

# 温度对 $\text{Er}^{3+}$ 掺杂 ZBLAN 透明玻璃斯塔克能级跃迁的影响

冯志军<sup>1</sup> 张晓松<sup>1</sup> 周永亮<sup>1</sup> 凌志<sup>2</sup> 李梦真<sup>1</sup> 孙健<sup>2</sup> 李岚<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 天津理工大学材料物理研究所显示材料与光电器件教育部重点实验室, 天津 300384)

<sup>2</sup> 天津理工大学理学院, 天津 300384

**摘要** 采用熔融淬火法制备了  $\text{Er}^{3+}$  掺杂  $53\text{ZrF}_4-20\text{BaF}_2-4\text{LaF}_3-3\text{AlF}_3-20\text{NaF}-2.4\text{PbF}_2$  (ZBLAN) 氟化物透明玻璃。在 10 K~540 K 温度范围内, 测量了对应于  $\text{Er}^{3+}$  斯塔克分裂能级  $^4\text{S}_{3/2(1)} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  和  $^4\text{S}_{3/2(2)} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  (对应波长分别为 542 nm 和 548 nm) 的变温荧光光谱, 结果显示环境温度升高时, 样品在两个发射位置的发光强度均快速衰减, 但是衰减速率有所差异, 结合位形坐标模型讨论认为, 两斯塔克能级的激活能分别为  $\Delta E_1 = 0.078$  eV 和  $\Delta E_2 = 0.049$  eV, 其差异导致了二者热猝灭速率不同。分析了斯塔克分裂能级跃迁的荧光强度比 (FIR) 随温度的变化规律, 结果显示在低温区域 FIR 随温度呈现线性增加, 而高温区则趋于平缓。计算了样品的温度灵敏度随温度的变化, 结果表明, 在温度 90 K 时, 灵敏度达到最大为  $0.0011 \text{ K}^{-1}$ 。该材料对环境温度敏感性可应用于光学温度传感器。

**关键词** 材料; ZBLAN 透明玻璃; 荧光强度比; 斯塔克能级; 激活能; 温度灵敏度

中图分类号 O482.31 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0816001

## Influence of Temperature on the Transition of Stark Sublevels of $\text{Er}^{3+}$ Doped ZBLAN Glass

Feng Zhijun<sup>1</sup> Zhang Xiaosong<sup>1</sup> Zhou Yongliang<sup>1</sup> Ling Zhi<sup>2</sup> Li Mengzhen<sup>1</sup> Sun Jian<sup>2</sup> Li Lan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Display Materials and Photoelectric Devices, Ministry of Education, Institute of Material Physics, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)  
<sup>2</sup> College of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

**Abstract**  $\text{Er}^{3+}$ -doped  $53\text{ZrF}_4-20\text{BaF}_2-4\text{LaF}_3-3\text{AlF}_3-20\text{NaF}-2.4\text{PbF}_2$  (ZBLAN) fluoride transparent glasses are prepared by the melt quenching method. The fluorescence spectra are measured for the transition of  $\text{Er}^{3+}$  Stark sublevels  $^4\text{S}_{3/2(1)} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  and  $^4\text{S}_{3/2(2)} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  ( $\lambda_1 = 542$  nm,  $\lambda_2 = 548$  nm) with in the temperature range of 10 K~540 K. The results show a rapid decrease in emission intensity and an obvious difference in decay rate with the temperature increase. According to the configurational coordinate, the mechanism is proposed to involve the difference of thermal quenching rate from the fitted activation energy ( $\Delta E$ ) of 0.078 eV and 0.049 eV for two sublevels of  $^4\text{S}_{3/2(1)}$  and  $^4\text{S}_{3/2(2)}$ , respectively. The calculated fluorescence intensity ratio (FIR), which is corresponding to the transition of  $\text{Er}^{3+}$  stark sublevels  $^4\text{S}_{3/2(1)} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  and  $^4\text{S}_{3/2(2)} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ , shows a linearly increase with temperature rise and then tends to flatten at high temperature region. The temperature sensitivity of sample is obtained for the maximum value of  $0.0011 \text{ K}^{-1}$  at the temperature of 90 K. The features in temperature sensitivity would be an application of optical temperature sensor.

**Key words** materials; ZBLAN transparent glass; fluorescence intensity ratio; Stark sublevel; activation energy; temperature sensitivity

**OCIS codes** 160.2540; 160.4670; 160.5690; 300.6550

收稿日期: 2013-03-04; 收到修改稿日期: 2013-03-28

基金项目: 科技创新体系及条件平台建设计划项目“发光材料的制备与性能”(10SYSYJC28100)

作者简介: 冯志军(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事稀土发光材料方面的研究。E-mail: fzj0123456@163.com

导师简介: 李岚(1964—), 女, 博士, 研究员, 主要从事各种无机荧光材料与器件等方面的研究。

E-mail: lilan@tjut.edu.cn(通信联系人)

## 1 引 言

以光吸收、荧光寿命、放大自发辐射和荧光强度比(FIR)等<sup>[1-5]</sup>作为输出信号的稀土掺杂光纤光学温度传感器,具有灵敏度高、光源选择范围大的特点。其中基于FIR信号的光学温度传感器是将稀土离子同时发出的两束光强度的比值作为采集信号,可以实现更高灵敏度的测量,由于克服了电源波动、电磁辐射等因素的干扰,适用于高电压、强磁场以及易燃易爆环境中的温度传感器中。

一直以来,由于具有丰富的能级结构,发光强度与寿命随温度的变化敏感,基于稀土 $\text{Er}^{3+}$ 的FIR光学温度传感器最引人关注,利用其普通荧光发射<sup>[6]</sup>和上转换发光<sup>[7-8]</sup>实现FIR的研究都有所报道。1990年,Berthou等<sup>[9]</sup>利用了 $\text{Er}^{3+}$ 掺杂氟化物玻璃和锆酸盐玻璃首次获得了上转换FIR光学温度传感器测试结果。之后,Maurice等<sup>[10]</sup>利用 $\text{Er}^{3+}$ 掺杂 $\text{SiO}_2$ 材料使该类上转换光学温度传感器的工作温度扩展到1000 K,但是 $\text{SiO}_2$ 较大的声子能量(约为 $1100\text{ cm}^{-1}$ )使器件具有较低的灵敏度。针对在室温以上的温度范围,Maciel<sup>[11]</sup>和Dos Santos等<sup>[12]</sup>分别报道了稀土掺杂氟化物玻璃和硫系玻璃的上转换温度传感效应,指出玻璃基质材料在传感系统中起着重要作用。2011年,León-Luis等<sup>[13]</sup>报道了 $\text{Er}^{3+}$ 掺杂的氟碲酸玻璃的FIR行为,灵敏度达到 $0.0054\text{ K}^{-1}$ ,是目前报道的灵敏度最高的玻璃材料温度传感器。除了基于 $\text{Er}^{3+}$ 离子上转换发光的温度传感器之外,近几年来源于斯塔克能级FIR信号的温度传感器也被相继报道。2007年,Rai小组<sup>[14]</sup>首次提出使用 $\text{Er}^{3+}$ 的 $^4\text{S}_{3/2}$ 斯塔克分裂能级的FIR信号构造了新型温度传感器,他们认为 $^4\text{S}_{3/2}$ 能级的斯塔克能级作为FIR温度传感器有利于提高传感器灵敏度测量范围。迄今为止,大多数的稀土光纤温度传感器的报道多关注在高温区域(300 K~1000 K),低温或者超低温区域的光学温度传感器的研究还较少,Haro-González等<sup>[6]</sup>曾探讨了 $\text{Er}^{3+}$ 掺杂氟碲酸玻璃在低温(125 K~425 K)区域作为温度传感器的可能,指出在425 K时其灵敏度达到最大。

与传统的氧化物玻璃相比,低声子能量稀土掺杂氟化物玻璃具有熔点低、折射率高、较强的荧光发射和良好的力学性质,是具有发展前景的光纤温度传感介质材料。本文拟对10 K~540 K温度范围内, $53\text{ZrF}_4\text{-}20\text{BaF}_2\text{-}4\text{LaF}_3\text{-}3\text{AlF}_3\text{-}20\text{NaF}\text{-}2.4\text{PbF}_2$ (ZBLAN)玻璃中 $\text{Er}^{3+}$ 掺杂离子所对应的两个斯塔克能级 $^4\text{S}_{3/2(1)}\rightarrow^4\text{I}_{15/2}$ 和 $^4\text{S}_{3/2(2)}\rightarrow^4\text{I}_{15/2}$ 的跃迁强度进

行分析。利用位形坐标对温度猝灭机理给予分析,进一步计算出FIR灵敏度随温度的变化情况。

## 2 实 验

按照摩尔分数为53%的 $\text{ZrF}_4$ ,20%的 $\text{BaF}_2$ ,4%的 $\text{LaF}_3$ ,3%的 $\text{AlF}_3$ ,3.5%的 $\text{H}_2\text{O}$ ,20%的 $\text{NaF}$ ,2.4%的 $\text{PbF}_2$ 和1.4%的 $\text{Er}_2\text{O}_3$ 来配比,将原料充分研磨混合,包埋在氟化铵中以温度800℃加热30 min,样品达到完全熔融状态后,快速冷却后即置入马弗炉中在300℃下退火2 h以去除残余的应力和内部缺陷,自然冷却到室温,对样品进行切割、抛光。样品的荧光光谱采用Jobin Yvon FL3-212-TCSPC荧光分光光度计测得。低温环境由Janis CCS-100系统提供,工作温度范围是8 K~325 K,高温环境利用自制变温样品平台,测试温度范围为室温到550 K。考虑到样品分别由低温与高温系统测量得到的光谱数据的差异,利用两套系统的交叠温度区域(室温到325 K)内的荧光光谱对数据进行了修正。除了 $\text{Er}_2\text{O}_3$ 为光谱纯,其他原料均为分析纯。

## 3 结果与讨论

尽管稀土离子 $\text{Er}^{3+}$ 的4f壳层电子被外层的5s和5p轨道屏蔽,但是受周围晶体场的作用,简并的 $^4\text{S}_{3/2}$ 能级会产生斯塔克劈裂,形成 $^4\text{S}_{3/2(1)}$ 和 $^4\text{S}_{3/2(2)}$ 能级<sup>[15]</sup>,与这两个能级相关的跃迁分别对应542 nm( $^4\text{S}_{3/2(1)}\rightarrow^4\text{I}_{15/2}$ )和548 nm( $^4\text{S}_{3/2(2)}\rightarrow^4\text{I}_{15/2}$ )的光发射。图1为377 nm紫外光激发下ZBLAN: $\text{Er}^{3+}$ 对应于 $^4\text{S}_{3/2}\rightarrow^4\text{I}_{15/2}$ 能级的跃迁在温度范围为10 K~540 K的发射光谱变化。可以看出光致发光(PL)光谱具有双峰的特征,峰值分别对应于542 nm和548 nm。如图2所示,由两个峰位的荧光强度随温度的变化可知,温度升高时,两峰的荧光强度都在降低,在10 K~100 K温度范围内,对应于 $^4\text{S}_{3/2(2)}\rightarrow^4\text{I}_{15/2}$ 的跃迁强度的猝灭速率高于 $^4\text{S}_{3/2(1)}\rightarrow^4\text{I}_{15/2}$ 的。紫外激发下,电子首先从基态被激发到 $^4\text{G}_{11/2}$ ,经由非辐射弛豫过程电子到达 $^4\text{S}_{3/2}$ ,考虑到 $^4\text{S}_{3/2(1)}$ 和 $^4\text{S}_{3/2(2)}$ 之间的热耦合能仅为 $230\text{ cm}^{-1}$ ,因此 $^4\text{S}_{3/2(2)}$ 上的电子除了向下跃迁产生荧光发射外,还可能由于声子作用到达 $^4\text{S}_{3/2(1)}$ 上<sup>[14]</sup>;环境温度增大后,与晶格振动以及多声子发射有关的非辐射弛豫加剧,且更多的电子由 $^4\text{S}_{3/2(2)}$ 能级到达 $^4\text{S}_{3/2(1)}$ 上,造成对应于 $^4\text{S}_{3/2(2)}$ 能级非辐射跃迁几率增大;当温度进一步增加时,基

于热耦合能的两能级粒子的转移可忽略不计,因此两能级的猝灭速率趋于一致。

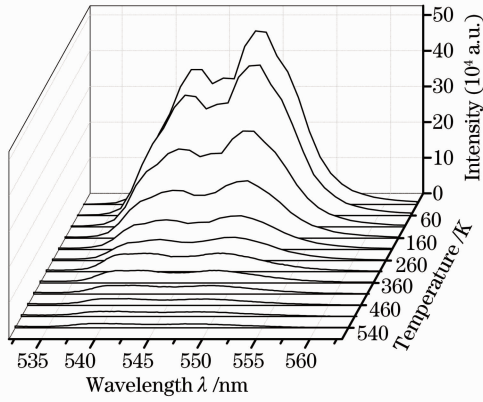


图1 ZBLAN:Er<sup>3+</sup>样品在377 nm紫外光激发下发射光谱与温度关系

Fig.1 Emission spectra of ZBLAN:Er<sup>3+</sup> excited by ultraviolet of 377 nm vary with temperature

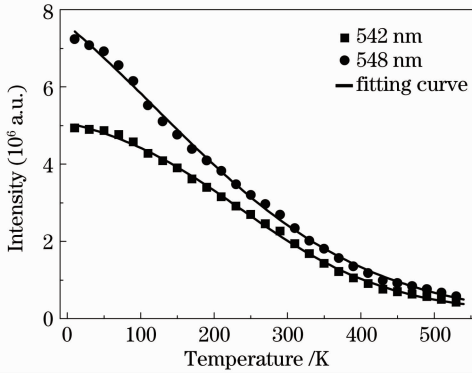


图2 ZBLAN:Er<sup>3+</sup>样品斯塔克分裂能级在377 nm紫外光激发下两发射峰的荧光强度与温度关系

Fig.2 Influence of fluorescence on temperature intensity corresponding to Stark energy of ZBLAN:Er<sup>3+</sup> excited by ultraviolet of 377 nm

稀土离子荧光强度与温度的关系满足公式<sup>[16]</sup>

$$I(T) = \frac{I(0)}{1 + A \exp[-\Delta E / (\kappa T)]}, \quad (1)$$

式中  $T$  表示绝对温度,  $A$  是常数,  $I(0)$  表示在绝对零度时的发射强度,  $\kappa$  为玻尔兹曼常数,  $\Delta E$  为热猝灭过程的激活能。根据图2曲线拟合得到两个荧光发射峰分别对应的激活能值如表1所示,其中能级<sup>4</sup>S<sub>3/2(1)和<sup>4</sup>S<sub>3/2(2)</sub>对应的激活能分别为 $\Delta E_1 = 0.078$  eV和 $\Delta E_2 = 0.049$  eV。对应的位形坐标图由图3给出,激发态的分裂能级<sup>4</sup>S<sub>3/2(1)、<sup>4</sup>S<sub>3/2(2)</sub>分别与基态<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>相交于 $P_1$ 和 $P_2$ 两点,环境温度的升高使得位于激发态上的电子被热激活,当所获得的能量高于能级的热激活能 $\Delta E$ 时,电子通过弛豫过程从交点 $P_1$ 或 $P_2$ 转移到基态并产生温度猝灭。</sub></sub>

表1 斯塔克能级<sup>4</sup>S<sub>3/2(1)和<sup>4</sup>S<sub>3/2(2)</sub>的激活能  
Table 1 Activation energy  $\Delta E$  of Stark energy level <sup>4</sup>S<sub>3/2(1)</sub> and <sup>4</sup>S<sub>3/2(2)</sub></sub>

Energy level	$I(0)$	A	$\Delta E$ /eV
<sup>4</sup> S <sub>3/2(1)</sub>	5.073	31.56	0.078
<sup>4</sup> S <sub>3/2(2)</sub>	7.467	16.59	0.049

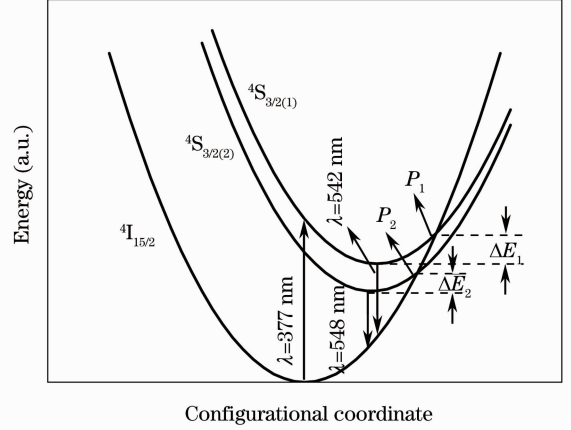


图3 ZBLAN:Er<sup>3+</sup>位形坐标图

Fig.3 Configurational coordinate diagram of ZBLAN:Er<sup>3+</sup>

稀土离子的热衰减现象被认为是热激发下的发光中心与增大的声子密度强相互作用所致,一般表现为稀土离子的非辐射跃迁几率的增大。无辐射弛豫速率 $W_{NR}$ 与温度的关系可用 Arrhenius 公式来描述<sup>[17-18]</sup>:

$$W_{NR} = \tau_r^{-1} \exp[-\Delta E / (\kappa T)], \quad (2)$$

式中 $\tau_r$ 为 $T = \infty$ 时的衰减时间。在相同的温度 $T$ 下,无辐射弛豫速率与激活能 $\Delta E$ 成反比关系。考虑到对应于能级<sup>4</sup>S<sub>3/2(1)</sub>的激活能大于<sup>4</sup>S<sub>3/2(2)</sub>,相应的<sup>4</sup>S<sub>3/2(1)</sub>能级的无辐射弛豫速率偏小,其温度猝灭程度低于后者,如图2所示。

图4给出377 nm紫外光激发下,Er<sup>3+</sup>离子斯塔克能级<sup>4</sup>S<sub>3/2(1)和<sup>4</sup>S<sub>3/2(2)</sub>向基态<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>跃迁的 FIR 与温度的依赖关系。当温度从10 K上升到540 K时,可以看出 FIR 随环境温度增大而增加,低温区(150 K以下)时,FIR 比随温度上升的较快;高于150 K时,FIR 增长的比较缓慢。在377 nm的光激发下,Er<sup>3+</sup>离子处于基态<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>中的电子被激发到<sup>4</sup>G<sub>11/2</sub>上,经过无辐射过程弛豫到两热耦合能级<sup>4</sup>S<sub>3/2(1)和<sup>4</sup>S<sub>3/2(2)</sub>上,当电子回到基态<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>上时,产生542 nm和548 nm的荧光发射。当环境温度增加时,两热耦合能级的非辐射跃迁速率加剧,使得二能级电子数密度的差异可以忽略不计,FIR 变化趋于平稳。通常下,发射峰的一半全宽随温度的升高而展宽,对 FIR 有一定的</sub></sub>

影响,光谱测量曲线,如图 1 所示,显示发射峰的半峰全宽仅出现微弱的展宽,对 FIR 的整体变化趋势影响不大。

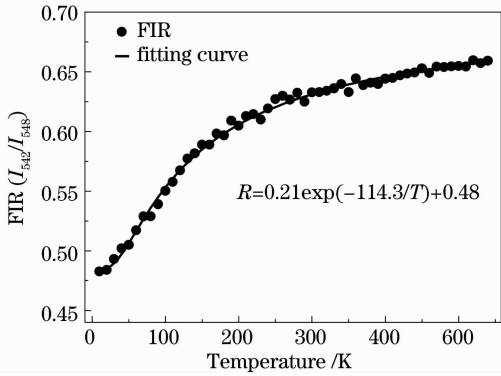


图 4 ZBLAN:Er<sup>3+</sup> 样品发射峰的 FIR 与温度的依赖关系

Fig. 4 Relationship between FIR of ZBLAN:Er<sup>3+</sup> and temperature

对于两个相邻的斯塔克分裂能级,其上的电子布居数依赖于环境温度变化,它们到达同一低能级所发生荧光辐射的比值  $R$  是温度的单一函数<sup>[19]</sup>。考虑到这两个斯塔克能级的发光峰重叠的非常明显,为了消除发光峰重叠而引起测量误差,通常 FIR 表示为<sup>[20]</sup>

$$R \equiv B \exp\left(\frac{-\Delta E'}{\kappa T}\right) + C, \quad (3)$$

式中  $\Delta E'$  为两能级间的能量差,  $B$ 、 $C$  为常数。根据图 4 拟合得到  $R = 0.21 \exp(-114.3/T) + 0.48$ 。对应的温度传感器的灵敏度<sup>[21]</sup> 由  $S = \frac{dR}{dT} = R\left(-\frac{\Delta E'}{\kappa T^2}\right)$  给出。图 5 给出了 Er<sup>3+</sup> 掺杂 ZBLAN 玻

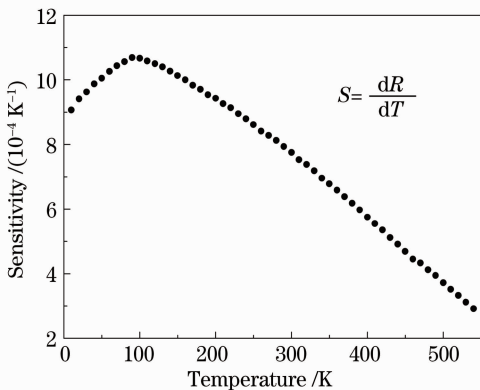


图 5 在 10 K~540 K 温度范围内传感器灵敏度随温度变化

Fig. 5 Sensor sensitivity in the temperature range of 10 K~540 K

璃的斯塔克能级的 FIR 信号在 10 K~540 K 的灵敏度随温度的变化曲线,可以看出,低于 90 K 时,材料的灵敏度随温度的升高而增加;在 90 K~540 K 温度区间内,材料的灵敏度随温度的升高而减小,在 90 K 时达到最大为 0.0011 K<sup>-1</sup>。基于 Er<sup>3+</sup> 掺杂氟化物玻璃<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 的斯塔克分裂能级 FIR 温度传感器能够利用紫外光激发下低温环境中实现较高的发光效率和较宽的传感范围,且具有较高的灵敏度,在光学温度传感方面表现出较强的应用潜力。

## 4 结 论

用熔融淬火法制备了 Er<sup>3+</sup> 掺杂 ZBLAN 透明玻璃。分析了 10 K~540 K 温度范围内,Er<sup>3+</sup> 的斯塔克分裂能级<sup>4</sup>S<sub>3/2(1)</sub> 和<sup>4</sup>S<sub>3/2(2)</sub> 跃迁分别对应 542 nm 的和 548 nm 的光发射行为。通过拟合计算得到了两能级的激活能分别为  $\Delta E_1 = 0.078$  eV 和  $\Delta E_2 = 0.049$  eV, 认为由于热激活能的差异和热激发下两能级的布居数的不同造成了两个发射波长的温度猝灭速率的不同。计算了 Er<sup>3+</sup> 的两斯塔克能级<sup>4</sup>S<sub>3/2(1)</sub>, <sup>4</sup>S<sub>3/2(2)</sub> 在温度范围 10 K~540 K 内的 FIR 信号灵敏度,得到在 90 K 时,材料的灵敏度达到最大 0.0011 K<sup>-1</sup>, 在光学温度传感方面表现出较强的应用潜力。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Yinghai, Yu Benli. The properties of Nd<sup>3+</sup> doped glass temperature and optical fibre temperature sensor [J]. Acta Optica Sinica, 1990, 10(2): 178-182.
- 2 杨瀛海, 俞本立. 钕玻璃的温敏特性及光纤温度传感器[J]. 光学学报, 1990, 10(2): 178-182.
- 3 Wang Yutian, Hu Qiaoli, Shi Junyan. Optical fiber thermometer based on fluorescence mechanism [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 655-659.
- 4 王玉田, 胡俏丽, 石军彦. 基于荧光机理的光纤温度测量仪[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 655-659.
- 5 T Liu, K Obermann, K Petermann, et al.. Effect of saturation caused by amplified spontaneous emission on semiconductor optical amplifier performance [J]. Electron Lett, 1997, 33(24): 2042-2043.
- 6 Shen Yang, Wang Xing, He Hongcai, et al.. Effects of Sm<sup>3+</sup> doping on the temperature-dependent fluorescence intensity ratio of Er<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>-codoped yttria stabilized zirconia [J]. J Alloys Compd, 2012, 536(25): 161-165.
- 7 Zhou Li, Liang Dakai, Zeng Jie, et al.. Mechanism and experimental research on performance degeneratio of fiber bragg grating affected by temperature [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0405007.
- 8 周 丽, 梁大开, 曾 捷, 等. 温度影响光纤光栅传感器性能蜕化机理及实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0405007.
- 9 P Haro-González, S León-Luis, S González-Pérez, et al.. Analysis of Er<sup>3+</sup> and Ho<sup>3+</sup> codoped fluoroindate glasses as wide range temperature sensor [J]. Mater Res Bull, 2011, 46(7): 1051-1054.
- 10 G Tripathi, V K Rai, S B Rai. Upconversion and temperature

- sensing behavior of  $\text{Er}^{3+}$  doped  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-BaO-PbO}$  tertiary glass [J]. *Opt Mater*, 2007, 30(2): 201–206.
- 8 M Quintanilla, E Cantelar, F Cussó, *et al.*. Temperature sensing with up-converting submicron-sized  $\text{LiNbO}_3\text{:Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  particles [J]. *Appl Phys Express*, 2011, 4(022601): 1–3.
- 9 H Berthou, C Jörgensen. Optical-fiber temperature sensor based on upconversion-excited fluorescence [J]. *Opt Lett*, 1990, 15(19): 1100–1102.
- 10 E Maurice, G Monnom, B Dussardier, *et al.*. Thermalization effects between upper levels of green fluorescence in Er-doped silica fibers [J]. *Opt Lett*, 1994, 19(13): 990–992.
- 11 G Maciel, L S Menezes, A Gomes, *et al.*. Temperature sensor based on frequency upconversion in  $\text{Er}^{3+}$ -doped fluoroindate glass [J]. *IEEE Phot Tech Lett*, 1995, 7(12): 1474–1476.
- 12 P D Santos, M D Araujo, A Gouveia-Neto, *et al.*. Optical temperature sensing using upconversion fluorescence emission in  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped chalcogenide glass [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(5): 578–580.
- 13 S F León-Luis, U R Rodríguez-Mendoza, E Lalla, *et al.*. Temperature sensor based on the  $\text{Er}^{3+}$  green upconverted emission in a fluorotellurite glass [J]. *Sens Actuators, B; Chem*, 2011, 158(1): 208–213.
- 14 V K Rai, S Rai. Temperature sensing behaviour of the stark sublevels [J]. *Spectrochim Acta Part A: Mol Biomol Spectrosc*, 2007, 68(5): 1406–1409.
- 15 M Viatroski, R Carvalho, G Cruz. Spectral of the ZBLAN: $\text{Er}^{3+}$  system at low temperature [J]. *J Alloys Compd*, 2004, 372(1): L13–L14.
- 16 Chen Yonghu, Liu Bo, Shi Chaoshu, *et al.*. The temperature effect of  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{:Ce}^{3+}$  luminescence [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A*, 2005, 537(1–2): 31–35.
- 17 F Auzel. Multiphonon-assisted anti-Stokes and Stokes fluorescence of triply ionized rare-earth ions [J]. *Phys Rev B*, 1976, 13(7): 2809.
- 18 M Weber. Multiphonon relaxation of rare-earth ions in yttrium orthoaluminate [J]. *Phys Rev B*, 1973, 8(1): 54.
- 19 O Svelto. *Principles of Lasers*, Fifth Edition [M]. New York: Springer, 2009, 58.
- 20 Z P Cai, H Y Xu. Point temperature sensor based on green upconversion emission in an Er:ZBLALiP microsphere [J]. *Sens Actuators, A; Phys*, 2003, 108(1): 187–192.
- 21 Li Dongyu, Wang Yuxiao, Zhang Xueru, *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.

栏目编辑：韩峰