

# 高浓度镱钪共掺磷酸盐光纤放大器增益特性<sup>\*</sup>

宋 峰<sup>†</sup> 苏瑞渊 傅 强 覃 斌 田建国 张光寅

(南开大学光子学中心, 天津 300071)

(2004 年 12 月 20 日收到, 2005 年 5 月 16 日收到修改稿)

在忽略高能级的自发辐射和光纤损耗的情况下, 利用速率方程和传输方程理论研究了高浓度  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃光纤放大器的增益特性, 讨论了  $\text{Er}^{3+}$  浓度、 $\text{Yb}^{3+}$  浓度、抽运光功率、信号光功率、光纤长度对放大器增益的影响, 并与单掺钪光纤放大器进行了比较. 由于  $\text{Yb}^{3+}$  的敏化作用降低了钪离子的团簇效应, 减少了离子间相互作用, 共掺光纤的增益和效率明显高于单掺光纤. 数值计算表明, 3.2cm 长  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺光纤在 980nm 的 20dBm (100mW) 抽运功率下, 1532nm 处的增益可达 10dB.

关键词: 镱钪共掺光纤放大器, 速率方程, 传输方程, 高浓度

PACC: 4281W, 0260

## 1. 引 言

随着光子集成技术的迅速发展, 体积小、光波导放大器受到广泛关注<sup>[1-4]</sup>. 但由于某些原因, 光波导放大器的实用化程度还比较低. 而目前的光纤放大器长度比较长, 一般为几米到几十米, 不利于小型化和集成化. 如果能将光纤放大器的长度降低到厘米量级, 对光子集成技术和光通信技术无疑是很有意义的.

为了减小掺钪光纤器件的长度, 就要提高单位长度的增益, 而要达到高增益, 需要有足够的激活离子来吸收抽运能量, 这就要求掺入的  $\text{Er}^{3+}$  浓度必须足够高. 但在高掺杂浓度下会产生严重的离子聚集, 出现浓度淬灭. 根据对光学材料的研究, 发现解决这个问题有两种有效的方法: 一是  $\text{Er}^{3+}$  与  $\text{Yb}^{3+}$  进行联合掺杂.  $\text{Yb}^{3+}$  吸收截面较大, 吸收波段宽, 可以从 800nm 到 1100nm, 增加了抽运光波长的选择性<sup>[5, 6]</sup>. 共掺后,  $\text{Yb}^{3+}$  可以通过能量传递把吸收的能量传递给  $\text{Er}^{3+}$ , 使得更多的  $\text{Er}^{3+}$  被激发到高能态. 另一方法是选择合适基质. 与其他玻璃基质相比, 磷酸盐玻璃中稀土离子溶解度高,  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂浓度可以达到 20%, 在背景能量转移率方面也有无可比拟的优越

性<sup>[7]</sup>, 并且从  $\text{Yb}^{3+}$  到  $\text{Er}^{3+}$  的能量传递可高达 95%<sup>[5]</sup>. 已有理论表明  $\text{Yb}^{3+}$  的引入可以显著降低  $\text{Er}^{3+}$  浓度淬灭引起的负效应<sup>[8]</sup>.

人们已经成功地实现了  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃的激光运转, 介质长度仅为 1mm 乃至  $200\mu\text{m}$ <sup>[9-11]</sup>. 这充分说明了这种材料的高增益特性. 若以此材料拉制成光纤, 也完全有可能在短长度内达到足够高的增益, 得到高增益的光纤放大器. Myslinski, Jiang 等人对此进行了尝试, 并实现了 3—5dB/cm 的增益<sup>[12-14]</sup>, 但是对高增益磷酸盐光纤的理论研究还比较少见. 本文从理论上研究高浓度  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃光纤放大器的增益特性, 分析  $\text{Er}^{3+}$  浓度、 $\text{Yb}^{3+}$  浓度、抽运光功率、信号光功率和光纤长度对放大器增益的影响, 并与单掺钪光纤放大器进行比较, 得出与实验报道相接近的增益量.

## 2. 理论分析

对  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺系统, 我们可列出如下五能级系统的速率方程<sup>[2, 8, 15, 16]</sup>, 式中忽略高能级自发辐射, 但考虑了高浓度掺杂时上转换效应:

$$\frac{dN_1}{dt} = -(R_{13} + W_{12})N_1 + \left(W_{21} + \frac{1}{\tau_2}\right)N_2 + K_2N_2^2 + K_3N_3^2 - C_{14}N_1N_4 - K_rN_1N_2^{\text{Yb}}, \quad (1)$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60377033, 60025512), 天津市自然科学基金、教育部“新世纪优秀人才支持计划”、教育部留学回国人员科研启动基金和教育部优秀青年教师资助计划资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: fsong@nankai.edu.cn

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - \left( W_{21} + \frac{1}{\tau_2} \right) N_2 + \frac{N_3}{\tau_{32}} - 2K_2N_2^2 + 2C_{14}N_1N_4, \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - \frac{N_3}{\tau_{32}} - 2K_3N_3^2 + \frac{N_4}{\tau_4} + K_rN_1N_2^{Yb}, \quad (3)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = K_2N_2^2 - C_{14}N_1N_4 - \frac{N_4}{\tau_4} + \frac{N_5}{\tau_5}, \quad (4)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = K_3N_3^2 - \frac{N_5}{\tau_5}, \quad (5)$$

$$N_{Er} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5, \quad (6)$$

$$\frac{dN_1^{Yb}}{dt} = -R_{12}^{Yb}N_1^{Yb} + R_{21}^{Yb}N_2^{Yb} + \frac{N_2^{Yb}}{\tau_{21}^{Yb}} + K_rN_1N_2^{Yb}, \quad (7)$$

$$\frac{dN_2^{Yb}}{dt} = R_{12}^{Yb}N_1^{Yb} - R_{21}^{Yb}N_2^{Yb} - \frac{N_2^{Yb}}{\tau_{21}^{Yb}} - K_rN_1N_2^{Yb}, \quad (8)$$

$$N_{Yb} = N_1^{Yb} + N_2^{Yb}, \quad (9)$$

其中  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$  和  $N_{Er}$  分别是  $Er^{3+}$  的  $^4I_{15/2}, ^4I_{13/2}, ^4I_{11/2}, ^4I_{9/2}, ^4F_{7/2}$  能级的粒子数密度和总的粒子数密度 ( $ion/m^3$ )。  $N_1^{Yb}, N_2^{Yb}$  和  $N_{Yb}$  分别是  $Yb^{3+}$  的  $^2F_{7/2}, ^2F_{5/2}$  能级的粒子数和总的  $Yb^{3+}$  数浓度 ( $ion/m^3$ )。  $\tau_n$  是  $Er^{3+}$  相应能级的能级寿命,  $\tau_{21}^{Yb}$  是  $Yb^{3+}$  中  $^2F_{5/2}$  的能级寿命。  $K_2$  和  $K_3$  分别是  $Er^{3+}$  的  $^4I_{13/2}$  和  $^4I_{11/2}$  能级的上转换系数,  $C_{14}$  是交叉弛豫系数。  $K_r$  是从  $Yb^{3+}$  到  $Er^{3+}$  的能量转移系数。  $R_{13}, W_{12}, W_{21}$  和  $R_{12}^{Yb}$ ,  $R_{21}^{Yb}$  表示相应能级的辐射或吸收概率:

$$R_{13} = \frac{\sigma_{13}}{h\nu_p} I_p; W_{12} = \frac{\sigma_{12}}{h\nu_s} I_s; W_{21} = \frac{\sigma_{21}^{Yb}}{h\nu_s} I_s;$$

$$R_{12}^{Yb} = \frac{\sigma_{12}^{Yb}}{h\nu_p} I_p; R_{21}^{Yb} = \frac{\sigma_{21}^{Yb}}{h\nu_p} I_p,$$

其中  $I_p, I_s$  分别是抽运光、信号光的强度。  $\nu_p, \nu_s$  分别是抽运光、信号光频率,  $h$  是普朗克常数。  $Er^{3+}$  对频率为  $\nu_p$  的抽运光的吸收截面是  $\sigma_{13}$ , 对  $\nu_s$  的吸收和发射截面分别是  $\sigma_{12}$  和  $\sigma_{21}$ 。  $Yb^{3+}$  对  $\nu_p$  的吸收和发射截面分别是  $\sigma_{12}^{Yb}$  和  $\sigma_{21}^{Yb}$ 。

假设光信号沿  $z$  方向传播, 忽略光纤损耗, 同向抽运下传输方程为<sup>[2]</sup>

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = - \int_A \varphi_p [ \sigma_{13}N_1 + \sigma_{12}^{Yb}N_1^{Yb} - \sigma_{21}^{Yb}N_2^{Yb} ] r dr d\theta P_p(z), \quad (10)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \int_A \varphi_s [ \sigma_{21}N_2 - \sigma_{12}N_1 ] r dr d\theta P_s(z), \quad (11)$$

下标  $p, s$  分别表示抽运光和信号光,  $A$  表示纤芯有效掺杂面积,  $P_p(z)$  和  $P_s(z)$  分别表示光纤  $z$  处的抽运光和信号光功率。  $\varphi_p(r, \theta)$  和  $\varphi_s(r, \theta)$  分别为抽运光和信号光的归一化光强。在掺杂均匀时, 引入重叠因子  $\Gamma_{p,s}$ <sup>[17]</sup>:

$$\Gamma_{p,s} \equiv \iint_A \varphi_p \varphi_s(r, \theta) r dr d\theta, \quad (12)$$

于是传输方程化为

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = - \Gamma_p ( \sigma_{13}N_1 + \sigma_{12}^{Yb}N_1^{Yb} - \sigma_{21}^{Yb}N_2^{Yb} ) P_p(z), \quad (13)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s ( \sigma_{21}N_2 - \sigma_{12}N_1 ) P_s(z). \quad (14)$$

在稳态情况下, 由于  $Er^{3+}$  中能级  $^4F_{7/2}$  的能级寿命极短, 计算过程中可以忽略  $N_5$ , 由(5)式可知(4)式中的  $N_5/\tau_5$  可以用  $K_3N_3^2$  代替。对速率方程进行横向积分, 整理后得到

$$- \left[ \frac{\Gamma_p P_p(z)}{h\nu_p A} \sigma_{13} + \frac{\Gamma_s P_s(z)}{h\nu_s A} \sigma_{12} \right] N_1 + \left[ \frac{\Gamma_s P_s(z)}{h\nu_s A} \sigma_{21} + \frac{1}{\tau_2} \right] N_2 + K_2N_2^2 + K_3N_3^2 - C_{14}N_1N_4 - K_rN_1N_2^{Yb} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\Gamma_s P_s(z)}{h\nu_s A} \sigma_{12}N_1 - \left[ \frac{\Gamma_s P_s(z)}{h\nu_s A} \sigma_{21} + \frac{1}{\tau_2} \right] N_2 + \frac{N_3}{\tau_{32}} - 2K_2N_2^2 + 2C_{14}N_1N_4 = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\Gamma_p P_p(z)}{h\nu_p A} \sigma_{13}N_1 - \frac{N_3}{\tau_{32}} - 2K_3N_3^2 + \frac{N_4}{\tau_4} + K_rN_1N_2^{Yb} = 0, \quad (17)$$

$$- \frac{\Gamma_p P_p(z)}{h\nu_p A} \sigma_{12}^{Yb}N_1^{Yb} + \frac{\Gamma_p P_p(z)}{h\nu_p A} \sigma_{21}^{Yb}N_2^{Yb} + \frac{N_2^{Yb}}{\tau_{21}^{Yb}} + K_rN_1N_2^{Yb} = 0. \quad (18)$$

由(6)(9)和(15)–(18)式求出  $N_1, N_2, N_3, N_4$  及  $N_1^{Yb}, N_2^{Yb}$ , 然后代入(13)和(14)式, 利用数值法, 即可模拟放大器的增益特性。

### 3. 数值计算和结果讨论

对单模掺钕光纤, 信号光和抽运光都取高斯光束, 如果掺杂离子在纤芯内均匀分布, 可近似认为在

掺杂面内光强均匀分布,重叠因子可以取为常数<sup>[17]</sup>.我们选取抽运光为 980nm、信号光为 1532nm 的高斯光,纤芯直径为  $4\mu\text{m}$ .选择这些参数可以保证在信号光和抽运光波长下光纤是单模的.在本文中,

表 1  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃光纤放大器的数值模拟参数<sup>[12,18]</sup>

$\text{Er}^{3+}$ 信号光吸收、发射截面	$\sigma_{12} = 6.0 \times 10^{-25} \text{m}^2, \sigma_{21} = 9.0 \times 10^{-25} \text{m}^2$
$\text{Er}^{3+}$ 抽运光吸收截面	$\sigma_{13} = 2.58 \times 10^{-25} \text{m}^2$
$\text{Er}^{3+}$ $^4\text{I}_{13/2}, ^4\text{I}_{11/2}, ^4\text{I}_{9/2}$ 能级寿命	$\tau_2 = 7.9 \times 10^{-3} \text{s}, \tau_{32} = 1.0 \times 10^{-9} \text{s}, \tau_4 = 1.0 \times 10^{-9} \text{s}$
$\text{Er}^{3+}$ $^4\text{I}_{13/2}, ^4\text{I}_{11/2}$ 上转换系数	$K_2 = K_3 = 5.0 \times 10^{-24} \text{m}^3/\text{s}$
$\text{Er}^{3+}$ $^4\text{I}_{9/2}$ 与 $^4\text{I}_{15/2}$ 间的交叉弛豫系数	$C_{14} = 3.5 \times 10^{-23} \text{m}^3/\text{s}$
$\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 之间的能量转移系数	$K_{tr} = 4.0 \times 10^{-22} \text{m}^3/\text{s}$
$\text{Yb}^{3+}$ $^2\text{F}_{5/2}$ 能级寿命	$\tau_{21} = 2.0 \times 10^{-3} \text{s}$
$\text{Yb}^{3+}$ 抽运光吸收、发射截面	$\sigma_{12}^{\text{Yb}} = 1 \times 10^{-24} \text{m}^2, \sigma_{21}^{\text{Yb}} = 1 \times 10^{-24} \text{m}^2$

### 3.1. $\text{Er}^{3+}$ 浓度与 $\text{Yb}^{3+}$ 敏化对增益的影响

图 1 为 3.2cm 长光纤增益随掺铒浓度的变化图.在图上同时画出了没有掺  $\text{Yb}^{3+}$  时两种情况下的光纤增益,一种考虑了离子间相互作用,一种没有考虑(此时  $C_{14} = K_2 = K_3 = 0$ ).可以看出,随着  $\text{Er}^{3+}$  浓度的增加,铒铒共掺光纤以及不考虑离子间相互作用的单掺光纤的增益几乎线性增长.而没有共掺  $\text{Yb}^{3+}$ ,且存在离子间相互作用时(实际的掺铒光纤就是如此)增益增加缓慢且很快达到饱和.这说明了  $\text{Yb}^{3+}$  的引入大大地减小了高浓度掺杂下的上转换和交叉弛豫效应带来的负面影响,从而提高了放大器的增益效率.掺杂浓度有一个最佳值,高到一定程度就会出现饱和.因此,为了在较短的长度(厘米量级)内获得较高的增益, $\text{Er}^{3+}$  的高浓度掺杂是必须的,但是也不能太高.

### 3.2. 信号光功率对增益的影响

图 2 是不同  $\text{Yb}^{3+}$  浓度下 2.5cm 长光纤的增益随入射信号光功率变化关系图.从图上可以看出,当信号光功率大于一定的数值(0dBm 左右)时,增益随着信号光功率的增大而减小.这是因为信号光的光子能量与  $\text{Er}^{3+}$  中的  $^4\text{I}_{15/2}$  和  $^4\text{I}_{13/2}$  能级差相等,信号功率越大对  $^4\text{I}_{15/2}$  和  $^4\text{I}_{13/2}$  的影响越强,使两能级的粒子数趋于相等,降低了粒子数反转的程度,光纤增益因此减小.从图上还可以看出,铒铒共掺光纤放大器的信号光增益比没有掺铒的掺铒光纤放大器的增益要大.另一方面,掺铒浓度高的增益比掺铒浓度低的大,但不是很明显.实际上,掺铒率太低, $\text{Yb}^{3+}$  无法

$\Gamma_p$  和  $\Gamma_s$  都取为 0.6.数值计算过程用到的主要参数见表 1. $\text{Yb}^{3+}$  到  $\text{Er}^{3+}$  的能量转移系数  $K_{tr}$  和  $N_{\text{Yb}}$  相关,但当  $N_{\text{Yb}}$  大于  $1.0 \times 10^{27} \text{ion}/\text{m}^3$  时,可假设  $K_{tr}$  是一个常数<sup>[1,18]</sup>.

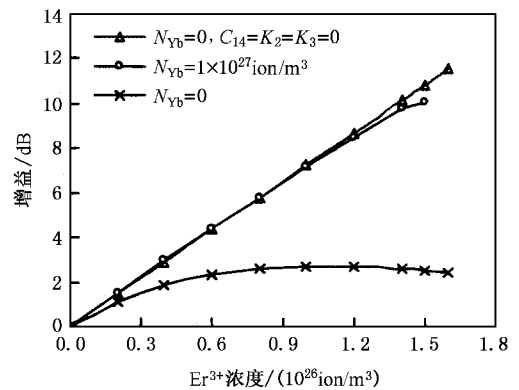


图 1 增益和  $\text{Er}^{3+}$  浓度关系图( $P_{s0} = -30\text{dBm}, P_{p0} = 20\text{dBm}, L = 3.2\text{cm}$ )

阻止  $\text{Er}^{3+}$  产生“团簇”,从  $\text{Yb}^{3+}$  到  $\text{Er}^{3+}$  的能量传递不是很有效.而掺铒率太高,抽运功率被  $\text{Yb}^{3+}$  大量吸收而降低了放大器的效率,而且  $\text{Yb}^{3+}$  在高浓度掺杂下也会像  $\text{Er}^{3+}$  一样产生聚集,从而降低  $\text{Yb}^{3+}$  的敏化作用.所以选择一个合适的掺杂比率  $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ ,以保证能量有效地从  $\text{Yb}^{3+}$  传递到  $\text{Er}^{3+}$ ,且  $\text{Yb}^{3+}$  不会产生聚集是十分重要的.研究表明<sup>[41]</sup>, $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$  一般选择 4 到 20 之间.

### 3.3. 光纤长度对增益的影响

图 3 显示,随着抽运长度的增加,信号增益几乎是线性地增加.到达一定的长度后(称为最佳长度  $L_{\text{max}}$ )增益达到最大.不同的抽运光功率下,最佳长度不同,抽运功率越高,光纤的最佳长度越长.比如,100mW 抽运功率下 3cm 左右长度光纤增益可达到

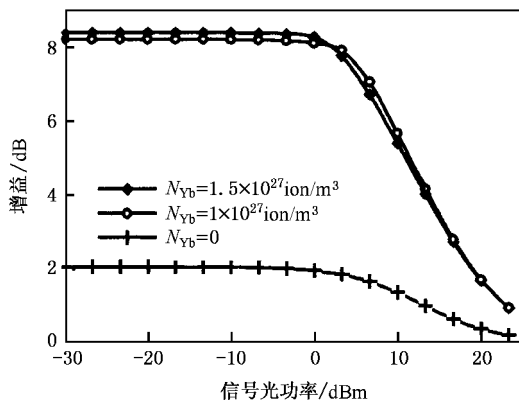


图2 增益和信号光功率关系图(  $N_{Er} = 1.5 \times 10^{26} \text{ ion/m}^3$ ,  $P_{s0} = 20 \text{ dBm}$ ,  $L = 2.5 \text{ cm}$  )

10dB 左右. 光纤长度继续增加, 光纤总增益开始减小. 这是由于抽运光到达  $L_{\max}$  时已经减少到零, 当放大器长度超过  $L_{\max}$ , 信号光只有损耗没有增益, 放大器的增益开始减小. 因此, 应根据抽运光功率来选择合适的光纤长度.

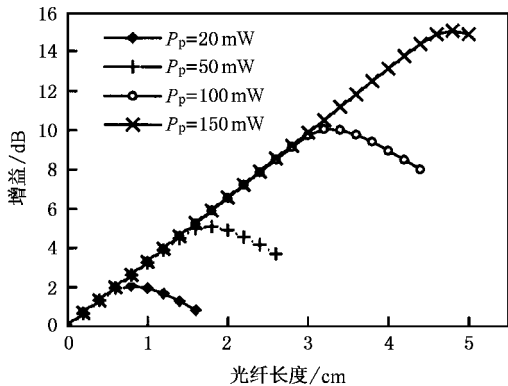


图3 增益和光纤长度关系图(  $N_{Er} = 1.5 \times 10^{26} \text{ ion/m}^3$ ,  $N_{Yb} = 1 \times 10^{27} \text{ ion/m}^3$ ,  $P_{s0} = -30 \text{ dBm}$  )

### 3.4. 不同 $Er^{3+}$ 浓度下, 增益随抽运功率的变化

从图4可以看出, 随着  $Er^{3+}$  掺杂浓度的增加, 抽运阈值功率增大. 这是由于  $Er^{3+}$  浓度越大, 对信号光的吸收越强, 为了使信号光通过光纤后功率保持不变, 则应增加抽运光功率. 另一方面, 对于一定的  $Er^{3+}$  掺杂浓度, 抽运光功率增加到一定程度时, 粒子数反转达到饱和, 增益也达到饱和. 从图上还可以看出, 在一定的抽运光功率下(大于一定数值),  $Er^{3+}$  掺

杂浓度越高, 增益越大. 这是由于  $Er^{3+}$  掺杂浓度提高, 反转的粒子增加, 结果增益增加. 磷酸盐是  $Er^{3+}$  掺杂的良好基质, 高浓度  $Er^{3+}$  掺杂是这一材料的优点. 理论计算表明, 在 20dBm(100mW) 的光抽运下,  $1.2\text{—}1.8 \times 10^{26} \text{ /m}^3$  的  $Er^{3+}$  掺杂浓度是较好的. 随着  $Er^{3+}$  掺杂浓度的提高, 抽运光的阈值功率也相应增加. 因此, 在实际工作中应根据抽运光源的功率来选择  $Er^{3+}$  的掺杂浓度.

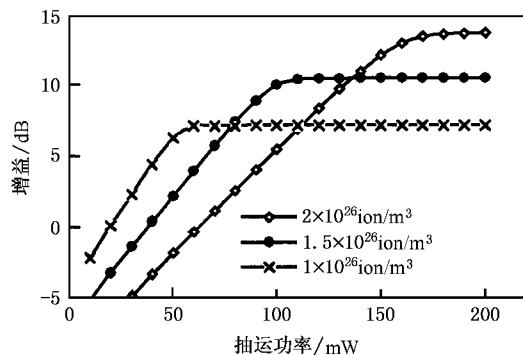


图4 不同  $N_{Er}$  下增益和抽运功率关系图(  $N_{Yb} = 1 \times 10^{27} \text{ ion/m}^3$ ,  $L = 3.2 \text{ cm}$ ,  $P_{s0} = -30 \text{ dBm}$  )

## 4. 结 论

本文提出了一个以五能级速率方程和传输方程为基础的、适用于分析  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃光纤放大器增益特性的模型. 在忽略光纤损耗、离子的自发辐射的情况下, 利用该模型详细讨论了  $Er^{3+}$  浓度、 $Yb^{3+}/Er^{3+}$  的比率、抽运光功率、信号光功率对放大器增益的影响. 由于考虑了上转换和交叉弛豫效应, 该模型适用于分析高浓度下双掺光纤的增益特性. 数值计算表明, 由于  $Yb^{3+}$  的敏化作用可以减少离子间相互作用,  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺磷酸盐光纤放大器的增益要远远高于单掺钕光纤放大器. 在已有的抽运功率下, 选择合适的参数, 比如光纤长度,  $Er^{3+}$  浓度,  $Yb^{3+}$  浓度, 信号功率等, 可以获得最大增益值. 分析表明, 在 980nm 处的 20dBm(100mW) 的抽运功率、-30dBm(1μW) 信号功率、 $1.5 \times 10^{26} \text{ ion/m}^3$   $Er^{3+}$  浓度、 $1.0 \times 10^{27} \text{ ion/m}^3$   $Yb^{3+}$  浓度条件下, 3.2cm 长光纤的增益可达 10dB. 这与文献 [1—3] 中光波导放大器中及文献 [12—14] 中  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺磷酸盐光纤中单位长度的增益量大致相当.

- [ 1 ] Chryssou C E , Di Pasquale F and Pitt C W 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 345
- [ 2 ] Shoostari A , Touam T and Najafi S I 1998 *Opt. Quantum Electron.* **30** 249
- [ 3 ] Yan Y C , Faber A J *et al* 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2922
- [ 4 ] Lester C , Bjarklev A , Rasmussen T and Dinesen P G 1995 *J. Lightwave Technol.* **13** 740
- [ 5 ] Hwang B C , Jiang S , Luo T *et al* 2000 *J. Optical Soc. Amer. B* **5** 833
- [ 6 ] Zhou X and Toratani H 1995 *Phys. Rev. B* **52** 15889
- [ 7 ] Gapontsev V P , Matitsin S M *et al* 1982 *Opt. Laser Technol.* **14** 189
- [ 8 ] Pasquale F D and Federighi M 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **30** 2127
- [ 9 ] Taccheo S , Sorbello G *et al* 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 19
- [ 10 ] Laporta P , Taccheo S , Longhi S and Svelto O 1993 *Opt. Lett.* **18** 1232
- [ 11 ] Meng Fan - zhen , Song Feng *et al* 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1739
- [ 12 ] Myslinski P , Szubert C *et al* 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 973
- [ 13 ] Hu Y , Jiang S , Luo T *et al* 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 657
- [ 14 ] Jiang S , Tao L *et al* 2000 *J. Non-Cryst. Solids* **263** 364
- [ 15 ] Song F *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1233 ( in Chinese ) [ 宋 峰等 2002 物理学报 **51** 1233 ]
- [ 16 ] Song Q *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1624 ( in Chinese ) [ 宋琦等 2005 物理学报 **54** 1624 ]
- [ 17 ] Rany C and Desurvire E 1991 *J. Lightwave Technol.* **9** 271
- [ 18 ] Taccheo S , Sorbello G , Longhi S and Laporta P 1999 *Opt. Quantum Electron.* **31** 249

## Gain characteristics of high-concentration $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped phosphate fiber amplifier<sup>\*</sup>

Song Feng Su Rui-Yuan Fu Qiang Qin Bin Tian Jian-Guo Zhang Guang-Yin

( Photonics Center , Nankai University , Tianjin 300071 , China )

( Received 20 December 2004 ; revised manuscript received 16 May 2005 )

### Abstract

The gain characteristics of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped phosphate fiber amplifier pumped with light of 980nm wavelength are theoretically studied in this paper. With the help of rate equations and the propagation equation of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped phosphate fiber , we analyzed the effects of concentration of erbium and ytterbium ions , pump power , signal power and fiber length on the gain characteristics of the co-doped fiber amplifier. Comparison with singly erbium-doped fiber amplifier was also made. It is shown that the sensitization of  $\text{Yb}^{3+}$  decreases the clustering effect of erbium ions in the fiber and the gain and pump efficiency of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped fiber are apparently higher than that of singly erbium-doped fiber. Numerical results also demonstrate that considerable signal gain of 10dB can be achieved in a 3.2cm-long fiber amplifier with 20dBm( 100mW ) pumping power at 980 nm.

**Keywords** : erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier , rate equation , propagation equation , high concentration

**PACC** : 4281W 0260

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60377033 , 60025512 ) , Natural Science Foundation of Tianjin City , Program for New Century Excellent Talents in University , the Scientific Research Starting Foundation for Returned Overseas Chinese Scholars , Ministry of Education , China and the Excellent Young Teachers Program of MOE , China.