

Er³⁺掺杂Li₂O-SrO-ZnO-Bi₂O₃玻璃中Er³⁺离子 在1.53 μm处的荧光发射特性

张 宁^{1,2} 林志文¹ 满石清^{*,1}

(¹ 云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650500)

(² 云南师范大学能源与环境科学学院, 昆明 650500)

摘要: 采用传统的熔融法制备了Er³⁺掺杂的新型铋酸盐玻璃(Li₂O-SrO-ZnO-Bi₂O₃, LSZB), 并对其光谱性质进行了表征, 分析了玻璃的拉曼光谱、吸收光谱、荧光光谱, 利用Judd-Ofelt理论研究了其荧光特性。LSZB玻璃样品中Er³⁺的⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2}跃迁发射峰位于1.53 μm处, 半高宽约为78 nm。样品中Er³⁺的⁴I_{13/2}能级寿命为2.848 ms, 量子效率为99.93%, 受激发射截面达到9.76×10⁻²¹ cm²。以上结果显示, Er³⁺掺杂LSZB玻璃有良好的光谱特性。

关键词: 铒; 铋酸盐玻璃; 光放大器; Judd-Ofelt理论

中图分类号: O614.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4861(2021)06-0984-05

DOI: 10.11862/CJIC.2021.131

Luminescence Properties of Er³⁺ Ions in Er³⁺-Doped Li₂O-SrO-ZnO-Bi₂O₃ Glasses with 1.53 μm Emission

ZHANG Ning^{1,2} LIN Zhi-Wen¹ MAN Shi-Qing^{*,1}

(¹ School of Physics and Electronic Information Science & Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

(² School of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Er³⁺-doped novel bismuthate (Li₂O-SrO-ZnO-Bi₂O₃, LSZB) glasses have been fabricated through the conventional melt-quenching method, and the spectroscopic properties of Er³⁺ in the glasses were characterized. The density, refractive indexes, Raman spectra, optical absorption spectra, fluorescence spectra and radiative lifetime of the glasses were measured and analyzed. The fluorescence properties were calculated by using the Judd-Ofelt theory. The emission peak from the Er³⁺: ⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2} transition located around 1.53 μm with a full width at half maximum (FWHM) of ~78 nm. The lifetime of the ⁴I_{13/2} level was 2.848 ms and the quantum efficiency was 99.93%, respectively. The emission cross section was estimated to be 9.76×10⁻²¹ cm². In summary, the above results indicate that Er³⁺-doped LSZB glasses have good spectral characteristics.

Keywords: erbium; bismuth glasses; optical amplifier; Judd-Ofelt theory

掺铒光纤放大器(EDFA)是波分复用(WDM)通信系统中的关键器件之一, Er³⁺掺杂的硅基EDFA以其高增益、低噪声等优点在大容量光通信系统中得到了广泛的应用^[1-2]。随着通信网络中数据传输业务

的飞速发展, 人们对提高WDM系统传输容量的需求日益增长。由于传统的硅酸盐玻璃具有低的Er³⁺溶解浓度和窄的增益带宽等缺点, 硅酸盐玻璃基EDFA已不能满足大容量通信系统需求。因此, 寻

收稿日期: 2020-11-26。收修改稿日期: 2021-05-01。

国家自然科学基金(No.21661036, 21361028)资助。

*通信联系人。E-mail: sqman_ynnu@163.com

找具有宽的 $1.53\ \mu\text{m}$ 发射带宽和高的稀土溶解度的基质材料,对提高光纤通信系统传输容量具有非常重要的意义。

目前,人们已经对氟化物、硅酸盐、磷酸盐、锗酸盐、碲酸盐和铋酸盐进行了广泛的研究^[3-7]。其中,氟化物玻璃易与水反应;硅酸盐、磷酸盐、锗酸盐玻璃体系中 Er^{3+} 的荧光半高宽(FWHM)只有30~50 nm,以这些玻璃材料制作的光放大器,增益带宽较窄,限制了传输波长的信道数。虽然掺铋碲酸盐玻璃光纤放大器具有宽的增益特性,增益带宽达到83 nm,但是碲酸盐玻璃较差的热稳定性以及其昂贵的原料价格限制了其在实际生产中的应用^[8-9]。 Er^{3+} 掺杂的 $43\text{Bi}_2\text{O}_3-x\text{B}_2\text{O}_3-(57-x)\text{SiO}_2$ 玻璃呈现出了较宽的 $1.5\ \mu\text{m}$ 发射,但随着 B_2O_3 量的增加,带宽增加,量子效率下降,其中 $43\text{Bi}_2\text{O}_3-57\text{B}_2\text{O}_3$ 玻璃量子效率仅为34%^[10]。

新型铋酸盐玻璃以 Bi_2O_3 和 Li_2O 为主要成分,具有较好的热稳定性和光学性能,透光范围从可见光至 $9\ \mu\text{m}$ 波长^[11]。我们采用传统的熔融法制备了掺 Er^{3+} 的 $\text{Li}_2\text{O}-\text{SrO}-\text{ZnO}-\text{Bi}_2\text{O}_3$ (LSZB)玻璃,通过拉曼光谱仪、紫外可见近红外分光光度计和荧光光谱仪等对玻璃材料的光学性能进行表征。研究了新型铋酸盐玻璃LSZB中 Er^{3+} 在 $1.53\ \mu\text{m}$ 处的荧光特性。

1 实验部分

按照 Li_2O 、 SrO 、 ZnO 、 Bi_2O_3 的物质的量之比20:3:10:67制备无掺杂与掺杂质量分数1.0% Er_2O_3 的玻璃样品。玻璃原料使用 $\text{Li}_2\text{CO}_3(\text{AR})$ 、 $\text{SrCO}_3(\text{AR})$ 、 $\text{ZnO}(\text{AR})$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3(\text{AR})$ 和 $\text{Er}_2\text{O}_3(99.99\%)$,原料研细混匀后放入带盖的铂金坩埚内,使用高温马弗炉加热至 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 熔融反应30 min后倒出至不锈钢托盘中进行冷却。玻璃成型后,样品随即放入 $270\sim 300\ ^\circ\text{C}$ 的马弗炉中进行退火24 h。最后进行切割和抛光,将玻璃加工成 $20\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}$ 的样品,用于光谱性质测试。加工后的样品为橙黄色且透明度良好的双面光滑薄片。

采用阿基米德排水法测量 Er^{3+} 掺杂LSZB玻璃样品的体积,计算其密度为 $8.167\ 8\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。使用棱镜耦合仪(Metricon 2010)测试 Er^{3+} 掺杂LSZB玻璃样品的折射率,其在635.9和 $1\ 547.9\ \text{nm}$ 处的折射率分别为2.384 5和2.274 8。通过柯西色散公式 $n=A+B/\lambda^2$ (其中 λ 为光波长, n 为对应光波长的折射率)计算其系数为 $A=2.245\ 7$ 和 $B=53\ 326.803$ 。

样品的拉曼光谱由英国OceanOptic公司的QE65Pro拉曼光谱仪记录,范围 $0\sim 1\ 000\ \text{cm}^{-1}$,激发光源为785 nm半导体激光器。吸收光谱采用美国Perkin-Elmer公司的Lambda 900紫外可见近红外分光光度计测定。使用法国Jobin-Yvon公司的Triax 320荧光光谱仪测试样品荧光光谱和荧光寿命,泵浦光源为980 nm激光器。以上所有测试均在室温下进行。

2 结果与讨论

2.1 拉曼光谱特性

图1为无掺杂LSZB玻璃样品的拉曼光谱。为了更好地分析各个结构体的拉曼位移和强度,采用Gaussian拟合法对拉曼光谱进行分峰拟合处理。从图1中可以看出,在LSZB玻璃网络中存在4个特征振动峰,分别位于 240 、 346 、 485 和 $596\ \text{cm}^{-1}$ 。其中, $240\ \text{cm}^{-1}$ 处的振动峰应源于Bi与O原子的半桥接半非桥接 $\text{O}-\text{Bi}\cdot\text{O}$ 振动^[12], $346\ \text{cm}^{-1}$ 处的振动峰源于 $[\text{BiO}_3]$ 三角体和 $[\text{BiO}_6]$ 八面体中 $\text{O}-\text{Bi}-\text{O}$ 的振动^[13], $485\ \text{cm}^{-1}$ 振动峰源于 $[\text{BiO}_6]$ 八面体中Bi—O的伸缩振动^[14], $596\ \text{cm}^{-1}$ 处的振动峰应归属于Bi—O(—Li)振动^[15]。

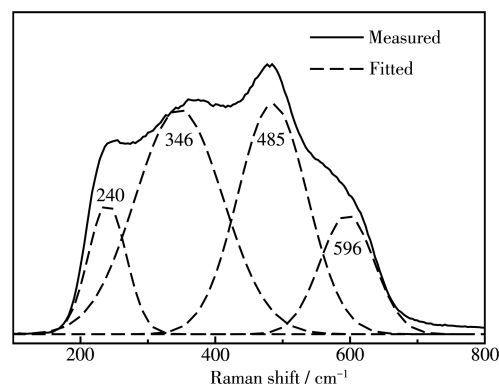


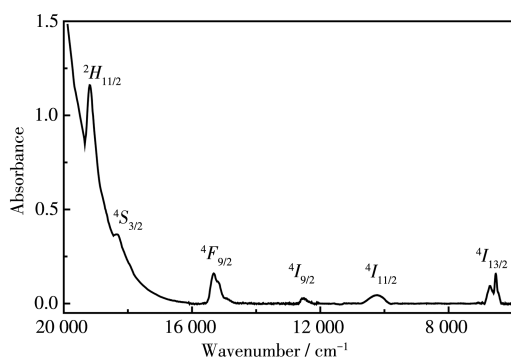
图1 无掺杂LSZB玻璃的拉曼光谱

Fig.1 Raman spectrum of undoped LSZB glasses

2.2 吸收光谱与Judd-Ofelt理论分析

室温下 Er^{3+} 掺杂LSZB玻璃样品的吸收光谱如图2所示,范围覆盖可见光至近红外光。由图可见, Er^{3+} 有6个吸收峰,分别位于 $19\ 175\ \text{cm}^{-1}(522\ \text{nm})$ 、 $18\ 332\ \text{cm}^{-1}(543\ \text{nm})$ 、 $15\ 326\ \text{cm}^{-1}(653\ \text{nm})$ 、 $12\ 516\ \text{cm}^{-1}(798\ \text{nm})$ 、 $10\ 215\ \text{cm}^{-1}(976\ \text{nm})$ 和 $6\ 527\ \text{cm}^{-1}(1\ 530\ \text{nm})$,分别对应从基态 $^4I_{15/2}$ 到 $^2H_{11/2}$ 、 $^4S_{3/2}$ 、 $^4F_{9/2}$ 、 $^4I_{9/2}$ 、 $^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{13/2}$ 激发态的跃迁。

为了进一步研究研究LSZB玻璃的光学特性,

图2 1.0% Er₂O₃掺杂LSZB玻璃的吸收光谱Fig.2 Absorption spectrum of LSZB glasses doped with 1.0% Er₂O₃

引入Judd-Ofelt理论进行分析^[16-17]。根据Judd-Ofelt理论,初态能级 $(S, L)J$ 与末态能级 $(S', L')J'$ 间的电偶极子谱线强度(S_{ed})可用如下公式表示:

$$S_{\text{ed}} = \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_{\lambda} |\langle (S, L)J || U^{(\lambda)} || (S', L')J' \rangle|^2 \quad (1)$$

其中, Ω_{λ} 为Judd-Ofelt强度参数,由基质材料的配位特性决定, $\langle (S, L)J || U^{(\lambda)} || (S', L')J' \rangle$ 为约化矩阵元, S, L 和 J 分别对应某一特定能级的自旋角动量量子数、轨道角动量量子数和总角动量量子数,基本不随基质的变化而变化,这里采用了文献^[18]中数据。

S_{ed} 与计算振子强度 f_{cal} 的关系如下:

$$f_{\text{cal}} = \frac{8\pi^2 mc}{3h\lambda(2J+1)} \frac{(n^2+2)^2}{9n} S_{\text{ed}} \quad (2)$$

其中, m 为电子质量, c 为真空光速, h 为Planck常

数, λ 为谱线中心波长, n 为谱线中心波长 λ 对应的折射率。

样品的实验振子强度(f_{exp})可以根据样品的吸收光谱由以下公式计算:

$$f_{\text{exp}} = \frac{mc^2}{N_0 \pi e^2 \lambda^2} \int e(\nu) d\nu \quad (3)$$

其中, N_0 为样品中稀土离子的物质的量浓度, e 为电子电量, ν 为光波数, $e(\nu)$ 为吸收系数。由于 f_{exp} 中同时包含电偶极子和磁偶极子的贡献,磁偶极子振子强度(f_{md})必须从 f_{exp} 中减掉,以得到 S_{ed} 。 f_{md} 可以由下式计算:

$$f_{\text{md}} = n \frac{8\pi^2 mc}{3h\lambda(2J+1)} S_{\text{md}} \quad (4)$$

其中磁偶极子谱线强度(S_{md})可表示如下:

$$S_{\text{md}} = \frac{1}{4m^2 c^2} |\langle (S, L)J || L + 2S || (S', L')J' \rangle|^2 \quad (5)$$

可见 S_{md} 与基质无关,这里采用了文献^[19]中数据。

采用最小二乘法拟合得到 Ω_{λ} 值,拟合结果的准确度由均方根偏差rms来衡量:

$$\text{rms} = \left[\frac{\sum (f_{\text{exp}} - f_{\text{cal}})^2}{p-3} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中, p 为参与拟合计算的吸收峰个数。以上全部计算结果见表1。

表1 Er³⁺在LSZB玻璃中的 f_{exp} 、 f_{cal} 、 f_{md} 、 S_{ed} 及 Ω_{λ} Table 1 Measured and calculated f_{exp} , f_{cal} , f_{md} , S_{ed} and Ω_{λ} of Er³⁺ in LSZB glasses

Transition	Energy / cm ⁻¹	f_{exp}	f_{cal}	f_{md}	S_{ed}
$4I_{15/2} \rightarrow 4I_{13/2}$	6 527	2.019×10^{-6}	1.362×10^{-6}	7.184×10^{-7}	1.231×10^{-20}
$4I_{15/2} \rightarrow 4I_{11/2}$	10 215	9.83×10^{-7}	6.42×10^{-7}		3.61×10^{-21}
$4I_{15/2} \rightarrow 4I_{9/2}$	12 516	2.50×10^{-7}	5.65×10^{-7}		2.53×10^{-21}
$4I_{15/2} \rightarrow 4F_{9/2}$	15 326	3.251×10^{-6}	3.074×10^{-6}		1.087×10^{-20}
$4I_{15/2} \rightarrow 4S_{3/2}$	18 332	1.56×10^{-7}	5.51×10^{-7}		1.56×10^{-21}
$4I_{15/2} \rightarrow 2H_{11/2}$	19 175	9.778×10^{-6}	9.801×10^{-6}		2.613×10^{-20}
Ω_2 / cm^2			2.75×10^{-20}		
Ω_4 / cm^2			1.42×10^{-20}		
Ω_6 / cm^2			7.1×10^{-21}		
rms			5.26×10^{-7}		

根据Judd-Ofelt理论,可由拟合得到的 Ω_{λ} 值,通过以下公式计算出从能级 $(S, L)J$ 到能级 $(S', L')J'$ 的

自发辐射跃迁几率:

$$A_{\text{cal}}[(S, L)J; (S', L')J'] = A_{\text{ed}} + A_{\text{md}} = \frac{64\pi^4 e^2}{3h\lambda(2J+1)} \left[\frac{n(n^2+2)^2}{9} S_{\text{ed}} + n^3 S_{\text{md}} \right] \quad (7)$$

其中 A_{ed} 和 A_{md} 分别对应电偶极子和磁偶极子的自发辐射跃迁几率。依据计算得到的各能级间自发辐射跃迁几率,根据下式计算出某一能级的荧光分支比:

$$\beta[(S,L)J;(S',L')J'] = \frac{A_{\text{cal}}[(S,L)J;(S',L')J']}{\sum_{S',L',J'} A_{\text{cal}}[(S,L)J;(S',L')J']} \quad (8)$$

同时可以进一步计算出该能级的辐射跃迁寿命(τ_{rad})^[20]:

$$\tau_{\text{rad}} = \left\{ \sum_{S',L',J'} A_{\text{cal}}[(S,L)J;(S',L')J'] \right\}^{-1} \quad (9)$$

以上全部计算结果见表2。

表2 Er³⁺在LSZB玻璃中的 A_{ed} 、 A_{md} 、 β 和 τ_{rad}
Table 2 A_{ed} , A_{md} , β and τ_{rad} of Er³⁺ in the LSZB glasses

Transition	Energy / cm ⁻¹	$A_{\text{ed}} / \text{s}^{-1}$	$A_{\text{md}} / \text{s}^{-1}$	$A_{\text{total}} / \text{s}^{-1}$	β	$\tau_{\text{rad}} / \text{ms}$
$^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	6 527	231	120	351	1	2.85
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	3 688	36	33	69	0.18	2.65
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10 215	308		308	0.82	
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2 301	1	7	8	0.02	1.90
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	5 989	92		92	0.17	
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	12 516	426		426	0.81	
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2 801	6	4	10	0	0.20
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	5 111	133	79	212	0.04	
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	8 799	204		204	0.04	
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	15 326	4 506		4 506	0.92	
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3 006	1		1	0	0.24
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	5 816	129		129	0.03	
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	8 117	77		77	0.02	
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	11 805	1 026		1 026	0.24	
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	18 332	3 003		3 003	0.71	

2.3 荧光光谱与受激发射截面

图3为Er³⁺掺杂LSZB玻璃样品在980 nm激光激发下 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁的荧光发射光谱。由图可以看出,该跃迁的发射峰位于1.53 μm处,荧光发射带的(FWHM)约为78 nm,明显大于硅酸盐玻璃(30~40 nm)的FWHM。图4为该样品在980 nm激光激发下, $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 辐射跃迁的衰减曲线。通过使用单指

数衰减函数进行拟合,得到Er³⁺的 $^4I_{13/2}$ 能级寿命 τ_{mea} 为2.848 ms。通过公式(10)计算得出 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 的跃迁量子效率 η 为99.93%。

$$\eta = \frac{\tau_{\text{mea}}}{\tau_{\text{rad}}} \times 100\% \quad (10)$$

Er³⁺掺杂的LSZB玻璃中Er³⁺的 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁吸收截面 σ_a 可由测量的吸收光谱通过下式计算得出:

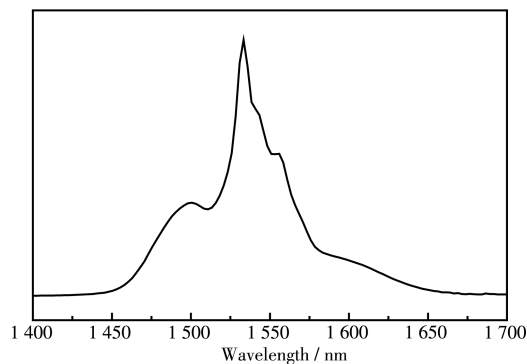


图3 Er³⁺掺杂LSZB玻璃的 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁荧光光谱
Fig.3 Fluorescence spectrum of $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ transition of Er³⁺-doped LSZB glasses

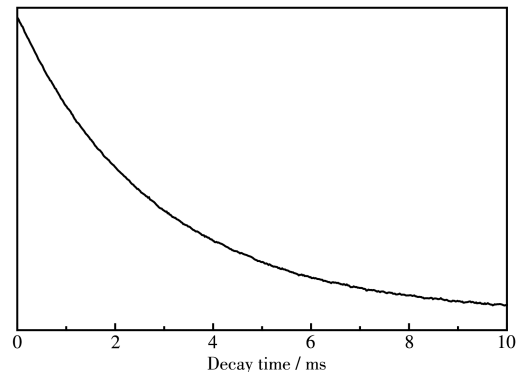


图4 Er³⁺掺杂LSZB玻璃的 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁荧光衰减曲线
Fig.4 Decay curve for $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ transition of Er³⁺-doped LSZB glasses

$$\sigma_a = \frac{2.303}{N_0 d} OD(\nu) \quad (11)$$

其中, $OD(\nu)$ 为光密度, d 为样品厚度。同时, 根据 McCumber 理论可知^[21], Er^{3+} 的 σ_a 和受激发射截面 σ_e 存在下列关系:

$$\sigma_a(\nu) = \sigma_e(\nu) \exp[(\varepsilon - h\nu)/(kT)] \quad (12)$$

其中 k 为 Boltzman 常数, T 为温度, ε 为将 Er^{3+} 离子从基态激发到激发态的自由能^[22]。

通过计算得到的 Er^{3+} 掺杂 LSZB 玻璃 σ_a 和 σ_e 如图 5 所示, 其在峰值波长 1.53 μm 的 σ_e 为 $9.76 \times 10^{-21} cm^2$ 。表 3 中列出了 Er^{3+} 在不同玻璃基质中的荧光 FWHM 和 σ_e 。可以看出, 相较于硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、锗酸盐玻璃和碲酸盐玻璃, Er^{3+} 掺杂 LSZB 玻璃具有较大的荧光 FWHM 和 σ_e 。这是由于 σ_e 正比于玻璃基质的折射率 n : $\sigma_e \propto (n^2 + 2)/(9n)$, 而 LSZB 玻璃的折射率较大 (> 2.24)。

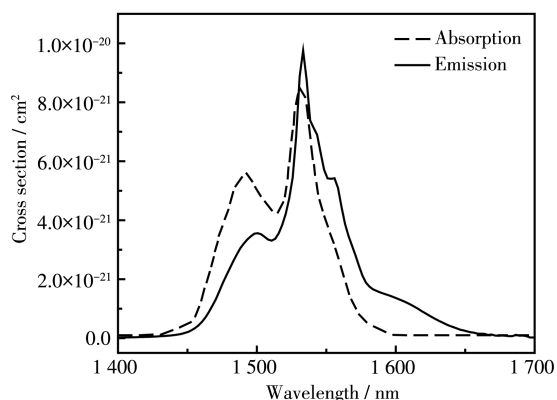


图5 Er^{3+} 掺杂 LSZB 玻璃的 σ_a 和 σ_e

Fig.5 σ_a and σ_e of Er^{3+} -doped LSZB glasses

表3 多种 Er^{3+} 掺杂玻璃的 FWHM 和 σ_e ($I_{13/2} \rightarrow I_{15/2}$ 跃迁)

Table 3 FWHM and σ_e in different Er^{3+} -doped glasses ($I_{13/2} \rightarrow I_{15/2}$ transition)

Glass	FWHM / nm	σ_e / cm^2	Ref.
Silicate	40	5.5×10^{-21}	[23]
Phosphate	37	6.4×10^{-21}	[24]
Germanate	53	5.7×10^{-21}	[25]
Tellurite	71	7.5×10^{-21}	[26]
LSZB	78	9.76×10^{-21}	This work

3 结论

制备了 Er^{3+} 掺杂 $Li_2O-SrO-ZnO-Bi_2O_3$ (LSZB) 玻璃, 分析了该玻璃的拉曼光谱, 计算了 Judd-Ofelt 参数, Judd-Ofelt 强度以及 Er^{3+} 离子的自发辐射几率、荧

光分支比和理论辐射寿命。 Er^{3+} 掺杂 LSZB 玻璃 $I_{13/2} \rightarrow I_{15/2}$ 跃迁的发射峰位于 1.53 μm 处, FWHM 约为 78 nm, $I_{13/2}$ 能级寿命为 2.848 ms, 量子效率为 99.93%, 受激发射截面达到 $9.76 \times 10^{-21} cm^2$ 。

参考文献:

- [1] 孟硕, 赵梦洁, 韦钦磊, 邹翔宇, 张洪波, 苏春辉. 无机化学学报, **2017**, **33**(9):1505-1509
MENG S, ZHAO M J, WEI Q L, ZOU X Y, ZHANG H B, SU C H. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2017**, **33**(9):1505-1509
- [2] 厉宇翔, 邓声玉, 范亚蕾, 王德强. 无机化学学报, **2017**, **33**(5):801-808
LI Y X, DENG S Y, Fan Y L, WANG D Q. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2017**, **33**(5):801-808
- [3] 张瑜, 黄飞飞, 刘力挽, 周秦岭, 邢朝君, 杨科, 陈丹平. 光子学报, **2015**, **35**(8):225-230
ZHANG Y, HUANG F F, LIU L W, ZHOU Q L, XING C J, YANG K, CHEN D P. *Acta Photonica Sinica*, **2015**, **35**(8):225-230
- [4] 宋峰. 激光与光电子进展, **2007**, **4**:15-25
SONG F. *Laser & Optoelectronics Progress*, **2007**, **4**:15-25
- [5] Albalawi A, Brilliant C, Chiasera A, Gebavi H, Balda R, Ferrari M, Blanc W, Albalawi W, Hung H, Quandt A, Lukowiak A, Taccheo S. *Optic. Mater.*, **2019**, **87**:29-34
- [6] Miedzinski R, Fuks-Janczarek I, Said Y E. *Opt. Mater.*, **2016**, **60**:456-461
- [7] 吴昌根, 姚连增, 夏海平. 化学物理学报, **2005**, **18**(2):218-222
WU C G, YAO L Z, XIA H P. *Chinese Journal of Chemical Physics*, **2005**, **18**(2):218-222
- [8] Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. *Opt. Mater.*, **1994**, **3**:187-203
- [9] Shen S, Naftaly M, Jha A. *Opt. Commun.*, **2002**, **205**:101-105
- [10] Tanabe S, Sugimoto N, Ito S, Hanada T. *J. Lumin.*, **2000**, **87**:670-672
- [11] Fu J. *J. Non-Cryst. Solids*, **1996**, **194**:207-209
- [12] Yu Q S, Chen F F, Xu T F, Dai S X, Zhang Q Y. *J. Non-Cryst. Solids*, **2013**, **378**:254-257
- [13] Baia L, Iliescu T, Simon S, Kiefer W. *J. Mol. Struct.*, **2001**, **599**(1):9-13
- [14] Fan H, Wang G, Hu L. *Solid State Sci.*, **2009**, **11**(12):2065-2070
- [15] 陈丹平, 姜雄伟, 朱从善. 无机材料学报, **2002**, **17**(2):202-209
CHEN D P, JIANG X W, ZHU C S. *J. Inorg. Mater.*, **2002**, **17**(2):202-209
- [16] Judd B R. *Phys. Rev.*, **1962**, **127**:750-761
- [17] Ofelt G S. *Chem. Phys.*, **1962**, **37**:511-520
- [18] Weber M J, Myers J D, Blackburn D H. *Appl. Phys.*, **1981**, **52**:2944-2949
- [19] Weber M J. *Phys. Rev.*, **1967**, **157**:262-276
- [20] Jacobs R, Weber M. *IEEE*, **1976**, **12**:102-111
- [21] McCumber D E. *Phys. Rev.*, **1964**, **134**:A299-A306
- [22] Miniscalco W J, Quimby R S. *Opt. Lett.*, **1991**, **16**(4):258-260
- [23] Miniscalco W J. *J. Lightwave Technol.*, **1991**, **9**(2):234-250
- [24] Jiang S B, Luo T, Hwang B C, Smekatala F, Seneschal K, Lucas J, Peyghambarian N. *J. Non-Cryst. Solids*, **2000**, **263-264**:364-368
- [25] Lin H, Pun E Y B, Man S Q, Liu X R. *J. Opt. Soc. Am.*, **2001**, **B18**(5):602-609
- [26] 吴家禄, 戴世勋, 张军杰, 胡丽丽, 姜中宏. 光子学报, **2006**, **35**(2):209-213
WU J L, DAI S X, ZHANG J J, HU L L, JIANG Z H. *Acta Photonica Sinica*, **2006**, **35**(2):209-213