

# Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> 共掺碲酸盐玻璃上转换 绿光激发过程的研究\*

董力强<sup>1)†</sup> 黄世华<sup>1)†</sup> 温红宇<sup>2)</sup> 杨艳民<sup>3)</sup> 王大伟<sup>1)</sup> 段晓霞<sup>1)</sup>

1) 北京交通大学光电子技术研究所, 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

2) 防化研究院, 北京 102205)

3) 河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2008 年 12 月 1 日收到, 2009 年 3 月 29 日收到修改稿)

根据 Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> 共掺碲酸盐玻璃绿光上转换发光的能级结构和相关跃迁建立的速率方程模型, 分析了 Er<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 能级上升特性与 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级和 Yb<sup>3+</sup> 的 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 能级的关系. 通过模型对实验观测的上升和衰减曲线的拟合, 确定速率方程模型的相关参数, 计算 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 能级粒子数布居趋于稳定时能量传递粒子数与激发态吸收粒子数之比. 进一步分析了 Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> 共掺绿光上转换发光的动力学过程.

关键词: 速率方程模型, 上转换, Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup>, 方波激发

PACC: 7855, 7820, 7840

## 1. 引 言

提高发光效率是上转换发光研究的一个重要内容. 采用共掺敏化离子的方式提高上转换发光效率是一种常用的方法. 其实质是敏化离子吸收激发光并把能量传递给激活离子, 实现激活离子高能级的粒子数增加, 从而提高激活离子的发光效率. 在可以作为 Er<sup>3+</sup> 敏化剂的稀土离子中, Yb<sup>3+</sup> 以其独特的能级结构占有重要地位. Yb<sup>3+</sup> 的能级结构简单, 只有 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 作为激发态能级, 且非常接近 Er<sup>3+</sup> 离子 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级, 同 Er<sup>3+</sup> 容易匹配, 在 980 nm 附近的吸收截面大<sup>[1-3]</sup>, 可以显著提高 Er<sup>3+</sup> 的上转换发光效率.

许多研究者系统地研究了 Er<sup>3+</sup> 单掺和 Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup> 共掺体系的上转换发光过程<sup>[4-12]</sup>, 对绿光上转换发光机理看法基本一致, 主要通过以下三个过程实现 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 和 <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> 能级粒子数积累: Er<sup>3+</sup> 激发态吸收、Er<sup>3+</sup> 间交叉弛豫和 Yb<sup>3+</sup> → Er<sup>3+</sup> 的能量传递. 通过比较 Er<sup>3+</sup> 单掺、Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup> 共掺绿光发光强度的大小及计算 Yb<sup>3+</sup> → Er<sup>3+</sup> 的能量传递效率  $\eta$ , 说明 Yb<sup>3+</sup> → Er<sup>3+</sup> 能量传递过程起主要作用. 实际上, 由于很难保

证测量不同样品时实验条件完全相同, 用上转换发光强度评价发光效率是否提高比较困难. 要确定能量传递在共掺体系起主要作用还需要补充更多的实验数据. 基于上述思想, 本文通过建立 Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> 共掺碲酸盐玻璃绿光上转换发光的速率方程模型, 分析 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 和 <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> 能级粒子数积累的过程, 通过能级粒子数的表达式拟合实验数据, 得到能级寿命和相关参数, 计算 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 和 <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> 能级粒子数趋于稳定时 Yb<sup>3+</sup> → Er<sup>3+</sup> 能量传递粒子数与 Er<sup>3+</sup> 激发态吸收粒子数的比值, 通过此比值来分析能量传递对 Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup> 共掺绿光上转换发光的贡献.

## 2. 实 验

上转换荧光测试光源为中国科学院半导体研究所生产的 980 nm 激光二极管 (LD), 荧光寿命测试光源为方波光源, 由方波电源驱动 980 nm (LD) 产生, 频率在 1—3000 Hz 可调; 由 Jobin Yvon-Spex Fluorolog3 型光谱仪和 Hamamatsu R456 型光电倍增管 (PMT) 对发光信号进行探测, 用 TDS1012 型数字存储示波器和计算机进行数据采集和记录. 根据

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10434030, 10774012) 和北京交通大学科研基金 (批准号: 2006XM038, 2007XM048) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: shhuang@bjtu.edu.cn

PMT 负载的要求,为了保证输出线形和好的频率响应,满足  $R_L C \ll \tau$  ( $\tau$  为能级寿命)本实验 PMT 输出口端负载选择  $R_L = 11 \text{ k}\Omega$ ,分布电容  $C = 100 \text{ pF}$ ,则  $R_L C = 1.1 \text{ }\mu\text{s} \ll \tau$ .所有的测试均在室温下进行.

实验中使用的样品 1 为  $\text{Er}^{3+}$  掺杂的硝酸盐玻璃,样品 2 为  $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  掺杂的硝酸盐玻璃,两种样品的摩尔组分分别是  $80\text{TeO}_2-10\text{ZnO}-10\text{Na}_2\text{CO}_3-0.5\text{Er}_2\text{O}_3$  和  $80\text{TeO}_2-10\text{ZnO}-10\text{Na}_2\text{CO}_3-0.5\text{Er}_2\text{O}_3-1\text{Yb}_2\text{O}_3$ .

### 3. 建立速率方程模型

图 1 为  $\text{Er}^{3+}$  单掺、 $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  共掺硝酸盐玻璃的能级结构和绿光上转换激发机理示意图.文献 [13] 已经讨论过  $\text{Er}^{3+}$  单掺绿光上转换发光是激发态吸

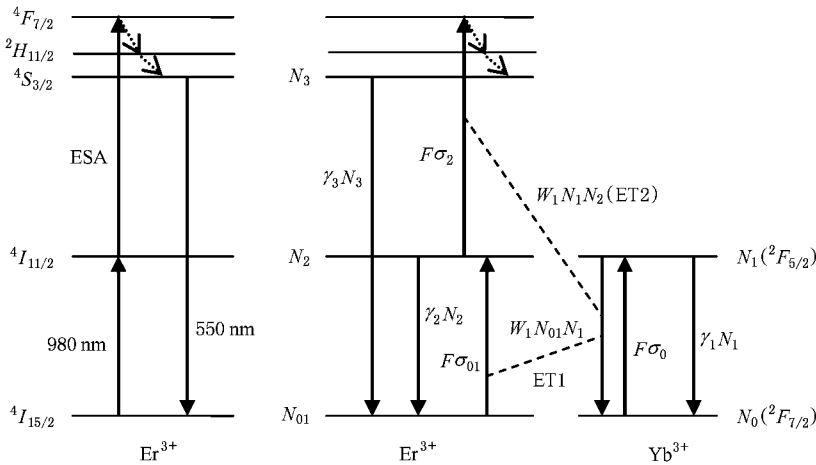


图 1 980 nm LD 激发下  $\text{Er}^{3+}$  和  $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  在硝酸盐玻璃中的能级结构和绿光上转换发光机理

根据以上分析得到图 1 中  $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  上转换绿光的能级结构和相关跃迁,设  $t < 0$  时所有原子都处于基态,在  $t = 0$  时受到方波激光激发,于是可以写出  $\text{Er}^{3+}$  的  $4S_{3/2}$ ,  $4I_{11/2}$  能级和  $\text{Yb}^{3+}$   $2F_{5/2}$  能级粒子数  $N$  随时间变化的速率方程

$$\frac{dN_1}{dt} = F\sigma_0(N_D - N_1) - [\gamma_1 + w_1(N_A - N_2 - N_3)] \times N_1 - w_2N_1N_2, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = F\sigma_{01}(N_A - N_2 - N_3) - (\gamma_2 + F\sigma_2)N_2 + w_1(N_A - N_2 - N_3)N_1 - w_2N_1N_2, \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = F\sigma_2N_2 + w_2N_1N_2 - \gamma_3N_3, \quad (3)$$

其中  $N_i$  表示能级  $i$  的粒子数,  $N_A = N_{01} + N_2 + N_3$ ,  $N_D = N_0 + N_1$ ;  $\gamma_i$  是能级  $i$  的弛豫速率;  $\gamma_{ij}$  是能级  $i$

收过程,即在 980 nm LD 激发下  $\text{Er}^{3+}$  从基态  $4I_{15/2}$  直接激发至  $4I_{11/2}$  能级,  $4I_{11/2}$  能级吸收第二光子跃迁到  $4F_{7/2}$  能级,  $4F_{7/2}$  能级离子无辐射跃迁到  $2H_{11/2}$  和  $4S_{3/2}$  能级,  $2H_{11/2}$  和  $4S_{3/2}$  能级的辐射跃迁产生绿光.对于  $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  共掺体系绿光上转换发光是激发态吸收、交叉弛豫和能量传递过程.在 980 nm LD 激发下,  $\text{Er}^{3+}$  的  $4I_{11/2}$  能级粒子数来源于两方面,即  $\text{Er}^{3+}$  的  $4I_{15/2}$  能级的基态吸收和  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$  的能量传递(ET1);  $\text{Er}^{3+}$  的  $4F_{7/2}$  能级粒子数来源于两方面,即  $4I_{11/2}$  能级的激发态吸收和  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$  的能量传递(ET2);  $\text{Er}^{3+}$  离子间的交叉弛豫在  $\text{Er}^{3+}$  离子浓度低的情况下可以忽略<sup>[13]</sup>.  $4F_{7/2}$  能级上的离子迅速无辐射弛豫至  $2H_{11/2}$  和  $4S_{3/2}$  能级,产生  $2H_{11/2} \rightarrow 4I_{15/2}$  和  $4S_{3/2} \rightarrow 4I_{15/2}$  的辐射跃迁.

到  $j$  的跃迁速率,  $\gamma_i = \sum \gamma_{ij}$ ;  $F$  是激发光的光子流密度;  $\sigma_i$  是能级  $i$  的吸收截面.下面给出三种近似条件.(i)在弱激发条件下,  $N_D \gg N_1$ ,  $N_D - N_1 \approx N_D$ ;  $N_A \gg N_2 + N_3$ ,  $N_A \approx N_A - N_2 - N_3$ ;  $F\sigma_2 \ll \gamma_2$ , 在方程(2)中可以忽略  $F\sigma_2$ .(ii)能量传递为弱传递,  $\gamma_1N_1 \gg w_1N_1N_2$ ;  $\gamma_1N_1 \gg w_2N_1N_2$ ;  $\gamma_2N_2 \gg w_2N_1N_2$ .(iii)受激辐射可以忽略.在上述情形下,方程(1)–(3)可写为

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= F\sigma_0N_D - \gamma_1N_1, \\ \frac{dN_2}{dt} &= F\sigma_{01}N_A - \gamma_2N_2 + w_1N_1N_2, \\ \frac{dN_3}{dt} &= F\sigma_2N_2 + w_2N_1N_2 - \gamma_3N_3. \end{aligned} \quad (4)$$

上升阶段的初始条件为  $N_i(0) = 0$ , 假设  $\gamma_3 \gg$

$\gamma_2, \gamma_3 \gg \gamma_1$  [13-16] 微分方程的近似解为

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{F\sigma_0 N_D}{\gamma_1} (1 - e^{-\gamma_1 t}), \\
 N_2 &= \left( \frac{F\sigma_{01} N_A}{\gamma_2} + \frac{F\sigma_0 w_1 N_A N_D}{\gamma_1 \gamma_2} \right) (1 - e^{-\gamma_2 t}) \\
 &\quad - \frac{F\sigma_0 w_1 N_A N_D}{\gamma_1 (\gamma_2 - \gamma_1)} (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t}), \\
 N_3 &\approx A (1 - B e^{-\gamma_1 t} - C e^{-\gamma_2 t} \\
 &\quad - D e^{-2\gamma_1 t} - F e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)t}), \tag{5}
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 A &= \left( \frac{F\sigma_{01} N_A}{\gamma_2} + \frac{F\sigma_0 w_1 N_A N_D}{\gamma_1 \gamma_2} \right) \\
 &\quad \times \left( \frac{F\sigma_2}{\gamma_3} + \frac{F\sigma_0 N_D w_2}{\gamma_1 \gamma_3} \right), \\
 B &= \left( \frac{F^2 \sigma_0 \sigma_2 N_D N_A w_1}{\gamma_1 \gamma_3 (\gamma_2 - \gamma_1)} + \frac{F^2 \sigma_0 \sigma_{01} N_D N_A w_2}{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{F^2 \sigma_0^2 N_D^2 N_A w_1 w_2}{\gamma_1^2 \gamma_2 \gamma_3} + \frac{F^2 \sigma_0^2 N_D^2 N_A w_1 w_2}{\gamma_1^2 (\gamma_2 - \gamma_1) \gamma_3} \right) / A, \\
 C &= 1 - \left( \frac{F^2 \sigma_0 \sigma_2 N_D N_A w_1}{\gamma_1 \gamma_3 (\gamma_2 - \gamma_1)} + \frac{F^2 \sigma_0^2 N_D^2 N_A w_1 w_2}{\gamma_1^2 (\gamma_2 - \gamma_1) \gamma_3} \right) / A, \\
 D &= \left( - \frac{F^2 \sigma_0^2 N_D^2 N_A w_1 w_2}{\gamma_1^2 (\gamma_2 - \gamma_1) \gamma_3} \right) / A, \\
 F &= \left( \frac{F^2 \sigma_0^2 N_D^2 N_A w_1 w_2}{\gamma_1^2 (\gamma_2 - \gamma_1) \gamma_3} - \frac{F^2 \sigma_0 \sigma_{01} N_D N_A w_2}{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{F^2 \sigma_0^2 N_D^2 N_A w_1 w_2}{\gamma_1^2 \gamma_2 \gamma_3} \right) / A. \tag{6}
 \end{aligned}$$

从  $N_3$  表达式可知, 其上升与 Er<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级和 Yb<sup>3+</sup> 的 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 能级有关, 由这两个能级决定 <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> 和 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 能级粒子数, 这与单掺杂 Er<sup>3+</sup> 体系的  $N_3$  上升只与 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级有关 [13] 显然不同. 从  $N_3$  粒子数上升特性可知  $N_1$  和  $N_2$  的能级寿命, 即从 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 的上升曲线可以得到 Er<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 和 Yb<sup>3+</sup> 的 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 能级寿命.

对于衰减阶段,  $F = 0$ , 初始条件  $N_1(0) = N_{10}$ ,  $N_2(0) = N_{20}$ ,  $N_3(0) = N_{30}$  由上升阶段的  $t \rightarrow \infty$  给出, 微分方程的解为

$$\begin{aligned}
 N_1 &= N_{10} e^{-\gamma_1 t}, \\
 N_2 &= N_{20} e^{-\gamma_2 t} + \frac{w_1 N_A N_{10}}{\gamma_2 - \gamma_1} (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t}), \\
 N_3 &= \left[ N_{30} - \frac{w_1 w_2 N_{10}^2 N_A}{(\gamma_2 - \gamma_1) (\gamma_2 - 2\gamma_1)} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{w_2 N_{10}}{\gamma_3 - \gamma_2 - \gamma_1} \left( N_{20} - \frac{w_1 N_{10} N_A}{\gamma_2 - \gamma_1} \right) \right] e^{-\gamma_3 t},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \frac{w_1 w_2 N_{10}^2 N_A}{(\gamma_2 - \gamma_1) (\gamma_2 - 2\gamma_1)} e^{-2\gamma_1 t} \\
 &+ \frac{w_2 N_{10}}{\gamma_3 - \gamma_2 - \gamma_1} \left( N_{20} - \frac{w_1 N_{10} N_A}{\gamma_2 - \gamma_1} \right) e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)t}. \tag{7}
 \end{aligned}$$

由上升阶段的终值可知

$$\begin{aligned}
 N_{10} &= \frac{F\sigma_0 N_D}{\gamma_1}, \\
 N_{20} &= \frac{F\sigma_{01} N_A}{\gamma_2} + \frac{F\sigma_0 w_1 N_A N_D}{\gamma_1 \gamma_2}, \\
 N_{30} &= \left( \frac{F\sigma_{01} N_A}{\gamma_2} + \frac{F\sigma_0 w_1 N_A N_D}{\gamma_1 \gamma_2} \right) \\
 &\quad \times \left( \frac{F\sigma_2}{\gamma_3} + \frac{F\sigma_0 N_D w_2}{\gamma_1 \gamma_3} \right).
 \end{aligned}$$

$N_3$  的衰减特性与单掺 Er<sup>3+</sup> 的衰减特性显然不同 [13]. 这是由于激发停止后,  $N_1, N_2$  的能级上还有电子, 还能发生能量传递把能量传递到  $N_3$  的能级, 而  $N_3$  的能级的寿命短, 上转换发光的衰减取决于向这个能级提供能量的能级寿命及其传递速率.

### 4. 结果与讨论

980 nm LD 激发两种样品, 室温下可以观察到样品发出肉眼明显可见的绿光. 从图 2 和图 3 的上转换发射谱及图 1 的能级结构, 确定发射来自 Er<sup>3+</sup> 的 <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>; <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 辐射跃迁. 加入 Yb<sup>3+</sup> 后, 发出 528 和 550 nm 的上转换绿光, 光谱的组成以及发光中心波长基本相同.

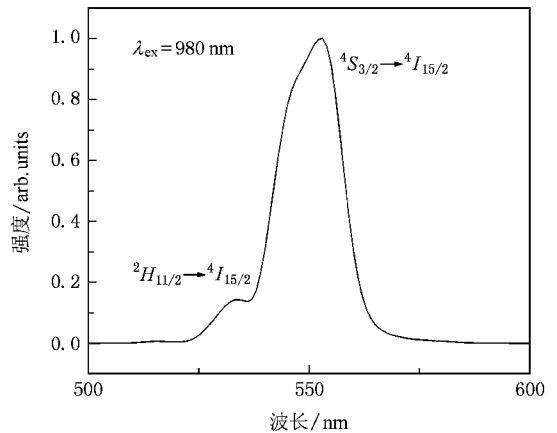


图 2 980 nm LD 激发下 Er<sup>3+</sup> 掺杂的硝酸盐玻璃上转换荧光光谱

为了进一步研究 Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> 共掺绿光上转换激发机理, 实验上用 980 nm 的方波激光激发样品 1 和样品 2 两种样品, 调整方波电源频率使激发 (方波激

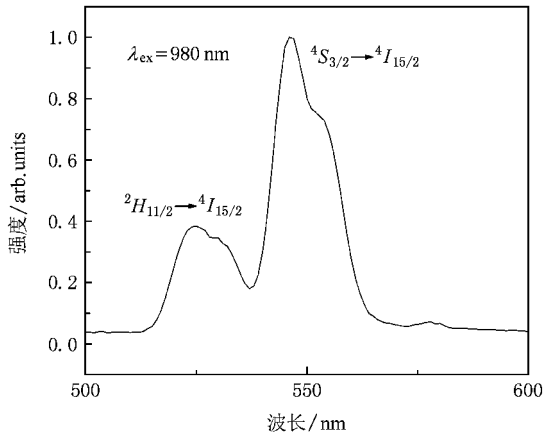


图 3 980 nm LD 激发下  $\text{Er}^{3+}$ -Yb 掺杂的磷酸盐玻璃上转换荧光光谱

示.用模型所得  $N_3$  表达式对实验所测的上升和衰减曲线进行拟合,得到两种样品上升衰减的时间常数如表 1 所列.表 1 结果表明  $\gamma_3 \gg \gamma_2, \gamma_1$  的假设成立,实验结果验证了理论模型的合理性.

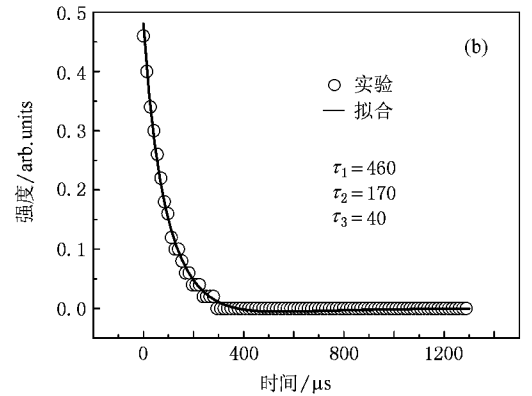
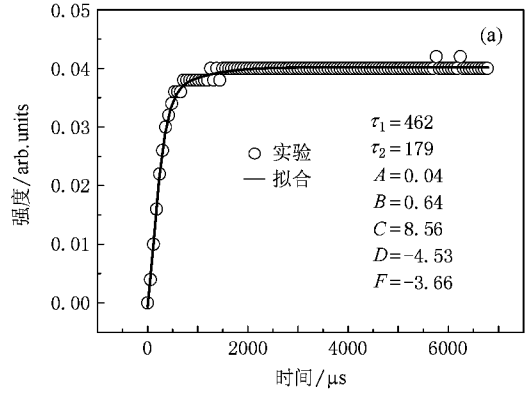


图 5 980 nm 方波激发下  $\text{Er}^{3+}$ -Yb $^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃 $^4S_{3/2}$ (550 nm)能级上转换发光上升衰减曲线的拟合结果( $\tau$ 为时间常数)(a)发光强度上升时的实验结果和拟合结果(b)发光强度衰减时的实验结果和拟合结果

表 1 980 nm 激发两种样品的 $^4S_{3/2}$ 能级上升和衰减的时间常数(单位为  $\mu\text{s}$ )

	上升	衰减
样品 1	$\tau_2 = 178$	$\tau_3 = 38$
样品 2	$\tau_1 = 462$	$\tau_1 = 460$
	$\tau_2 = 179$	$\tau_2 = 170$
		$\tau_3 = 40$

注: $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  分别为  $N_1, N_2, N_3$  的能级寿命.

为了分析能量传递在  $\text{Er}^{3+}$ -Yb $^{3+}$  共掺绿光上转换发光中起的重要作用,我们研究了 $^2H_{11/2}$ 和 $^4S_{3/2}$ 能级粒子数的两种来源能量传递和激发态吸收在上转换发光中的贡献.对于上升阶段,当  $t \rightarrow \infty$  时, $N_3(t)$  粒子数趋于稳定,即

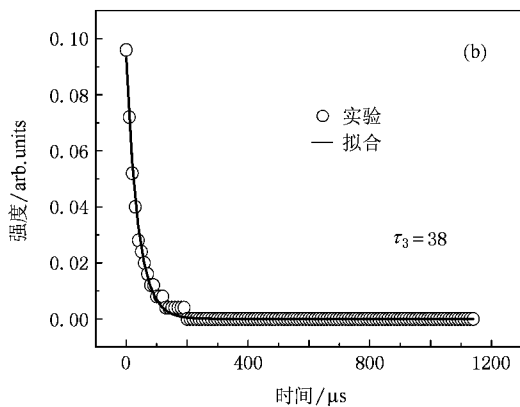
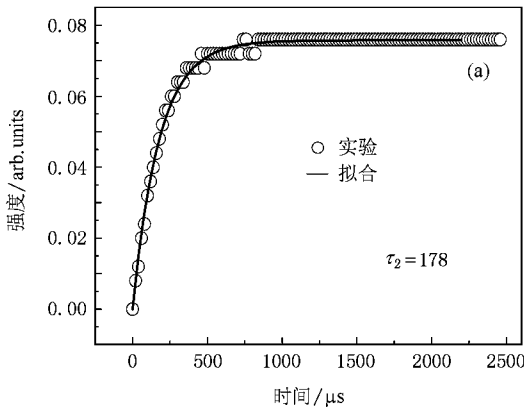


图 4 980 nm 方波激发下  $\text{Er}^{3+}$  掺杂磷酸盐玻璃 $^4S_{3/2}$ (550 nm)能级上转换发光上升衰减曲线的拟合结果( $\tau$ 为时间常数)(a)发光强度上升时的实验结果和拟合结果(b)发光强度衰减时的实验结果和拟合结果

发光的上升沿为  $0.1 \mu\text{s}$ ,下降沿为  $0.14 \mu\text{s}$ 的持续时间远大于上转换激发过程中所涉及能级的寿命,测量 $^4S_{3/2}$ 能级发光的上升和衰减曲线如图 4 和图 5 所

$$N_3(t \rightarrow \infty) = \left( \frac{F\sigma_{01}N_A}{\gamma_2} + \frac{F\sigma_0 w_1 N_A N_D}{\gamma_1 \gamma_2} \right) \left( \frac{F\sigma_2}{\gamma_3} + \frac{F\sigma_0 N_D w_2}{\gamma_1 \gamma_3} \right) \\ = \frac{F^2 \sigma_2 \sigma_{01} N_A}{\gamma_2 \gamma_3} + \frac{F^2 \sigma_0 \sigma_2 w_1 N_A N_D \gamma_1 + F^2 \sigma_0 \sigma_{01} w_2 N_A N_D \gamma_1 + F^2 \sigma_0^2 N_D^2 w_1 w_2 N_A}{\gamma_1^2 \gamma_2 \gamma_3}$$

其中等号右端第一项为激发态吸收对  $N_3(t)$  粒子数的贡献,第二项为能量传递对  $N_3(t)$  粒子数的贡献.为了验证能量传递和激发态吸收这两种过程哪个对上转换发光起主要作用,我们计算了这两种过程粒子数之比

$$\frac{N_{\text{ETU}}(t \rightarrow \infty)}{N_{\text{ESA}}(t \rightarrow \infty)} = \frac{\sigma_0 w_1 N_D}{\gamma_1 \sigma_{01}} + \frac{\sigma_0 w_2 N_D}{\gamma_1 \sigma_2} + \frac{\sigma_0^2 w_1 w_2 N_D^2}{\gamma_1^2 \sigma_2 \sigma_{01}}$$

由表 1 可知,  $\gamma_1 = 1/\tau_1 = 1/462 = 2.16 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $\gamma_2 = 1/\tau_2 = 1/179 = 5.59 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $\gamma_3 = 1/\tau_3 = 1/38 = 26.3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ;将图 5 的拟合结果  $A = 0.04$ ,  $B = 0.64$ ,  $C = 8.56$ ,  $D = -4.53$ ,  $F = -3.66$  代入方程(6)通过计算可得

$$\frac{N_{\text{ETU}}(t \rightarrow \infty)}{N_{\text{ESA}}(t \rightarrow \infty)} = 9.63 \approx 10.$$

$t \rightarrow \infty$  时该比值说明了能量传递对  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  共掺绿光上转换发光起主要作用,甚至可以忽略  $\text{Er}^{3+}$  的激发态吸收过程.

## 5. 结 论

本文利用速率方程模型分析  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  共掺绿光上转换发光的激发过程,确定<sup>4</sup> $S_{3/2}$ 能级粒子数的积累来源于  $\text{Er}^{3+}$  的<sup>4</sup> $I_{11/2}$ 能级和  $\text{Yb}^{3+}$  的<sup>2</sup> $F_{5/2}$ 能级.通过模型对实验观测的上升和衰减曲线的拟合,确定能级寿命和速率方程模型的相关参数,计算<sup>4</sup> $S_{3/2}$ 和<sup>2</sup> $H_{11/2}$ 能级粒子数趋于稳定时  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$  的能量传递与  $\text{Er}^{3+}$  激发态吸收对发光能级贡献之比,结果显示能量传递粒子数要远大于激发态吸收粒子数的情形,可以确定在  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  共掺硝酸盐玻璃的绿光上转换发光中能量传递对<sup>4</sup> $S_{3/2}$ 和<sup>2</sup> $H_{11/2}$ 能级粒子数积累起主要作用,可以忽略  $\text{Er}^{3+}$  的激发态吸收过程.实验结果( $\gamma_3 \gg \gamma_2, \gamma_1$ )验证了理论模型的合理性.

- [1] Dai N L, Zhang D B, Hu L L, Li S G 2003 *Acta Photon. Sin.* **32** 112 (in Chinese) [戴能利、张德宝、胡丽丽、李顺光 2003 光子学报 **32** 112]
- [2] Da Vila L D, Gomes L, Tarelho L V G, Ribeiro S J L, Messadeq Y 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 3873
- [3] Kozanecki A, Homewood K, Sealy B J 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 793
- [4] Da Silva C J, de Araujo M T, Gouveia E A, Gouveia-Neto A S, Sombra A S B 2000 *Appl. Phys. B* **70** 185
- [5] Wen L, Yang J H, 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]
- [6] Page R H, Schaffers K I, Waide P A, Tassano J B, Payne S A, Krupke W F 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 996
- [7] Zhang Y P, Xia H P, Zhang X M, Wang J H, Zhang J L, Jiang C 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 4207 (in Chinese) [张约品、夏海平、张新民、王金浩、章践立、姜淳 2007 物理学报 **56** 4207]
- [8] Li Y H, Hong G Y, Zhang Y M, Yu Y N 2008 *J. Alloy. Compd.* **456** 247
- [9] Yang Z M, Zhang Q Y, Liu Y H, Jiang Z H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2013 (in Chinese) [杨中民、张勤远、刘粤惠、姜中宏 2005

物理学报 **54** 2013]

- [10] García-Revilla S, Valiente R, Romanyuk Y E, Pollnau M 2008 *J. Lumin.* **128** 934
- [11] Ding Q L, Xiao S G, Zhang X H, Xia Y Q, Liu Z W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5140 (in Chinese) [丁庆磊、肖思国、张向华、夏艳琴、刘政威 2006 物理学报 **55** 5140]
- [12] Dai S X, Li X J, Nie Q H, Xu T F, Shen X, Wang X S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5518 (in Chinese) [戴世勋、厉旭杰、聂秋华、徐铁锋、沈祥、王训四 2007 物理学报 **56** 5518]
- [13] Dong L Q, Huang S H, Jia X X, Chen B J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2061 [董力强、黄世华、贾晓霞、陈宝玖 2009 物理学报 **58** 2061]
- [14] Jiang C, Zheng Q J, Zhang J Z, Gan F X 2000 *Prog. Nat. Sci.* **10** 1066 (in Chinese) [姜淳、曾庆济、张俊洲、干福熹 2000 自然科学进展 **10** 1066]
- [15] Zhang L, Lin F Y, Hu H F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1378 (in Chinese) [张龙、林凤英、胡和方 2001 物理学报 **50** 1378]
- [16] Ren G Z, Chen B J, Yang Y M, Lü S Z, Wang X J 2006 *Chin. J. Lumin.* **27** 325 (in Chinese) [任国仲、陈宝玖、杨艳民、吕少哲、王晓君 2006 发光学报 **27** 325]

# Excitation processes of up-conversion green emission for $\text{Er}^{3+}$ and $\text{Yb}^{3+}$ codoped tellurite glass<sup>\*</sup>

Dong Li-Qiang<sup>1,2)</sup> Huang Shi-Hua<sup>1)†</sup> Wen Hong-Yu<sup>2)</sup> Yang Yan-Min<sup>3)</sup> Wang Da-Wei<sup>1)</sup> Duan Xiao-Xia<sup>1)</sup>

1  $\text{X}$  Key Laboratory of Luminescence and Optical Information of Ministry of Education, Institute of Optoelectronic Technology,  
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2  $\text{X}$  Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

3  $\text{X}$  College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

(Received 1 December 2008; revised manuscript received 29 March 2009)

## Abstract

This paper analyzed the build-up characteristics of  $\text{Er}^{3+} {}^4S_{3/2}$  and the relationships between  $\text{Er}^{3+} {}^4S_{3/2}$ ,  ${}^4I_{11/2}$  and  $\text{Yb}^{3+} {}^2F_{5/2}$  according to the energy structure for green up-conversion emission and relative transition rating function model for  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  codoped tellurite glass. Through fitting the build-up and decay curves by the model the relative parameters for rating equation model were determined, and the relative value between energy transfer and excited state absorption when population of  ${}^4S_{3/2}$  energy tend to be stable was calculated, also the dynamic processes in green up-conversion emission of  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  codoped tellurite glass were analyzed.

**Keywords** : rating equation model, up-conversion,  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$ , square wave excitation

**PACC** : 7855, 7820, 7840

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Gran Nos. 10434030, 10774012 ) and the Scientific Research Foundation of Beijing Jiaotong University, China ( Gran Nos. 2006XM038, 2007XM048 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : shhuang@bjtu.edu.cn