

基于 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 实现高灵敏度的双模式光学测温

相国涛*, 易园园, 张 羽, 熊 明, 徐秦玉, 陈红豆, 常 瑛, 姚 璐*
(重庆邮电大学 理学院, 重庆 400065)

摘要: 研发具有近红外二区测温功能的光学温度计在生物医疗领域具有十分重要的实际应用价值。为此, 本文基于高温固相法合成了 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 上转换发光材料, 该材料在绿光区和近红外二区均表现出较强的发光强度。在绿光区, 基于 Er^{3+} 的 ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁进行荧光强度比光学测温, 其最佳的绝对灵敏度、相对灵敏度和温度分辨率可分别达到 $1.7\% \text{ K}^{-1}$ 、 $1.2\% \text{ K}^{-1}$ 和 0.027 K ; 在近红外二区, 基于 $\text{Er}^{3+}: {}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁的 Stark 劈裂所进行的光学测温, 其最佳的绝对灵敏度、相对灵敏度和温度分辨率分别为 $3.01\% \text{ K}^{-1}$ 、 $0.59\% \text{ K}^{-1}$ 和 0.06 K 。更为重要的是, 在生理温度范围内, 以上两种光学温度计均表现出较高的测温准确性。所有的数据均表明, $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 是一种优异的光学测温材料, 可在可见区和近红外二区实现高灵敏度的双模式光学测温。

关键词: 稀土离子; 上转换发光; 光学测温; 荧光强度比

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20240082

Dual-mode optical thermometry with high sensitivity achieved in $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$

XIANG Guo-tao*, YI Yuan-yuan, ZHANG Yu, XIONG Ming, XU Qin-yu, CHEN Hong-dou,
CHANG Ying, YAO Lu*

(Department of Mathematics and Physics, Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2 Chongwen Road, Chongqing 400065, China)

* Corresponding Authors, E-mail: xianggt@cqupt.edu.cn

Abstract: The development of optical thermometers with temperature measurement capabilities in near-infrared II (NIR-II) region holds significant practical value in the biomedical field. In this paper, $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ up-conversion (UC) material is synthesized by the high-temperature solid-state method, exhibiting strong luminescence in both green and NIR-II region. In green region, optical thermometry based on the fluorescence intensity ratio (FIR) of $\text{Er}^{3+}: {}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ and ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ transition achieves optimal absolute sensitivity (S_A), relative sensitivity (S_R) and temperature resolution (δT) of $1.7\% \text{ K}^{-1}$, $1.2\% \text{ K}^{-1}$ and 0.027 K , respectively. In NIR-II region, optical thermometry based on the Stark splitting of $\text{Er}^{3+}: {}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ transition exhibits optimal S_A , S_R and δT of $3.01\% \text{ K}^{-1}$, $0.59\% \text{ K}^{-1}$ and 0.06 K , respectively. More importantly, both of the two optical thermometers show high accuracy for temperature measurement within the physiological temperature range. All data indicate that $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ is an excellent luminescence material with the ability of high-sensitivity dual-mode optical thermometry in the visible and NIR region.

Key words: rare earth ions; upconversion luminescence; optical thermometry; fluorescence intensity ratio

收稿日期: 2024-04-08; 修订日期: 2024-04-09

基金项目: 国家自然科学基金 (11704054); 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2022NSCQ-MSX0366, cstc2021jcyj-msxmX0578); 重庆邮电大学大学生创新创业训练计划 (X20231061706031) 资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China (11704054); Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2022NSCQ-MSX0366, cstc2021jcyj-msxmX0578); Undergraduate Innovation and Entrepreneurship Training Plan Program of Chongqing University of Posts and Telecommunications (X20231061706031)

1 引 言

随着医疗技术的不断发展和进步,如何在生物体内实现精准的局部温度监测已成为科学研究的热点问题。传统的侵入式测温方式,不但对人体组织有损伤,而且还存在监测范围不足、易受电磁波影响等缺点,无法满足现代医疗的实际需求^[1-3]。与其相比,基于稀土上转换发光(UC)材料进行的荧光强度比(FIR)光学测温技术,则具有非接触、空间分辨率高、响应速度快、抗干性扰强等优点^[4-7]。同时,该类材料还具有发射带宽窄、激发态寿命长、光致稳定性强、自发荧光弱、生物适用性好等特点,从而使其有望在生物组织中实现高灵敏度的光学温度感测^[8-10]。

目前的FIR型光学温度计多以 $\text{Er}^{3+}: {}^2\text{H}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2}$ 作为测温能级,利用二者之间强的热耦合性,建立FIR与温度之间的函数关系,进而实现温度探测^[11-14]。然而, $\text{Er}^{3+}: {}^2\text{H}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2}$ 能级均为绿光发射,发光波长未在生物窗之内(650 ~ 1700 nm),造成该类光学温度计在生物体内的穿透深度不足,无法进行实际应用^[15-16]。实际上,在 Yb^{3+} 离子敏化下, Er^{3+} 离子在近红外二区(NIR-II, 1000 ~ 1700 nm)范围内存在较强的 ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁,并且该发射峰中包含了多个热耦合的Stark亚能级。若基于以上Stark亚能级的FIR进行测温,将有望拓展FIR型光学温度计在生物组织中的探测深度^[17-19]。

鉴于此,在本文中使用高温固相法合成了 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 荧光粉,并且详细研究了其在绿光区及近红外二区的FIR光学测温性能。

2 实 验

2.1 化学试剂

Na_2CO_3 (99.8%)和 NH_4VO_3 (99.95%)由重庆川东化工有限公司提供, Y_2O_3 (99.99%)、 Yb_2O_3 (99.99%)和 Er_2O_3 (99.99%)由国药集团化学试剂有限公司提供。所有化学试剂均直接作为原料使用,未经过进一步提纯。

2.2 制备 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$

本实验采用高温固相法合成 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 荧光粉,具体步骤如下:按照化学计量比称量 Na_2CO_3 、 NH_4VO_3 、 Y_2O_3 、 Yb_2O_3 和 Er_2O_3 ,并在玛瑙研钵中研磨45分钟,使其混合均匀。接下来,在1000℃的箱式炉中烧结6小时后,

自然冷却至室温,制得样品。

2.3 样品表征

Press XD-2衍射仪用于采集样品的X射线衍射(XRD)数据。光谱数据则使用爱丁堡仪器公司的FLS1000光谱仪进行采集,并配备了980 nm激光作为激发光源。样品的温度由英国林曼克公司生产的HFS600E-PB2型冷热台进行调控。

3 结果与讨论

3.1 物相分析

如图1所示,在 10° 到 80° 范围内, $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 荧光粉的XRD图谱与 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2$ 的标准卡片(PDF#7-0257)相符,且未发现其它杂相的存在,表明 Yb^{3+} 和 Er^{3+} 均已成功地进入 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2$ 晶格中,形成了固溶体结构。

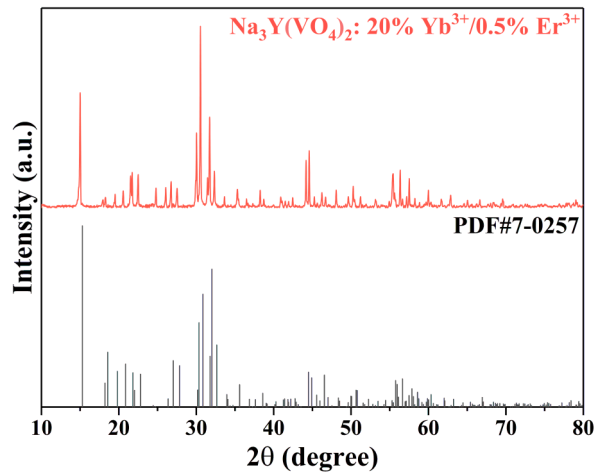


图1 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 的XRD图谱及 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2$ 的标准卡片。

Fig. 1 XRD patterns of $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ along with the corresponding standard card.

3.2 上转换发光性质

图2(a)为 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 在980 nm激发下的上转换发射光谱。从图中可以看出,在500 ~ 700 nm范围内存在三个明显的发射峰,分别为位于525 nm处的 $\text{Er}^{3+}: {}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 绿光跃迁、位于553 nm处的 $\text{Er}^{3+}: {}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 绿光跃迁及位于660 nm处的 $\text{Er}^{3+}: {}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 红光跃迁。与此同时,在1425 ~ 1650 nm范围内还存在较强的 $\text{Er}^{3+}: {}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁,其峰值位于1543 nm处,如图2(b)所示。

在上转换发光过程中,发光强度(I)与激发功率密度(P)之间存在如下关系:

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

其中 n 表示发射一个高能光子所需吸收的近红外光子数, 可由二者间的双对数曲线斜率获得。如图 2(c) 所示, 在 $\text{Er}^{3+}: {}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 、 $\text{Er}^{3+}: {}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 和 ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁的强度与 P 之间双对数曲线中, 直线斜率均为 1.4 左右, 表明 Er^{3+} 的绿光和红光发射均是双光子上转换过程。

图 2(d) 中展示了 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 在 980 nm 激发下的能级跃迁情况。由于 Yb^{3+} 在 980 nm 附近具有较大的吸收截面, 因此近红外光子主要被 Yb^{3+} 吸收, 从而使其布

居至激发态能级 ${}^2\text{F}_{5/2}$ 。随后, 处于基态的 Er^{3+} 通过接收 Yb^{3+} 的能量而跃迁至 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级 (能量传递过程 1, ET1)。在 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级的 Er^{3+} 离子既可以通过 ET2 过程实现绿光能级 ${}^2\text{H}_{11/2}/{}^4\text{S}_{3/2}$ 的布居, 也可以无辐射弛豫至 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级, 进而实现近红外发光。同时, 处于 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级的 Er^{3+} 离子还可以进一步通过 ET3 过程完成红光能级 ${}^4\text{F}_{9/2}$ 的布居, 实现红光发射。另外, 处于 ${}^4\text{S}_{3/2}$ 能级的 Er^{3+} 离子也可以通过无辐射弛豫过程实现 ${}^4\text{F}_{9/2}$ 能级的布居。

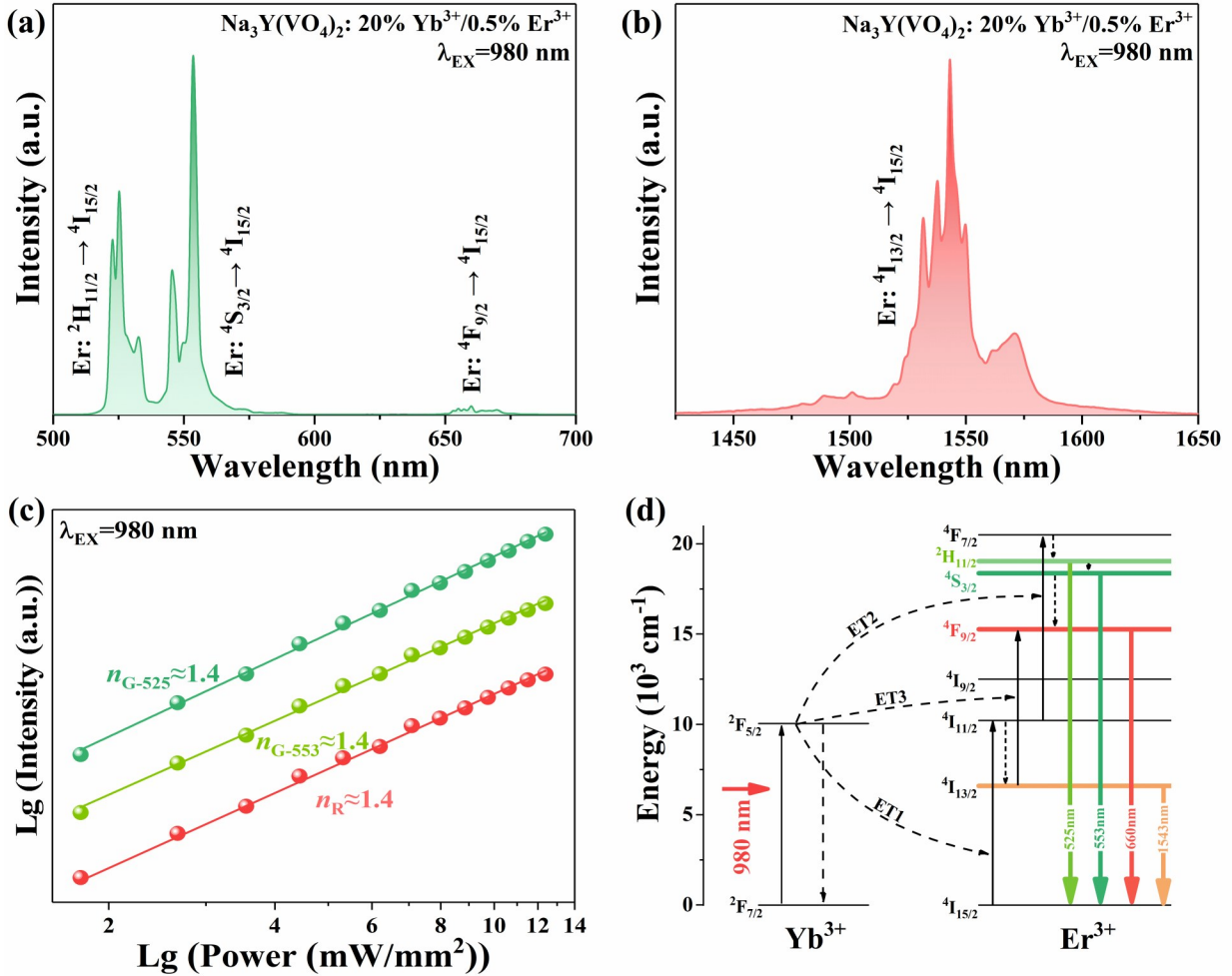


图 2 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 的 (a) 上转换发射光谱和 (b) 近红外发射光谱; (c) $\text{Er}^{3+}: {}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 、 ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 和 $\text{Er}^{3+}: {}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁与激发功率密度的双对数曲线; (d) 980 nm 激发下, $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 共掺杂体系中的能级跃迁过程。

Fig. 2 (a) UC and (b) NIR emission of $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$. (c) The power dependence curves of $\text{Er}^{3+}: {}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ and ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ transition. (d) Possible ET mechanism in the $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped system under 980 nm excitation.

3.3 光学测温性质

图 3(a) 为 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 在 298 ~ 573 K 范围内的上转换发光光谱, 其强度在 553 nm 处进行了归一化处理。明显地, 随着温度的升高, 绿光发射带的位置未发生移动, 但

是 ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁的强度相较于 ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁明显增强, 这使得二者的 FIR 具有了温度响应的特性。实际上, $\text{Er}^{3+}: {}^2\text{H}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2}$ 能级的热耦合属性, 使其 FIR 满足玻尔兹曼分布规律:

$$\text{FIR} = I_{\text{up}}/I_{\text{low}} = B \cdot \exp(-\Delta E/k_B T), \quad (2)$$

其中 I_{up} 和 I_{low} 分别代表上能级和下能级的发射强度, ΔE 为能级差, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, B 为与温度无关的常数^[12]。如图 3(b) 所示, 基于公式(2)进行拟合, 即可得到 ${}^2\text{H}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2}$ 能级之

间的 FIR_G 随温度变化的关系:

$$FIR_G = I_{525}/I_{553} = 34.4 \cdot \exp(-1083.2/T)。 \quad (3)$$

基于上式, 计算出 ${}^2\text{H}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2}$ 能级之间的 ΔE 约为 754 cm^{-1} 。

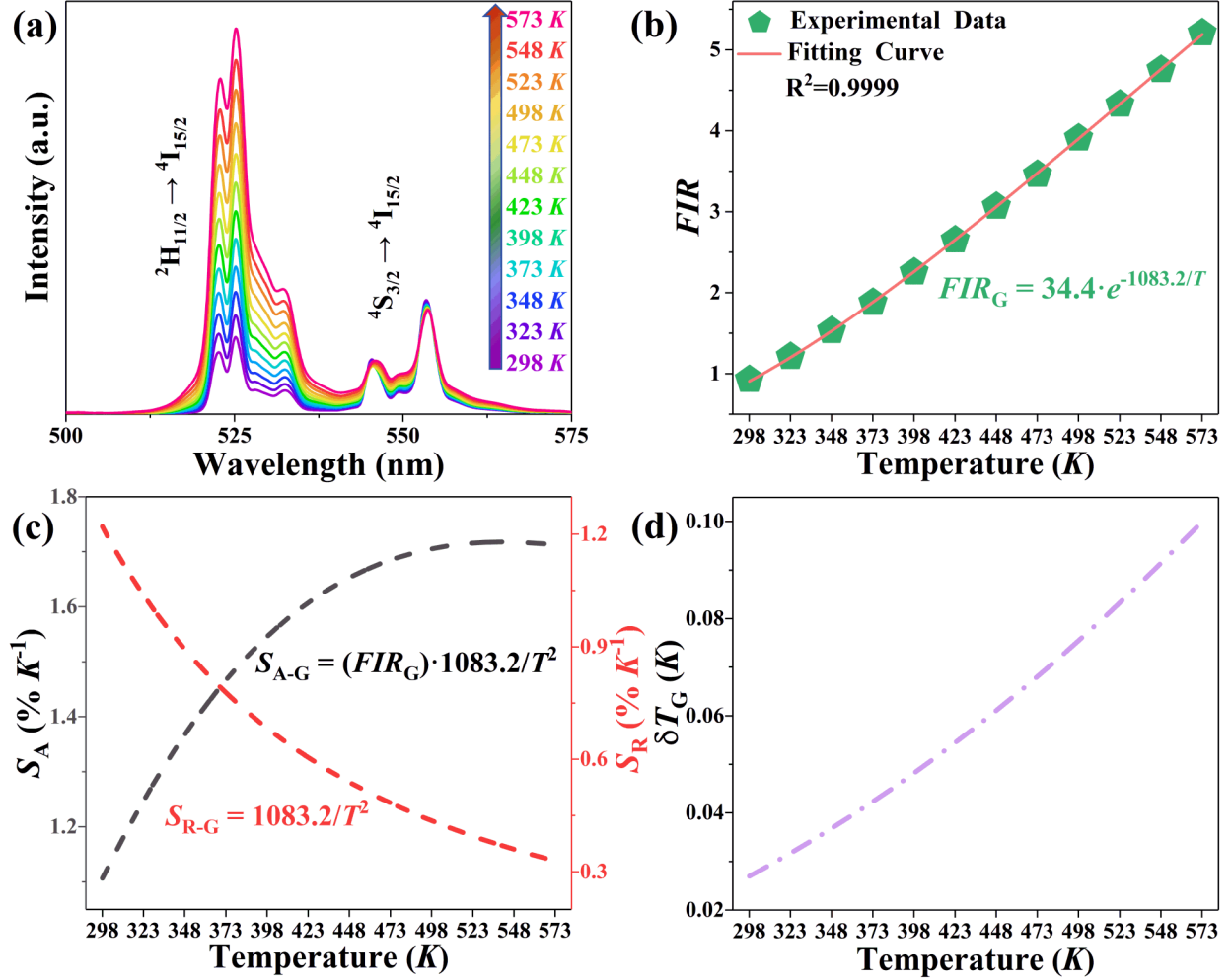


图 3 (a)980 nm 激发, $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 的绿光变温光谱; 样品的 (b) 荧光强度比 FIR_G 、(c) 绝对灵敏度 S_{A-G} 和相对灵敏度 S_{R-G} 及 (d) 测温分辨率 δT_G 的温度依赖关系。

Fig. 3 (a) The green UC emission of the sample at various temperature under the excitation of 980 nm wavelength. Temperature-dependent of (b) FIR_G , (c) absolute sensitivity S_{A-G} and relative sensitivity S_{R-G} as well as (d) temperature resolution δT_G .

样品光学测温的表现可以通过其测温的绝对灵敏度 S_A 和相对灵敏度 S_R 进行评价:

$$S_A = |d(FIR)/dT|, \quad (4)$$

$$S_R = |d(FIR)/(FIR) \cdot dT|. \quad (5)$$

如图 3(c) 所示, 随着温度的升高, 样品的 S_{A-G} 数值逐渐增大; 相反地, 其 S_{R-G} 在初始温度 298 K 时达到最大值 $1.2\% K^{-1}$, 随后持续降低。此外, 测温分辨率 δT 也是光学温度计的一项重要指标, 可以通过以下公式进行计算:

$$\delta T = (\delta FIR/FIR) \cdot (1/S_R)。 \quad (6)$$

其中 $\delta FIR/FIR$ 为 FIR 的相对不确定度, 其数值大小主要取决于光谱测试设备的精度, 本实验中该数值约为 0.033% 。图 3(d) 中给出了 FIR_G 光学温度计的 δT_G 的温度依赖关系曲线, δT_G 的数值随温度升高而增大, 其最小值位于初始温度 298 K, 为 0.027 K 。值得一提的是, 在整个温度测试范围内, δT_G 的数值始终低于 0.1 K , 表现出良好的测温分辨能力。

随后, 我们还测试了样品在 NIR 区的变温光谱。如图 4(a) 所示, 样品在 $1500 \sim 1600 \text{ nm}$ 范围

内具有较强的 $\text{Er}^{3+}: {}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁, 并且受晶场环境影响, 在此发射带内出现了 5 个热耦合的 Stark 跃迁。在对 1569 nm 处的跃迁强度进行归一化处理后, 可以明显地看出其余 4 个 Stark 跃迁的相对强度随温度升高而出现规律性的变化。此处, 我们以最强的、处于 1543 nm 处的 Stark 跃迁为研究对象, 根据公式 (2) 进行拟合, 可以得到其与 1569 nm 处的 Stark 跃迁的强度比的温度依赖

关系 (如图 4(b) 所示)^[20]:

$$FIR_N = I_{1543}/I_{1569} = 0.9 \cdot \exp(-522.8/T)。 \quad (7)$$

图 4(c) 和 (d) 给出了 S_{A-N} 、 S_{R-N} 和 δT_N 的温度依赖关系。在测试温度范围内, S_{A-N} 和 S_{R-N} 的数值均随温度的升高而减小, 二者的最大值分别为 $3.01\% \text{ K}^{-1}$ 和 $0.59\% \text{ K}^{-1}$ 。另外, FIR_N 的测温分辨率 δT_N 随温度升高而增大, 其最小值 0.06 K 出现于初始温度 298 K 时。

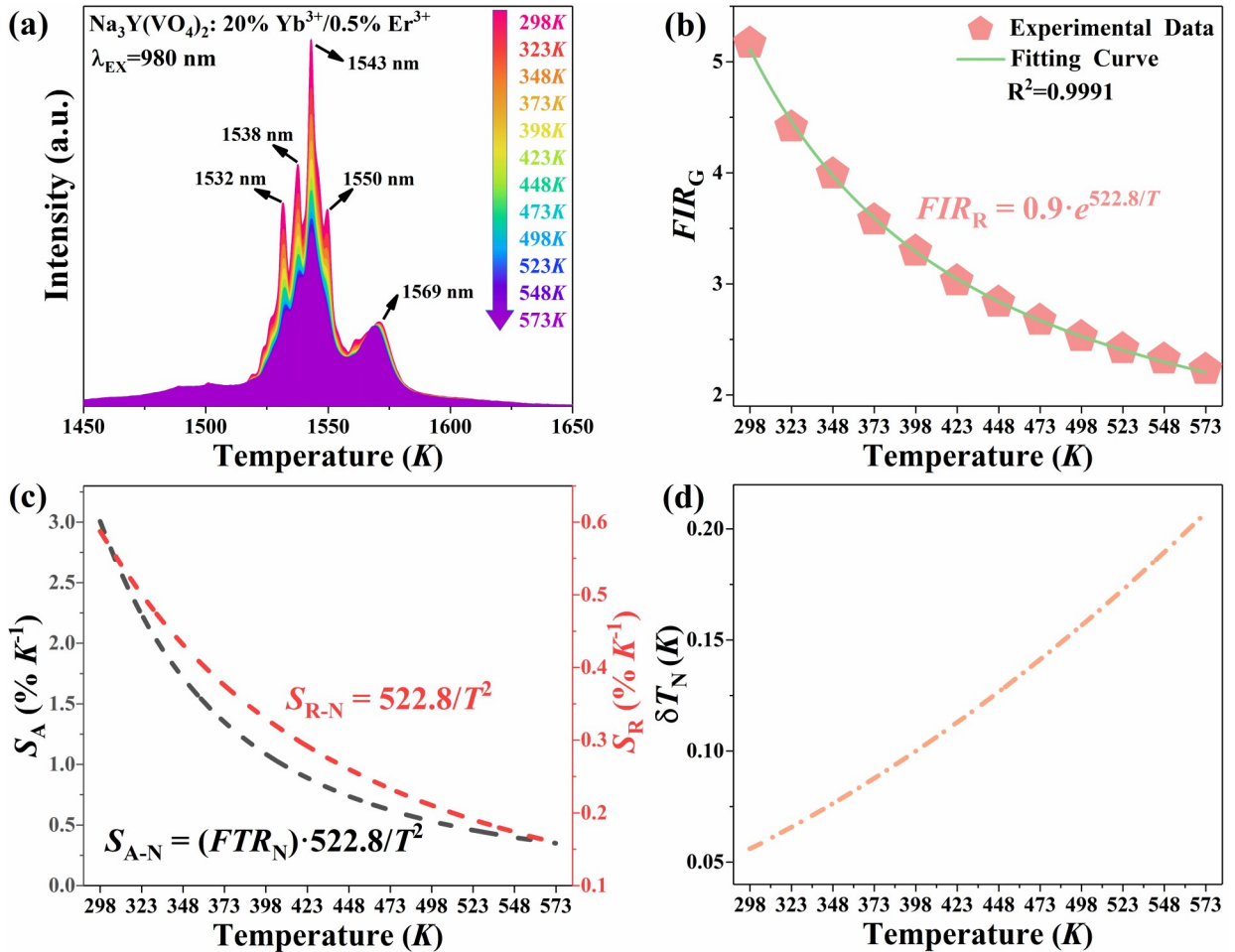


图 4 (a) 980 nm 激发, $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 的近红外变温光谱; 样品的 (b) FIR_N 、(c) S_{A-N} 和 S_{R-N} 及 (d) δT_N 的温度依赖关系。

Fig. 4 (a) The NIR emission of the sample at various temperature under the excitation of 980 nm wavelength. Temperature-dependent of (b) FIR_N , (c) S_{A-N} and S_{R-N} as well as (d) δT_N .

为了进一步地评定 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: 20\% \text{Yb}^{3+}/0.5\% \text{Er}^{3+}$ 测温的准确性, 我们对样品进行了加热处理, 随后运用 FIR 技术测试样品的温度, 同时使用商用的红外测温仪对其测试结果进行验证。如图 5 所示, 基于 FIR_C 和 FIR_N 所测得的温度与红外测温仪所测的温度数值 (Actual Temperature) 较为相近, 尤其是在生理温度范围 ($303 \sim 348 \text{ K}$, 即 $30 \sim 75^\circ\text{C}$) 内符合的更好^[21]。由此可见, 该样品不但

具有较高的测温准确性, 而且其在生理温区内具有十分优异的测温表现。

4 结 论

本文利用高温固相法合成了 $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2: \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 荧光粉, 该荧光粉在绿光区及近红外二区均表现出较好的测温性能。其中, 基于 $\text{Er}^{3+}: {}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 绿光跃迁进行的 FIR_C

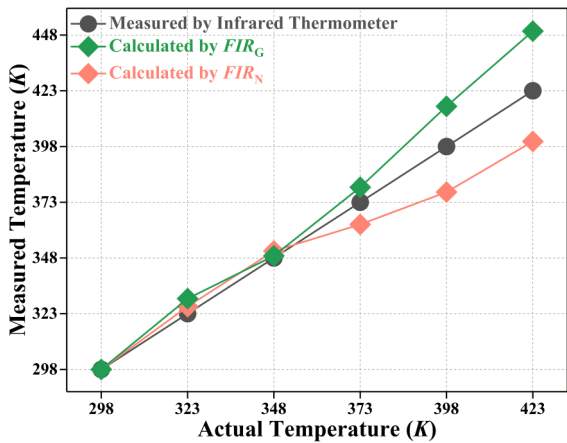


图5 分别使用 FIR 技术和商用的红外测温仪测试样品的温度。

Fig. 5 Sample temperature tested using FIR technology and a commercial infrared thermometer respectively.

测温,其最大 S_{A-G} 和 S_{R-G} 及最佳 δT_G 可分别达到 $1.7\% K^{-1}$ 、 $1.2\% K^{-1}$ 和 $0.027 K$;在近红外二区,基于 $Er^{3+}: ^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁的 Stark 劈裂所进行的 FIR_N 测温,其最佳的 S_{A-N} 、 S_{R-N} 和 δT_N 分别为 $3.01\% K^{-1}$ 、 $0.59\% K^{-1}$ 和 $0.06 K$ 。与此同时,在测温准确性验证实验中, FIR_C 和 FIR_N 均表现出较好的测温性能,尤其是在生理温度范围内。以上结果表明,在 $Na_3Y(VO_4)_2: Yb^{3+}/Er^{3+}$ 中可实现高灵敏度的双模式光学测温,且其在生物医疗领域具有较好的应用前景。

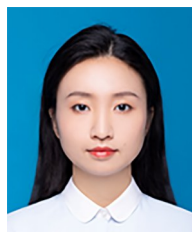
参 考 文 献:

- [1] SAIDI K, DAMMAK M, SOLER-CARRACEDO K, *et al.* Optical thermometry based on upconversion emissions in $Na_3Gd(VO_4)_2: Yb^{3+}-Er^{3+}/Ho^{3+}$ micro crystals[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 891: 161993.
- [2] XU L, LIU J, PEI L, *et al.* Enhanced up-conversion luminescence and optical temperature sensing in graphitic C_3N_4 quantum dots grafted with $BaWO_4: Yb^{3+}, Er^{3+}$ phosphors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(20): 6112-6119.
- [3] WANG Z, CHRISTIANSEN J, WEZENDONK D, *et al.* Thermal enhancement and quenching of upconversion emission in nanocrystals[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(25): 12188-12197.
- [4] 张焕君,董兴邦,李海宁,等. 六方相 $LaOF: Er, Yb$ 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- $LaOF: Er, Yb$ [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(5): 536-541.
- [5] ZHANG J, HAO Z, LI J, *et al.* Observation of efficient population of the red-emitting state from the green state by non-multiphonon relaxation in the $Er^{3+}-Yb^{3+}$ system[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(1): e239-e239.
- [6] 李洋洋,李鑫,周昊,等. 白色荧光粉 $CaF_2: Yb^{3+}/Eu^{3+}/La^{3+}$ 的制备及其上转换发光特性[J]. *发光学报*, 2020, 41(2): 153-159.
LI Y Y, LI X, ZHOU H, *et al.* Synthesis and Upconversion Luminescence Properties of White Phosphor $CaF_2: Yb^{3+}/Eu^{3+}/La^{3+}$ [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(2): 153-159.
- [7] WANG Z, JIAO H, FU Z, *et al.* Investigating the luminescence behaviors and temperature sensing properties of rare-earth-doped $Ba_2In_2O_3$ phosphors[J]. *Inorganic chemistry*, 2018, 57(15): 8841-8849.
- [8] 相国涛,刘小桐,夏清,等. $\beta-NaYF_4: Yb^{3+}/Er^{3+}@\beta-NaYF_4: Yb^{3+}$ 的上转换发光特性[J]. *发光学报*, 2020, 41(6): 679-683.
XIANG G T, LIU X T, XIA Q, *et al.* Upconversion luminescence properties of $\beta-NaYF_4: Yb^{3+}/Er^{3+}@\beta-NaYF_4: Yb^{3+}$ [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(6): 679-683. (in Chinese)
- [9] 金叶,李坤,罗旭,等. $Sc_2(WO_4)_3: Er^{3+}/Yb^{3+}$ 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 $Sc_2(WO_4)_3: Er^{3+}/Yb^{3+}$ [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(1): 91-97.
- [10] SUN J, ZHANG Z, SUO H, *et al.* Temperature self-monitoring photothermal nano-particles of Er^{3+}/Yb^{3+} Co-doped zircon-tetragonal $BiVO_4$ [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(1): 409-415.
- [11] 王雪,兰民,杨怡舟,等. Cu^{2+} 离子共掺杂的 $\beta-NaYF_4: Yb^{3+}, Er^{3+}$ 晶体的制备与上转换发光性能的提高[J]. *发光学*

- 报, 2018, 39(8): 1082-1086.
- WANG X, LAN M, YANG Y Z, *et al.* Synthesis and Enhanced Upconversion Optical Properties of Cu^{2+} Ion Doped β - NaYF_4 : Yb^{3+} , Er^{3+} Crystals[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(8): 1082-1086.
- [12] XIANG G T, XIA Q, XU S, *et al.* Multipath optical thermometry realized in CaSc_2O_4 : $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ with high sensitivity and superior resolution[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, 104(6): 2711-2720.
- [13] 祝冰心, 朱肖, 王磊, 等. $\text{Ca}_2\text{MgTeO}_6$: Bi^{3+} , Mn^{4+} 材料的发光性能和温度探测研究[J]. 发光学报, 2024, 1-12.
- ZHU B, ZHU X, WANG L, *et al.* Luminescent properties and temperature sensing of $\text{Ca}_2\text{MgTeO}_6$: Bi^{3+} , Mn^{4+} phosphors [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2024, 1-12.
- [14] SUO H, ZHAO X, ZHANG Z, *et al.* Local symmetric distortion boosted photon up-conversion and thermometric sensitivity in lanthanum oxide nanospheres[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(19): 9245-9251.
- [15] WANG X, WANG Y, BU Y, *et al.* Influence of doping and excitation powers on optical thermometry in Yb^{3+} - Er^{3+} doped CaWO_4 [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 43383.
- [16] DU P, LUO L, PARK H K, *et al.* Citric-assisted sol-gel based $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped $\text{Na}_{0.5}\text{Gd}_{0.5}\text{MoO}_4$: A novel highly-efficient infrared-to-visible upconversion material for optical temperature sensors and optical heaters[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 306: 840-848.
- [17] SHI Y, YANG F, ZHAO C, *et al.* Highly sensitive up-conversion thermometric performance in Nd^{3+} and Yb^{3+} sensitized $\text{Ba}_4\text{La}_2\text{Ti}_4\text{Nb}_6\text{O}_{30}$ based on near-infrared emissions[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2019, 124: 130-136.
- [18] ȘTEFAN A, TOMA O, GEORGESCU Ș. Upconversion luminescence in CaSc_2O_4 doped with Er^{3+} and Yb^{3+} [J]. *Journal of Luminescence*, 2016, 180: 376-383.
- [19] ZHANG Z, JAYAKUMAR M K G, SHUKHA S, *et al.* Modularly assembled upconversion nanoparticles for orthogonally controlled cell imaging and drug delivery[J]. *ACS applied . materials & interfaces.*, 2020, 12(11): 12549-12556.
- [20] WU H, HAO Z, ZHANG L, *et al.* $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped phosphor $\text{Ba}_3\text{Y}_4\text{O}_9$ with intense red upconversion emission and optical temperature sensing behavior[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(13): 3459-3467.
- [21] SUTA M, ANTIĆ Ž, ĐORĐEVIĆ V, *et al.* Making Nd^{3+} a sensitive luminescent thermometer for physiological temperatures-an account of pitfalls in Boltzmann thermometry[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(3): 543.



相国涛(1988—),男,黑龙江佳木斯人,博士研究生,副教授,2016年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事稀土上转换发光材料的研究。
E-mail: xianggt@cqupt.edu.cn



姚璐(1990—),女,陕西宝鸡人,博士研究生,副教授,2020年于重庆大学获得博士学位,主要从事新型功能材料的开发研究。
E-mail: yaolu@cqupt.edu.cn