>, 张 雁<sup>1\*</sup>, 叶林华<sup>2\*</sup>

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500; 2. 浙江大学 物理系, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 采用 CO<sub>2</sub> 激光区熔法制备了 LuYO<sub>3</sub>:Tm<sup>3+</sup> (0.3%) -Yb<sup>3+</sup> (5%) 荧光材料。在 980 nm 激光激发下测量了样品在可见光波段的上转换 (UC) 荧光光谱, 其中<sup>1</sup>G<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> 跃迁产生的蓝色上转换荧光发生明显的 Stark 劈裂。利用荧光强度比 (FIR) 方法对样品的 Stark 劈裂能级<sup>1</sup>G<sub>4(a)</sub>与<sup>1</sup>G<sub>4(b)</sub>和<sup>3</sup>F<sub>2,3</sub>与<sup>3</sup>H<sub>4</sub> 两对热耦合能级的荧光温度传感特性进行研究。结果表明, 两对热耦合能级的测温范围为 223 ~ 723 K。<sup>1</sup>G<sub>4(a)</sub>与<sup>1</sup>G<sub>4(b)</sub> 能级在低温下灵敏度较高, 在 223 K 处有最大绝对灵敏度 5.62 × 10<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>和最大相对灵敏度 28.2 × 10<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>; <sup>3</sup>F<sub>2,3</sub>与<sup>3</sup>H<sub>4</sub> 能级比较适合高温下的温度传感, 最大绝对灵敏度为 1.44 × 10<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> (723 K), 最大相对灵敏度为 4.61 × 10<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> (516.3 K), 表明所制备荧光材料非常适合用于荧光温度传感。

**关键词:** Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>: LuYO<sub>3</sub>; 上转换发光; 荧光强度比 (FIR); 荧光温度传感

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20210276

## Temperature Sensing Characteristics of Up-conversion Luminescence in Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-doped LuYO<sub>3</sub> Phosphor

ZHANG Zhi-hong<sup>1†</sup>, ZHOU Hui-li<sup>2†</sup>, WU Feng<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1\*</sup>, YE Lin-hua<sup>2\*</sup>

(1. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China;

2. Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: 1015329361@qq.com; lhye@zju.edu.cn

**Abstract:** LuYO<sub>3</sub>:Tm<sup>3+</sup> (0.3%) -Yb<sup>3+</sup> (5%) phosphor was prepared by CO<sub>2</sub> laser zone melting method. Under the excitation of 980 nm laser, the sample exhibits up-conversion luminescence (UCL) corresponding to <sup>1</sup>G<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub>, <sup>1</sup>G<sub>4</sub>→<sup>3</sup>F<sub>4</sub>, <sup>3</sup>F<sub>2,3</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub>, <sup>3</sup>H<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> transition in the visible light region, among which obvious Stark splits of luminescence are observed in the blue UCL corresponding to <sup>1</sup>G<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> transition. The temperature sensing characteristics of <sup>1</sup>G<sub>4(a)</sub>, <sup>1</sup>G<sub>4(b)</sub> and <sup>3</sup>F<sub>2,3</sub>, <sup>3</sup>H<sub>4</sub> thermally coupled levels (TCLs) are investigated by fluorescence intensity ratio (FIR) method. The results show that the temperature measurement range of the two pairs of TCLs is 223 ~ 723 K. The Stark sub-levels <sup>1</sup>G<sub>4(a)</sub> and <sup>1</sup>G<sub>4(b)</sub> have higher sensitivity at low temperatures with maximum absolute sensitivity 5.62 × 10<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> and maximum relative sensitivity 28.2 × 10<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> at 223 K, the <sup>3</sup>F<sub>2,3</sub> and <sup>3</sup>H<sub>4</sub> TCLs are more suitable for high temperature measurement with maximum absolute sensitivity 1.44 × 10<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> (723 K) and maximum relative sensitivity 4.61 × 10<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> (516.3 K), indicating that the prepared fluorescent material is very suitable for fluorescent temperature sensing.

收稿日期: 2021-08-20; 修订日期: 2021-09-07

基金项目: 国家自然科学基金 (11674284); 先进航空动力创新工作站 (依托中国航空发动机研究院设立) (HKCX2019-01-017) 资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (11674284); Advanced Jet Propulsion Innovation Center, AEAC (HKCX2019-01-017)

†: 共同贡献作者

**Key words:**  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{LuYO}_3$ ; upconversion luminescence; fluorescence intensity ratio(FIR); optical temperature sensing

## 1 引 言

近年来,基于稀土离子上转换荧光的荧光强度比例(FIR)型荧光温度传感器引起了广泛关注和研究<sup>[1-3]</sup>。上转换发光是指荧光材料通过吸收长波长光发射短波长光的过程,它是一种反斯托克斯发光<sup>[4]</sup>。FIR型荧光温度传感器的测温原理是稀土离子在外界激发光源泵浦下两个热耦合能级或两个非热耦合能级跃迁产生的荧光强度之比随温度单调变化,它具有非接触式、高精度等优点。相比于其他光学温度传感器,FIR型荧光温度传感器具有原理简单、可以有效减小因激发光源波动、荧光信号传输损耗等非温度因素引起的测量误差等优点<sup>[5]</sup>。

在稀土离子中, $\text{Tm}^{3+}$ 离子因为其丰富的能级分布、较强的蓝色和近红外上转换荧光而备受关注,其 $^1\text{G}_4$ 的两个 Stark 劈裂能级和 $^3\text{F}_{2,3}$ 、 $^3\text{H}_4$ 能级为两对热耦合能级<sup>[6-9]</sup>。由于 $\text{Tm}^{3+}$ 离子对 980 nm 激光的激发态吸收(ESA)较弱,而 $\text{Yb}^{3+}$ 离子在 980 nm 处具有较大的吸收截面,通常在荧光材料中共掺 $\text{Yb}^{3+}$ 离子作为敏化剂,通过 $\text{Yb}^{3+}$ 离子的能量转移(ET)过程,使 $\text{Tm}^{3+}$ 离子上转换发光效率大大提升<sup>[10-11]</sup>。

上转换荧光基质材料的选择对上转换荧光特性会产生较大影响。一般认为,低声子能量的基质可以有效降低非辐射弛豫过程,从而提高上转换发光效率。常见的低声子基质材料主要为氟化物,但由于氟化物化学稳定性较差,且具有较高的毒性,从而限制了它的应用<sup>[12]</sup>。与氟化物相比,倍半氧化物( $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 等)拥有较好的热稳定性和化学稳定性、无毒、且具有较低的声子能量(约  $430\text{ cm}^{-1}$ )、较高的熔点(约  $2430\text{ }^\circ\text{C}$ )。而混合倍半氧化物(如 $\text{LuYO}_3$ )在保持倍半氧化物优点的同时,它的不规则晶体结构会导致荧光光谱的不均匀加宽<sup>[13-15]</sup>。据了解,目前尚未有 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 $\text{LuYO}_3$ 荧光材料的上转换荧光温度特性研究报道。

本文通过 $\text{CO}_2$ 激光区熔法制备了 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 $\text{LuYO}_3$ 荧光材料。用XRD表征了样品的晶体结构,在980 nm激光激发下,研究了样品

从223~773 K温度范围内的上转换荧光光谱,并通过FIR方法研究了样品 $^1\text{G}_4$ 的两个 Stark 劈裂能级和 $^3\text{F}_{2,3}$ 、 $^3\text{H}_4$ 热耦合能级的荧光温度传感特性。

## 2 实 验

采用 $\text{CO}_2$ 激光区熔法制备 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 $\text{LuYO}_3$ 荧光材料,所用的实验设备与激光加热基座法(LHPG)中所使用的相同<sup>[8,16-17]</sup>。 $\text{Tm}^{3+}$ 离子和 $\text{Yb}^{3+}$ 离子的掺杂浓度对上转换荧光材料的荧光强度具有重要的影响。Hou等<sup>[18]</sup>发现,在 $\text{Tm}/\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 上转换材料中, $\text{Yb}^{3+}$ 离子浓度与 $\text{Tm}^{3+}$ 离子浓度之比为15:1时 $\text{Tm}^{3+}$ 离子的上转换蓝色荧光强度最强, $\text{Yb}^{3+}$ 离子浓度过高会使得上转换发光效率降低。结合我们之前 $\text{Tm}/\text{Yb}:\text{LuAG}$ 上转换荧光特性实验结果<sup>[8]</sup>,选定 $\text{Tm}^{3+}$ 离子和 $\text{Yb}^{3+}$ 离子掺杂浓度分别为0.3%和5%。将 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Yb}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Tm}_2\text{O}_3$ 按照如下化学方程式进行配比: $(1-x-y)\text{Lu}_2\text{O}_3 + (1-x-y)\text{Y}_2\text{O}_3 + 2x\text{Yb}_2\text{O}_3 + 2y\text{Tm}_2\text{O}_3 = 4(\text{LuY})_{1-x-y}\text{Yb}_{2x}\text{Tm}_{2y}\text{O}_3$ ,其中 $x$ 为5%, $y$ 为0.3%,共称取2 g按上述化学计量配比粉末原料。将精确称量的粉末原料放入玛瑙研钵之中,加入一定量无水乙醇进行充分研磨使得混合均匀,待乙醇完全挥发后,将混合好的原料用模具压制成粗细均匀的粉末源棒,并于 $1280\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温炉中烧结4 h。将烧结完毕的粉末源棒固定在激光加热基座法晶体光纤生长装置的籽晶夹具处,如图1所示,移动源棒位置,使得两

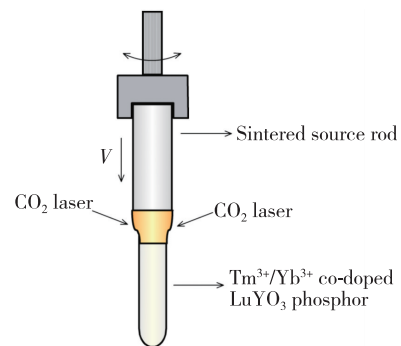


图1  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 $\text{LuYO}_3$ 荧光材料制备图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation of  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped  $\text{LuYO}_3$  phosphor

束 CO<sub>2</sub> 激光聚焦于源棒的下端。调节 CO<sub>2</sub> 激光功率,使得源棒充分熔化,并使源棒缓慢下降且左右旋转,充分熔化后的源棒冷却后得到所需 Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺 LuYO<sub>3</sub> 荧光材料。

采用 X 射线衍射仪 (XRD, Panalytical, Cu-K $\alpha$ ) 对样品的晶体结构进行测量。样品的上转换荧光测试装置如图 2 所示。激发光源采用波长为 980 nm 的半导体激光器 (LSR980H, 宁波远明激光技术有限公司),带 SMA905 光纤输出接口。采用波长分辨率为 0.5 nm 的光纤光谱仪 (S2000-VIS, 杭州赛曼科技有限公司) 测试样品的上转换荧光,波长测试范围为 320 ~ 1 100 nm。为了测试样品的上转换荧光温度特性,将所制备样品磨成粉末,取适量放置于半封闭陶瓷管中,并用一根蓝宝石光纤将陶瓷管内样品与 Y 型石英光纤公共端连接,Y 型石英光纤的一个分支连接激发光源,荧光信号从另一个分支导出,通过截止滤光片后连接到光纤光谱仪,截止滤光片用于滤除上转换荧光信号中的激发光。样品的室温以上温度特性在一个可编程温度控制系统控制的管式炉 (LT-KC-6-13CX, 杭州蓝天化验仪器厂) 中进行,低温特性由低温试验箱 (DW-50, 河北沧州华屹试验仪器有限公司) 完成。

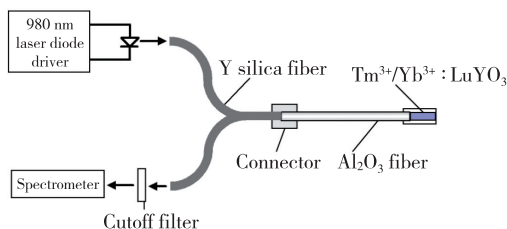


图 2 上转换荧光光谱测试装置

Fig. 2 Test setup to measure the upconversion luminescence

### 3 结果与讨论

#### 3.1 晶体结构

图 3 为 Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺 LuYO<sub>3</sub> 荧光材料的 XRD 图及 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的标准卡 PDF#43-1036 和 PDF#65-3172。Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 均为立方晶相,它们拥有相同的结构,理论上两种材料中的 Lu<sup>3+</sup> 和 Y<sup>3+</sup> 可以互相替换而不改变其晶体结构。从图中可以看出,样品在 10° ~ 75° 范围内的 X 射线衍射峰角度与 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 标准卡相比略微偏大,而与 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 标准卡相比,样品的 X 射线衍射峰角度略

微偏小,这是由于 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的晶格常数 (1.039 nm) 小于 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.060 nm),LuYO<sub>3</sub> 的晶格常数介于 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 之间<sup>[14]</sup>,晶格常数增大会导致衍射峰角度减小,从而导致衍射峰位有规律地变化。样品在测试范围内没有观察到其他杂质引起的二级衍射峰,说明掺杂的离子没有改变基质材料的晶体结构,样品展现出纯立方晶相。

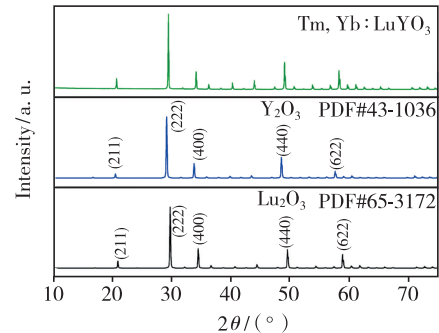


图 3 样品的 XRD 图谱和 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 标准图谱。

Fig. 3 XRD spectrum of the sample and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> standard card.

#### 3.2 上转换荧光光谱和发光机理

图 4 展示了 Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺 LuYO<sub>3</sub> 荧光材料在不同功率的 980 nm 激光激发下的上转换荧光光谱,插图为所制备的样品和样品在 980 nm 激光激发下产生的上转换荧光。从图中我们可以看到,在 980 nm 激光激发下,样品辐射出较强的蓝色荧光,随着激发功率从 36 mW 增加到 200 mW,样品的上转换荧光强度也逐渐变强,同时上转换荧光光谱的形状和峰值所对应的波长没有发生明显的改变和偏移。样品的上转换荧光光谱主要包含 4

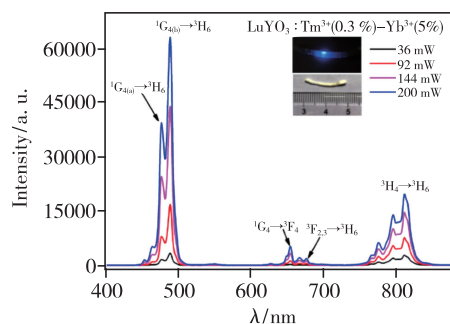


图 4 Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺 LuYO<sub>3</sub> 荧光材料在不同激发功率下的上转换荧光光谱 (插图为制备好的样品和其较强的上转换蓝色荧光)

Fig. 4 UC spectra of Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped LuYO<sub>3</sub> phosphor under various pumping power (insert is the prepared sample and its strong blue UC emission)

个荧光带:  $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁发出的蓝色上转换荧光, 波长范围为 440 ~ 520 nm, 荧光信号较强, 并出现了明显的 Stark 劈裂, 劈裂荧光带所对应的峰值波长分别为 477 nm 和 488.8 nm, 分别对应  $^1\text{G}_{4(a)} \rightarrow ^3\text{H}_6$  和  $^1\text{G}_{4(b)} \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁<sup>[19]</sup>;  $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$  跃迁产生的红色上转换荧光, 波长范围为 620 ~ 660 nm;  $^3\text{F}_{2,3} \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁产生的红色上转换荧光, 对应的波长范围为 660 ~ 730 nm, 荧光信号较弱; 以及波长范围为 730 ~ 840 nm 的近红外荧光, 对应  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁。

稀土离子荧光材料在激光激发下, 对外辐射出各种颜色的上转换荧光, 在该过程中, 稀土离子向外辐射一个光子需要吸收一定数目的激发光的光子, 我们用  $n$  表示所需的光子数目, 用  $I$  表示稀土离子的上转换荧光强度,  $P$  表示激发光的泵浦功率, 它们满足以下关系<sup>[20]</sup>:

$$I \propto P^n, \quad (1)$$

对上式两边取对数可得到:

$$\ln I \propto n \ln P, \quad (2)$$

图 5(a) 给出了  $^1\text{G}_{4(a)} \rightarrow ^3\text{H}_6$ 、 $^1\text{G}_{4(b)} \rightarrow ^3\text{H}_6$  和  $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$  跃迁的荧光强度峰值与不同激发功率密度的对数关系。从拟合结果中可以看到, 在功率密度较小时,  $^1\text{G}_{4(a)} \rightarrow ^3\text{H}_6$  (477 nm)、 $^1\text{G}_{4(b)} \rightarrow ^3\text{H}_6$  (488.8 nm) 和  $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$  (654.1 nm) 的拟合直线给出的斜率分别为 2.32, 2.21, 2.24; 当功率密度变大时, 斜率减小为 1.90, 1.72, 2.00。图 5(b) 中给出了  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  (811.5 nm) 和  $^3\text{F}_{2,3} \rightarrow ^3\text{H}_6$  (684.5 nm) 跃迁的荧光强度峰值数据和拟合直线, 在功率密度较小时,  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  拟合得到的  $n$  值为 1.35; 当功率密度变大时,  $n$  值减小为 1.30,  $^3\text{F}_{2,3} \rightarrow ^3\text{H}_6$  的  $n$  值为 1.65。

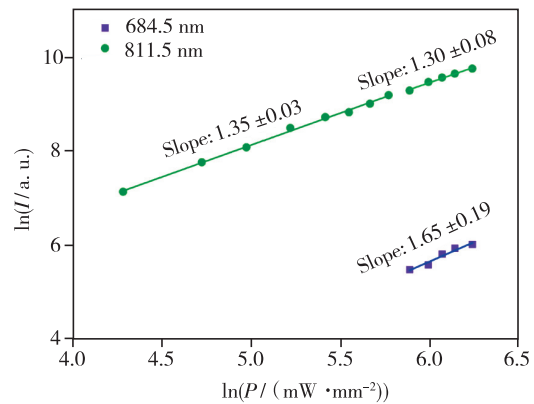
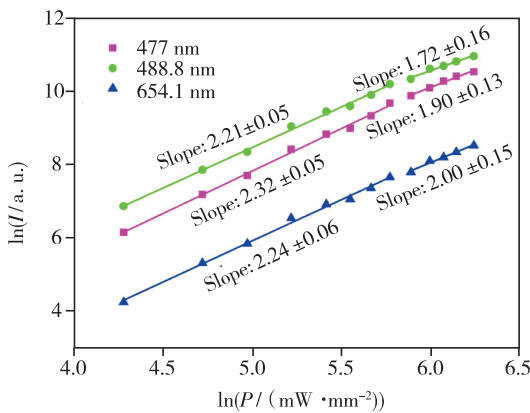


图 5 样品的上转换荧光强度随功率密度变化的双对数图

Fig. 5 Logarithmic graph of the UC emission intensity versus excitation power density

图 6 展示了  $\text{LuYO}_3:\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  荧光材料在 980 nm 激光激发下的上转换发光机制。  $\text{Yb}^{3+}$  离子首先从  $^2\text{F}_{7/2}$  能级激发到  $^2\text{F}_{5/2}$  能级, 接着  $\text{Yb}^{3+}$  离子通过能量转移 (ET) 过程, 将能量传递给  $\text{Tm}^{3+}$  离子, 将  $\text{Tm}^{3+}$  离子从基态  $^3\text{H}_6$  能级激发到  $^3\text{H}_5$  能级。处于  $^3\text{H}_5$  能级的  $\text{Tm}^{3+}$  离子无辐射弛豫到  $^3\text{F}_4$  能级, 随后再次吸收来自  $\text{Yb}^{3+}$  离子传递的能量跃迁到  $^3\text{F}_{2,3}$  能级。处于  $^3\text{F}_{2,3}$  能级的  $\text{Tm}^{3+}$  离子一部分通过  $^3\text{F}_{2,3} \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁产生了峰值为 684.5 nm 的上转换荧光, 其余弛豫到较低的  $^3\text{H}_4$  能级。处于  $^3\text{H}_4$  能级的  $\text{Tm}^{3+}$  离子可以跃迁回基态产生峰值为 811.5 nm 的近红外荧光, 也可以通过第三次 ET 过程被激发到能级  $^1\text{G}_{4(a)}$  和  $^1\text{G}_{4(b)}$ 。处于基态的  $\text{Tm}^{3+}$  离子也可以被两个处于激发态的  $\text{Yb}^{3+}$  离子协同致敏跃迁至  $^1\text{G}_{4(a)}$  和  $^1\text{G}_{4(b)}$  能级<sup>[21-22]</sup>。处

于  $^1\text{G}_{4(a)}$  和  $^1\text{G}_{4(b)}$  能级的  $\text{Tm}^{3+}$  离子可以跃迁到基态  $^3\text{H}_6$  能级发出中心波长为 477 nm 和 488.8 nm

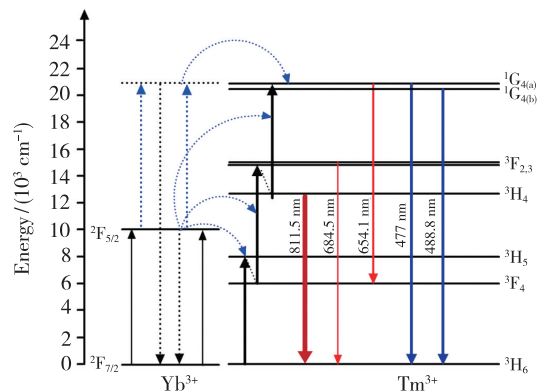


图 6  $\text{Tm}^{3+}$  与  $\text{Yb}^{3+}$  离子的能级结构及上转换发光机理  
Fig. 6 Energy level diagram and the UC mechanism of  $\text{Tm}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  ions

的蓝色上转换荧光,也可以跃迁到 $^3F_4$ 能级发出中心波长为 654.1 nm 的红色上转换荧光。因此,在  $Yb^{3+}/Tm^{3+}$  共掺杂的  $LuYO_3$  荧光材料样品中, $Tm^{3+}$  离子的  $^1G_{4(a)}/^1G_{4(b)} \rightarrow ^3H_6/^3F_4$  跃迁产生上转换荧光是三光子过程,而  $^3F_{2,3} \rightarrow ^3H_6$  和  $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$  属于双光子过程。如图 5 所示, $^1G_4 \rightarrow ^3H_6$ ,  $^3F_4$  跃迁的实验拟合数据出现了明显的功率饱和现象<sup>[20]</sup>。根据之前的报道我们可知, $^3F_4$  能级寿命较长<sup>[23]</sup>,当激发功率较大时,处于 $^3F_4$ 能级上的  $Tm^{3+}$  离子容易处于饱和状态,使得处于 $^3F_4$ 能级的  $Tm^{3+}$  离子只需通过两次 ET 过程跃迁至 $^1G_4$ 能级,从而造成拟合值  $n$  偏小。

### 3.3 上转换荧光温度传感特性

为了研究  $Tm^{3+}/Yb^{3+}$  共掺  $LuYO_3$  荧光材料的荧光温度传感特性,在 980 nm 激光激发下,测量了样品在不同温度下的上转换荧光光谱,激发功率设置为 128 mW,所用蓝宝石光纤直径为 0.8 mm,对应功率密度为 254.6 mW/mm<sup>2</sup>,以避免 980 nm 激光功率密度过大产生的自加热效应,荧光光谱波长测量范围为 400 ~ 880 nm。图 7 为  $Tm^{3+}/Yb^{3+}$  共掺  $LuYO_3$  荧光材料在不同温度下的上转换荧光光谱。从图中可以看出,随着温度升高,上转换荧光发射峰在光谱中没有位移,波长 440 ~ 520 nm ( $^1G_4 \rightarrow ^3H_6$ ) 蓝色荧光和 730 ~ 840 nm ( $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ ) 近红外荧光光强较强,且蓝色荧光带显示出明显的谱分裂。从图 7(a) 中可见,在 223 ~ 273 K 范围内,样品的上转换荧光光强随温度升高先增大后减小,在 258 K 处达到最大。从图 7(b) 中可见,在 298 ~ 773 K 温度范围内,波长

440 ~ 520 nm ( $^1G_4 \rightarrow ^3H_6$ ) 蓝色荧光、波长 620 ~ 660 nm ( $^1G_4 \rightarrow ^3F_4$ ) 红色荧光、波长 730 ~ 840 nm ( $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ ) 近红外荧光随温度升高而减弱, $^3F_{2,3} \rightarrow ^3H_6$  跃迁产生的 660 ~ 730 nm 红色荧光在低温范围内比较微弱,光强随温度的升高先升高后下降,在 623 K 处达到最大值。

样品荧光强度随温度变化的原因与  $Yb^{3+}$  离子到  $Tm^{3+}$  离子之间的能量传递效率和  $Tm^{3+}$  离子的非辐射跃迁几率有关,这两个因素都与平均声子数密切相关<sup>[24-25]</sup>,是两个互相竞争的过程。能量传递是指  $Yb^{3+}$  离子通过多极距的作用将能量无辐射地传递给  $Tm^{3+}$ ,从而增加  $Tm^{3+}$  激发态的布居数,因为传递过程中能量不匹配,所以这个过程需要声子的辅助<sup>[26]</sup>;非辐射弛豫过程是指在声子的辅助作用下,处于激发态的  $Tm^{3+}$  离子无辐射弛豫到基态,这个过程不放出光子,能量完全以热形式耗散<sup>[27]</sup>。平均声子数随温度的升高而增加,它既会辅助  $Yb^{3+}$  离子与掺杂离子之间的能量传递,也会给非辐射跃迁提供去活化所需要的活化能,因此能量传递效率和非辐射跃迁几率随温度的升高而增大。但在温度较低时,能量传递效率对光强的影响大于非辐射跃迁;而温度较高时,非辐射弛豫对光强的影响大于能量传递。在两个因素的共同影响下,当温度较低时,样品的荧光强度随温度的升高而升高,当温度达到能量传递效率和非辐射弛豫几率对荧光强度造成的影响程度相等的转折点时,荧光光强达到最大;当温度继续升高时,荧光光强随温度的升高而减小<sup>[25]</sup>。

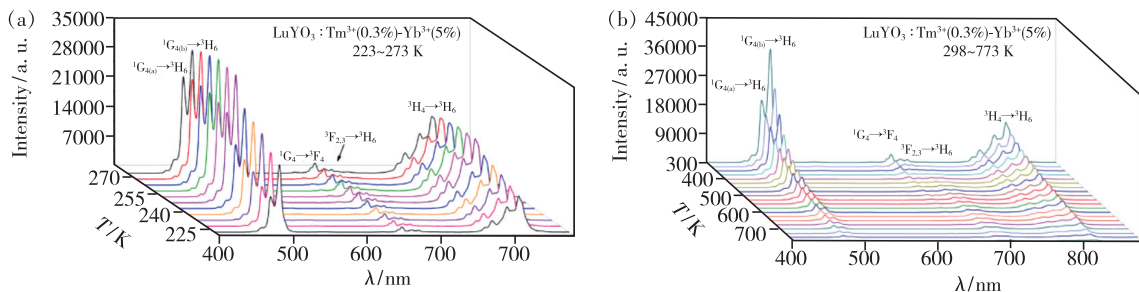


图 7 样品在 223 ~ 273 K (a) 和 298 ~ 773 K (b) 温度范围的上转换荧光光谱

Fig. 7 UCL spectra of the sample in the range of 223 - 273 K (a) and 298 - 773 K (b)

稀土离子中的热耦合能级的粒子数布居满足玻尔兹曼分布,考虑到荧光光谱重叠等因素的干扰,Wade 等将两个热耦合能级 1 和 2 的荧光强度比例 ( $R$ ) 满足的公式修正为<sup>[5]</sup>:

$$R = \frac{I_1}{I_2} = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) + B, \quad (3)$$

其中  $I_1$ 、 $I_2$  为荧光积分强度; $A$  为常数; $B$  为补偿因子,通常与两个热耦合能级光谱重叠和杂散光

等相关;  $\Delta E$  为能级间隙;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度。

在  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺  $\text{LuYO}_3$  荧光材料中, 我们以  $^1\text{G}_4$  能级的两个 Stark 劈裂能级和  $^3\text{F}_{2,3}$ 、 $^3\text{H}_4$  能级作为两对热耦合能级, 探究它们的荧光温度传感特性。我们将  $^1\text{G}_{4(a)} \rightarrow ^3\text{H}_6$  和  $^1\text{G}_{4(b)} \rightarrow ^3\text{H}_6$  的荧光强度比表示为  $R_1$ , 荧光积分区间分别为 440 ~ 482 nm 和 482 ~ 520 nm; 将  $^3\text{F}_{2,3} \rightarrow ^3\text{H}_6$  和  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  的荧光强度比表示为  $R_2$ , 荧光积分区间分别为 660 ~ 730 nm 和 730 ~ 840 nm。图 8 展示了不同温度下的  $R_1$ 、 $R_2$  值及它们的拟合曲线。如图所示, 在 223 ~ 723 K 温度范围, 实验数据和拟合曲线符合得很好。  $R_1$  由公式(3)拟合得出的系数  $A$ 、

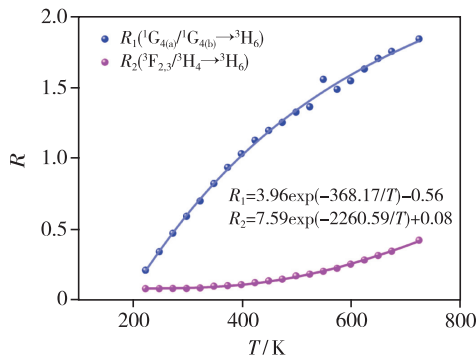


图 8 不同温度下样品的荧光强度比及其拟合曲线

Fig. 8  $R$  and the fitting curve of the sample at different temperatures

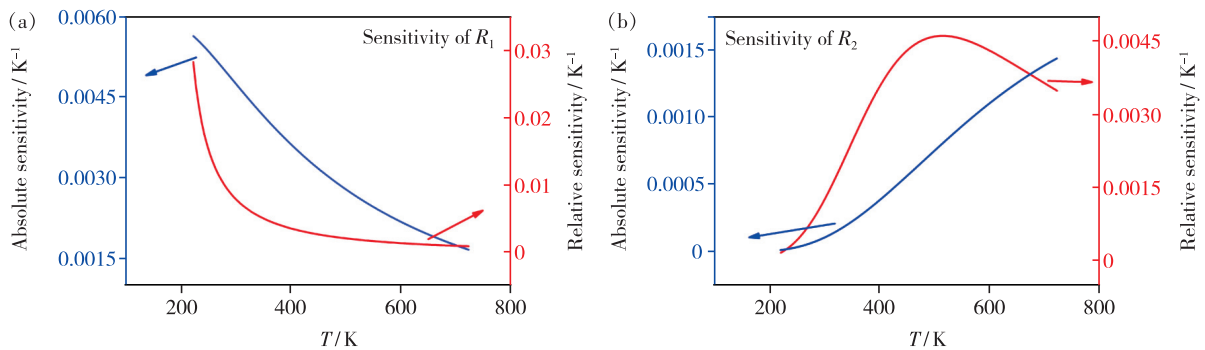


图 9 样品的灵敏度随温度变化曲线

Fig. 9 Sensitivity of the sample varies with temperature

在实际应用中, 重复性是荧光温度传感器的一个重要因素。图 10(a)、(b) 中给出了样品在 298 K 和 673 K 下  $R_1$  和  $R_2$  的重复性测试数据。从图中可以看出, 在循环加热冷却过程中, 样品的  $R_1$  和  $R_2$  均拥有良好的重复性, 室温和高温下的  $R$  值基本不变。这说明样品作为一种温度传感器具有优良的重复性和热稳定性。

$B$  分别为 3.96 和  $-0.56$ , 对应的  $\Delta E$  为 0.032 eV;  $R_2$  的拟合系数  $A$ 、 $B$  分别为 7.59 和 0.08, 对应的  $\Delta E$  为 0.195 eV。

荧光温度传感器的灵敏度是一个描述温度分辨率的重要参数。对于基于热耦合能级  $R$  的温度传感器, 绝对灵敏度  $S_a$  定义为:

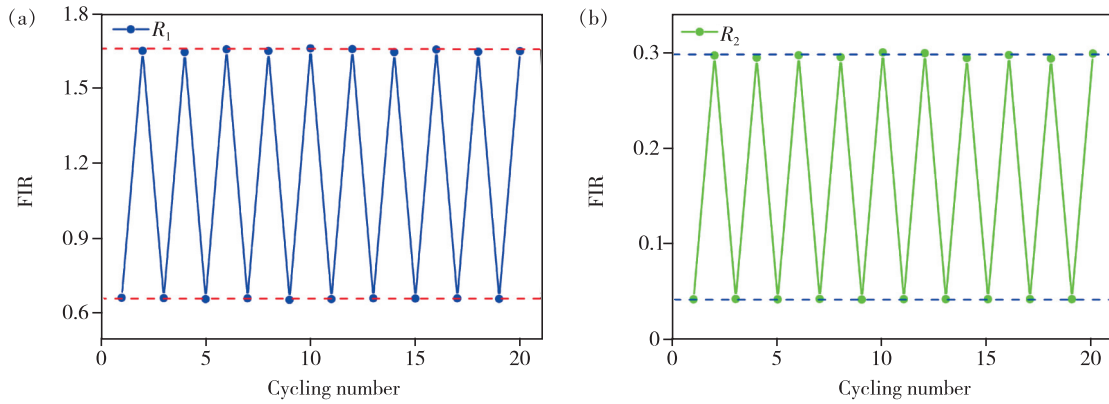
$$S_a = \frac{dR}{dT}, \quad (4)$$

同时定义相对灵敏度  $S_r$ :

$$S_r = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}, \quad (5)$$

图 9(a) 展示了基于  $^1\text{G}_{4(a)}$  和  $^1\text{G}_{4(b)}$  热耦合能级的  $R$  的绝对灵敏度与相对灵敏度随温度的变化, 可以看到其  $S_a$  和  $S_r$  均随温度的升高而降低, 在 223 K 处得到最大绝对灵敏度和相对灵敏度, 分别为  $5.62 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  和  $28.2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 。图 9(b) 展示了基于  $^3\text{F}_{2,3}$  和  $^3\text{H}_4$  热耦合能级的  $R$  的绝对灵敏度与相对灵敏度随温度的变化关系, 绝对灵敏度会随着温度的升高而逐渐增大, 而其相对灵敏度则会呈现先升高后降低的趋势, 在 723 K 处得到  $S_a$  最大值为  $1.44 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , 在 516.3 K 处得到  $S_r$  最大值为  $4.61 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 。所以在  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺  $\text{LuYO}_3$  荧光材料中,  $^1\text{G}_4$  的两个 Stark 劈裂能级比较适合低温下的温度测量, 而  $^3\text{F}_{2,3}$  和  $^3\text{H}_4$  这对热耦合能级比较适合高温下的荧光温度传感。

表 1 展示了不同基质材料的  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺荧光材料的温度传感性能。从表中可以看出, 与其他基质材料相比,  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺  $\text{LuYO}_3$  的测温范围较宽, 最低测量温度低至 223 K。此外,  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺  $\text{LuYO}_3$  的  $^1\text{G}_{4(a)}$ 、 $^1\text{G}_{4(b)}$  热耦合能级的最大相对灵敏度与其他已发表的工作相比有较大提高; 样品的  $^3\text{F}_{2,3}$ 、 $^3\text{H}_4$  热耦合能级的最大相对灵敏度也较高。

图 10  $R_1$  和  $R_2$  在 298 K 和 673 K 下的重复性测试Fig. 10 Repeatability test of  $R_1$  and  $R_2$  at 298 K and 673 K表 1 不同基质材料中  $Tm^{3+}$  的温度传感性能Tab. 1 Temperature sensing performance of  $Tm^{3+}$  in various host materials

Materials	Responsible transition	Maximum absolute sensitivity	Maximum relative sensitivity	Temperature range/K	Reference
LuYO <sub>3</sub>	$^3F_{2,3}, ^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	$1.44 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 723 K	$4.61 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 516.3 K	223 ~ 723	This work
LuYO <sub>3</sub>	$^1G_{4(a)}, ^1G_{4(b)} \rightarrow ^3H_6$	$5.62 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 223 K	$28.2 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 223 K	223 ~ 723	This work
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$^1G_{4(a)}, ^1G_{4(b)} \rightarrow ^3H_6$	$3.5 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 310 K	/	303 ~ 753	[19]
KLuF <sub>4</sub>	$^3F_{2,3}, ^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	/	$0.1451 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 503 K	303 ~ 503	[28]
KLuF <sub>4</sub>	$^1G_{4(a)}, ^1G_{4(b)} \rightarrow ^3H_6$	/	$2.101 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 303 K	303 ~ 503	[28]
NaLuF <sub>4</sub>	$^3F_{2,3}, ^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	$0.45 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 600 K	/	250 ~ 600	[29]
LiNbO <sub>3</sub>	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6, ^1G_4 \rightarrow ^3F_4$	$37 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 80 K	$12.5 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 80 K	80 ~ 140, 160 ~ 260	[30]
LiNbO <sub>3</sub>	$^3H_4   1, ^3H_4   3 \rightarrow ^3H_6$	$6.5 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 180 K	$6.9 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 180 K	180 ~ 260	[30]
Bi <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	$^3F_3, ^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	/	$24 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 300 K	300 ~ 505	[31]
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$^3F_{2,3}, ^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	/	$5.6 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 535 K	373 ~ 973	[32]
Ba <sub>5</sub> Gd <sub>8</sub> Zn <sub>4</sub> O <sub>21</sub>	$^1G_{4(1)}, ^1G_{4(2)} \rightarrow ^3H_6$	$6.1 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 300 K	/	300 ~ 510	[33]
YF <sub>3</sub>	$^3F_{2,3}, ^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	$1.01 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 750 K	/	300 ~ 750	[34]
NaYF <sub>4</sub>	$^1G_4 \rightarrow ^3F_4, ^3F_{2,3} \rightarrow ^3H_6$	/	$15.3 \times 10^{-3} K^{-1}$ @ 417 K	350 ~ 510	[35]

## 4 结 论

本文采用 CO<sub>2</sub> 激光区熔法制备了 LuYO<sub>3</sub>: Tm<sup>3+</sup> (0.3%) - Yb<sup>3+</sup> (5%) 荧光材料, 在 980 nm 激光激发下利用荧光强度比方法对样品的  $^1G_{4(a)}$ 、 $^1G_{4(b)}$  和  $^3F_{2,3}$ 、 $^3H_4$  两对热耦合能级在 223 ~ 723 K 区间的温度传感特性进行了研究。结果表明,  $^1G_{4(a)}$ 、 $^1G_{4(b)}$  热耦合能级在低温下灵敏度较高,  $^3F_{2,3}$ 、 $^3H_4$  热耦合能级比较适合高温下的温度传感测量。基于  $^1G_{4(a)}$ 、 $^1G_{4(b)}$  热耦合能级的  $R$  在 223 K 处有最大绝对灵敏度  $5.62 \times 10^{-3} K^{-1}$  和最

大相对灵敏度  $28.2 \times 10^{-3} K^{-1}$ ; 基于  $^3F_{2,3}$  和  $^3H_4$  热耦合能级的  $R$  在 723 K 处有最大绝对灵敏度为  $1.44 \times 10^{-3} K^{-1}$ , 在 516.3 K 处有最大相对灵敏度为  $4.61 \times 10^{-3} K^{-1}$ 。LuYO<sub>3</sub>: Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 荧光材料拥有的两对热耦合能级、较大灵敏度和较宽的测温范围说明其非常适合用于荧光温度传感。

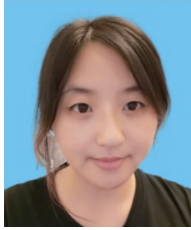
本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210276>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 金叶,李坤,罗旭,等.  $\text{Sc}_2(\text{WO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  的上转换发光及其温度传感特性 [J]. 发光学报, 2021,42(1): 91-97.  
JIN Y,LI K,LUO X, *et al.* Upconversion luminescence and temperature sensing properties for  $\text{Sc}_2(\text{WO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021,42(1):91-97. (in Chinese)
- [ 2 ] 张焕君,董兴邦,李海宁,等. 六方相  $\text{LaOF}:\text{Er},\text{Yb}$  的上转换发光及温度传感特性 [J]. 发光学报, 2020,41(5): 536-541.  
ZHANG H J,DONG X B,LI H N, *et al.* Upconversion emission and temperature sensing of R- $\text{LaOF}:\text{Er},\text{Yb}$  [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020,41(5):536-541. (in Chinese)
- [ 3 ] 陈静,王友法. 溶剂热法制备  $\text{NaBiF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  及掺杂  $\text{Rb}^+$  离子增强其上转换荧光 [J]. 硅酸盐学报, 2020,48(1):35-43.  
CHEN J,WANG Y F. Preparation of  $\text{NaBiF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  particles *via* solvothermal method and enhancement of upconversion luminescence by  $\text{Rb}^+$  ion doping [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2020,48(1):35-43. (in Chinese)
- [ 4 ] 赵玉慈,赵雄燕,王鑫. 稀土上转换纳米发光材料的研究进展 [J]. 现代化工, 2016,36(7):21-24.  
ZHAO Y C,ZHAO X Y,WANG X. Research progress of rare-earth up-conversion luminescent material [J]. *Modern Chem. Ind.*, 2016,36(7):21-24. (in Chinese)
- [ 5 ] WADE S A,COLLINS S F,BAXTER G W. Fluorescence intensity ratio technique for optical fiber point temperature sensing [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003,94(8):4743-4756.
- [ 6 ] WANG X F,LIU Q,BU Y Y, *et al.* Optical temperature sensing of rare-earth ion doped phosphors [J]. *RSC Adv.*, 2015, 5(105):86219-86236.
- [ 7 ] XING L L,XU Y L,WANG R, *et al.* Highly sensitive optical thermometry based on upconversion emissions in  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped  $\text{LiNbO}_3$  single crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2014,39(3):454-457.
- [ 8 ] ZHOU H L,AN N,ZHU K S, *et al.* Optical temperature sensing properties of  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped  $\text{LuAG}$  polycrystalline phosphor based on up-conversion luminescence [J]. *J. Lumin.*, 2021,229:117656.
- [ 9 ] YU L,YE L H,BAO R J, *et al.* Sensitivity-enhanced  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped  $\text{YAG}$  single crystal optical fiber thermometry based on upconversion emissions [J]. *Opt. Commun.*, 2018,410:632-636.
- [ 10 ] 郑龙江,高晓阳,徐伟,等.  $\text{Tm}^{3+},\text{Yb}^{3+}$  共掺微晶玻璃蓝色上转换荧光的温度特性 [J]. 发光学报, 2012,33(9): 944-948.  
ZHENG L J,GAO X Y,XU W, *et al.* Temperature characteristic of blue up-conversion emission in  $\text{Tm}^{3+},\text{Yb}^{3+}$  codoped oxyfluoride glass ceramic [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012,33(9):944-948. (in Chinese)
- [ 11 ] 吴中立,吴红梅,唐立丹,等.  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺氟氧化物磷酸盐玻璃的上转换发光及光学温度传感 [J]. 光子学报, 2017,46(9):0916003-1-7.  
WU Z L,WU H M,TANG L D, *et al.* Up-conversion light-emitting and optical temperature sensing for  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped oxyfluoride tellurite glass [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2017,46(9):0916003-1-7. (in Chinese)
- [ 12 ] 宗玲博. 钇氧化物基质材料的微结构调控及其对发光性能的增强效应研究 [D]. 北京:北京科技大学, 2017.  
ZONG L B. *Microstructure Control of Yttrium-based Oxides Host Materials and Their Enhanced Effect on Luminescence Properties* [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017. (in Chinese)
- [ 13 ] PETERMANN K,HUBER G,FORNASIERO L, *et al.* Rare-earth-doped sesquioxides [J]. *J. Lumin.*, 2000,87-89: 973-975.
- [ 14 ] CHEN G Z,LI S M,ZHANG L H, *et al.* Growth and spectra of  $\text{Tm}^{3+}$  doped  $\text{LuYO}_3$  single crystal for  $2\ \mu\text{m}$  lasers [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2020,109:103431.
- [ 15 ] ZHOU Z Y,GUAN X F,HUANG X X, *et al.*  $\text{Tm}^{3+}$ -doped  $\text{LuYO}_3$  mixed sesquioxide ceramic laser: effective  $2.05\ \mu\text{m}$  source operating in continuous-wave and passive  $Q$ -switching regimes [J]. *Opt. Lett.*, 2017,42(19):3781-3784.
- [ 16 ] YE L H,ZHANG J F,SHI Y. Growth and characteristics of  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$  crystal fiber for fluorescence decay temperature sensor [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006,77(5):054901-1-4.



- [17] BAO R J, YU L, YE L H, *et al.* Compact and sensitive  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped YAG single crystal optical fiber thermometry based on up-conversion luminescence [J]. *Sens. Actuators A Phys.*, 2018, 269:182-187.
- [18] HOU X R, ZHOU S M, LIN H, *et al.* Violet and blue upconversion luminescence in  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped  $\text{Y}_2\text{O}_3$  transparent ceramic [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 107(8):083101-1-4.
- [19] LI D Y, WANG Y X, ZHANG X R, *et al.* Optical temperature sensor through infrared excited blue upconversion emission in  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped  $\text{Y}_2\text{O}_3$  [J]. *Opt. Commun.*, 2012, 285(7):1925-1928.
- [20] POLLNAU M, GAMELIN D R, LÜTHI S R, *et al.* Power dependence of upconversion luminescence in lanthanide and transition-metal-ion systems [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, 61(5):3337-3346.
- [21] DONG H, SUN L D, YAN C H. Energy transfer in lanthanide upconversion studies for extended optical applications [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, 44(6):1608-1634.
- [22] 李瑞琴, 邱建备, 杨正文, 等.  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  共掺杂  $\text{Sb}_2\text{O}_4$  荧光粉的制备及上转换发光性质研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(3):630-633.  
LI R Q, QIU J B, YANG Z W, *et al.* Preparation and up-conversion luminescence properties of  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  co-doped  $\text{Sb}_2\text{O}_4$  powder [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 2014, 34(3):630-633. (in Chinese)
- [23] ZHANG Z H, LOUCHET-CHAUVET A, MORVAN L, *et al.* Tailoring the  $^3\text{F}_4$  level lifetime in  $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  by  $\text{Eu}^{3+}$  co-doping for signal processing application [J]. *J. Lumin.*, 2020, 222:117107.
- [24] 李路, 娄朝刚, 谢宇飞.  $\text{Ce}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  共掺 YAG 荧光粉量子剪裁发光的浓度及温度特性 [J]. *发光学报*, 2016, 37(12):1445-1450.  
LI L, LOU C G, XIE Y F. Concentration and temperature characteristics of quantum cutting luminescence in  $\text{Ce}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  co-doped YAG phosphor [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(12):1445-1450. (in Chinese)
- [25] 林燕金, 黄衍堂, 吴锦树, 等. 稀土荧光特性与温度关系 [J]. *光子学报*, 2016, 45(1):0116002-1-6.  
LIN Y J, HUANG Y T, WU J S, *et al.* Relationship between rare earth fluorescence characteristic and temperature [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(1):0116002-1-6. (in Chinese)
- [26] 芦泓宇. 基于稀土掺杂上转换材料荧光峰值比的温度传感 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
LU H Y. *Temperature Sensing of Rare Earth Doped Upconversion Materials based on Fluorescence Intensity Ratio Technique* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [27] 赵旺, 平兆艳, 郑庆华, 等. 白光发光二极管用  $\text{SrGdLiTeO}_6:\text{Eu}^{3+}$  红色荧光粉的浓度猝灭和温度猝灭行为 [J]. *物理学报*, 2018, 67(24):247801-1-10.  
ZHAO W, PING Z Y, ZHENG Q H, *et al.* Concentration and thermal quenching of  $\text{SrGdLiTeO}_6:\text{Eu}^{3+}$  red-emitting phosphor for white light-emitting diode [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2018, 67(24):247801-1-10. (in Chinese)
- [28] MIN Q H, BIAN W J, QI Y S, *et al.* Temperature sensing based on the up-conversion emission of  $\text{Tm}^{3+}$  in a single  $\text{KLuF}_4$  microcrystal [J]. *J. Alloys Compd.*, 2017, 728:1037-1042.
- [29] TONG L L, LI X P, HUA R N, *et al.* Optical temperature sensing properties of  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  co-doped  $\text{NaLuF}_4$  crystals [J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2017, 17(7):999-1004.
- [30] LIU Z H, LONG S W, ZHU Y Z, *et al.* Optical thermometry based on thermolabile intrinsic polarons in  $\text{Tm}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  co-doped congruent lithium niobate single crystal [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 867:158986.
- [31] GE W Y, XU M M, SHI J D, *et al.* Highly temperature-sensitive and blue upconversion luminescence properties of  $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  nanofibers by electrospinning [J]. *Chem. Eng. J.*, 2020, 391:123546.
- [32] ZHANG N, ZHOU H L, YIN Y R, *et al.* Exploring promising up-conversion luminescence single crystal fiber in sesquioxide family for high temperature optical thermometry application [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 889:161348.
- [33] SUO H, GUO C F, YANG Z, *et al.* Thermometric and optical heating bi-functional properties of upconversion phosphor  $\text{Ba}_3\text{Gd}_8\text{Zn}_4\text{O}_{21}:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3(28):7379-7385.
- [34] SUO H, HU F F, ZHAO X Q, *et al.* All-in-one thermometer-heater up-converting platform  $\text{YF}_3:\text{Yb}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$  operating in the first biological window [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(6):1501-1507.
- [35] ZHOU S S, JIANG G C, LI X Y, *et al.* Strategy for thermometry via  $\text{Tm}^{3+}$ -doped  $\text{NaYF}_4$  core-shell nanoparticles [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(23):6687-6690.



张志宏(1976-),女,辽宁沈阳人,硕士,高级工程师,2017年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事航空发动机试验温度、压力等参数测试技术的研究。

E-mail: jyz\_18@163.com



张雁(1994-),女,四川绵阳人,硕士,助理工程师,2020年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事航空发动机整机试验技术的研究。

E-mail: 1015329361@qq.com



周慧丽(1996-),女,浙江金华人,博士研究生,2017年于浙江外国语学院获得学士学位,主要从事稀土离子掺杂荧光材料温度传感特性的研究。

E-mail: 21836046@zju.edu.cn



叶林华(1965-),男,浙江宁海人,博士,副教授,2006年于浙江大学获得博士学位,主要从事高温氧化物单晶光纤材料制备及其应用的研究。

E-mail: lhye@zju.edu.cn