

Ce³⁺ 对 Er³⁺ /Yb³⁺ 共掺氟磷酸盐 玻璃光谱性质的影响^{*}

李 涛^{1)†} 张勤远^{1)†} 姜中宏¹⁾

1) 华南理工大学光通信材料研究所, 特种功能材料制备新技术教育部重点实验室, 广州 510640)

2) 华南农业大学理学院, 广州 510640)

(2005 年 8 月 10 日收到, 2006 年 3 月 27 日收到修改稿)

研究了能量接受离子 Ce³⁺ 对 Er³⁺ 上转换发光强度以及 Er³⁺ 在 1.5 μm 附近波段发光性能参数的影响, 并从能量匹配及能级结构角度出发对 Er³⁺ /Ce³⁺ 间的能量转移机制进行了分析. 分析认为, ⁴I_{11/2} 能级的 Er³⁺ 通过无辐射能量转移把能量传递给 ²F_{5/2} 能级的 Ce³⁺ 激发其跃迁至 ²F_{7/2} 能级, 而 ⁴I_{11/2} 能级上的 Er³⁺ 则无辐射弛豫至 ⁴I_{13/2} 能级, 从而有效降低氟磷酸盐玻璃中 Er³⁺ 的上转换发光. 当 Er³⁺ 浓度为 1.11 × 10²⁰ cm⁻³ 时, Ce³⁺ 的最佳掺杂浓度为 2.22 × 10²⁰ cm⁻³, 此时 Ce³⁺ 的引入不仅可以降低上转换发光, 而且有助于提高 Er³⁺ 在 1.5 μm 附近波段的荧光强度、发射截面以及 ⁴I_{13/2} 能级荧光寿命.

关键词: 氟磷酸盐玻璃, 光谱性质, 光纤放大器, Er³⁺ 和 Ce³⁺

PACC: 7820, 4270C, 7840

1. 引 言

Er³⁺ 掺杂材料是一种重要的激光材料, 它的荧光峰位于 1.5 μm 附近, 该激光波长对人眼是安全的, 并且正好处于光通信的第三通信窗口, 可用于光通信的信号光放大, 故多年以来一直受到人们的重视. 特别是当今迅速增长的海量信息量对光纤通信系统的传输速率、传输距离及容量提出了更高的要求. 最近的两项主要技术进步——掺铒光纤放大器 (EDFA) 和波分复用 (WDM) 技术——提高了现有系统的传输能力并将使发展中系统的传输能力得到巨大提高. 事实上, 这两种技术的结合正迅速成为进行平滑的、可管理的容量扩展的技术选择^[1]. EDFA 的带宽和增益平坦对 WDM 技术是重要的指标, 传统的 Er³⁺ 掺杂基质——石英玻璃在这些方面并不具有优势, 已经越来越不能满足当前信号传输高速大容量的要求^[2,3]. 与之相比, 氟化物玻璃基质的光纤放大器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^[4], 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其普及应用. 近年来, 兼具氟化物材料声子能量低和氧化物材料热稳定性好、机械强度高特点的氟磷酸盐玻璃在作为增益平坦的宽带宽光纤放大器方面展现出了良好的应用前景^[5-7]. 但是用 980 nm 的激光二极管 (LD) 作为抽运源时, 玻璃系统较低的声子能量也使 Er³⁺ 掺杂的氟磷酸盐玻璃中有明显的上转换现象发生^[8], 特别是添加 Yb³⁺ 敏化 Er³⁺ 在 1.5 μm 附近波段的发光时, 上转换发光也随之增强. 这对应用于光纤放大器、平面光波导等光放大器是十分不利的, 因为上转换会降低抽运的量子效率, 影响光放大的增益特性^[9,10]. 用 1480 nm 的 LD 作为抽运源虽然可以减小上转换的影响, 但不能获得好的信噪比和充分的粒子数反转. 所以, 如何既保持高吸收效率和发光性能的同时又避免提高氟磷酸盐玻璃 980 nm 抽运的上转换发光强度, 是一个非常意义的研究课题. 已有研究表明, 在一些低声子能量的基质中掺杂合适的能量接收离子 (如 Tb³⁺, Eu³⁺, Ce³⁺ 等), 通过共振能量转移可以使 Er³⁺ 的 ⁴I_{11/2} → ⁴I_{13/2} 无辐射跃迁概率增加, 从而起到抑制

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 50472053)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-04-0823) 和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: qyztang@scut.edu.cn

Er^{3+} 上转换发光的效果^[11-16]. 但共掺 Tb^{3+} 和 Eu^{3+} 在降低 Er^{3+} 的 $^4I_{11/2}$ 能级寿命的同时也使 $^4I_{13/2}$ 能级寿命显著降低^[14,15], 不利于 Er^{3+} 在 $1.5 \mu m$ 附近波段的发光. 本文通过在 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺的氟磷酸盐玻璃中引入 Ce^{3+} , 研究了能量接受离子 Ce^{3+} 对 Er^{3+} 上转换发光的抑制作用和最佳掺杂浓度, 为改善掺铒的氟磷酸盐玻璃的光放大特性提供了新的方法.

2. 样品制备与性能测试

选取 $35AlF_3-12RF-48MF_2-5Al(PO_3)_3-0.5ErF_3-2YbF_3$ ($R = Li, Na; M = Mg, Ca, Sr, Ba$) 含量以 mol% 计) 氟磷酸盐玻璃作为研究对象. 除 ErF_3 和 YbF_3 为光谱纯之外, 其余各组分原料均采用分析纯. 称取混合料 15 g, 充分搅拌均匀, 放入铂金坩埚

中于 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 的硅碳棒电炉中熔化 30 min, 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 $360 \text{ }^\circ\text{C}$. 退火后的玻璃经研磨, 切割加工成 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 双面抛光试样以满足光谱测试的要求.

用 Perkin-Elmer Lambda-900 UV/VIS/NIR 型光谱仪测试玻璃的吸收光谱, 测量范围为 $300-1700 \text{ nm}$, 分辨率为 1 nm . 荧光光谱采用法国 J-Y 公司的 TRIAX320 型荧光光谱仪测试, 用 980 nm 的 LD 作为激发光源, 测定了上述样品在相同抽运功率下荧光强度的变化, 荧光寿命通过示波器读出. 用排水失重法测量玻璃密度. 用 V 型棱镜法测量玻璃折射率. 稀土离子 (RE^{3+}) 的离子浓度 $N_{RE^{3+}}$ 用已知的摩尔组成和玻璃的密度计算而得. 表 1 为玻璃样品中的 $N_{RE^{3+}}$ 及 Ce^{3+} 与 Er^{3+} 的浓度比例 $N_{Ce^{3+}}/N_{Er^{3+}}$. 所有测试均于室温下进行.

表 1 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃样品中 $N_{RE^{3+}}$ 及 $N_{Ce^{3+}}/N_{Er^{3+}}$

样品编号	$N_{Ce^{3+}}/10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$N_{Er^{3+}}/10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$N_{Yb^{3+}}/10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$N_{Ce^{3+}}/N_{Er^{3+}}$
CYE0	0.00	1.11	4.45	0
CYE1	1.11	1.11	4.45	1
CYE2	2.22	1.11	4.45	2
CYE3	3.35	1.11	4.45	3
CYE4	4.44	1.11	4.45	4
CYE5	5.56	1.11	4.45	5

3. 结果及讨论

图 1 为不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃吸收光谱. 从图 1 可以看到, 随 $N_{Ce^{3+}}$ 的增加, 样品紫外吸收边向长波方向移动, 这是由 Ce^{3+} 的构型间跃迁 $4f^1: ^2F_{5/2} \rightarrow 4f^0, ^5d^1$ 所引起^[13,17]. 随 $N_{Ce^{3+}}$ 增加, 构型间跃迁对可见光短波部分吸收也逐渐加强, 造成样品的紫外吸收边向长波方向移动.

图 2 为 980 nm 的 LD 作为抽运源条件下不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃 $1.5 \mu m$ 附近波段荧光光谱, 内插图给出相应样品在 $1.5 \mu m$ 附近波段的荧光积分强度. 从图 2 可以看出, 在 $N_{Ce^{3+}}$ 和 $1.5 \mu m$ 附近波段荧光积分强度之间有明显的依赖关系. 荧光强度首先随 $N_{Ce^{3+}}$ 的增加而增大, 当 $N_{Ce^{3+}} > 2.22 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (CYE2 样品) 后, 强度

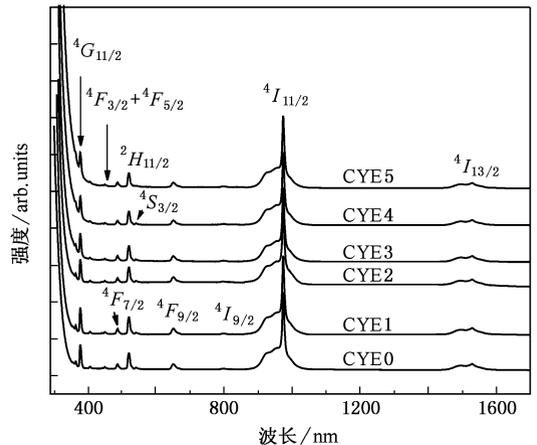


图 1 不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃吸收光谱

变化趋于平缓且略有降低, CYE2 样品的荧光积分强度是 CYE0 样品的 1.44 倍.

对应用于通信中的光纤或平面波导放大器而

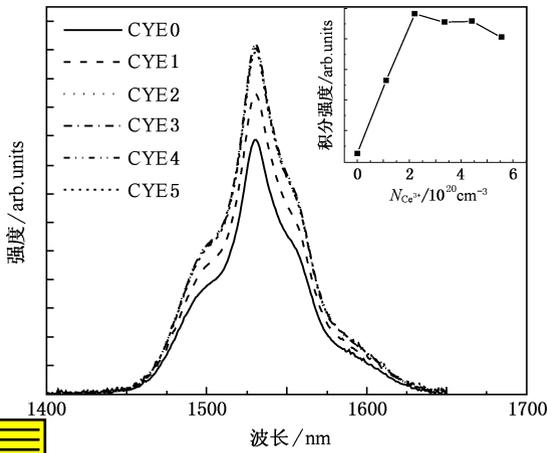


图 2 不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃 $1.5 \mu m$ 附近波段荧光光谱 内插图表示荧光积分强度随 Ce^{3+} 掺杂浓度的变化

言 $1.5 \mu m$ 附近波段的发射特性如荧光光谱半高宽 (FWHM)⁴、 $I_{13/2}$ 能级的荧光寿命 τ_m 、FWHM 与发射截面 σ_{emi} 的乘积 ($FWHM \times \sigma_{emi}$) 以及发射截面 σ_{emi} 与荧光寿命的乘积 ($\sigma_{emi} \times \tau_m$) 是非常重要的参数, 其中后两种参数也叫做放大器的品质因数, 分别表征放大器的带宽性能和增益性能. τ_m 越长则所需抽运阈值越低, $FWHM \times \sigma_{emi}$ 和 $\sigma_{emi} \times \tau_m$ 的值越大则会有更宽的增益带宽和更好的增益性能^[18, 19], 而宽的带宽对于增加光纤传输的信道数、提高 WDM 的传输容量十分有利^[20]. 图 3 所示为各个样品的 FWHM、峰值 σ_{emi} 以及带宽品质因数 $FWHM \times \sigma_{emi}$ 的比较. 与 $1.5 \mu m$ 附近波段荧光积分强度的变化趋势一致, FWHM, σ_{emi} 和 $FWHM \times \sigma_{emi}$ 也在 $N_{Ce^{3+}} = 2.22 \times 10^{20} cm^{-3}$ 时出现了极大值, 分别为 $62.8 nm$, $8.46 \times 10^{-21} cm^2$ 和 531 . 由于 Ce^{3+} 的引入, Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺样品的 FWHM 值增加了大约 $1 nm$, σ_{emi} 和 $FWHM \times \sigma_{emi}$ 也分别增长了大约 5.6% 和 7.0% , 使得玻璃样品在 $1.5 \mu m$ 附近波段的光谱性能有所提高.

图 4 所示为各个样品中 Er^{3+} 的 $I_{13/2}$ 能级荧光寿命 τ_m 和 $\sigma_{emi} \times \tau_m$ 随 Ce^{3+} 掺杂浓度 $N_{Ce^{3+}}$ 的变化. 它们的变化规律与 $1.5 \mu m$ 附近波段荧光积分强度的变化趋势也相当一致. 随 $N_{Ce^{3+}}$ 增大, τ_m 和 $\sigma_{emi} \times \tau_m$ 先是有个微小的增长, 当 $N_{Ce^{3+}} = 2.22 \times 10^{20} cm^{-3}$ 时均有较大幅度的提高, 分别达到 $9.2 ms$ 和 77.8 , 比不掺 Ce^{3+} 的 CYE0 样品荧光寿命 ($7.8 ms$) 提高了大约 17.9% , $\sigma_{emi} \times \tau_m$ 也增长了 25% . 当 $N_{Ce^{3+}}$ 继续增大时, τ_m 几乎呈线性下降, 增益性能也随之迅速

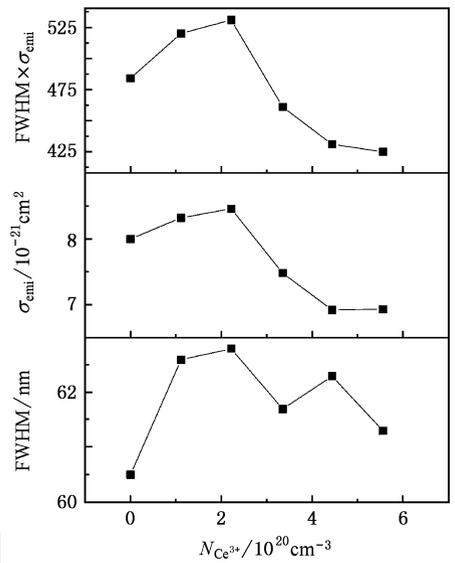


图 3 不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃 $1.5 \mu m$ 附近波段的 FWHM、峰值 σ_{emi} 以及带宽品质因数 $FWHM \times \sigma_{emi}$

衰退, CYE6 样品的 τ_m 和 $\sigma_{emi} \times \tau_m$ 已减小到 $8.5 ms$ 和 58.9 , 分别下降了 7.6% 和 24% . 这些现象都是由 Ce^{3+} 和 Er^{3+} 之间的能量转移所引起的. 总的看来, Ce^{3+} 的引入对 Er^{3+} 的 $I_{13/2}$ 能级荧光寿命及增益性能的影响是显著的, 它可能降低该基质光纤放大器的抽运功率阈值并提高其增益性能.

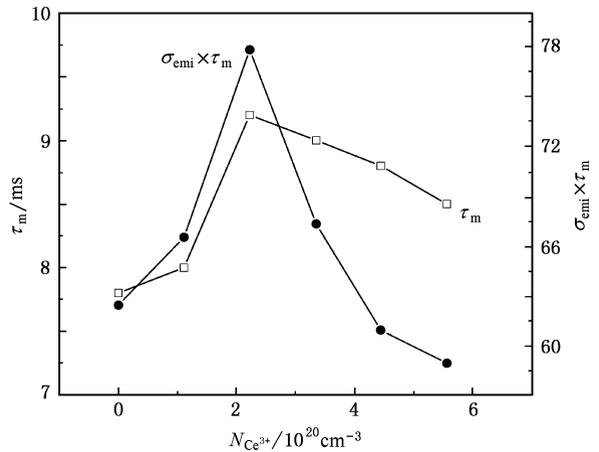


图 4 不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃中 Er^{3+} 的 τ_m 和 $\sigma_{emi} \times \tau_m$

图 5 所示为相同抽运条件下各个样品的红外—可见上转换发光光谱. 该体系的上转换荧光主要包括峰值为 $520, 540 nm$ 的绿光和 $653 nm$ 的红光, 分别对应于 Er^{3+} 的 ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 和

$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁,已在图 5 中标示.如图 5 所示,随 $N_{Ce^{3+}}$ 的增加样品的红色和绿色上转换发光强度均显著降低,测试过程中用肉眼即可观察到这种变化.图 6 进一步给出了峰值分别为 653 和 540 nm 波段发光的积分强度(分别标记为 I_R 和 I_G)随 Ce^{3+} 浓度的变化趋势,图 6 的内插图显示了相应积分强度之比 (I_R/I_G) 的变化趋势.从图 6 可以明显看到, I_R 和 I_G 均随 $N_{Ce^{3+}}$ 的增加而大幅减小, I_G 减小的幅度大概为 74%, I_R 也减小了 69% 左右.由 I_R/I_G 的变化可知, Ce^{3+} 的引入对绿色上转换荧光的抑制作用更为显著.

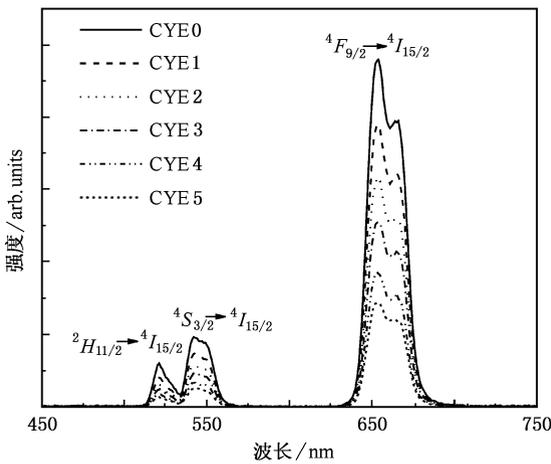


图 5 不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃上转换光谱

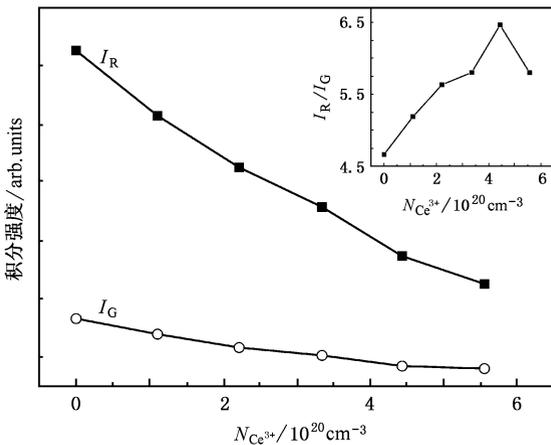


图 6 不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃的上转换发光强度 I_R 和 I_G 内插图为相应的 I_R/I_G 变化

激发态吸收、基态吸收和多声子弛豫.掺铒的氟磷酸盐玻璃的上转换发光机制已在我们以前的报道^[8]中有过详细讨论.由对该玻璃系统上转换发光机制的分析可知,所有上转换绿光和红光的发射都依赖于 Er^{3+} 的 $^4I_{11/2}$ 能级荧光寿命,减小该能级荧光寿命可以降低上转换的发光强度.从 Er^{3+} 的吸收光谱可得出 Er^{3+} 的 $^4I_{11/2}$ 能级与 $^4I_{13/2}$ 能级之间的能量差约为 3700 cm^{-1} ,而 Ce^{3+} 的 $^2F_{7/2}$ 能级与 $^2F_{5/2}$ 能级之间的间隔约为 2000 cm^{-1} , Er^{3+} 和 Ce^{3+} 相应能级之间的失配度较小.氟磷酸盐玻璃中由于 P—O 键的存在,最大声子能量约为 1060 cm^{-1} ^[21],只需要 2 个声子就可协助 Er^{3+} 与 Ce^{3+} 之间的能量转移.通过这种基质声子协助的能量传递形式,无辐射能量转移(ET1)

$^4I_{11/2}(Er^{3+}) + ^2F_{5/2}(Ce^{3+}) \rightarrow ^4I_{13/2}(Er^{3+}) + ^2F_{7/2}(Ce^{3+})$ 很容易发生.图 8 显示了各样品中 Er^{3+} 的 $^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{13/2}$ 能级荧光寿命与 Ce^{3+} 浓度 $N_{Ce^{3+}}$ 之间的依赖关系. Er^{3+} 的 $^4I_{13/2}$ 能级荧光寿命 τ_m 可直接测出, $^4I_{11/2}$ 能级荧光寿命 τ_3 由于 Yb^{3+} 的引入而无法直接得到,可用以下经验公式计算该寿命^[22]:

$$\frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{\tau_{R3}} + K,$$

式中, τ_{R3} 表示 Er^{3+} 的 $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 能级跃迁的辐射寿命,可由 Judd-Ofelt 理论计算得出,其值基本不受 Ce^{3+} 浓度 $N_{Ce^{3+}}$ 的影响; K 为 $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 能级跃迁的无辐射跃迁概率,由经验公式^[22]

$$K = K_0 + 0.160N_{Ce} + 0.046N_{Ce}^2$$

得出,其中 K_0 为 $N_{Ce^{3+}} = 0$ 时的跃迁概率,采用文献^[22]的数据.由图 7 和图 8 可以看到,随 $N_{Ce^{3+}}$ 增加,能量接受离子越来越多, $^4I_{11/2}$ 能级上更多 Er^{3+} 的能量无辐射转移给 Ce^{3+} ,把 $^2F_{5/2}$ 能级的 Ce^{3+} 激发

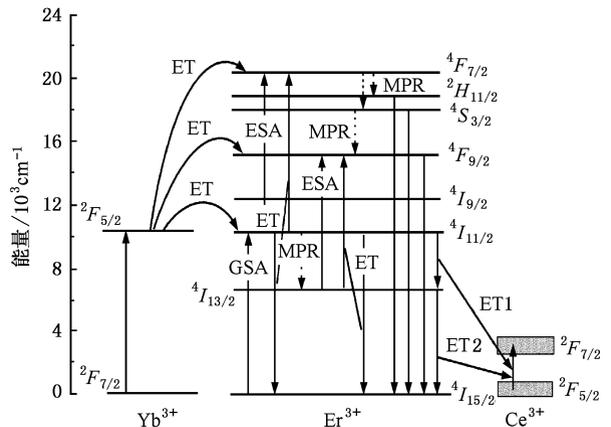


图 7 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃的能量转移示意图

图 7 为 $Er^{3+}/Yb^{3+}/Ce^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃的能量转移示意图,图中的 ESA, GSA 和 MPR 分别表示

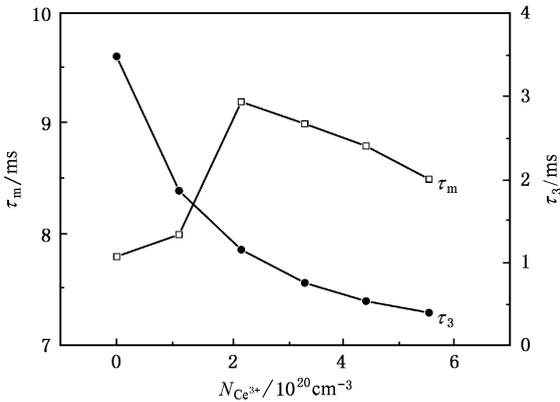


图8 不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ 共掺氟磷酸盐玻璃中 Er^{3+} 的 τ_m 和 τ_3

至² $F_{7/2}$ 能级,⁴ $I_{11/2}$ 到⁴ $I_{13/2}$ 能级间跃迁的无辐射跃迁概率增加, τ_3 明显降低(降幅约为88.7%),从而减小了 Er^{3+} 的红光和绿光上转换发光, τ_m 虽然在 $N_{\text{Ce}^{3+}}$ 增加时也有一个降低的趋势,但是幅度相对较小(约为7.6%).这说明 Ce^{3+} 的² $F_{5/2}$ 能级与 Er^{3+} 的⁴ $I_{11/2}$ 能级间确实存在较为强烈的交叉弛豫作用.而 Er^{3+} 的⁴ $I_{13/2}$ 能级与⁴ $I_{15/2}$ 能级之间的能量差约为 6500 cm^{-1} ,与 Ce^{3+} 能级的失配度较大,其声子阶数为5,因此无辐射能量转移(ET2)

${}^4I_{13/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2F_{5/2}(\text{Ce}^{3+}) \rightarrow {}^4I_{15/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2F_{7/2}(\text{Ce}^{3+})$ 在低 Ce^{3+} 浓度下发生概率较小.适当引入 Ce^{3+} 不会降低 τ_m ,反而会因为ET1过程大大增加 Er^{3+} 的⁴ $I_{13/2}$ 能级粒子数, τ_m 因此有一定程度的提高, Er^{3+} 的

$1.5 \mu\text{m}$ 附近波段荧光强度也随之增强,增益性能得到改善,如图2和图4所示.但是当 Ce^{3+} 浓度超过一定数量时, Er^{3+} 周围的 Ce^{3+} 分布很多,ET2过程也有机会得以发生,使 Er^{3+} 从⁴ $I_{13/2}$ 能级无辐射弛豫到⁴ $I_{15/2}$ 能级,减少了⁴ $I_{13/2}$ 能级的粒子数,从而降低了 τ_m . Er^{3+} 在 $1.5 \mu\text{m}$ 附近波段的荧光强度也随之降低,增益性能反而恶化,如图2和图4所示.

4. 结 论

在 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ 共掺的氟磷酸盐玻璃中, Ce^{3+} 的适量引入可以有效提高 Er^{3+} 在 $1.5 \mu\text{m}$ 附近波段的荧光强度、发射截面以及⁴ $I_{13/2}$ 能级荧光寿命. Er^{3+} 浓度为 $1.11 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时,其 σ_{emi} ,FWHM $\times \sigma_{\text{emi}}$ 和荧光寿命均在 Ce^{3+} 掺杂浓度为 $2.22 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时出现极大值,分别为 $8.46 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$,531和9.2 ms,比未掺 Ce^{3+} 样品分别增长了大约5.6%,7.0%和18%.玻璃在 $1.5 \mu\text{m}$ 附近波段的增益和带宽性能均有所提高.由于 $\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ 间的能量传递,⁴ $I_{11/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2F_{5/2}(\text{Ce}^{3+}) \rightarrow {}^4I_{13/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2F_{7/2}(\text{Ce}^{3+})$, Ce^{3+} 的引入可以有效降低氟磷酸盐玻璃中 Er^{3+} 的红色和绿色上转换发光.由 I_R/I_G 的变化可知, Ce^{3+} 的引入对绿色上转换荧光的抑制作用更强.综上所述,适量引入 Ce^{3+} 可以有效抑制980 nm的LD抽运下氟磷酸盐玻璃中的红外—可见上转换发光,改善 Er^{3+} 在 $1.5 \mu\text{m}$ 附近波段的发光性能,有利于氟磷酸盐玻璃作为宽带光纤放大器潜在基质的实用化.

- [1] Tanabe S 2002 *C. R. Chimie* **5** 815
- [2] Seneschal K, Jiang S, Luo T et al 2001 *Proc. SPIE* **4282** 93
- [3] Yang J H, Dai S X, Wen L et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 509 (in Chinese) [杨建虎、戴世勋、温磊等 2003 物理学报 **52** 509]
- [4] Ainslie B J, Davey S T, Szebesta D et al 1995 *J. Non-Cryst. Solids* **184** 225
- [5] Ono H, Nakagawa K, Yamada M et al 1996 *Electron. Lett.* **32** 1586
- [6] Prassas M 2002 *US Patent* 6429162
- [7] Philipps J F, Töpfer T, Eborndorf-Heidepriem H et al 2001 *Appl. Phys. B* **72** 399
- [8] Li T, Zhang Q Y, Liu Y H et al 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1147
- [9] Ishikawa E, Aoki H, Yamashita T et al 1992 *Electron. Lett.* **28** 1497
- [10] Zemon S, Pedersen B, Lambert G et al 1992 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **4** 244
- [11] Andronov A A, Grishin I A, Gurev V A et al 1998 *Technol. Phys. Lett.* **24** 365
- [12] Meng Z, Yoshimura T, Fukue K et al 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 2187
- [13] Choi Y G, Kim K H, Park S H et al 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 3832
- [14] Strohhofer C, Kik P G, Polman A 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 4486
- [15] Strohhofer C, Polman A 2001 *Opt. Mater.* **17** 445
- [16] Nagamatsu K, Nagaoka S, Higashihata M et al 2004 *Opt. Mater.* **27** 337
- [17] Qiu J, Shimizugawa Y, Iwabuchi Y et al 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 43
- [18] Shen S, Jha A 2004 *Opt. Mater.* **25** 321

- [19] Shen S , Naftaly M , Jha A 1999 *Proc. SPIE* **3849** 103
- [20] Yang J H , Dai S X , Dai N L *et al* 2003 *Spectrosc. Spect. Anal.* **23** 1065 (in Chinese) [杨建虎、戴世勋、戴能利等 2003 光谱学与光谱分析 **23** 1065]
- [21] Tanabe S , Yoshii S , Hirao K *et al* 1992 *Phys. Rev. B* **45** 4620
- [22] Meng Z , Yoshimura T , Nakata Y *et al* 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** L1409

Effects of Ce^{3+} ions on the spectroscopic properties of fluorophosphate glasses codoped with $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ *

Li Tao^{1,2)} Zhang Qin-Yuan^{1)†} Jiang Zhong-Hong¹⁾

1) *Key Laboratory of Special Functional Materials and Advanced Manufacturing Technology of Ministry of Education , Institute of Optical Communication Materials , South China University of Technology , Guangzhou 510640 , China)*

2) *College of Science , South China Agriculture University , Guangzhou 510640 , China)*

(Received 10 August 2005 ; revised manuscript received 27 March 2006)

Abstract

This paper reports on the influence of energy acceptors Ce^{3+} ions on the upconversion and $1.5 \mu\text{m}$ emission properties of fluorophosphate glasses codoped with $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$. The energy transfer mechanism has been discussed based on the energy matching and the energy level. The Ce^{3+} ions are excited from the ${}^2F_{5/2}$ level to the ${}^2F_{7/2}$ level due to the non-radiatively energy transfer process of the Er^{3+} ions from the ${}^4I_{11/2}$ level to the ${}^4I_{13/2}$ level. The upconversion luminescence intensities of the Er^{3+} are decreased quite significantly owing to this energy transfer process. Meanwhile , the luminescence intensities , peak stimulated emission cross sections , and lifetimes of the ${}^4I_{13/2}$ level of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped fluorophosphate glasses increase largely with the introduction of the Ce^{3+} ions at the proper concentration of $1.11 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Keywords : fluorophosphate glasses , spectroscopic properties , optical fiber amplifier , Er^{3+} and Ce^{3+}

PACC : 7820 , 4270C , 7840

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50472053) , the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-04-0823) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province , China (Grant No. 04020036) .

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