

# 碱金属和碱土金属氟化物对掺 $\text{Er}^{3+}$ 氟磷酸盐玻璃光谱性质的影响\*

李 涛<sup>1)</sup> 张勤远<sup>1)</sup> 冯洲明<sup>1)</sup> 赵 纯<sup>1)</sup> 姜中宏<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> 华南理工大学特种功能材料及其制备新技术教育部重点实验室, 华南理工大学材料学院光通信材料研究所, 广州 510640)

<sup>2)</sup> 中科院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2005 年 1 月 14 日收到, 2005 年 3 月 28 日收到修改稿)

研究了碱金属和碱土金属离子修饰的掺  $\text{Er}^{3+}$  氟磷酸盐玻璃的光谱性质, 讨论了碱金属和碱土金属对铒氟磷酸玻璃的吸收和发射截面、荧光半高宽、Judd-Ofelt 强度参数和上转换发光强度等光谱性质的影响, 并与一些传统氧化物玻璃系统进行了比较. 研究表明碱金属  $\text{K}^+$  和碱土金属  $\text{Sr}^{2+}$  掺杂高的玻璃更适宜用作光放大器基质. 含 12mol%  $\text{K}^+$  的氟磷酸玻璃展现出  $7.83 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  的高发射截面和最小的荧光上转换强度, 含 23mol%  $\text{Sr}^{2+}$  的氟磷酸玻璃则有  $7.58 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  的高发射截面、65nm 的荧光半高宽及 8.6ms 的长的上能级荧光寿命.

关键词: 氟磷酸盐玻璃, 光谱性质, Judd-Ofelt 参数, 光学放大器

PACC: 7820, 2110J, 4270C

## 1. 引 言

近年来, 迅速增长的信息网络对光通信的容量及速率提出了更高的要求<sup>[1]</sup>, 波分复用技术(WDM)应运而生, 它是一种有效提高通信容量的信道复用技术, 而宽带光纤放大器正是实现 WDM 的关键器件. 目前工作在 C 波段(1530—1565nm)的掺铒石英光纤放大器(EDSFA)已经商业化, 其主要特性如信号增益、带宽、增益带宽平坦度、噪声系数和饱和输出功率等都在不断的优化中. 然而, EDSFA 因其增益带宽窄( $\sim 30\text{nm}$ )和增益平坦度不高已经越来越不能满足当前信号传输高速大容量和光路集成的要求<sup>[2]</sup>. 与之相比, 氟化物玻璃基质的光纤放大器(EDFFA)具有最为平坦的增益光谱和近似于石英光纤放大器的效率<sup>[3]</sup>, 但氟化物玻璃的化学稳定性和热稳定性较差, 机械强度低及拉丝困难等原因阻碍了 EDFFA 的普及应用<sup>[4]</sup>.

氟磷酸盐玻璃综合了氟化物玻璃(低声子能量和低非线性折射率)和磷酸盐玻璃(高发射截面和热稳定性)的优点, 具有较高的热稳定性和化学稳定

性, 高的稀土离子溶解性, 低的非线性折射率和从紫外到红外的宽的透射光谱区域<sup>[5,6]</sup>. 一般认为氟磷酸玻璃或许可以满足 WDM 网络的要求和制备一些光子器件, 例如制造宽带放大器, 光纤激光器和频率上转换器等. 尤其值得一提的是, 含有少量偏磷酸盐的掺铒氟磷酸盐玻璃已经在  $1.5\mu\text{m}$  显示出比氟化物玻璃系统更高且平坦的增益特性<sup>[7]</sup>. 系统研究氟磷酸玻璃的物理化学性质和光谱性质, 讨论碱金属等成分对掺铒氟磷酸玻璃的光谱性质的影响等是非常必要的.

本文研究了碱金属和碱土金属氟化物对掺铒  $\text{AlF}_3\text{-RF-MF}_2\text{-Al(PO}_3)_3$  (其中,  $R = \text{Li, Na, K, M} = \text{Mg, Ca, Sr, Ba}$ ) 氟磷酸盐玻璃光谱性质的影响. 利用 Judd-Ofelt(J-O)理论模型<sup>[8,9]</sup>, 计算了掺铒氟磷酸玻璃样品的 J-O 强度参数, 并且将这些参数和玻璃光谱性质与传统的氧化物玻璃如硅酸盐和磷酸盐玻璃作了比较以便于评价其特性. 实验发现, 所有样品均展示出强烈的  $1.5\mu\text{m}$  发光, 应用 McCumber 理论, 计算了样品的受激发射截面, 结果表明碱金属和碱土金属对氟磷酸玻璃光谱性质有较大的影响.

\* 国家自然科学基金(批准号: 50472053), 广东省自然科学基金(批准号: 04020036)资助的课题.

† 通讯联系人: E-mail: Qy Zhang@scut.edu.cn

## 2. 实验方法

### 2.1. 样品制备

选取掺杂 1mol%  $\text{ErF}_3$  的  $\text{AlF}_3\text{-RF-MF}_2\text{-Al(PO}_3)_3$  ( $R = \text{Li, Na, K, M} = \text{Mg, Ca, Sr, Ba}$ ) 氟磷酸玻璃作为研究对象, 其具体组成和  $\text{Er}^{3+}$  的离子浓度  $N_0$  均列

表 1 氟磷酸玻璃的组分和  $\text{Er}^{3+}$  的掺杂浓度

玻璃 编号	组分/mol%										$N_0$ / $10^{20}(\text{ions}\cdot\text{cm}^{-3})$
	$\text{AlF}_3$	$\text{LiF}$	$\text{NaF}$	$\text{KF}$	$\text{MgF}_2$	$\text{CaF}_2$	$\text{SrF}_2$	$\text{BaF}_2$	$\text{Al(PO}_3)_3$	$\text{ErF}_3$	
LFP	35	12	-	-	8	8	23	8	5	1	2.305
NFP	35	-	12	-	8	8	23	8	5	1	2.170
KFP	35			12	8	8	23	8	5	1	2.240
MFP	35	6	6	-	23	8	8	8	5	1	2.485
CFP	35	6	6	-	8	23	8	8	5	1	2.247
SFP	35	6	6	-	8	8	23	8	5	1	2.036
BFP	35	6	6	-	6	8	8	23	5	1	2.135

### 2.2. 性质测试

用 Perkin-Elmer Lambda-900 UV/VIS/NIR 光谱仪测试玻璃的吸收光谱, 测量范围为 320—1700nm, 分辨率为 1nm. 荧光光谱采用法国 J-Y 公司的 TRIAX320 型荧光光谱仪测试, 用 977nm 激光二极管作为激发光源. 用排水法测量玻璃密度. 用 V 棱镜法测量玻璃折射率.  $\text{Er}^{3+}$  的离子浓度用已知的摩尔组成和玻璃的密度计算而得. 所有的测试均在室温下进行.

于表 1. 除  $\text{ErF}_3$  纯度为光谱纯之外, 其余各组分原料均采用分析纯. 称取混合料 15g, 充分搅拌均匀, 放入铂金坩锅中于 1000℃ 的硅碳棒电炉中熔化 30min, 将熔融液倒入已预热的不锈钢模具中成型, 然后放入马弗炉中退火, 退火温度为 360℃. 退火后的玻璃经研磨, 切割加工成 10mm × 10mm × 2mm 双面抛光试样以满足光谱测试的要求.

## 3. 结果与讨论

玻璃的密度  $n_d$  和折射率  $\rho$  测定结果如图 1 所示. 由图可见, 在同一系列玻璃中, 氟磷酸盐玻璃的密度  $\rho$  和折射率  $n_d$  均随着金属氟化物的阳离子半径增大而增大, 对碱金属和碱土金属而言, 分别按照  $\text{LiF} < \text{NaF} < \text{KF}$ ,  $\text{MgF}_2 < \text{CaF}_2 < \text{SrF}_2 < \text{BaF}_2$  顺序, 特别是  $\text{SrF}_2$  和  $\text{BaF}_2$  可以大大增加玻璃的密度.

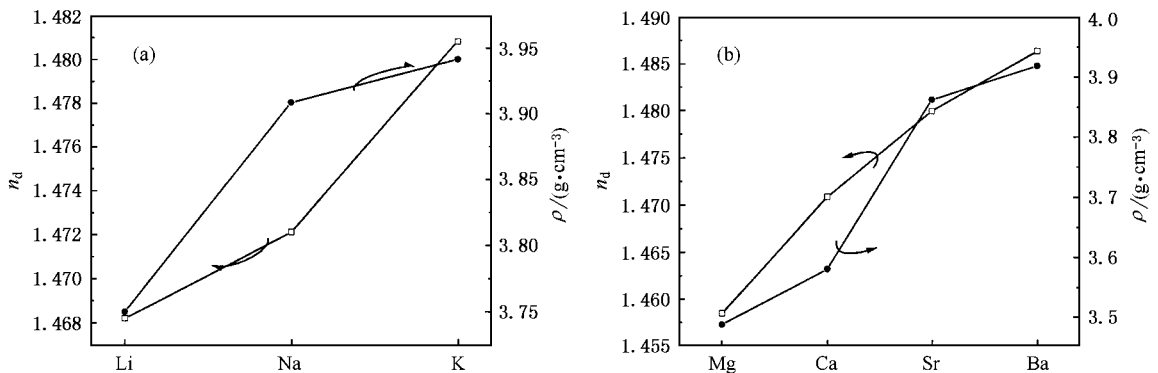


图 1 碱金属(a)和碱土金属(b)的含量变化对玻璃折射率和密度的影响

到目前为止, J-O 理论仍然是预测外场作用下稀土离子在各种基质中的电偶极跃迁几率, 荧光支

效率和辐射寿命的最有效的理论. J-O 强度参数  $\Omega_s$  ( $t = 2, 4, 6$ ) 可以根据实验测得的吸收光谱通过最小

二乘法拟合求得<sup>[10]</sup> 结果列于表 2, 计算中用到的矩阵元由 Weber 和 Carnall 等人给出<sup>[11,12]</sup>, 计算均方根  $\sigma_{\text{ms}}$  也同时列出以评价计算的有效性.

表 2 各种玻璃基质中  $\text{Er}^{3+}$  的 J-O 参数和均方根  $\sigma_{\text{ms}}$

玻璃编号	$\Omega_2$	$\Omega_4$	$\Omega_6$	$\sigma_{\text{ms}}$
	/10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup>	/10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup>	/10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup>	/10 <sup>-7</sup>
LFP	2.71	1.97	1.13	0.5
NFP	3.17	2.3	1.11	0.1
KFP	4.17	2.31	1.22	0.2
MFP	3.05	1.87	1.09	0.1
CFP	3.01	2.16	1.15	0.4
SFP	3.30	2.46	1.21	0.2
BFP	2.85	1.95	1.20	0.3
氟磷玻璃 <sup>[13]</sup>	3.25	1.41	1.49	2.3
氟磷玻璃 <sup>[10]</sup>	2.91	1.63	1.26	—
硅酸盐玻璃 <sup>[10]</sup>	4.23	1.04	0.61	—
磷酸盐玻璃 <sup>[14]</sup>	5.10	1.30	0.55	0.4
碲酸盐玻璃 <sup>[15]</sup>	5.62	1.50	1.18	1.85

从表 2 的数据可以看到, 随玻璃基质中碱金属和碱土金属含量的变化 J-O 强度参数都有一定的变化. 按照原子序数的增大,  $\Omega_2$  和  $\Omega_6$  均有增大的趋势. 碱金属含量的变化显然对  $\Omega_2$  有较大的影响. 按照原子序数的增大,  $\Omega_2$  也依次增大. 以往的研究结果表明<sup>[13,16]</sup>  $\Omega_2$  受玻璃基质的非对称性影响显著而  $\Omega_6$  和配位体与稀土离子之间的共价度成反比,  $\Omega_2$  和稀土离子的超敏跃迁相关联, 受基质组分和场域的影响最大. 用  $\text{K}^+$  和  $\text{Sr}^{2+}$  分别取代  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  会引起三个 J-O 参数的升高, 和其他碱金属和碱土金属离子相比,  $\text{K}^+$  和  $\text{Sr}^{2+}$  对 J-O 参数有更大的影响. 从表 2 可以看到, 氟磷玻璃和传统的氧化物玻璃如磷酸盐和硅酸盐玻璃相比具有较大的  $\Omega_6$  和较小的  $\Omega_2$ , 这是因为氟磷玻璃基质的非对称性和离子度比硅酸盐和磷酸盐更大. 与所报道的氟磷玻璃相比,  $\Omega_2$  和文献 [10] 和 [13] 的值比较一致,  $\Omega_6$  则比这两篇文献的计算值稍小.

按照 J-O 理论, 对于满足选择定则  $\Delta S = \Delta L = 0$ ,  $\Delta J = 0, \pm 1$  的跃迁来说, 除电偶极子 (ED) 跃迁以外, 磁偶极子 (MD) 跃迁对谱线强度也有影响, 从而会影响到发射光谱的形状. 当谱线强度中电偶极子所占的相对比例较大, 玻璃就会有更宽并且更平坦的发射光谱<sup>[1]</sup>. 磁偶极子谱线强度  $S_{\text{md}}$  由量子数

所决定, 是特定跃迁的特征值, 不依赖于基质、配位场的性质. 因此与玻璃组分和结构相关联的电偶极子跃迁就成为改善发射特性的重要因素.  $\text{Er}^{3+}$  的  ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  跃迁的电偶极子谱线强度  $S_{\text{ed}}$  和三个 J-O 强度参数相关, 方程式如下:

$$S_{\text{ed}}[{}^4\text{I}_{13/2}; {}^4\text{I}_{15/2}] = 0.0188\Omega_2 + 0.1176\Omega_4 + 1.4617\Omega_6. \quad (1)$$

其中强度参数  $\Omega_s$  ( $s = 2, 4, 6$ ) 前的系数是单位张量运算的约化矩阵元<sup>[11]</sup>, 与基质无关. 通过调整玻璃组成, 可使  $S_{\text{ed}}$  在一定范围内变化. 从式 1 不难看出, 由于系数最大,  $\Omega_6$  的变化在三个 J-O 强度参数中最能影响  $S_{\text{ed}}$  的大小, 从而也对  $1.5\mu\text{m}$  波段发射谱具有最为重要的影响, 所以选择放大器基质时, 在三个 J-O 参数中更关注的是  $\Omega_6$  的大小. 正如表 2 所示, 在本文所研究的氟磷玻璃中 KFP 和 SFP 玻璃样品具有比其他氟磷玻璃稍大的  $\Omega_6$ , 并且氟磷玻璃系统的  $\Omega_6$  显然比硅酸盐和磷酸盐要大很多, 这预示氟磷玻璃系统在  $1.5\mu\text{m}$  波段可能会有更宽更平坦的光学放大特性.

图 2 为 SFP 玻璃样品的 UV-VIS-NIR 吸收光谱. 吸收截面  $\sigma_{\text{abs}}$  由吸收光谱确定, 并由下式求得:

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{2.303I_0 \lg(I_0/I)}{N_0 d}, \quad (2)$$

式中  $I_0$  为入射光强度,  $I$  为透射光强度,  $\lg(I_0/I)$  是吸收光谱中的光密度,  $N_0$  为离子浓度,  $d$  是样品的厚度.

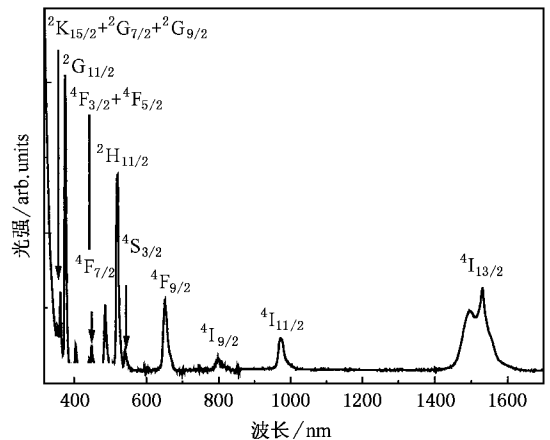


图 2 SFP 玻璃的吸收光谱

依据 McCumber 理论<sup>[17]</sup>, 受激发射截面  $\sigma_{\text{emi}}$  由相应波段的吸收截面得到

$$\sigma_{\text{emi}} = \sigma_{\text{abs}} \exp[(\epsilon - h\nu)/kT], \quad (3)$$

式中  $\nu$  为光子频率,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为样品温度.  $\epsilon$  是与温度有关的激发能量, 其物理意义为: 保持温度  $T$  不变, 把一个稀土离子从激态激发到相应跃迁的激发态时所需要的自由能, 可以应用文献 [18] 的方法计算其数值. SFP 玻璃样品在 1400—1650nm 光谱区由 977nm 光源激发的荧光光谱和由

(2)(3) 式计算所得的吸收和发射截面谱分别图示于图 2(a) 和 (b). 从图中可注意到, 由于 Stokes 位移和形状变化, 当波长小于峰值波长时, 试样的吸收截面大于受激发射截面, 当波长大于峰值波长时, 试样的吸收截面小于受激发射截面, 并且峰值发射截面大于峰值吸收截面.

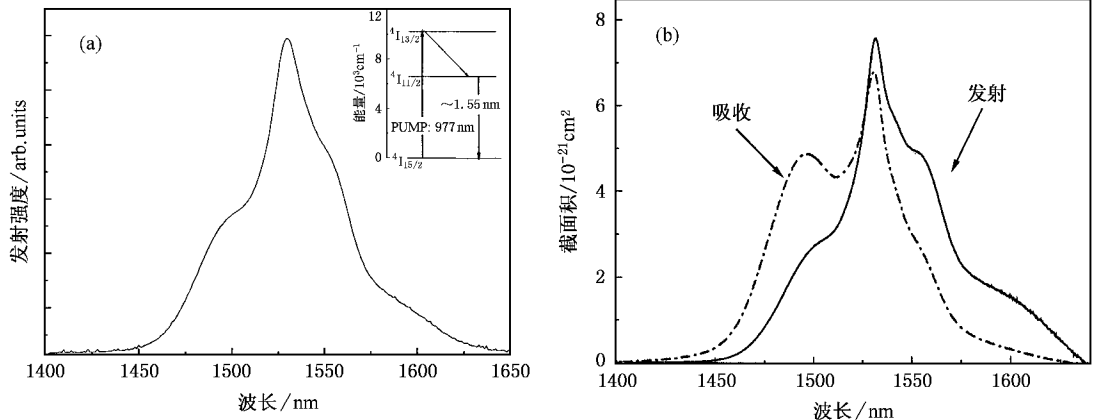


图 3 (a) 在 977nmLD 激发下对应于  ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  跃迁的 SFP 玻璃的  $1.5\mu\text{m}$  波段发射光谱, 插图示意  $\text{Er}^{3+} 1.5\mu\text{m}$  发射的相应跃迁 (b) 由 McCumber 理论计算得出的 SFP 玻璃的吸收和发射截面

对于应用于通信中的光纤或平面波导放大器来说,  $1.5\mu\text{m}$  波段的吸收和荧光特性吸收截面、荧光半高宽 (FWHM) 与发射截面的乘积和  ${}^4\text{I}_{13/2}$  能级的荧光寿命是非常重要的品质参数. 高的吸收截面意味着高的抽运效率和更好的敏化<sup>[19]</sup>, 而  $\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}$  的值越大,  ${}^4\text{I}_{13/2}$  能级的荧光寿命越长则会有更宽的增益带宽和更低的抽运阈值功率<sup>[20]</sup>. 图 4 为碱金属和碱土金属成分对玻璃峰值吸收和发射截面的影响, 可以看到各吸收和发射截面的变化趋势和  $\Omega_6$  大致相同, 也是按照原子序数增大的顺序而有增大的趋

势. 为了便于比较, 各样品的峰值吸收截面 ( $\sigma_{\text{abs}}^p$ ) 和峰值发射截面 ( $\sigma_{\text{emi}}^p$ ),  $\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}$  和  ${}^4\text{I}_{13/2}$  的荧光寿命均列于表 3. 在碱金属和碱土金属修饰的氟磷玻璃中, KFP 玻璃展示出最大的发射截面  $7.83 \times 10^{-21} \text{cm}^2$ , 但是荧光寿命却相对较短, SFP 玻璃发射截面次之, 但是具有最宽的 FWHM 65nm 和最大的  $\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}$ . 实验发现, 本文认为氟磷玻璃系统的  $\sigma_{\text{emi}}^p$  和  $\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}$  均明显高于硅酸盐和磷酸盐玻璃, 和碲酸盐相当, 但荧光寿命高于碲酸盐. 值得注意的是重金属氧化物玻璃具有较高的  $\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}$ , 但其荧光

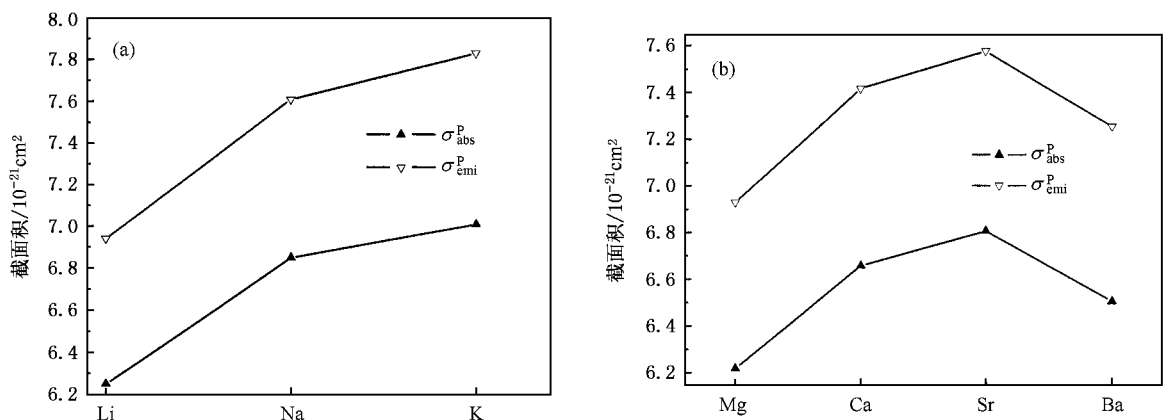


图 4 碱金属和碱土金属成分对玻璃峰值吸收和发射截面的影响 (a) 碱金属 (b) 碱土金属

寿命比氟磷玻璃系统低很多,这意味着其更高的抽运阈值功率.综合这些因素考虑,氟磷玻璃系统是一种很有前景的潜在的宽带高品质光学放大器的基质

材料,其中  $\text{Sr}^{2+}$  含量偏高的玻璃可能会有更好的放大品质.

表 3 峰值吸收截面  $\sigma_{\text{abs}}^p$  和发射参数  $\sigma_{\text{emi}}^p$ , FWHM,  $\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}^p$  及荧光寿命  $\tau_f$

玻璃编号	$\sigma_{\text{abs}}^p/10^{-21} \text{ cm}^2$	$\sigma_{\text{emi}}^p/10^{-21} \text{ cm}^2$	FWHM/nm	$\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}^p$	$\tau_f/\text{ms}$
LFP	6.25	6.94	61.7	428	8.47
NFP	6.85	7.61	60.4	460	8.81
KFP	7.01	7.83	60.6	474	7.23
MFP	6.22	6.93	64.3	446	8.43
CFP	6.66	7.42	61.4	456	8.77
SFP	6.81	7.58	65.2	494	8.62
BFP	6.51	7.26	62.1	451	8.76
氟磷玻璃 <sup>[21]</sup>	-	6.0	53	318	7.6—8.4
硅酸盐玻璃 <sup>[21]</sup>	-	5.5	40	220	5—8
碲酸盐玻璃 <sup>[21]</sup>	-	7.5	65	488	2.5—4
磷酸盐玻璃 <sup>[22]</sup>	-	6.4	43.2	276	8
重金属氧化物玻璃 <sup>[23]</sup>	-	5.3	95.2	504	3.8
氟化物玻璃 <sup>[24]</sup>	4.94	5.5	-	-	9.24

本文研究发现,在 977nm 连续 LD 的激发下,钕氟磷玻璃存在荧光上转换现象.图 5 为钕氟磷玻璃在 500—750nm 可见光谱区的上转换荧光光谱(测试条件相同),插图为 977nm 抽运条件下的  $\text{Er}^{3+}$  上转换机制示意图.该体系的上转换荧光主要包括 524nm 的绿光,546nm 的强绿光和 668nm 的红光,分别对应于  $\text{Er}^{3+}$  的  ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ ,  ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  和  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  跃迁,如图 5 中的插图所示,钕氟磷玻璃的上转换发光机制已在文献 [25] 中详细讨论.在图 5 中可以看到,在碱金属系列中上转换荧光强度有明显的变化,按照原子序数的顺序依次减弱,这可能是由于这些碱金属修饰离子按照原子序数的顺序改变了玻璃网络的声子能量所致,碱土金属系列则没有显示出明显的规律性,除 BFP 的上转换荧光稍强之外, MFP, CFP 和 SFP 的强度相差不远.综上所述,具有最大发射截面的 KFP 玻璃样品也同样具有最小的上转换发光强度,这说明其 1.5 $\mu\text{m}$  波段的发光效率高于同系列的其他样品,是一种更为优良的光学放大器基质材料.

## 4. 结 论

为了进一步发展宽带光纤和高品质平面波导放大器,我们研究了  $\text{Er}^{3+}$  掺杂的氟磷酸盐玻璃.实验

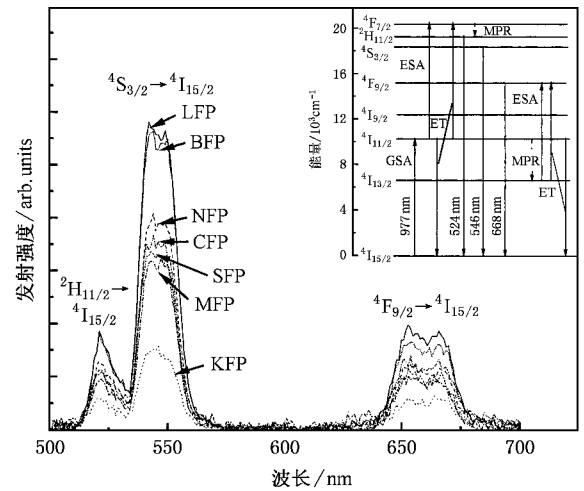


图 5 977nm 抽运条件下氟磷玻璃样品的上转换荧光光谱.右 上角插图为 977nm 抽运条件下的  $\text{Er}^{3+}$  上转换机制示意图

发现,碱金属和碱土金属对玻璃的光谱参数如吸收和发射截面、荧光半高宽、J-O 参数乃至上转换发光等都有一定的影响,其中  $\text{K}^+$  和  $\text{Sr}^{2+}$  对基质的影响更加突出.掺钕的 KFP 样品展现出高的发射截面  $7.83 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  和最小的上转换发光强度, SFP 样品也有较高的发射截面  $7.58 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 、最宽的 FWHM 65nm、最大的  $\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}^p$  和较小的上转换发光强度.这两种基质最有可能获得平坦的增益和高的发

光效率. 本文研究表明氟磷玻璃系统的 J-O 参数  $\Omega_6$ 、发射截面和荧光半高宽均比传统的氧化物玻璃

更大, 因此是一种更为理想的实现宽带宽平坦增益的光学放大器的基质材料.

- [ 1 ] Tanabe S 2002 *C. R. Chimie* **5** 815
- [ 2 ] Seneschal K, Jiang S B, Luo T *et al* 2001 *Proc. SPIE* **4282** 93
- [ 3 ] Ainslie B J, Davey S T, Szebesta D *et al* 1995 *J. Non-Cryst. Solids* **184** 225
- [ 4 ] Wen L, Yang J H and Hu L L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4378 ( in Chinese ) [ 温 磊、杨建虎、胡丽丽 2004 物理学报 **53** 4378 ]
- [ 5 ] Philipps J F, Töpfer T, Ebendorff-Heidepriem H *et al* 2001 *Appl. Phys. B* **72** 399
- [ 6 ] Ronchin S, Rolli R, Montagna M *et al* 2001 *J. Non-Cryst. Solids* **284** 243
- [ 7 ] Ono H, Nakagawa K, Yamada M *et al* 1996 *Electron. Lett.* **32** 1586
- [ 8 ] Judd B R 1962 *Phys. Rev.* **127** 750
- [ 9 ] Ofefe G S 1962 *J. Chem. Phys.* **37** 511
- [ 10 ] Zou X L and Izumitani T 1993 *J. Non-Cryst. Solids* **162** 68
- [ 11 ] Weber M J 1967 *Phys. Rev.* **157** 262
- [ 12 ] Carnall W T, Fields P R and Wybourne B G 1965 *J. Chem. Phys.* **42** 3797
- [ 13 ] Ebendorff-Heidepriem H, Ehrt D, Bettinelli M *et al* 1998 *J. Non-Cryst. Solids* **240** 66
- [ 14 ] Obaton A -F, Labbé C, Boulanger P *et al* 1999 *Spectrochim. Acta A* **55** 263
- [ 15 ] Rolli R, Montagna M, Chaussecent S *et al* 2003 *Opt. Mater.* **21** 743
- [ 16 ] Tanabe S, Ohyagi T, Todoroki S *et al* 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 8451
- [ 17 ] McCumber D E 1964 *Phys. Rev. A* **134** 299
- [ 18 ] Miniscalco W J and Quimby R S 1991 *Opt. Lett.* **16** 258
- [ 19 ] Sandoe J N, Sarkies P H and Parke S 1972 *J. Phys. D* **5** 1788
- [ 20 ] Rolli R, Chiasera A, Montagna M *et al* 2001 *Proc. SPIE* **4282** 109
- [ 21 ] Zhang L Y and Hu L L 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1836
- [ 22 ] Jiang S B, Luo T, Hwang B-C *et al* 2000 *J. Non-Cryst. Solids* **263&264** 364
- [ 23 ] Courrol L C, Kassab L R P, Fukumoto M E *et al* 2003 *J. Lumin.* **102&103** 91
- [ 24 ] Shim M D, Sibley W A, Drexhage M G *et al* 1983 *Phys. Rev. B* **27** 6635
- [ 25 ] Li T, Zhang Q Y, Liu Y H *et al* 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1147

# Spectroscopic properties of $\text{Er}^{3+}$ -doped alkaline/alkaline-earth metal modified fluorophosphate glasses \*

Li Tao<sup>1)</sup> Zhang Qin-Yuan<sup>1)†</sup> Feng Zhou-Ming<sup>1)</sup> Zhao Chun<sup>1)</sup> Jiang Zhong-Hong<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>( Key Laboratory of Specially Functional Materials and Advanced Manufacturing Technology , Ministry of Education , China ,  
Institute of Optical Communication Materials , South China University of Technology , Guangzhou 510640 , China )

<sup>2)</sup>( Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China )

( Received 14 January 2005 ; revised manuscript received 28 March 2005 )

## Abstract

This paper reports the spectroscopic properties of  $\text{Er}^{3+}$  -doped  $\text{AK PO}_3$  -based fluorophosphate glasses for  $1.5\mu\text{m}$  optical amplifiers. Effects of alkaline/alkaline-earth metal composition on the spectroscopic properties of  $\text{Er}^{3+}$  in fluorophosphate glasses are investigated. A strong correlation between the alkaline/alkaline-earth metal content and the spectroscopic parameters , such as absorption and emission cross sections , Judd-Ofelt intensity parameters and upconversion emission intensity , has been observed. The fluorophosphate glass with 12 mol% potassium fluoride exhibits the largest calculated stimulated-emission cross-section of  $7.83 \times 10^{-21} \text{cm}^2$  and the smallest upconversion emission intensity among the fluorophosphate studied. The fluorophosphate glass with 23 mol% strontium fluoride has a broadband near-infrared emission at  $1.5\mu\text{m}$  with a full width at half-maximum over 65nm and a long upper level fluorescence lifetime of 8.6ms.

**Keywords :** fluorophosphate glasse , spectroscopic properties , Judd-Ofelt parameters , optical amplifier

**PACC :** 7820 , 2110J , 4270C

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant No.50472053 ) , and the Natural Science Foundation of Guangdong Province , China( Grant No.04020036 ) .

† Corresponding author . E-mail : Qy Zhang@scut.edu.cn