

Dy³⁺掺杂 Y-Al-O 体系荧光材料的光学测温性能研究

范锦珑¹, 孙鹏¹, 高九萍², 崔鑫³, 范东杰¹, 蔡静⁴, 温悦⁴, 李建民¹, 王高^{1*}

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051; 2. 山西风雷钻具有限公司, 山西 临汾 043000;
3. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 4. 北京长城计量测试研究所, 北京 100095)

摘要: 温敏荧光材料因其非侵入式/半侵入式的光学特性, 以及优异的抗干扰性能, 表现出卓越的温度传感潜力。其中, Dy³⁺掺杂的 Y-Al-O 体系荧光材料以其出色的发光效率与合适的热耦合能级而备受关注。通过高温固相法合成 Dy³⁺掺杂 Y-Al-O 体系荧光粉, 使用 X 射线衍射技术表征了材料物相成分, 结合荧光分光光度计测试了材料激发光谱与发射光谱特性, 系统分析了其温度敏感特性。结果表明, 提高材料烧结温度会促进 Y₃Al₅O₁₂(YAG)相的生成, 增强材料发光效率和测温性能。1600 °C 下合成的荧光粉中 YAG 物相含量高达 97.8%, 在 100~1300 °C 的测试温度范围内最大绝对灵敏度和相对灵敏度分别达到了 1.7×10⁻³ °C⁻¹ 和 3.8×10⁻³ %°C⁻¹。与热电偶测量结果相比, 最大相对测量误差仅为 0.5%。这些研究凸显了 Dy³⁺掺杂 Y-Al-O 体系荧光粉在各种工业和科学应用中进行温度监测的潜在价值。

关键词: 温敏特性; 荧光材料; Dy³⁺; Y-Al-O 体系

中图分类号: O482.31 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025034

引用格式: 范锦珑, 孙鹏, 高九萍, 等. Dy³⁺掺杂 Y-Al-O 体系荧光材料的光学测温性能研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(3): 276-283.

FAN Jinlong, SUN Peng, GAO Jiuping, et al. Study on Dy³⁺ phosphors doped Y-Al-O system optical temperature measuring performance[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(3): 276-283.

Study on Dy³⁺ Phosphors Doped Y-Al-O System Optical Temperature Measuring Performance

FAN Jinlong¹, SUN Peng¹, GAO Jiuping², CUI Xin³, FAN Dongjie¹, CAI Jing⁴,
WEN Yue⁴, LI Jianmin¹, WANG Gao^{1*}

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Shanxi Fenglei Drilling Tools Co., Ltd., Linfen 043000, China;
3. School of Materials Science and Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China;
4. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Thermo-sensitive fluorescent materials show excellent potential for temperature sensing due to their non-invasive/semi-invasive optical properties and excellent anti-interference performance. Among them, Dy³⁺ doped Y-Al-O system fluorescent materials have attracted much attention due to their excellent luminous efficiency and suitable thermal coupling energy levels. In this paper, Dy³⁺ doped Y-Al-O system phosphor was synthesized by the high-temperature solid phase method, and the phase composition of the material was

收稿日期: 2024-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62105305)

作者简介: 范锦珑(2000-), 男, 硕士生, 主要从事动态温度测试、荧光温度测试技术研究。E-mail: 2663088584@qq.com。

*通信作者: 王高(1973-), 男, 教授, 博士, 主要从事信息探测与处理、动态测试技术等研究。E-mail: wanggao@nuc.edu.cn。

characterized by X-ray diffraction technology. The excitation and emission spectra were systematically measured by fluorescence spectrophotometer, and the temperature-sensitive characteristics of the material were analyzed. The results show that increasing the sintering temperature can promote the formation of the Y₃Al₅O₁₂ (YAG) phase and enhance the luminescence efficiency and temperature measurement performance of the material. The content of YAG phase in the phosphor synthesized at 1 600 °C is as high as 97.8%. The maximum absolute sensitivity and the maximum relative sensitivity in the test temperature range of 100~1 300 °C are $1.7 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ and $3.8 \times 10^{-3} \text{ } \%\text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, respectively. Compared with the thermocouple measurement results, the maximum relative measurement error is only 0.5%. These studies highlight the potential value of Dy³⁺ doped Y-Al-O system phosphors for temperature monitoring in a variety of industrial and scientific applications.

Key words: temperature sensitive characteristics; fluorescent materials; Dy³⁺; Y-Al-O system

0 引言

在现代工业和科学研究中,温度的精准测量对许多应用至关重要,开发高性能的温度测量技术已经成为当今社会的重要研究领域之一。近年来,荧光测温法受到了相关领域研究人员的广泛关注^[1-3],凭借荧光材料的光致发光现象和热猝灭特性,该技术可实现高达1 700 °C的温度测量^[4]。荧光测温法的非侵入式或半侵入式光学特性、无布线需求、不受发射率影响、不改变被测物外形等诸多优势使其成为热电偶和高温计等传统测温方法的优良替代方案^[5-8]。为了满足各种测试环境,国内外学者合成了大量在不同温度区间具有不同灵敏度的荧光材料。其中,镱掺杂钇铝石榴石(YAG:Dy)以其出色的发光效率和温度敏感特性成为该领域应用最广泛的荧光材料之一^[9-10]。较高的熔点((2 213±7) K)和机械强度,以及其在蓝色波长区域的强发射光谱,使该材料尤其适合监测航空发动机涡轮叶片的表面温度^[11]。

荧光材料的制备方法包括高温固相法、共沉淀法、水热法、溶胶-凝胶法和光浮区法^[12-17]。其中,高温固相法制备过程简单、易操作,适合工业化生产。通过高温固相法合成YAG:Dy荧光材料时,Y₂O₃-Al₂O₃(Y-Al-O)二元体系可生成3个不同物相:钇铝单斜体(YAM, Y₄Al₂O₉)、钇铝钙钛矿(YAP, YAlO₃)和YAG(Y₃Al₅O₁₂)。在该体系中,YAG是唯一的稳定相,而YAM和YAP是亚稳态化合物,随着温度升高最终转化为YAG。Dy掺杂Y-Al-O体系荧光材料由于三种物相的存在,会有不同的激发光谱与发射光谱。当受到348 nm激光激发时,YAM:Dy发生⁴F_{9/2}→⁶H_{15/2}的电子跃迁,在483 nm附近表现出蓝色发射带,在室温下发光衰减寿命约为1.522 ms;当受到447 nm激光

激发时,YAP:Dy发生⁴F_{9/2}→⁶H_{13/2}电子跃迁,在572 nm附近表现出黄色发射带,室温下发光衰减寿命约为0.024 ms;当受到355 nm激光激发时,YAG:Dy也由于⁴F_{9/2}→⁶H_{15/2}电子跃迁而在490 nm附近表现出蓝色发射带,室温下发光衰减寿命约为0.870 ms。相关研究表明,Dy掺杂Y-Al-O荧光粉材料的物相组成对其光学性能和温度响应特性有显著影响。因此,研究Dy掺杂的Y-Al-O荧光粉随温度变化的发光特性,探讨其在基于荧光强度比法(Fluorescence Intensity Ratio, FIR)光学测温中的应用具有重要意义。

在前期研究中,通过高温固相法合成的YAG/YAP:Dy荧光粉材料在100~1 300 °C的温度范围内表现出良好的光学温度传感潜力^[18]。在本文中,简述了荧光测温的原理,探究了Dy³⁺掺杂Y-Al-O体系荧光粉材料在不同温度下的物相组成、光致发光(Photoluminescence, PL)和光致发光激发(Photoluminescence Excitation, PLE)特性。此外,本文系统地分析了不同物相组成的荧光材料的温度传感特性,包括灵敏度和测量误差,并进行了温度测量验证,通过与热电偶测温结果的对比分析,进一步评估了测温误差。

1 实验步骤

1.1 样品制备与表征

本文采用传统高温固相法,不添加助熔剂,在不同温度下合成了一系列荧光粉。首先,使用电子分析天平分别精确称取原材料Y₂O₃粉末(1.665 g, ≥99.999%, Aladdin)、Al₂O₃粉末(1.279 g, ≥99.99%, Aladdin)和Dy₂O₃粉末(0.056 g, ≥99.9%, Aladdin)。其次,将称量的化学材料混合,在玛瑙研

钵中手工研磨2 h以上,确保化合物混合均匀。将研磨好的材料装入氧化铝坩埚中并放置于马弗炉内,设置马弗炉升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,然后分别在 $1\ 600$ 、 $1\ 500$ 、 $1\ 400$ 、 $1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下高温烧结7 h以上,烧结完成后设置马弗炉降温速率同样为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。最后将冷却到室温的样品再次研磨2 h,得到细小白色粉末,命名为样品1、样品2、样品3、样品4。

本文使用荧光分光光度计(F-2700,日本日立)在室温下测量4个样品的PL和PLE光谱,以探究合成材料的光学特性。结合Dieke能级图,通过观察光谱分析材料的电子能级结构,了解不同能级间跃迁概率和能量差异,确定最佳激发波长并揭示不同波长下的吸收特性。荧光分光光度计的扫描速度为 $300\text{ nm}/\text{min}$,光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)电压设置为 700 V 。在测试过程中,选择 355 nm 作为激发波长, 483 nm 作为发射波长。

采用配备Cu-K α 辐射源的X射线衍射仪(Bruker-AXS/D8 ECO,德国)进行X射线衍射(XRD)测量,评估材料的结晶度、晶体结构和物相成分。仪器的运行电压为 60 kV ,电流为 60 mA 。扫描范围设置为 $5^{\circ}\sim 90^{\circ}$,扫描速度为 $1^{\circ}/\text{min}$ 。从ICSD数据库(编号280104、编号88261和编号195908)中检索YAG、YAP和YAM的结构参数。使用JADE软件定量分析4个样品的衍射峰强度。

1.2 高温测量平台

高温测量平台主要由激发装置、加热装置和信号采集装置组成。 355 nm 紫外脉冲激光器(AO-355A, CNI Laser, 中国)作为激发光源,单脉冲能量为 1.55 mJ 。井式炉(HS-GG-1 700A, 恒速电子, 中国)作为加热装置,工作温度范围为 $100\sim 1\ 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。信号采集装置包括准直透镜(焦距 50 mm ,直径 25 mm)、带通滤波器(带宽 $400\sim 700\text{ nm}$)、光纤(芯径 $200\text{ }\mu\text{m}$)和高分辨率光谱仪(AVS-DESKTOP-EVO-USB3, Avantes, 狭缝尺寸 $10\text{ }\mu\text{m}$,光谱分辨率 0.14 nm)。如图1所示,温度测量时,将装有荧光粉材料的坩埚放置在井式炉内,随后加热至预定温度;激光束通过反射导向样品,样品在激发时产生的荧光信号由准直透镜收集到石英光纤中;采用带通滤波片消除杂散光的干扰,最终由光谱仪收集荧光信号后在计算机上进行数据分析。

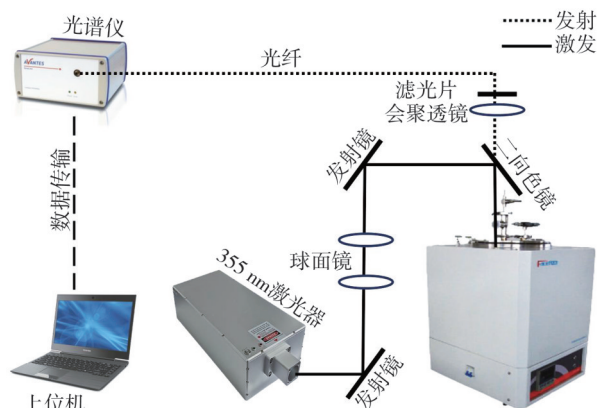


图1 温度测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the temperature measurement device

1.3 处理方法

稀土元素具有 $4f$ 电子层,由于电子互斥、自旋轨道耦合以及晶体场效应的影响, $4f$ 能级分裂成众多的光谱能级^[19]。图2为 Dy^{3+} 的能级图,显示了基态能级 ${}^6\text{H}_{15/2}$ 、 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 、 ${}^6\text{H}_{11/2}$ 、 ${}^6\text{H}_{9/2}$ 、 ${}^6\text{H}_{7/2}$ 、 ${}^6\text{H}_{5/2}$ 、 ${}^6\text{F}_{11/2}$ 、 ${}^6\text{F}_{9/2}$ 、 ${}^6\text{F}_{7/2}$ 、 ${}^6\text{F}_{5/2}$ 、 ${}^6\text{F}_{3/2}$,以及激发态能级 ${}^4\text{F}_{9/2}$ 、 ${}^4\text{F}_{7/2}$ 、 ${}^4\text{I}_{5/2}$ 、 ${}^4\text{I}_{3/2}$ 、 ${}^4\text{I}_{1/2}$ 、 ${}^4\text{G}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{K}_{15/2}$ 。在 355 nm 激励源激发下, Dy^{3+} 的内部电子经历各种非辐射跃迁后弛豫至 ${}^4\text{F}_{9/2}$,然后通过辐射跃迁回到基态,形成 Dy^{3+} 的特征发射。在发射光谱中观察到2个主要发射带:峰值波长为 497 nm 的蓝色发射带,对应于 ${}^4\text{F}_{9/2}\rightarrow{}^6\text{H}_{15/2}$ 跃迁;以及峰值波长为 583 nm 的黄色发射带,对应于 ${}^4\text{F}_{9/2}\rightarrow{}^6\text{H}_{13/2}$ 跃迁。随着温度的升高,受晶格振动和声子发射的影响,激发态电子可以直接从较高的 ${}^4\text{I}_{15/2}$ 能级发生辐射跃迁至基态,导致在高温环境下光谱中观察到 ${}^4\text{I}_{15/2}\rightarrow{}^6\text{H}_{15/2}$ 跃迁线(靠近 456 nm)。

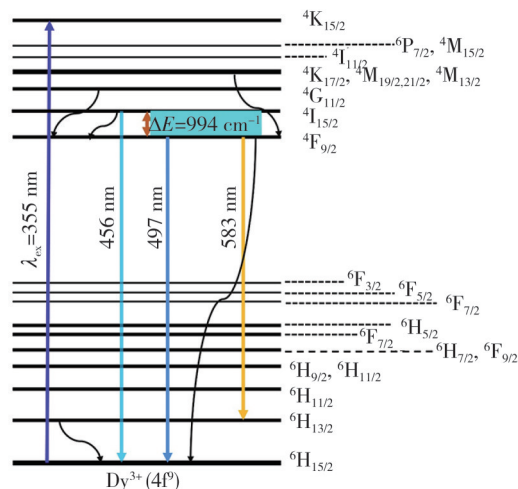


图2 Dy^{3+} 的部分能级图及部分能量传递过程

Fig. 2 Partial energy level diagram of Dy^{3+} and some energy transfer processes

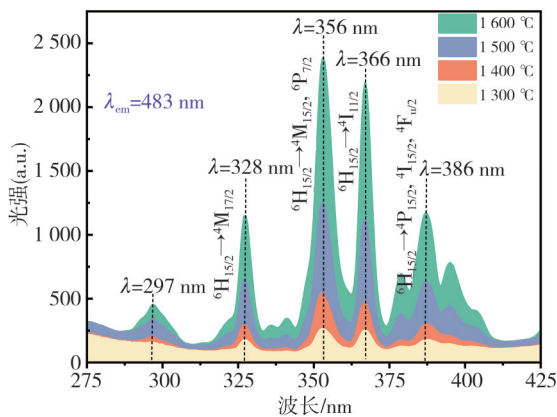
根据热力学统计,处于热耦合能级的粒子服从玻尔兹曼分布定律,发光强度与初始能级上的粒子数成正比,因此可以利用发光强度比建立与温度的定量关系。Dy³⁺的发射光谱中,波长为 456 nm 和 497 nm 的发光分别来源于粒子从⁴I_{15/2}和⁴F_{9/2}的能级跃迁,这两个能级之间的能量差(ΔE)为 994 cm⁻¹,满足热耦合能级的条件。数据处理时,将测量结果拟合为式(1),建立起发光强度比与温度的对应关系,实现温度的测量。

$$FIR = \frac{I_1}{I_2} = A \exp(-B/T) + C \exp(-D/T), \quad (1)$$

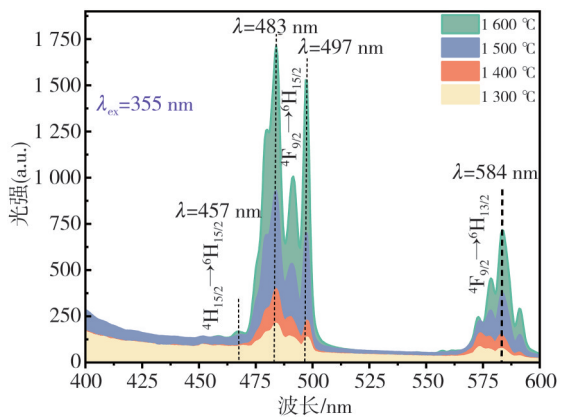
式中: I₁、I₂分别为光谱仪在 457.5、497.0 nm 处测得的荧光粉材料的光谱强度; A、B、C、D 为拟合参数。

如式(1)所示,当温度变化时,荧光强度的比值也发生变化。FIR 变化速率的大小可以表示材料温度分辨率的大小。为了评估在不同温度下合成的 Dy³⁺ 掺杂 Y-Al-O 体系荧光材料的温度传感性能,定义绝对灵敏度(S_a)和相对灵敏度(S_r)为

$$S_a = \frac{dFIR}{dT} = \frac{AB \exp(-B/T) + CD \exp(-D/T)}{T^2}, \quad (2)$$



(a) 荧光材料 PLE 光谱



(b) 荧光材料 PL 光谱

图 3 不同温度下合成的荧光粉材料的室温光谱表征

Fig. 3 Room temperature spectral characterization of phosphor materials synthesized at different temperatures

同时观察到 497 nm (⁴F_{9/2}→⁶H_{15/2})、584 nm (⁴F_{9/2}→⁶H_{13/2})的发射峰。此外,在 457 nm 附近也存在微弱的发射峰,这主要是由于⁴I_{15/2}→⁶H_{15/2}的粒子跃迁造成的。

2.2 XRD 表征

图 4 为不同温度下合成的 4 种材料样品的 XRD 图谱,尖锐的衍射峰和较窄的半峰全宽证明材料中出现了明显的布拉格衍射,说明其结晶性较好。随

$$S_r = \frac{1}{FIR} \frac{dFIR}{dT} = \frac{AB \exp(-B/T) + CD \exp(-D/T)}{T^2 [AB \exp(-B/T) + CD \exp(-D/T)]}. \quad (3)$$

为了对荧光测温结果进行误差分析,将荧光材料放入另一高温炉中重新测量荧光信号,计算两波段的强度比,利用拟合曲线推算温度,并与高温炉腔内的温度进行比较,确定测温误差。

2 结果与讨论

2.1 PL 与 PLE 光谱

使用荧光分光光度计在室温下测量荧光粉材料的 PL 和 PLE 光谱。图 3(a) 显示了 275~425 nm 范围内荧光粉材料的光致吸收光谱。所有样品在 356 nm 左右均表现出最强吸收峰,对应于粒子⁶H_{15/2}→⁶P_{7/2}跃迁。此外,在 297 nm (⁴I_{15/2}→⁴M_{13/2})、328 nm (⁶H_{15/2}→⁴M_{17/2})、366 nm (⁶H_{15/2}→⁴I_{11/2})和 386 nm (⁶H_{15/2}→⁶P_{15/2}、⁴I_{15/2}、⁴F_{7/2})附近观察到吸收峰。图 3(b) 显示了 400~600 nm 范围内荧光粉材料的 PL 谱,其中最强发射峰位于 483 nm 左右,对应于⁴F_{9/2}→⁶H_{15/2}跃迁。

着烧结温度的升高,材料的物相组成发生明显变化,如表 1 所示。经 1 300 °C 热处理后,材料中除了原料 Y₂O₃和 Al₂O₃外,还含有一定比例的 YAG、YAP 和 YAM 相。当烧结温度升高到 1 400 °C 时,不稳定的 YAM 和 Al₂O₃继续反应生成 YAP 和 YAG,导致粉末中 YAG、YAP、Y₂O₃和 Al₂O₃四相共存。经 1 500 °C 烧结后,粉末的主要成分为 YAG 相,含有少量的 YAP 和 Al₂O₃。当烧结温度升高到 1 600 °C 时,YAG 含量高达 97.8%,而 YAP 含量则降至 2.2%。

表1 物相含量比例

Tab. 1 Proportion of phase composition

温度/℃	YAG/%	YAP/%	YAM/%	Y ₂ O ₃ /%	Al ₂ O ₃ /%
1 600	97.8	2.2	0	0	0
1 500	83.9	11.5	0	0	4.6
1 400	57.0	27.3	0	14.0	1.7
1 300	28.0	13.8	22.6	11.1	24.5

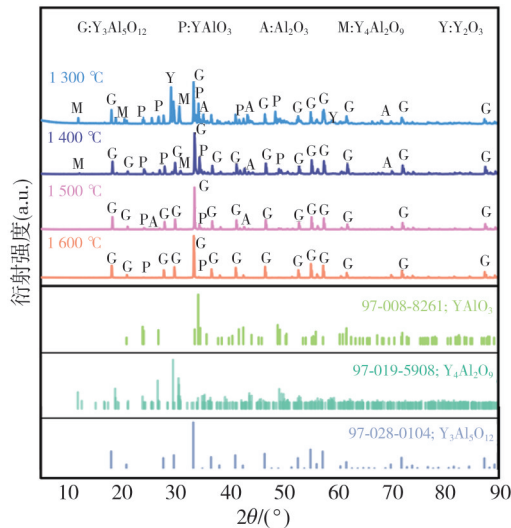
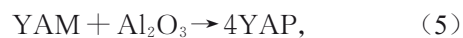


图4 荧光粉材料的XRD图谱

Fig. 4 XRD pattern of phosphor material

综上所述, Y₂O₃和Al₂O₃在高温下主要经历了3个反应: 首先形成YAM相, 然后转化为YAP相, 最终转变为YAG相。烧结温度越高, 材料中的YAG含量越高。与1 300 °C合成的材料相比, 1 600 °C合成的材料中YAG含量由28%提高到97.8%, 结合光致发光谱, 497 nm处的发光强度由3 355 a. u. 上升到48 371 a. u. (电子计数值), 这对该温敏材料用于温度测量非常有利。



2.3 发光特性

图5为荧光材料在不同温度下的光谱变化。在355 nm激光器激发下, 温度升高, 光谱表现出展宽现象。当温度从100 °C升至850 °C时, 457.5 nm处的发光强度逐渐增大, 这是由于热耦合激发态⁴F_{9/2}和⁴I_{15/2}按照玻尔兹曼分布共享电子布居所造成的。由于外界温度升高, ⁴I_{15/2}能级上的电子布居数增加, 粒子从⁴I_{15/2}直接跃迁到基态的概率增加, 故光强增强。温度超过850 °C之后, 发光强度开始下降, 这是由于热猝灭效应导致非辐

射弛豫概率显著增加, 从而减弱发光信号。在100~1 300 °C温度范围内, 497 nm处的强度随温度的升高不断下降, 这也是由于热猝灭效应^[12]。

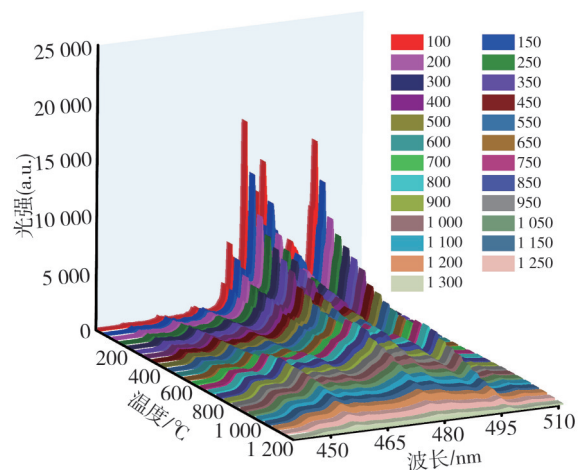


图5 1 600 °C合成的YAG: Dy荧光粉材料在100~1 300 °C温度范围内的发射光谱

Fig. 5 Emission spectra of YAG: Dy phosphor materials synthesized at 1 600 °C in the temperature range of 100~1 300 °C

2.4 强度比曲线

利用式(1), 以457.5 nm处的光强度为 I_1 , 497.0 nm处的光强度为 I_2 , 建立了100~1 300 °C范围内FIR与温度的关系。

拟合结果如图6所示, 在1 600 °C合成的材料的决定系数(R^2)为0.999 38, 在1 500 °C合成的材料的 R^2 为0.999 46, 表明这两种材料在用于测量100~1 300 °C范围内的温度时, 具有良好的指数拟合规律。然而, 当材料的烧结温度低于1 500 °C时, 测试温度数据点与其拟合曲线出现明显偏差。如图6(c)所示, 1 400 °C制备的荧光材料的 R^2 为0.997 73, 其在1 250 °C和1 300 °C测得的温度数据点与指数拟合曲线偏差较大。由图6(d)可知, 1 300 °C烧结材料的 R^2 为0.992 66, 高温下荧光强度比的多个数据点与拟合曲线存在较大偏离。综上所述, 1 600 °C和1 500 °C制备的荧光材料更适合用于100~1 300 °C范围内的温度测试。

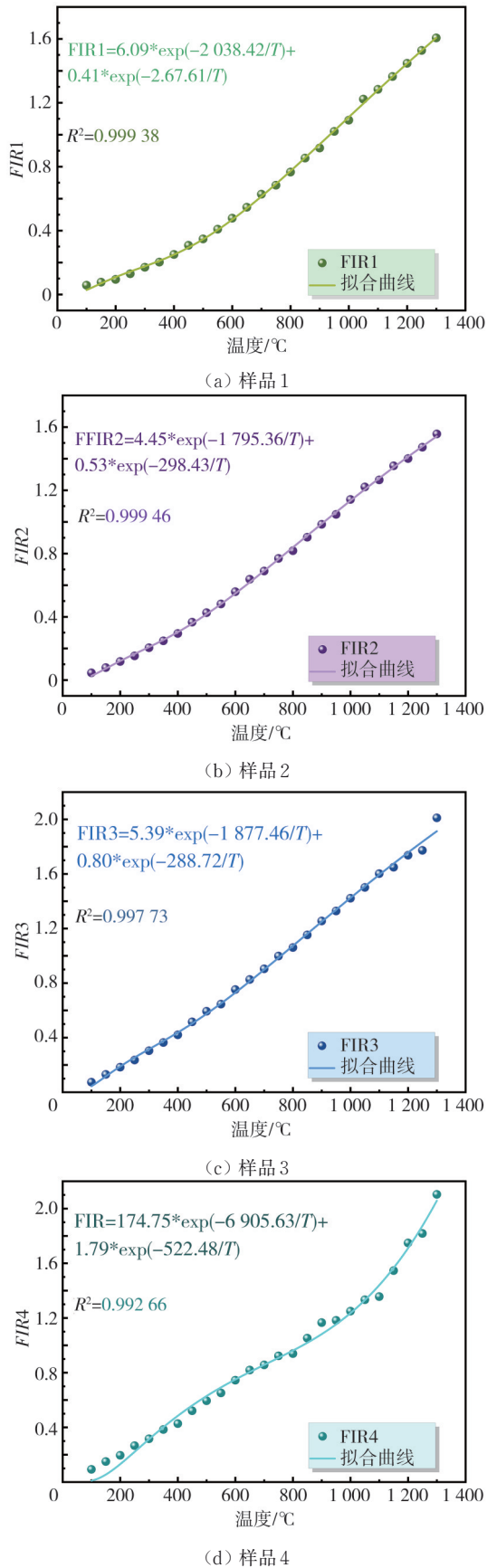


图 6 环境温度与 FIR 的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of environmental temperature and FIR

2.5 灵敏度分析

荧光材料的温度灵敏度是其测温性能的可靠指标,当材料的烧结温度在 1 400 °C 及以上时, FIR 数据具有较好的指数拟合特征。因此,根据拟合曲线、应用式(2)和式(3)计算了在 1 600, 1 500 和 1 400 °C 合成材料的 S_a 和 S_r , 结果如图 7 所示。

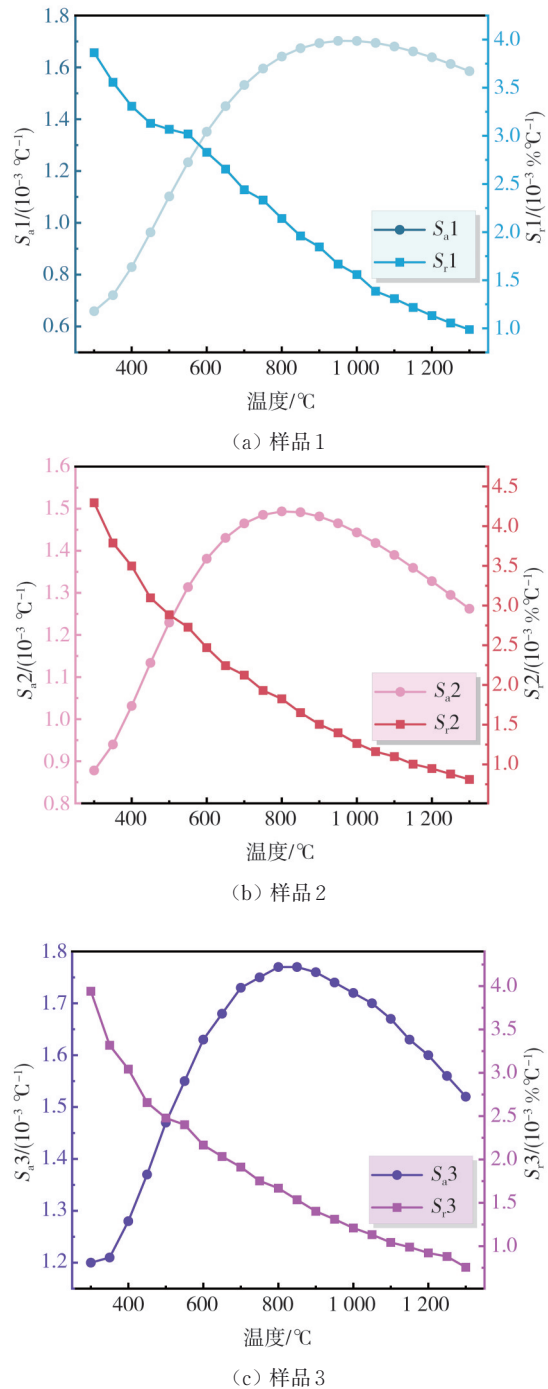


图 7 材料的温度灵敏度

Fig. 7 Temperature sensitivity of the materials

温敏性荧光材料的 S_a 呈现先增大后减小的趋势,而 S_r 则呈现先减小后趋于稳定的趋势。另外,对样品1~3材料的不同灵敏度进行了详细的分析和比较,结果如表2所示。

表2 样品灵敏度

Tab. 2 Sensitivity of samples

样品 序号	$S_{a-max}/$ ($10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	$S_{a-min}/$ ($10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	$S_{r-max}/$ ($10^{-3} \text{ } \%/^\circ\text{C}^{-1}$)	$S_{r-min}/$ ($10^{-3} \text{ } \%/^\circ\text{C}^{-1}$)
1	1.702 5	0.659 1	3.864 4	0.987 2
2	1.493 5	0.878 0	4.295 0	0.810 9
3	1.770 0	1.200 0	3.941 2	0.755 8

2.6 误差分析

将样品放置在另一个高温炉中(与之前使用的井式高温炉不同)。随机选择5个温度点,测量样品的FIR值,利用相对应的拟合曲线确定每个FIR值对应的温度,并与使用B型热电偶(材质为铂铑30和铂铑6)测得的高温炉内温度进行比较。分析了荧光材料的温度测量误差,结果如图8所示。

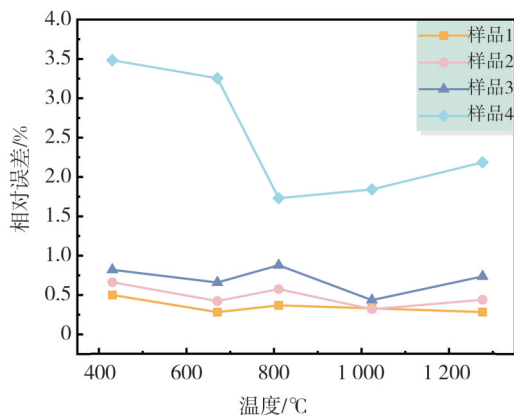


图8 不同样品的测温误差

Fig. 8 Temperature measurement errors of the different samples

样品1~4的测温最大相对误差分别为0.50%、0.66%、0.87%和3.46%,所有测试结果代表5次测量的平均值。

综上所述,4种样品在发射光谱中都表现出一定的温度敏感特性,但测温性能差异较大,其中在1600 °C下合成的材料表现出最佳的测温性能,在100~1300 °C测试温度范围内,其最大 S_a ($1.7 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)和最大 S_r ($3.8 \times 10^{-3} \text{ } \%/^\circ\text{C}^{-1}$)分别出现在950 °C处和300 °C处,最大相对测温误差仅为0.50%。

3 结论

本研究采用高温固相反应法在1300, 1400,

1500和1600 °C成功合成了 Dy^{3+} 掺杂的Y-Al-O二元系荧光材料,系统分析了材料的相组成和温度响应特性。随着合成温度从1300 °C升高至1600 °C,材料中的YAG含量由最初的28%提高至97.8%,497 nm处的发光强度由3355 a. u.显著提高至48371 a. u.。此外,在1400 °C以上合成的荧光材料在100~1300 °C范围内表现出优异的测温性能。1400 °C合成的荧光材料与温度的拟合指数相对较低,其测温误差相对较高。在1500 °C合成的荧光材料的温度拟合效果最优,相对灵敏度最高;在1600 °C合成的荧光材料绝对灵敏度最高,测温误差最小。因此,在一定温度条件下,高温固相反应法的合成温度越高, Dy^{3+} 掺杂的Y-Al-O体系荧光粉材料越适合温度传感应用。

参考文献:

- [1] 许灿华,周田,王雅婷,等. 基于荧光寿命与热辐射测温的30 °C至800 °C的光纤温度传感器[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(11): 28-34.
XU Canhua, ZHOU Tian, WANG Yating, et al. From 30 °C to 800 °C optical fiber temperature sensor based on fluorescence lifetime and thermal radiation temperature measurement [J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40 (11): 28-34. (in Chinese)
- [2] HASHEMI A, VETTER A, JOVICIC G, et al. Temperature measurements using YAG:Dy and YAG:Sm under diode laser excitation (405 nm) [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26 (7): 075202.
- [3] 相国涛,易园园,张羽,等. 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[J]. 发光学报, 2024, 45(6): 952-958.
XIANG Guotao, YI Yuanyuan, ZHANG Yu, et al. Dual-mode optical thermometry with high sensitivity achieved in $\text{Na}_3\text{Y}(\text{VO}_4)_2:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2024, 45(6): 952-958. (in Chinese)
- [4] ALLISON S W, BESHEARS D L, CATES M R, et al. Luminescence of YAG:Dy and YAG:Dy, Er crystals to 1700 °C [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(4): 044001.
- [5] BRÜBACH J, PFLITSCH C, DREIZLER A, et al. On surface temperature measurements with thermographic phosphors: a review [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 37-60.
- [6] ALLISON S, GILLIES G T. Remote thermometry

- with thermographic phosphors: instrumentation and applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(7): 2615-2650.
- [7] ISHIWADA N, UEDA T, YOKOMORI T. Characteristics of rare earth (RE=Eu, Tb, Tm)-doped Y₂O₃ phosphors for thermometry [J]. *Luminescence*, 2011, 26(6): 381-389.
- [8] OMRANE A, PETERSSON P, ALDÉN M, et al. Simultaneous 2D flow velocity and gas temperature measurements using thermographic phosphors [J]. *Applied Physics B*, 2008, 92(1): 99-102.
- [9] KLIMCZAK M, MALINOWSKI M, SARNECKI J, et al. Luminescence properties in the visible of Dy: YAG/YAG planar waveguides [J]. *Journal of Luminescence*, 2009, 129(12): 1869-1873.
- [10] HERTLE E, CHEPYGA L, BATENTSCHUK M, et al. Influence of codoping on the luminescence properties of YAG: Dy for high temperature phosphor thermometry [J]. *Journal of Luminescence*, 2017, 182: 200-207.
- [11] CASLAVSKY J L, VIECHNICKI D J. Melting behaviour and metastability of yttrium aluminium garnet (YAG) and YAlO₃ determined by optical differential thermal analysis [J]. *Journal of Materials Science*, 1980, 15(7): 1709-1718.
- [12] LIU F, TAN X, XU S, et al. Micro-defects and luminescence of thulium-doped yttrium aluminum garnet single crystals [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2022, 628: 413568.
- [13] SALADINO M L, CAPONETTI E. Coprecipitation synthesis of Nd: YAG nanopowders II: the effect of Nd dopant addition on luminescence properties [J]. *Optical Materials*, 2009, 32(1): 89-93.
- [14] HAKUTA Y, HAGANUMA T, SUE K, et al. Continuous production of phosphor YAG: Tb nanoparticles by hydrothermal synthesis in supercritical water [J]. *Materials Research Bulletin*, 2003, 38(7): 1257-1265.
- [15] FADLALLA H M H, TANG C C, ELSSFAH E M, et al. Synthesis and characterization of single crystalline YAG: Eu nano-sized powder by sol-gel method [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 109(2/3): 436-439.
- [16] 夏志国, 孙家跃, 李国武, 等. 新型固态照明用发光材料 Ca₃SiO₄Br₂: Eu²⁺ 的合成、结构与发光性能 [J]. *发光学报*, 2011, 32(10): 988-992.
- XIA Zhiguo, SUN Jiayue, LI Guowu, et al. Synthesis and analysis of novel solid state lighting compound Ca₃SiO₄Br₂: Eu²⁺ [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(10): 988-992. (in Chinese)
- [17] 孙家跃, 夏志国, 杜海燕. 稀土红色长余辉发光材料研究进展 [J]. *中国稀土学报*, 2005, 23(3): 257-265.
- SUN Jiayue, XIA Zhiguo, DU Haiyan. Progress in research of red long-lasting phosphorescence materials doped with rare earth ions [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2005, 23(3): 257-265. (in Chinese)
- [18] LIANG Y, LIU L, ZHAO L, et al. Temperature sensing technique across a wide range using phosphorescence intensity ratio of Dy³⁺-Doped YAG/YAP [J]. *Journal of Luminescence*, 2024, 266: 120309.
- [19] 乔建伟, 夏志国. Eu²⁺ 激活无机近红外荧光粉的研究进展 [J]. *中国稀土学报*, 2023, 41(1): 25-38.
- QIAO Jianwei, XIA Zhiguo. Progress in Eu²⁺ doped inorganic near infrared phosphors [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2023, 41(1): 25-38. (in Chinese)

(上接第 275 页)

- [18] RAZAVI M, HADIDI A. Structural damage identification through sensitivity-based finite element model updating and wavelet packet transform component energy [J]. *Structures*, 2021, 33: 4857-4870.
- [19] CHEN B, ZHANG W, XI J, et al. Product envelope spectrum optimization-gram: an enhanced envelope analysis for rolling bearing fault diagnosis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 193: 110270.
- [20] SAEEDIFAR M, ZAROUCAS D. Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: a review [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 195: 108039.