

掺铒碲钨酸盐玻璃光谱性质的研究

骆永石, 张家骅, 张 霞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 :合成了不同浓度 Er^{3+} 掺杂的 $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-Li}_2\text{O}$ 体系玻璃 (TW glasses), 详细研究了掺杂浓度对这种碲钨酸盐玻璃光学特性的影响。计算了 Judd-Ofelt (J-O) 强度参数, 研究了掺杂浓度对 $1.5\ \mu\text{m}$ 发射带宽的影响, 及不同掺杂浓度下 Er^{3+} 的 ${}^4I_{11/2}\text{-}{}^4I_{13/2}$ 和 ${}^4I_{13/2}\text{-}{}^4I_{15/2}$ 无辐射跃迁过程。实验得到了在 TW 玻璃中 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2}\text{-}{}^4I_{15/2}$ 跃迁的浓度猝灭速率约为 $0.8 \times 10^{-18}\ \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 这对寻求 Er^{3+} 在碲钨酸盐玻璃中的合理掺杂浓度有一定的参考意义。实验发现 Er^{3+} 的 ${}^4I_{11/2}\text{-}{}^4I_{13/2}$ 无辐射弛豫速率在这种玻璃体系中约是不含 WO_3 的碲钨酸盐玻璃中的 2 倍, 说明含 WO_3 的掺铒碲钨酸盐玻璃更有利于在 $980\ \text{nm}$ 激光泵浦下实现 $1.5\ \mu\text{m}$ 光放大。

关键词 :发光材料, 碲钨酸盐玻璃, 无辐射跃迁, 光谱性质

中图分类号 :O482.31 文献标识码 :A

Spectroscopic properties of tungsten-tellurite glasses doped with Er^{3+} ions at different concentrations

LUO Yong-shi, ZHANG Jia-hua, ZHANG Xia

(Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract : Infrared spectra and lifetimes of ${}^4I_{13/2}$ state of Er^{3+} in tungsten-tellurite glasses doped with different concentrations of Er_2O_3 were measured and studied. Judd-Ofelt parameters on absorption spectra were analyzed. Analyzed results show that the lifetime of the ${}^4I_{13/2}$ state decreases with the increase of the Er^{3+} concentration due to energy transfer processes and the energy transfer coefficient is $0.8 \times 10^{-18}\ \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. It is observed that the nonradiative relaxation rate of ${}^4I_{11/2}\text{-}{}^4I_{13/2}$ transition of Er^{3+} in tungsten-tellurite glass is unchanged with the increase of Er^{3+} concentration, and is about twice as high as that in $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$ glass. Hence, population feeding of ${}^4I_{13/2}$ of Er^{3+} in TW glass is more effective than that in TZN glass under $980\ \text{nm}$ pumping into the ${}^4I_{11/2}$ level of Er^{3+} ions. The obtained results reported here indicate that tungsten-tellurite glasses may be a promising candidate for broadband erbium-doped fiber amplifiers.

Key words : luminescent material, tungsten-tellurite glass, nonradiative transition, spectroscopic property

1 引言

近年来, 光纤通信事业得到了蓬勃发展, 现有的用于波分复用系统(Wavelength Division Multiplexing System, WDM)的硅基掺铒光纤放大器(Erbium-doped Fiber Amplifiers, EDFA)已不能满足通讯带宽的需求。因此, 具有宽带增益的用于 $1.5 \mu\text{m}$ 通信波段的新型 Er^{3+} 掺杂玻璃材料受到了广泛关注^[1-5], 其中碲酸盐玻璃由于具有受激发射截面大, 增益带宽较宽, 铒的可掺杂浓度高等优点受到极大的重视^[6-9]。1997 年 A. Mori 等人报道了以一种碲酸盐玻璃作为基质材料的掺铒光纤, 其在 $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段增益带宽约 76 nm ^[9], 但是, 同目前应用的硅酸盐玻璃相比, 碲酸盐玻璃热稳定性较差, 而且 Er^{3+} 在其中的 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 无辐射弛豫速率较小, 不利于 980 nm 激光泵浦下实现光放大。为克服以上缺点, 人们尝试了不同组分的碲基掺铒玻璃^[10-12], 碲钨酸盐玻璃就是其中一种^[10]。相对于掺铒碲酸盐玻璃^[9], 掺铒碲钨酸盐玻璃具有高的热稳定性和更快的 Er^{3+} 的 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 无辐射弛豫速率, 且 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 跃迁发射截面更大。

本文详细研究了 Er^{3+} 掺杂浓度对这种碲钨酸盐玻璃光学特性的影响。研究了不同掺杂浓度下 Er^{3+} 的 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 和 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 无辐射跃迁过程, 计算了 J-O 强度参数, 研究了 Er^{3+} 浓度对 $1.5 \mu\text{m}$ 发射带宽的影响, 得到了在 TW 玻璃中 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 跃迁的浓度猝灭速率约为 $0.8 \times 10^{-18} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 这对寻求 Er^{3+} 在碲钨酸盐玻璃中的合理掺杂浓度有一定的参考意义。

2 实验

玻璃样品 (1) $(40 - 0.4x)\text{TeO}_2 \cdot (40 - 0.4x)\text{WO}_3 \cdot (20 - 0.2x)\text{Li}_2\text{O} \cdot x\text{Er}_2\text{O}_3$ ($x = 0.1 \sim 10$), Er^{3+} 离子掺杂浓度为 $x \text{ mol}\%$, (2) $70\text{TeO}_2 \cdot 20\text{ZnO} \cdot 10\text{Na}_2\text{O} \cdot 0.5\% \text{Er}_2\text{O}_3$ (摩尔百分比), 所有原料均为分析纯的氧化物和碳酸盐。按比例准确称量 10 g 药品, 充分混合后放入刚玉坩埚内, 将坩埚放入已升温到 $750 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$ 的硅碳棒炉内, 待

药品充分熔融 1 h 后取出, 浇注到铜板上成型。将得到的玻璃放入电阻炉内在玻璃转变温度 T_g 附近保温 2 h , 自然冷却到室温后取出, 经过两大面抛光处理后, 用于光谱测量。

实验在室温下进行, 发射谱由 TRIAX 550 光谱仪测量, 发射谱泵浦光源为 808 nm 半导体激光, 扫描范围为 $1400 \sim 1700 \text{ nm}$, 步长为 1 nm 。吸收谱利用 UV-3101PC 光谱仪测量, 在由光学参数振荡器(OPO)输出的 808 nm 脉冲激光激发下, 用 Tektronix TDS 3052 数字示波器输出样品的发光衰减曲线。

3 不同 Er^{3+} 掺杂浓度下的 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 无辐射弛豫

3.1 不同掺杂浓度下的发射光谱

图 1 是 Er^{3+} 在 $(40 - 0.4x)\text{TeO}_2 \cdot (40 - 0.4x)\text{WO}_3 \cdot (20 - 0.2x)\text{Li}_2\text{O} \cdot x\text{Er}_2\text{O}_3$ ($x = 0.1 \sim 10$) 玻璃中的 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 和 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 跃迁近红外发射光谱。可以看到随掺杂浓度增加, Er^{3+} 在 $1.5 \mu\text{m}$ 的发射峰变宽, 半峰宽在 $65 \sim 110 \text{ nm}$ 间变化。本文最初认为可能是随着掺杂浓度增加, Er^{3+} 所处局域场

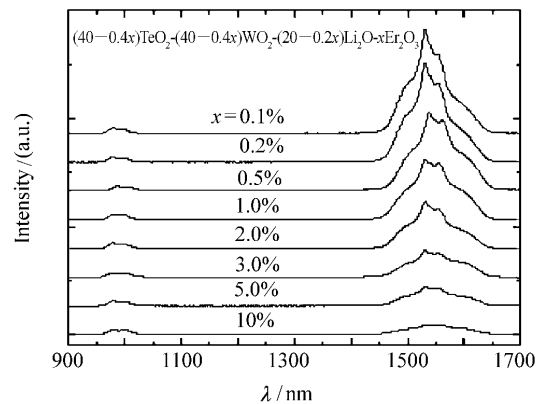


图 1 不同 Er_2O_3 浓度 TW 玻璃中 Er^{3+} 的 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 和 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 的发射光谱

Fig. 1 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ and ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ emission spectra of Er^{3+} in TW glass, the ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ emission band is normalized by $0.1 \text{ mol}\% \text{Er}_2\text{O}_3$

环境无序程度加大, 使 $1.5 \mu\text{m}$ 发射展宽引起的, 但是经过深入地分析, 本文认为这主要是由于文

献中提到的自吸收(光俘获效应)引起的^[10],而且可以通过减小被测样品尺寸来消除自吸收引起的 Er^{3+} 在 $1.5\ \mu\text{m}$ 的发射峰宽度的变化。同时,图1中给出了不同 Er^{3+} 浓度下 $1.5\ \mu\text{m}$ 同 $0.98\ \mu\text{m}$ 发射强度对比,这一比值由 ${}^4I_{11/2}$ - ${}^4I_{13/2}$ 无辐射弛豫和 ${}^4I_{13/2}$ 能级寿命决定。这一结果已应用于下面关于 ${}^4I_{11/2}$ - ${}^4I_{13/2}$ 无辐射弛豫的讨论中。

3.2 不同掺杂浓度下的吸收光谱与 J-O 分析

图2是 Er^{3+} 在不同掺杂浓度下的 $300\sim 1700\ \text{nm}$ 的室温吸收光谱图。从图中选取7个吸收峰,峰值位置为:1527、976、794、651、541、520、

487 nm,分别对应于 Er^{3+} 从基态 ${}^4I_{15/2}$ 到激发态 ${}^4I_{13/2}$ 、 ${}^4I_{11/2}$ 、 ${}^4I_{9/2}$ 、 ${}^4F_{9/2}$ 、 ${}^4S_{3/2}$ 、 ${}^2H_{11/2}$ 、 ${}^4F_{7/2}$ 的跃迁。由这7个吸收峰,利用J-O理论^[13,14]拟合出玻璃的强度参数 Ω_λ ,理论振子强度和实验振子强度,这一理论中电偶极跃迁谱线强度 S_{ed} 如下式:

$$S_{\text{ed}}(J'J'') = \sum_{t=2,4,6} \Omega_t \alpha SL J \| U^{(t)} \| \alpha' S'L' J'{}^2 \quad (1)$$

由于 Er^{3+} 离子对应于 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 跃迁的约化矩阵元 $U^2 = 0.0195$, $U^4 = 0.1172$, $U^6 = 1.4325$,很明显 S_{ed} 的值主要是由3个 Ω 参数中的 Ω_6 参数决定的,因此, Ω_6 参数对 $1.5\ \mu\text{m}$ 发射的影响是最主要的。

$\Omega(t=2,4,6)$ 是J-O强度参数,它能在一定程度上反映基质的结构性质,可以通过最小二乘法拟合等式(1)得到,所得数据如表1所示。一般说来, Ω_2 反映了玻璃结构、配位对称性和稀土离子所处的局部环境的无序性。 Ω_2 越大,玻璃的共价性越强,反之,玻璃的离子性越强。 Ω_4 和 Ω_6 与 Er^{3+} 离子所处的基质玻璃的刚性有关, Ω_6 的值越小,玻璃的刚性就越强。 Ω 计算结果显示 Ω_2 随 Er^{3+} 浓度增加而变小,而 Ω_4 、 Ω_6 没有明显的变化,说明Er—O键共价性随 Er^{3+} 浓度增加而略有变弱趋势。

由得到的强度参数 $\Omega(t=2,4,6)$ 计算得到了自发辐射跃迁速率 A 、能级寿命 τ ,见表1。

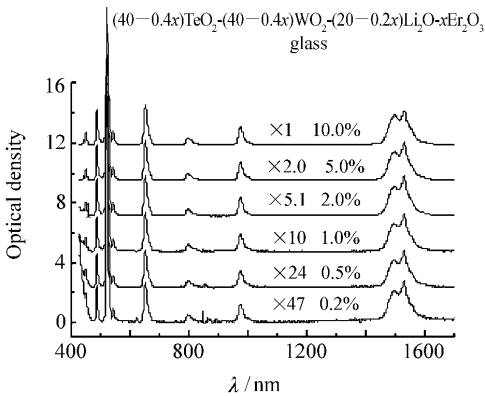


图2 不同 Er_2O_3 浓度TW玻璃的吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectra of TW glasses doped with different concentrations of Er_2O_3

表1 J-O参数与自发辐射速率

Tab. 1 J-O parameters and radiative transition rates calculated from absorption spectra

glass	Ω_2 10^{-20}	Ω_4 10^{-20}	Ω_6 10^{-20}	$A_{10}(\text{s}^{-1})$ (${}^4I_{13/2}$ - ${}^4I_{15/2}$)	$A_{20}(\text{s}^{-1})$ (${}^4I_{11/2}$ - ${}^4I_{15/2}$)	$A_{21}(\text{s}^{-1})$ (${}^4I_{11/2}$ - ${}^4I_{13/2}$)	$\tau_{1r}(\text{ms})$ (${}^4I_{13/2}$)	$\tau_{2r}(\text{ms})$ (${}^4I_{11/2}$)
TW0.2%	7.99	1.71	1.22	243.86	362.22	44.87	4.1	2.46
TW0.5%	7.79	1.61	1.20	238.84	344.6	42.6	4.187	2.58
TW1.0%	7.77	1.72	1.20	240.28	344.3	43.03	4.162	2.58
TW2.0%	7.15	1.56	1.28	249.87	351.53	43.89	4.002	2.53
TW5.0%	6.06	1.65	1.21	245.97	334.49	43.24	4.080	2.56
TW10%	6.58	1.72	1.20	252.35	346.35	44.48	3.962	2.56
TZNO.5%	5.88	1.41	1.13	220.2	304.51	38.59	4.541	2.91

3.3 不同 Er^{3+} 浓度下 ${}^4I_{13/2}$ 能级寿命及 ${}^4I_{13/2}$ - ${}^4I_{15/2}$ 无辐射弛豫

图3是 Er^{3+} 离子 ${}^4I_{13/2}$ 能级寿命和 ${}^4I_{13/2}$ - ${}^4I_{15/2}$ 无辐射弛豫速率与掺杂浓度的关系图。图中

(∇)是实验测量得到各样品中 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2}$ 能级寿命(\square)是由等式 $W_{10} = \tau_1^{-1} - A_{10}$ 计算得到的每个样品 ${}^4I_{13/2}$ - ${}^4I_{15/2}$ 无辐射弛豫速率值,实线1是利用 $W_1 = kC + W_{\text{MP}}$ 对各样品 ${}^4I_{13/2}$ - ${}^4I_{15/2}$ 无辐射弛豫

速率与 Er^{3+} 浓度关系进行拟合得到的, 实线 2 是利用 $\tau_1 = 1/(kC + W_{\text{MP}} + A_{10})$ 拟合 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2}$ 能级寿命与 Er^{3+} 浓度关系得到的。从中可以看到随掺杂浓度增加测得的 ${}^4I_{13/2}$ 能级寿命逐渐变短, 无辐射弛豫速率逐渐变大, 这主要是因为浓度猝灭引起的。 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 无辐射弛豫速率 (W_{10}) 可表示为:

$$W_{10} = \tau_1^{-1} - A_{10}, \quad (2)$$

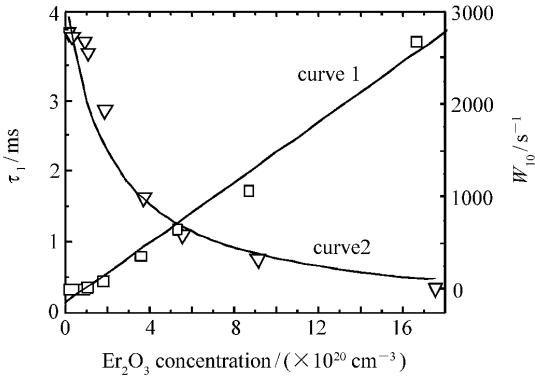


图 3 测得的 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2}$ 能级寿命, ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 无辐射弛豫与 Er^{3+} 浓度的依赖关系

Fig. 3 Dependence of measured lifetimes (square) and nonradiative relaxation rates (circle) of ${}^4I_{13/2}$ level on Er^{3+} concentrations in TW glass
The solid curve 1 and 2 is satisfied by $W_1 = kC + W_{\text{MP}}$, and $1/(kC + W_{\text{MP}} + A_{10})$, respectively

τ_1, A_{10} 分别是测得的 ${}^4I_{13/2}$ 能级寿命 (测量值) 和通过 J-O 计算得到的辐射跃迁速率。无辐射弛豫速率 (W_{10}) 主要由两种过程引起, 一是多声子弛豫 (W_{MP}), 一是能量传递 (W_{ET}), 只有后者是与钬浓度相关的, 这里用简单的线性关系描述为:

$$W_{\text{ET}} = kC, \quad (3)$$

k 是标志能量传递的系数, C 是 Er_2O_3 浓度, 通过等式 $W_1 = kC + W_{\text{MP}}$ 对计算得到的不同浓度样品 W_{10} 值进行线性拟合得到 curve 1, 同时给出了 k 值 $k = 1.6 \times 10^{-18} \text{ cm}^3/\text{s}$ 这里该数值对应的是 Er_2O_3 浓度, 如对应于 Er^{3+} 则为 $k = 0.8 \times 10^{-18} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, curve 2 由 $1/(kC + W_{\text{MP}} + A_{10})$ 得到, 从图中可见, 拟合结果与实验符合较好, 说明这里用线性关系描述 W_{ET} 与掺杂浓度间的关系是合理的, 而这里的能量传递系数 k 值对寻找合理的掺杂浓度有一定的指导意义。

4 Er^{3+} 在 TW 与 TZN 玻璃中的 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 无辐射弛豫

图 4 是 808 nm 激发下 Er^{3+} 能级间相关过程示意图。在 808 nm 激光激发下, Er^{3+} 由基态被激发至 ${}^4I_{9/2}$ 能级, 然后很快无辐射弛豫到 ${}^4I_{11/2}$ 能级。接下来是 ${}^4I_{13/2}$ 能级通过 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 弛豫过程得到布居, 该过程的速率对于实现 $1.5 \mu\text{m}$ 光放大很重要。由于直接测量 ${}^4I_{11/2}$ 能级寿命也比较困难, 一般是用前面介绍的多声子弛豫的能隙理论通过玻璃基质声子能量进行估计, 并不准确, 这里通过推导来比较 TW 与 TZN 玻璃间 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 无辐射弛豫的差别。

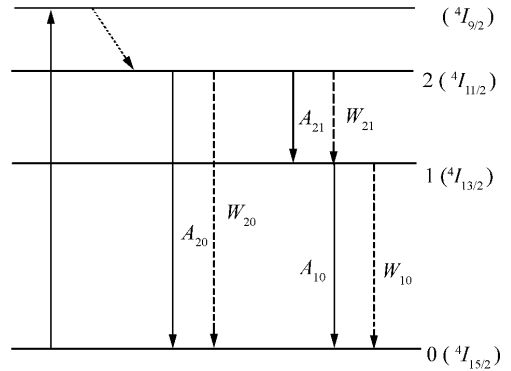


图 4 808 nm 激发下 Er^{3+} 能级示意图

Fig. 4 Energy level diagram of Er^{3+} ions

The transition from ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ indicates an optical transition under 808 nm excitation. Solid lines represent the radiative processes and dashed lines are the nonradiative processes

在稳态发光下有如下粒子数平衡关系: 设 A_{21}, W_{21} 分别是 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 辐射、无辐射速率, n_1, n_2 是 ${}^4I_{13/2}, {}^4I_{11/2}$ 能级布局数, 则有:

$$A_{21}n_2 + W_{21}n_2 = n_1/\tau_1, \quad (4)$$

如果定义参数 α :

$$\alpha = A_{10}n_1/A_{20}n_2, \quad (5)$$

则由 (4) (5) 可得:

$$W_{21} = \alpha A_{21}/A_{10}\tau - A_{21}, \quad (6)$$

又因 $W_{21} \gg A_{21}$, 可以忽略 A_{21} , 由此得到 W_{21} 值并对 0.1 mol% 浓度样品值归一化,

$$W_{21} \approx \alpha A_{21} / A_{10} \tau, \quad (7)$$

结果见图 5, 可见对于碲钨酸盐玻璃, ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 无辐射速率基本不随铒浓度增加而变化, 即

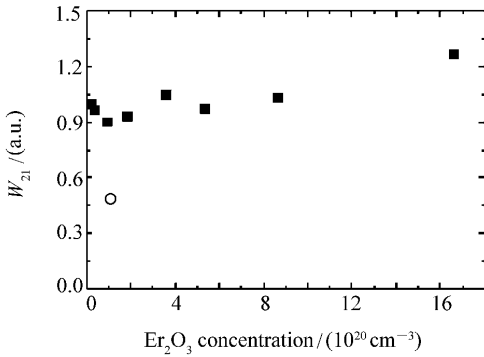


图 5 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 无辐射弛豫与 Er^{3+} 浓度的关系

Fig. 5 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ nonradiative relaxation rates against Er^{3+} concentration

The rates (W_{21}) are normalized to the least concentration (0.1 mol% Er_2O_3) in TW (square) and TZN (circle) glasses, respectively

使是掺杂浓度很高的时候(10 mol%)也只有不大的增加, 这是由在构成该无辐射弛豫的两种过程中, 同掺杂浓度无关的多声子弛豫过程占主导地位造成的。同时, 图中给出了在 TZN 玻璃中的 W_{21} 值, 可以看到 TW 玻璃中的无辐射弛豫速率约为 TZN 玻璃中的 2 倍, 说明 TW 玻璃更适合 980 nm 激光泵浦下实现光放大。

5 结 论

通过以上分析可知, 不同 Er^{3+} 掺杂浓度的碲钨酸盐玻璃其 1.5 μm 发射半峰宽都比较宽, 适合宽带通信的要求。 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 能级间由浓度猝灭引起的无辐射弛豫系数 $k = 3.2 \times 10^{-18} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 这对寻找合理的掺杂浓度有一定的参考意义。 Er^{3+} 在这一体系玻璃中 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 能级间无辐射弛豫速率约为 TZN 玻璃中的 2 倍, 说明 TW 玻璃更适合 980 nm 激光泵浦下实现光放大。

参考文献:

- [1] TANABE S, SUGIMOTO N, ITO S *et al.*. Broad-band 1.5 μm emission of Er^{3+} ions in bismuth-based oxide glasses for potential WDM amplifier[J]. *J. Luminescence* 2000 87-89: 670-672.
- [2] FENG X, TANABE S, HANADA T. Spectroscopic properties of erbium-doped ultraphosphate glasses for 1.5 μm amplification[J]. *J. Appl. Phys.* 2001 89(7): 3560-3567.
- [3] TIKHOMIROV V K, FURNISS D, SEDDON A B. Fabrication and characterization of nanoscale, Er^{3+} -doped, ultratransparent oxy-fluoride glass ceramics[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2002 81(11): 1937-1939.
- [4] MORI A, SAKAMOTO T, KOBAYASHI K *et al.*. 1.58 μm broad-band erbium-doped tellurite fiber amplifier[J]. *J. Light. Technol.* 2002 20(5): 794-799.
- [5] 杨艳民, 陈宝玖, 王成, 等. Er^{3+} 掺杂的 Bi_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2 玻璃的光谱性质[J]. 发光学报 2006 27(4): 469-473.
YANG Y M, CHEN B J, WANG CH *et al.*. Spectroscopic properties of Er^{3+} doped Bi_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2 glasses[J]. *Chinese J. Luminescence* 2006 27(4): 469-473. (in Chinese)
- [6] 屠明亮, 黄炜, 张旭东, 等. B_2O_3 含量对掺铒碲钨酸盐玻璃光谱性质及热稳定性影响[J]. 发光学报 2007 28(3): 361-366.
TU M L, HUANG W, ZHANG X D *et al.*. Effect of B_2O_3 content on the spectroscopic properties and thermal stability of Er^{3+} -doped niobic tellurite glasses[J]. *Chinese J. Luminescence* 2007 28(3): 361-366. (in Chinese)
- [7] WANG J S, VOGEL E M, SNITZER E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices[J]. *Opt. Mater.* 1994 3: 187-189.
- [8] JHA A, SHEN S, NAFTALY M. Structural origin of spectral broadening of 1.5 μm emission in Er^{3+} -doped tellurite glasses[J]. *Phys. Rev. (B)* 2000 62(10): 6215-6227.

- [9] MORI A ,OHISHI Y ,SUDO S. Erbium-doped tellurite glass fiber laser and amplified[J]. *Electron. Lett.* ,1997 ,33 :863-864.
- [10] FENG X ,TANABE S ,HANADA T. Spectroscopic properties and thermal stability of Er^{3+} -doped germanotellurite glasses for broadband fiber amplifiers[J]. *J. Am. Ceram. Soc.* 2001 ,84(1) :165-171.
- [11] PETIT L ,CARDINAL T ,VIDEAU J J *et al.* . Effect of the introduction of $Na_2B_4O_7$ on erbium luminescence in tellurite glasses[J]. *J. Non-Crystalline Solids* 2002 ,298(1) :76-88.
- [12] SHEN S ,NAFTALY M ,JHA A. Tungsten-tellurite—a host glass for broadband EDFA[J]. *Opt. Comm.* 2002 ,205 :101-105.
- [13] JUDD B R. Optical absorption intensities of rare-earth ions[J]. *Phys. Rev.* ,1962 ,127(3) :750-761.
- [14] OFELT G S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions[J]. *J. Chem. Phys.* ,1962 ,37(3) :511-520.

作者简介 骆永石(1975 —) 男 ,吉林扶余人 ,博士 ,主要从事稀土掺杂发光材料的研究。E-mail :luoys@ciomp. ac. cn
 张家骅(1965—) 男 ,黑龙江人 ,研究员 ,博士生导师 ,主要从事稀土物理与稀土发光材料的研究。
 E-mail :zjiahua@public. cc. jl. cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中国最早创办的液晶学科专业期刊
- 中国唯一的液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊 ,中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊
- 中文核心期刊 ,影响因子为 1. 156

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办 ,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新能力 ,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态 ,内容丰富 ,涵盖面广 ,信息量大 ,可读性强 ,是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊 ,国内定价 30. 00 元。国内邮发代号 :12 - 203 ;国外发行代号 :4868BM。

地 址 :长春市东南湖大路 3888 号

国内统一刊号 :CN 22-1259/O4

《液晶与显示》编辑部

国际标准刊号 :ISSN 1007-2780

邮 编 :130033

电 话 (0431)6176059

E-mail :yjxs@ciomp. ac. cn

网 址 :www. yejingyuxianshi. org