Yb³⁺敏化宽波带掺Er³⁺氟磷酸盐玻璃的发光性质及 Judd-Ofelt理论研究

郑涛¹ 李攀¹ 肖生春¹ 王丹¹ 吕景文^{1*} 门志伟²

(¹长春理工大学材料科学与工程学院, 长春 130022; ²吉林大学物理学院, 长春 130012)

摘要: 采用高温熔融法制备了一种新的Er³⁺/Yb³⁺共掺氟磷酸盐玻璃, 测试和分析了其密度、吸收光谱以及荧光光谱, 讨论了Er³⁺离子和Yb³⁺离子对光谱性质的影响。根据Judd-Ofelt理论计算了玻璃中Er³⁺离子的强度参数 Ω_t ($t=2, 4, 6$), 分别为 $\Omega_2=4.36 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4=1.35 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6=0.79 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 以及Er³⁺离子⁴I_{13/2}能级荧光寿命 $\tau_m=8.26 \text{ ms}$ 。主发射峰1.53 μm 处半高宽(FWHM)为68 nm。根据McCumber理论计算了Er³⁺的受激发射截面 $\sigma_e=8.5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。比较了不同玻璃基质中Er³⁺离子的光谱特性, 结果表明: Er³⁺/Yb³⁺双掺氟磷酸盐玻璃在1.53 μm 附近具有较宽的半高宽和较大的受激发射截面, 是一种高增益掺铒光纤放大器的理想介质材料。

关键词: 氟磷酸盐玻璃; McCumber理论; Judd-Ofelt理论; 荧光光谱; 荧光寿命

中图分类号: O644; TQ171

Luminance Properties and Judd-Ofelt Theory Study of Yb³⁺ Sensitization Wideband Er³⁺ Doped Fluorophosphate Glass

ZHENG Tao¹ LI Pan¹ XIAO Sheng-Chun¹ WANG Dan¹ LÜ Jing-Wen^{1*} MEN Zhi-Wei²

(¹Department of Material Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, P. R. China; ²Department of Physics, Jilin University, Changchun 130012, P. R. China)

Abstract: A new Er³⁺/Yb³⁺-codoped fluorophosphate glass was prepared by high temperature melting. Its density, absorption spectra, and fluorescence spectra were measured and investigated. The effect of Er³⁺ and Yb³⁺ concentrations on the spectroscopic properties of the glass sample are discussed. A Judd-Ofelt theory analysis on the absorption spectra was performed. The oscillator strengths were Ω_t ($t=2, 4, 6$), $\Omega_2=4.36 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4=1.35 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, and $\Omega_6=0.79 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$. The lifetime (τ_m) of the ⁴I_{13/2} level for the Er³⁺ ions was 8.26 ms and the full width at half maximum (FWHM) of the main emission peak was 68 nm at 1.53 μm . The large stimulated emission cross-section ($\sigma_e=8.5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$) of the Er³⁺ was calculated using McCumber theory. The spectroscopic properties of the Er³⁺ ion were compared among different glasses. The FWHM and σ_e of Er³⁺/Yb³⁺-codoped fluorophosphate glass were found to be larger than those of other glass hosts, which indicates that this glass may be a potentially useful candidate material host for a high-gain erbium-doped fiber amplifier.

Key Words: Fluorophosphate glass; McCumber theory; Judd-Ofelt theory; Fluorescence spectrum; Fluorescence lifetime

1 引言

氟磷酸盐具有优良的光学性质, 多年来一直受

到人们的关注。^{1,2} 高稀土溶解性、³ 低声子能量、非线性折射率、⁴ 高增益系数、⁵ 宽带宽以及低上转换等

Received: March 3, 2011; Revised: June 1, 2011; Published on Web: July 5, 2011.

*Corresponding author. Email: ljwcc@126.com; Tel: +86-431-85583058.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (11075026).

国家自然科学基金(11075026)资助项目

优点,⁶ 使其在可见光和红外激光器、光纤放大器、光学数据储存设备、水下光学通信、生物医学诊断和传感器等方面都有着广泛的应用.⁷⁻¹¹

Er^{3+} 和 Yb^{3+} 作为1.53 μm 光纤放大器的激活离子应用广泛, Li等¹²研究了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃的光学性质和热稳定性, 结果显示, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺氟磷酸盐光学玻璃中加入 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 能够显著提高玻璃的热稳定性.

本文研究了基于 P_2O_5 、 MgF_2 、 BaF_2 、 AlF_3 、 ZnO 、 Pb_2O_3 的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃的光谱性质, 应用Judd-Ofelt理论对氟磷酸盐中 Er^{3+} 的跃迁振子强度、强度参数、自发跃迁概率、荧光分子比等参数进行计算, 根据McCumber理论计算受激发射截面, 通过对不同玻璃基质中 Er^{3+} 离子光谱特性的比较, 表明这种玻璃是宽带光纤放大器理想的基质材料.

2 实验

2.1 样品的制备

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃选择的配方为 $(65-m-n)\text{P}_2\text{O}_5-10\text{RF}_2-5\text{AlF}_3-5\text{ZnO}-15\text{Pb}_2\text{O}_3-m\text{Er}_2\text{O}_3-n\text{Yb}_2\text{O}_3$, 其中R为碱土金属(其组成为Mg、Ca、Sr、Ba中的一种或几种), m 、 n 为摩尔分数(%), 下同, 分别为 $m=1.0$, $n=3, 4, 5, 6, 7$ (记为E1Yb3, E1Yb4, E1Yb5, E1Yb6, E1Yb7); $n=5$, $m=0.5, 1.0, 1.5$ (记为E0.5Yb5, E1.0Yb5, E1.5Yb5). 其中主要原料为 P_2O_5 (98%, 北京红星化工厂)、 AlF_3 (99%, 上海试剂三厂)、 ZnO (99.5%, 沈阳试剂二厂)、 Pb_2O_3 (99%, 天津化学试剂三厂)、 Er_2O_3 (99.999%, 甘肃稀土公司)和 Yb_2O_3 (99.999%, 甘肃稀土公司). 将原料混合均匀, 放入铂金坩埚中, 将硅碳棒电炉升温至1300 $^{\circ}\text{C}$, 保温30 min. 待玻璃完全熔化之后, 把玻璃熔体倒入事先预热的模具中, 再放入450 $^{\circ}\text{C}$ 马弗炉中. 马弗炉温度从450 $^{\circ}\text{C}$ 开始, 以10 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速率降至室温并将退火后的玻璃切割打磨, 经抛光后制成10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 2 mm的玻璃薄片, 进行光谱测试.

2.2 性能的测试

玻璃的密度用阿基米德法测得, 吸收光谱用Perkin-Elmer-Lambda 950 UV/VIS/NIR型分光光度计测试, 测量范围为350–1700 nm, 荧光光谱由TRI-AX320型荧光光谱仪测试, 用980 nm的激发二极管(LD)作为激发源, 测量范围为1400–1700 nm. 所有测量均在室温下进行.

3 结果与讨论

3.1 密度分析

本文制备的氟磷酸盐玻璃的密度随 Er_2O_3 和 Yb_2O_3 含量的变化而变化, 结果如图1所示. 从图1中可以看到, 随着 Yb^{3+} 浓度的增加, 玻璃密度明显呈线性增加. 这是由于Er和Yb的相对原子量比P的相对原子量大而且比组分中的其他原子相对原子量大, 用 Yb_2O_3 代替 P_2O_5 的时候, 密度也随着线性增大. 从图1中也可以看到, 随着 $x_{\text{Er}^{3+}}$ 含量从0.5%增加到1.5%, 玻璃密度也是随着 $x_{\text{Er}^{3+}}$ 量的增大而增大的. 不过没有 $x_{\text{Yb}^{3+}}$ 含量增大时变化明显, 这是因为 $x_{\text{Er}^{3+}}$ 的含量变化没有 $x_{\text{Yb}^{3+}}$ 的变化大. 同时, 由于磷酸盐四面体具有 Q^0 、 Q^1 、 Q^2 、 Q^3 等多种结构,¹³ 加入 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 等三价离子可以形成复杂的紧密结构, 这对密度的增加也有贡献.

3.2 吸收光谱和Judd-Ofelt理论分析

图2为不同 Er^{3+} 离子浓度的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃吸收光谱图, 其中横坐标为波长, 纵坐标

图1 氟磷酸盐玻璃的密度随 Er_2O_3 和 Yb_2O_3 含量的变化
Fig.1 Density changes of fluorophosphate glasses with the contents of Er_2O_3 and Yb_2O_3

图2 不同 Er^{3+} 离子浓度的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺氟磷酸盐吸收光谱
Fig.2 Absorption spectra of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fluoride phosphate glass with different Er^{3+} -doped concentrations

为吸收系数, 测量波长范围为 350–1700 nm. 为了清晰起见, 将各玻璃样品的吸收光谱进行了适当上移和分离处理, 同时为了使 Er³⁺ 离子的吸收峰较明显, Yb³⁺ 离子的吸收峰没有完全显示. 图中标出了 Er³⁺ 离子从基态 ⁴I_{5/2} 能级到各个主要激发态能级以及 Yb³⁺ 离子从基态 ²F_{7/2} 到 ³F_{5/2} 的吸收跃迁. Er³⁺ 离子的主要吸收峰分别对应 ⁴G_{11/2}、²H_{11/2}、⁴F_{9/2}、⁴I_{11/2}、⁴I_{13/2}, 其相应的波长分别为 378、518、648、975、1532 nm. 其他峰值不明显或者其他激发态的能级吸收已经被基质吸收所掩盖. 位于 980 nm 附近的吸收带很强, 这个吸收带可以看作是由 Yb³⁺ 离子的吸收引起的, 这是因为在此吸收带 Yb³⁺ 离子比 Er³⁺ 离子的吸收截面大,¹⁴ 而且其浓度比 Er³⁺ 离子浓度大很多. 同时, Yb³⁺ 离子是简单的二能级结构, 不存在上转换和浓度淬灭, 从 Yb³⁺ 到 Er³⁺ 有很高的正向能量传递, Yb³⁺ 敏化 Er³⁺ 将大大提高 980 nm 的吸收效率, 有利于光纤放大器对带宽的要求. 从图中可以看出, 随着 x_{Er³⁺} 从 0.5% 增加到 1.5% 时, 各吸收峰的吸收系数均增大.

按照 Judd-Ofelt^{15,16} 理论, 4f^N 电子组态的电偶极子跃迁谱线强度 S_{JJ'} 计算公式为

$$S_{JJ'} = \sum_{t=2,4,6} \Omega_t \left| \left\langle 4f^N(\alpha SL)J \left\| U^{(t)} \right\| 4f^N(\alpha' S' L')J' \right\rangle \right|^2 \quad (1)$$

Ω_t 为谱线强度参数(具有面积量纲), S、L、J 和 S'、L'、J' 分别为初态和末态的自旋角动量量子数、轨道角动量量子数以及总角动量量子数, $\left\langle 4f^N(\alpha SL)J \left\| U^{(t)} \right\| 4f^N(\alpha' S' L')J' \right\rangle$ 为约化矩阵元, 首先通过实验测得吸收谱强度 S_{JJ'}, 再通过计算机拟合得到谱线强度

参数.

跃迁实验振子强度为

$$f_{\text{exp}} = \frac{m_e c^2}{\pi e^2 N_0} \int k(\nu) d\nu \quad (2)$$

式中, m_e、e、c 分别为电子的质量、电子电荷和光速; N₀ 为单位体积内 Er³⁺ 离子的浓度(ions·cm⁻³), k(ν) 为玻璃样品在波数 ν 上的吸收系数(cm⁻¹), 由吸收光谱仪测得. 实验振子强度应是电偶极跃迁振子强度 f_{cal}^{ed} 和磁偶极跃迁振子强度 f_{cal}^{md}, 即

$$f_{\text{exp}} = f_{\text{cal}}^{\text{ed}} + f_{\text{cal}}^{\text{md}} \quad (3)$$

根据 Judd-Ofelt 理论, 电偶极跃迁振子强度表达式为

$$f_{\text{cal}}^{\text{ed}} = \frac{8\pi^2 m c \nu}{3 h (2J+1)} \frac{(n^2+2)^2}{9n} S_{JJ'} \quad (4)$$

式中, ν 为吸收谱线中心波数; n 为玻璃的折射率; h 为普朗克常量.

$$f_{\text{cal}}^{\text{md}} = \frac{8\pi^2 m c \nu}{3 h e^2} \frac{n}{(2J+1)} S_{JJ'}^{\text{md}} \quad (5)$$

其拟合得出 Ω_t 参量

$$\sum_t \Omega_t U_{JJ'}^{(t)} = S_{JJ'} \quad (6)$$

计算结果如表 1 所示, 一般来说, Judd-Ofelt 强度参数 Ω₂ 与 Er³⁺ 离子在玻璃基质中所处位置的极化程度和对称性有关,¹⁷ 极化度和非对称性越大, Ω₂ 值越大, Ω₆ 的大小与玻璃中 Er—O 键共价性的强弱有关, Er—O 键共价性越强, Ω₆ 值越小, 反之 Ω₆ 值越大. 表 2 给出了此配方的 Er³⁺ 在氟磷酸盐基质与其它玻璃基质的强度参量的比较, 可以看到本实验玻璃的

表 1 掺 Er³⁺ 氟磷酸盐测量振子电偶极矩跃迁强度 f_{exp}^{ed} 和实验吸收强度 S_{JJ'} (E1.0Yb5)

Table 1 Measured transition intensity of dipole electric dipole moment f_{exp}^{ed} and experimental absorption intensity S_{JJ'} (E1.0Yb5) of Er³⁺-doped fluoride phosphate

Transition	ν/cm ⁻¹	λ/nm	K(λ)∫K(λ)dλ	10 ⁶ f _{exp} ^{ed}	10 ²⁰ S _{JJ'}	10 ⁶ f _{md}
⁴ I _{5/2} →(^{S'} , ^{L'})J'	6527	1532	22.939	0.766	1.117	0.535
→ ⁴ I _{13/2}	10267	974	467.350	65.613	60.800	
→ ⁴ I _{11/2}	12531	798	2.520	0.527	0.400	
→ ⁴ I _{9/2}	15385	650	4.378	1.380	0.854	
→ ⁴ F _{9/2}	18382	544	0.899	0.405	0.210	
→ ⁴ S _{3/2}	19231	520	13.104	6.455	3.193	
→ ² H _{11/2}	20492	488	2.686	1.502	0.697	
→ ⁴ F _{7/2}	22222	450	0.455	0.299	0.128	
→ ⁴ F _{5/2}	22624	442	0.100	0.068	0.029	
→ ⁴ F _{3/2}	24631	406	0.881	0.712	0.275	
→ ² H _{9/2}	26455	378	14.552	13.564	4.878	
→ ⁴ G _{11/2}	27473	364	2.192	2.204	0.763	

K(λ) is the absorption coefficient of glass with the wavelength (λ), f_{exp}^{ed} is the oscillator strength of electric dipole transition, f_{md} is the oscillator strength of magnetic dipole transition, S_{JJ'} is the intensity of spectral line. Ω₂=4.36×10⁻²⁰ cm², Ω₄=1.35×10⁻²⁰ cm², Ω₆=0.79×10⁻²⁰ cm², δ_{ms}=4.6×10⁻⁷

表2 Er³⁺离子在不同基质中的强度参量比较
Table 2 Comparison of strength parameters of Er³⁺ ions in different matrixes

Glass	10 ²⁰ Ω ₂ /cm ²	10 ²⁰ Ω ₄ /cm ²	10 ²⁰ Ω ₆ /cm ²	Ref.
phosphate	3.89	1.01	0.55	18
germanosilicate	5.81	0.85	0.28	18
fluorophosphate	2.91	1.63	1.26	18
silicate	4.23	1.04	0.61	18
tellurate	5.41	1.55	1.45	19
bismuthate	3.86	1.52	1.17	18
alkali borate	3.90	1.84	1.46	20
fluorine phosphate	4.36	1.35	0.79	this article

Judd-Ofelt 参量Ω₂较大,表明此玻璃体系中Er³⁺极化度和非对称性较大,玻璃基质中周围离子对Er³⁺及与其配位O²⁻离子的极化作用程度大,造成Er³⁺离子周围环境非对称性很高.通过实验,Ω₂值要大于普通磷酸盐玻璃、氟磷酸盐玻璃、铋酸盐玻璃和碱硼酸盐玻璃的Ω₂值,说明Er³⁺离子在掺Er³⁺氟磷酸盐玻璃中受到周围离子的极化作用较强,Er³⁺离子周围环境非对称性较高.

根据 Judd-Ofelt 理论,利用强度参数Ω_λ和谱线强度公式,结合约化矩阵元U_{J'₂J''₂}⁽⁰⁾计算发光谱线强度S_{J'₂J''₂},由此便可计算自发辐射跃迁几率A_{J'₂J''₂},辐射寿命τ和荧光分支比β,计算式如下:

A_{J'J''} = \frac{64\pi^4 v^3 e^2}{3hc^2} \cdot \frac{1}{2J''+1} \cdot \frac{n(n^2+2)^2}{9} S_{J'J''} \tag{7}

\tau = \frac{1}{\sum_{J'} A_{J'J''}} \tag{8}

\beta = \frac{A_{J'J''}}{\sum_{J'} A_{J'J''}} \tag{9}

Er³⁺离子⁴I_{13/2}能级的荧光寿命定义为荧光强度降低至峰值强度的1/e时所需要的时间,是放大器重要的参数.¹⁸⁻²⁰ 荧光寿命主要与玻璃基质的声子能量有关,玻璃基质的声子能量越大,上能级的无辐射跃迁几率越大,荧光寿命越低.从表3可以看到玻璃由⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2}的荧光寿命为8.26 ms,而我们测试得到⁴I_{13/2}的荧光寿命为7.9 ms,与计算的结果很接近.实验结果表明本文研究的氟磷酸盐具有较长的荧光寿命.同时由于⁴I_{13/2}能级的荧光寿命越长,达到高粒子数反转所需泵浦能量越小.²¹

3.3 荧光光谱和受激发射截面

图3为Yb³⁺离子浓度不变,Er³⁺离子浓度变化的Er³⁺/Yb³⁺共掺荧光光谱图,峰值波长位于1532 nm.从图中可以看出,当Er³⁺离子的x从0.5%增加到1.0%时,荧光强度随着离子浓度的增加而增强,这主要是由于Er³⁺离子间的能量传递使得布居在⁴I_{13/2}能级上的Er³⁺离子数量增加,参与1.53 μm波段荧光发射的Er³⁺离子数量增加的结果.但是,当Er³⁺离子由1.0%增加到1.5%时,荧光强度急剧降低,这是由于Er³⁺离子浓度增大,稀土离子之间相互作用增强,增大了无辐射跃迁几率,发生浓度淬灭效应.掺Er³⁺氟磷酸盐玻璃的荧光半高宽(FWHM)大约为68 nm,这一数值远大于硅酸盐玻璃²²的40 nm以及磷酸盐玻璃²³的37 nm,这对于光纤放大器实现放大十分有利.

表3 掺Er³⁺氟磷酸盐玻璃中自发跃迁概率(A_i)、荧光分支比(β)和荧光寿命(τ) (E1.0Yb5)
Table 3 Spontaneous transition probability (A_i), fluorescence branching ratios (β), and fluorescence lifetime (τ) (E1.0Yb5) in Er³⁺-doped fluoride phosphate glasses

Transition (S', L')J'→(S, L)J	ν/cm ⁻¹	A _i /s ⁻¹		ΣA _i /s ⁻¹	β	τ/ms
		A _{ed}	A _{md}			
⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	6519	77.750	43.280	121.040	1.000	8.26
⁴ I _{11/2} → ⁴ I _{15/2}	10256	92.960	0.000	115.530	80.470	8.66
→ ⁴ I _{13/2}	3609	11.470	11.100		19.530	
⁴ I _{9/2} → ⁴ I _{15/2}	12516	78.780	0.000	103.730	75.950	9.64
→ ⁴ I _{13/2}	5768	22.860	0.000		22.040	
→ ⁴ I _{11/2}	2159	0.000	2.084		2.010	
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{15/2}	15361	821.000	0.000	1051.500	78.080	0.95
→ ⁴ I _{13/2}	8635	47.630	0.000		4.530	
→ ⁴ I _{11/2}	5036	44.540	0.000		4.240	
→ ⁴ I _{9/2}	2867	3.294	135.000		13.150	
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{15/2}	18353	224.700	0.000	361.940	62.080	2.76
→ ⁴ I _{13/2}	11852	105.400	0.000		29.110	

A_i=A_{ed}+A_{md}; ed: electric dipole; md: magnetic dipole

图3 Er³⁺/Yb³⁺共掺氟磷酸盐荧光光谱Fig.3 Fluorescence spectra of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fluoride phosphate 图4 不同Yb³⁺离子浓度的Er³⁺/Yb³⁺荧光光谱Fig.4 Fluorescence spectra of Er³⁺/Yb³⁺ with different Yb³⁺ ion concentrations

由于 $x_{\text{Er}^{3+}}$ 为1.0%时荧光强度最大, 所以选择Er³⁺浓度为1.0%, 改变Yb³⁺离子浓度. 图4为980 nm LD激发下的氟磷酸盐玻璃中Er³⁺离子的荧光强度随Er³⁺离子浓度的变化情况. 由图中可以看出, 随着Yb³⁺离子浓度的增加, 氟磷酸盐玻璃的荧光逐渐增强, 这主要是由于Yb³⁺:²F_{5/2}+Er³⁺:⁴I_{15/2}=Yb³⁺:²F_{7/2}+Er³⁺:⁴I_{11/2}能量传递使得布居在⁴I_{11/2}上的粒子数增加, 而Er³⁺的⁴I_{11/2}不稳定, 快速跃迁到⁴I_{13/2}, 这样使得参与1.53 μm波段荧光发射的Er³⁺离子数量增加, 荧光强度也增加.

根据McCumber理论,²⁴ ⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2}的跃迁发射截面可以由⁴I_{15/2}→⁴I_{13/2}的吸收截面得到,

$$\sigma_e(\lambda) = \sigma_a(\lambda) \exp[(\epsilon - h\nu)/kT] \quad (10)$$

其中 $\sigma_a(\lambda)$ 为吸收截面, $\sigma_a(\lambda) = \frac{2.303}{N_0 \times l} \lg(I_0/I)$, $\lg(I_0/I)$ 是光密度, l 是样品厚度, N_0 是稀土离子的掺杂浓度, h 为Planck常数; ν 为激光发射频率; k 为Boltzmann常数, T 是样品的测试温度, ϵ 为Er³⁺由⁴I_{15/2}到⁴I_{13/2}的平均跃迁能量. 对E1.0Yb5进行McCumber计算, 得到

表4 Er³⁺离子在不同基质玻璃中⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2}跃迁的 σ_e , FWHM和FWHM× σ_e Table 4 σ_e , FWHM and FWHM× σ_e of ⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2} transition with Er³⁺ in different glass matrixes

Glass	10 ²¹ σ _e /cm ²	FWHM/nm	10 ²¹ FWHM×σ _e /(cm ² ·nm)
silicate	5.50	40.0	220.00 ²²
phosphate	6.40	37.0	236.80 ²³
fluorophosphate (this article)	8.5	68.0	578.00

FWHM: full width at half maximum

计算结果 $\sigma_e = 8.5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$.

对于光纤放大器实现宽带和高增益放大来说, 荧光发射的半高宽FWHM和受激发射截面 σ_e 是两个非常重要的参数, 放大器的增益带宽主要由荧光发射的半高宽和受激发射截面的大小决定, 通常以FWHM× σ_e 乘积大小来衡量光纤放大器增益介质的放大品性, 两者的乘积越大, 其放大品性越好.²⁵ 表4给出不同基质玻璃中的受激发射截面和荧光半高宽, 可见本文研究的掺Er³⁺氟磷酸盐玻璃具有较大的 σ_e 和FWHM值, FWHM× σ_e 值远大于硅酸盐和磷酸盐, 这对于光纤放大器实现放大十分有利.

4 结 论

研究了一种新型的Er³⁺/Yb³⁺共掺杂氟磷酸盐玻璃的光谱性质、密度随Er³⁺离子和Yb³⁺离子浓度的增大线性增加. 当Er³⁺离子浓度增加时, 荧光光谱强度先增加后减小; 当Yb³⁺浓度从3% (x)增加到7%时, 荧光强度不断增强. 确定了最佳掺杂浓度为: $x_{\text{Er}^{3+}} = 1.0\%$, $x_{\text{Yb}^{3+}} = 7\%$. 根据Judd-Ofelt理论计算了玻璃中Er³⁺的强度参数、自发辐射跃迁几率、辐射寿命以及荧光分支比, Er³⁺离子⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2}发射峰的半高宽FWHM=68 nm; ⁴I_{13/2}能级荧光寿命 $\tau_m = 8.26 \text{ ms}$, 强度参数: $\Omega_2 = 4.36 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 1.35 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 0.79 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 主峰1.53 μm附近受激发射截面 $\sigma_e = 8.5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$. 比较了不同基质玻璃中Er³⁺离子的光谱特性, 结果表明: 该玻璃具有较宽的荧光半高宽和较大的受激发射截面, FWHM× σ_e 值远大于掺Er³⁺硅酸盐玻璃和磷酸盐玻璃, 是高增益掺铒光纤放大器的理想介质材料.

References

- (1) Kermaoui, C.; Barthou, J.; Denis, P. *J. Lumin.* **1984**, *29*, 295.
- (2) Reddy, A. V. R.; Balaji, T.; Buddhudu, S. *Spectrochim. Acta* **1992**, *48*, 1515.
- (3) Desirena, H.; De la Rosa, E.; Díaz-Torres, L. A. *Opt. Mater.* **2006**, *28*, 560.

- (4) Chou, J. H.; Shi, F. G. *Mater. J. Res.* **2005**, *20*, 264.
- (5) Choi, J. H.; Margaryan, A.; Margaryan, A. *J. Alloy. Compd.* **2005**, *396*, 79.
- (6) Tanabe, S.; Yoshii, S.; Hirao, K. *Phys. Rev. B* **1992**, *45*, 4620.
- (7) Shih, P. Y. *Mater. Chem. Phys.* **2004**, *84*, 151.
- (8) Li, W. N.; Zou, K. S.; Lu, M.; Xiang, L. B. *Journal of Inorganic Materials* **2007**, *22* (1), 30. [李玮楠, 邹快盛, 陆敏, 相里斌. 无机材料学报, **2007**, *22* (1), 30.]
- (9) Tanabe, S. *J. Non-Cryst. Sol.* **1999**, *259*, 1.
- (10) Zhang, L.; Li, C. R.; Ming, C. G.; Wang, B. C.; Xu, W. *Chemical Journal of Chinese Universities* **2009**, *30* (6), 1189. [张丽, 李成仁, 明成国, 王宝成, 徐伟. 高等学校化学学报, **2009**, *30* (6), 1189.]
- (11) Zou, X.; Toratani, H. *J. Appl. Phys.* **1997**, *81*, 3354.
- (12) Li, T.; Zhang, Q. Y.; Zhao, C. *Chin. Phys.* **2005**, *14*, 1250.
- (13) Brow, R. K. *J. Non-Cryst. Sol.* **2000**, *263*, 1.
- (14) Dai, N. L.; Zhang, D. B.; Hu, L. L.; Li, S. G. *Acta Photonica Sinica* **2003**, *32*, 112. [戴能利, 张德宝, 胡丽丽, 李顺光. 光子学报, **2003**, *32*, 112.]
- (15) Judd, B. R. *Phys. Rev.* **1962**, *127*, 750.
- (16) Ofelt, G. S. *J. Chem. Phys.* **1962**, *37*, 511.
- (17) Tanabe, S.; Ohyagi, T.; Soga, N.; Hanada, T. *Phys. Rev. B* **1992**, *46*, 3305.
- (18) Yang, J. H.; Dai, S. X.; Wen, L. *Acta Physica Sinica* **2003**, *52*, 810. [杨建虎, 戴世勋, 温磊. 物理学报, **2003**, *52*, 810.]
- (19) Jia, R. K.; Liu, Y. M.; He, D. L.; Lü, Q.; Shan, G. Y.; Liu, Z. Y.; Bai, Y. B.; Li, T. J. *Chemical Journal of Chinese Universities* **2004**, *25* (7), 1306. [贾若琨, 刘艳梅, 和东亮, 吕强, 单桂晔, 刘兆阅, 白玉白, 李铁津. 高等学校化学学报, **2004**, *25* (7), 1306.]
- (20) Dong, X. T.; Liu, L.; Wang, J. X.; Liu, G. X. *Chemical Journal of Chinese Universities* **2010**, *31* (1), 20. [董相廷, 刘莉, 王进贤, 刘桂霞. 高等学校化学学报, **2010**, *31* (1), 20.]
- (21) Yang, J. H.; Dai, S. X.; Wen, L. *Chin. Phys. Lett.* **2002**, *19*, 1516.
- (22) Zou, X.; Izumitani, T. *J. Non-Cryst Sol.* **1993**, *162*, 68.
- (23) Tanabe, S.; Sugimoto, N.; Hanada, T. *J. Lumin.* **2000**, *87–89*, 670.
- (24) McCubber, D. E. *Phys. Rev. A* **1964**, *134*, 299.
- (25) Shen, X.; Nie, Q. H.; Xu, T. F.; Gao, Y. *Acta Physica Sinica* **2005**, *54*, 2379. [沈祥, 聂秋华, 徐铁峰, 高媛. 物理学报, **2005**, *54*, 2379.]