

上转换对 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐 玻璃激光器输出的影响*

吴朝辉 宋峰† 刘淑静 覃斌 苏静 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 6 月 22 日收到修改稿)

研究了激光二极管抽运的 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃激光器中共协上转换 (cooperative upconversion) 和累积能量转移 (cumulative energy transfer) 对激光输出的影响. 通过对速率方程的数值模拟, 定量计算并分析了共协上转换和累积能量转移对激光输出的影响, 发现共协上转换对阈值抽运功率的影响可达到 22% 之多, 实验结果和理论曲线相当符合. 这有助于对 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃激光器进行优化.

关键词: 共协上转换, 累积能量转移, Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃激光器, 数值分析

PACC: 4255B, 4260

1. 引言

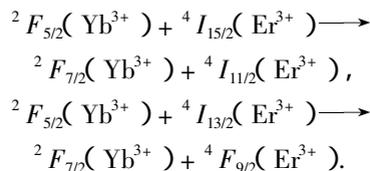
Er^{3+} 具有丰富的能级, 有多种波长的光跃迁. 以 Yb^{3+} 作敏化剂的掺 Er^{3+} 磷酸盐玻璃具有良好的光物理性和光化学性. 以此为激光介质得到的 1.54 μm 波段激光输出, 与其他同波长激光器 (如半导体激光器、灯泵 $\text{Er}:\text{YAG}$ 激光器等) 相比, 具有体积小、效率高、稳定性好、价格低等特点, 可应用于光通信、激光测距等领域^[1].

Er^{3+} 离子能级丰富, 在用波长为 980 nm 左右的光激发时可以产生上转换发光. 在以往的研究中, 由于抽运能量密度较低, 掺杂粒子数密度也不高, 上转换相对较弱, 对激光输出的影响往往可以忽略不计^[2-4]. 然而, 在高掺 Er^{3+} , Yb^{3+} 和高抽运功率密度条件下, 比如用激光二极管端面抽运的 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃激光器中, 上转换发光比较强. 我们实验中采用功率为 1 W 的 980 nm 激光二极管抽运, 肉眼就能看到明显的绿色上转换荧光. 这些上转换发光会消耗激光上能级粒子数, 对激光输出产生影响. 本文中, 我们从速率方程出发, 对上转换在 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃激光器输出时的影响进

行了数值模拟, 并且与实验结果进行了比较、验证.

2. 跃迁过程及理论分析

对 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺的磷酸盐玻璃, 当采用 980 nm 左右的激发光时, Yb^{3+} 基态吸收能量跃迁到 $^2F_{5/2}$ 能级 (图 1 中过程 1), 然后通过能量转移 (ET) 过程将能量传递给 Er^{3+} , 使得在低能态的粒子跃迁到高能态上. 主要的 ET 过程有两个, 即



这两个 ET 过程分别示于图 1 中 ET1 和 ET2, 其中 ET1 使 Er^{3+} 从基态跃迁到 $^4I_{11/2}$, 而大部分粒子将通过无辐射弛豫到激光上能级 $^4I_{13/2}$. 在 $^4I_{13/2}$ 的粒子除了受激辐射回基态发出 1.54 μm 激光外, 还将通过累积能量转移和共协上转换进一步激发到更高的能级上 (图 1 中 ET2 和过程 5)^[5], 从而降低了激光上能级的粒子数, 使得反转粒子数减少, 影响激光的阈值和输出. 在这些更高的上能级上的粒子回到基态时发出绿色和红色及近红外的上转换发光^[2].

* 国家自然科学基金 (批准号: 60377033, 60025512), 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.

† E-mail: fsong@nankai.edu.cn

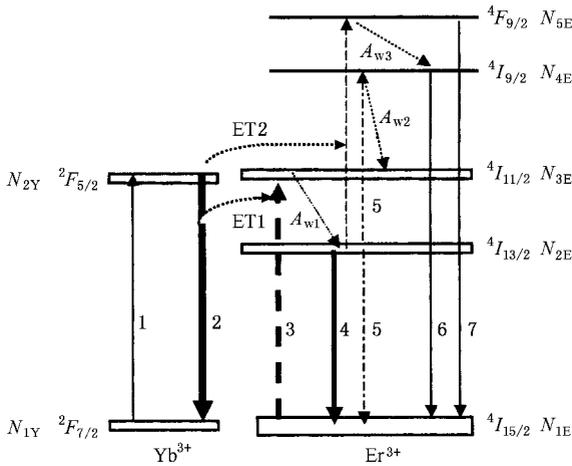


图 1 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃能级及相关跃迁示意图

考虑到以上激发和跃迁过程,我们可以给出下列单模运转时的稳态速率方程^[6]:

$$\frac{dN_{2Y}}{dt} = \sigma_Y N_Y W_p - k_1 N_{2Y} N_{2E} - K_2 N_{2Y} N_{2E} - N_{2Y} \gamma_Y = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dN_{2E}}{dt} = N_{3E} A_{w1} - k_2 N_{2Y} N_{2E} - N \frac{c_0}{n} \sigma_E \phi - N_{2E} \gamma_E - 2CN_{2E}^2 = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dN_{3E}}{dt} = k_1 N_{2Y} N_{1E} - N_{3E} A_{w1} + N_{4E} A_{w2} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{dN_{4E}}{dt} = CN_{2E}^2 + N_{5E} A_{w3} - N_{4E} A_{w2} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dN_{5E}}{dt} = k_2 N_{2Y} N_{2E} - N_{5E} A_{w3} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \sigma_E \frac{c_0}{n} \iiint \mathcal{N}(x, y, z) \mathcal{H}(x, y, z) dV - \frac{\Phi}{\tau_R} \quad (6)$$

$$N_{1E} = \frac{N_E - N}{2}, \quad (7)$$

$$N_{2E} = \frac{N_E + N}{2}. \quad (8)$$

(1)–(8)式中, N_{1Y} , N_{2Y} 分别表示 Yb^{3+} 的 ${}^2F_{7/2}$, ${}^2F_{5/2}$ 能级的粒子数密度, N_Y 为 Yb^{3+} 离子总粒子数密度; N_{1E} , N_{2E} , N_{3E} , N_{4E} , N_{5E} 分别为 Er^{3+} 的 ${}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{13/2}$, ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{9/2}$ 能级的粒子数密度; $N = N_{2E} - N_{1E}$ 为反转粒子数密度, 由于 N_{3E} , N_{4E} 和 N_{5E} 能级粒子数远远小于 N_{1E} , N_{2E} , 所以 $N_E = N_{2E} + N_{1E}$ 近似为 Er^{3+} 离子总粒子数密度; ϕ 为腔内光子数密度, Φ 为腔内光子数; $k_1 N_{2Y} N_{1E}$, $k_2 N_{2Y} N_{2E}$ 分别代表由于能量转移而导致的粒子数密度的变化(参见能量转移过

程 ET1, ET2), k_1 , k_2 分别为两个能量转移的速率系数, 它们与 Er^{3+} 离子浓度无关; CN_{2E}^2 代表共协上转换引起的粒子数密度的变化; γ_Y , γ_E 分别为 ${}^2F_{5/2}$ (Yb^{3+}), ${}^4I_{13/2}$ (Er^{3+}) 能级的自发辐射概率; W_p 为抽运光子流密度; σ_Y 为 Yb^{3+} 的吸收截面; $\tau_R = 2l/c_0(-\ln R + L)$ 为光子在腔内的寿命, l 为谐振腔的有效腔长, L , c_0 分别为腔内往返损耗及光速, R 为输出镜反射率; σ_E 为受激辐射截面; n 为激光介质的折射率; A_{w1} , A_{w2} 和 A_{w3} 分别为 Er^{3+} 的 ${}^4I_{11/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow {}^4I_{13/2}(\text{Er}^{3+})$, ${}^4I_{9/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow {}^4I_{11/2}(\text{Er}^{3+})$ 和 ${}^4F_{9/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow {}^4I_{9/2}(\text{Er}^{3+})$ 弛豫过程的多光子无辐射弛豫速率。

由(1)–(5)式, 可得到

$$W_p = \frac{1}{\sigma_Y N_Y k_1 N_{1E}} (CN_{2E}^2 + N_{2E} \gamma_E + N \frac{c_0}{n} \sigma_E \phi) \times (k_2 N_{2E} + k_1 N_{1E} + \gamma_Y). \quad (9)$$

定义归一化的抽运速率密度函数为

$$w_p(x, y, z) = \frac{W_p}{W},$$

其中 W 为总抽运速率, 对增益介质积分有

$$\iiint w_p(x, y, z) dV = 1.$$

定义归一化的腔内光子数密度为

$$\phi_0(x, y, z) = \frac{\phi(x, y, z)}{\Phi},$$

对整个谐振腔积分有

$$\iiint \phi_0(x, y, z) dV = 1.$$

我们认为抽运光是圆对称高斯光, 同时考虑到纵向抽运下增益介质对抽运光的吸收, 并考虑到介质长度很短, 抽运光斑在介质中基本不变, 且假设介质长度等于有效谐振腔长度(在微片激光器的实际光路中, 这些条件都能够满足)。

根据以上所述, 归一化的抽运速率密度函数可以写成

$$w_p = \frac{2\alpha_p}{\pi\omega_p^2 [1 - \exp(-\alpha_p l)]} \times \exp(-\alpha_p l) \exp(-2r^2/\omega_p^2). \quad (10)$$

假设振荡光为单模运转, 归一化的腔内光子数密度可以写成

$$\phi_0(x, y, z) = \frac{2}{\pi\omega_0^2 l} \exp(-2r^2/\omega_0^2). \quad (11)$$

这里, α_p , h , ω_p 和 ω_0 分别为介质对抽运光的吸收

系数、普朗克常数、抽运光斑束腰半径和振荡光斑束腰半径。

当归一化的抽运光和振荡光的光场分布函数 $w_p(x, y, z)$ 和 $\phi_0(x, y, z)$ 决定后, 就可以代入数据, 计算抽运光与振荡光之间的关系。

对抽运功率 P_{in} 和输出功率 P_{out} 有^[21]

$$P_{in} = Wh\nu_p\alpha_p(1 - e^{-\alpha_p l}), \quad (12)$$

$$P_{out} = \frac{(1 - R)h\nu_e c_0 \Phi}{2ln}. \quad (13)$$

3. 数值模拟及与实验结果之比较

我们将方程 (6)(9) 联立, 并将 (7)(8)(10) — (13) 式代入, 采用 Mathematica 对方程组进行数值模拟, 在计算中用到的主要参数的取值如表 1 所示。图 2 和图 3 是我们通过数值模拟得到的共协上转换及累积能量转移对于 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃微片激光器输出影响的定量分析, 计算过程中我们用共协上转换及累积能量转移对抽运功率的改变量来表征其影响。图 2 给出了共协上转换及累积能量转移对抽运功率的改变量与输出功率的关系。图 3 给出了共协上转换及累积能量转移对抽运功率的改变量与考虑了共协上转换及累积能量转移时抽运功率的比值随着输出功率增加的变化关系。实验中, 我们采用紧贴式平-平腔微片激光器设计, 激光输出实验数据与数值模拟比较见图 4。

表 1 数值模拟及实验中主要参量的取值

参量	取值	备注	参量	取值	备注
σ_Y/cm^2	11.65×10^{-21}		$\omega_p/\mu\text{m}$	75	
σ_E/cm^2	3.34×10^{-21}		$\omega_0/\mu\text{m}$	75	
$h/J \cdot s$	6.63×10^{-34}		$k_1/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	5×10^{-16}	文献 [7]
$c_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3×10^8		$k_2/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	5×10^{-16}	文献 [3, 9]
γ_Y/s	1000	文献 [2]	R	0.99	
γ_E/s	125		α_p/cm^{-1}	23.4	
$C/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	6×10^{-19}	文献 [7]	n	1.521	
l/mm	1		N_E/m^{-3}	9.88×10^{25}	
L	0.004	文献 [8]	N_Y/m^{-3}	2.01×10^{27}	

数值计算中, 设定考虑共协上转换和累积上转换时的抽运功率为 $P_{in}^0(P_{out})$, 未考虑共协上转换时的抽运功率为 $P_{in}^1(P_{out})$, 未考虑累积上转换时的抽运功率为 $P_{in}^2(P_{out})$, 共协上转换和累积上转换均未

考虑时的抽运功率为 $P_{in}^3(P_{out})$ 。如图 2 所示, 随着激光输出功率 P_{out} 的增加, 共协上转换对抽运功率的影响 $P_{in}^0 - P_{in}^1$ 随之增大, 但是共协上转换对抽运功率的影响率 $(P_{in}^0 - P_{in}^1)/P_{in}^0$ 随着 P_{out} 的增加而减小 (见图 3)。我们可以看到, 激光输出功率较小时, 共协上转换对抽运功率的影响率变化尤其显著, 特别是对阈值抽运功率 ($P_{out} = 0$ 时) 的影响可以达到 22% 之多。所以, 对高掺杂、高抽运能量密度的二极管端面抽运 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃激光器, 其共协上转换的影响是不可忽略的。

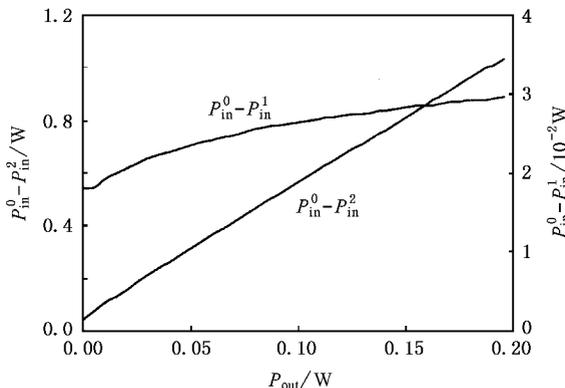


图 2 共协上转换及累积上转换对抽运功率的影响与激光输出功率的关系

由累积能量转移对抽运功率的影响 $P_{in}^0 - P_{in}^2$ 与输出功率 P_{out} 的关系 (见图 2), 累积能量转移对抽运功率的影响率 $(P_{in}^0 - P_{in}^2)/P_{in}^0$ 与输出功率的关系 (见图 3) 可以看出, 累积能量转移对抽运功率的影响 $P_{in}^0 - P_{in}^2$ 及其影响率 $(P_{in}^0 - P_{in}^2)/P_{in}^0$ 随着输出功率增加而增大。在阈值抽运功率附近, 累积能量转移对抽运功率的影响率变化比较显著, 随着输出功率的增

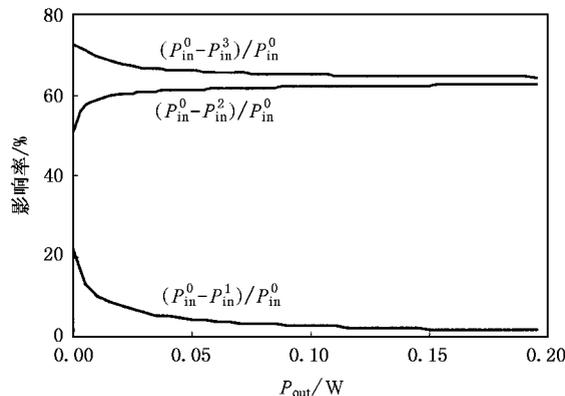


图 3 共协上转换与累积能量转移对抽运功率的影响率与激光输出功率的关系

加而变得比较平缓. 共协上转换和累积能量转移对抽运功率的共同影响率($P_{in}^0 - P_{in}^3$) γ P_{in}^0 随着激光输出功率的增加而有所下降.

由图 4 可以看出: 考虑了共协上转换及累积能量转移时, 激光输入-输出功率($P_{in}^0 - P_{out}$) 曲线与实验数据相当符合. 不考虑共协上转换的影响时, 理论模拟激光斜率效率与实验基本一致, 但是理论阈值抽运功率低于实验值(见 $P_{in}^1 - P_{out}$ 曲线). 当共协上转换与累积能量转移的影响均不考虑时, 实验数据与理论曲线有较大出入, 实验阈值抽运功率大大高于理论阈值, 且实验斜率效率远低于理论模拟曲线, 见 ($P_{in}^3 - P_{out}$) 曲线.

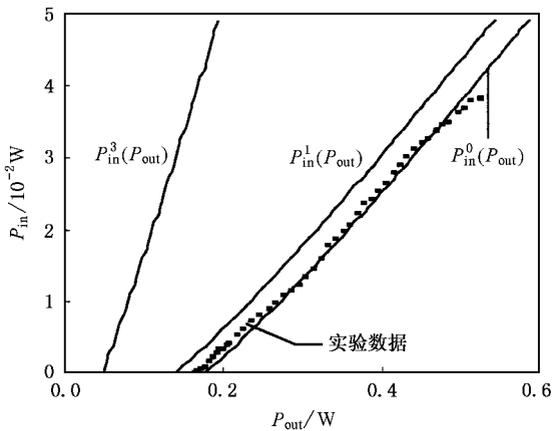


图 4 理论模拟输入-输出曲线与实验数据的比较

4. 总 结

在以往的理论分析中, 常常认为共协上转换的

影响可以忽略^[2-4]. 然而, 对于高掺 Er^{3+} , Yb^{3+} 和高抽运能量密度, 特别是二极管端面抽运的 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃激光器, 上转换作用尤其明显. 为此我们进行了数值模拟, 发现共协上转换对激光器的阈值影响可达到 22% 之多, 并对累积能量转移随着激光输出功率增加对抽运功率的影响进行了数值模拟. 将理论计算与实验数据相比较之后, 发现考虑了共协上转换和累积能量转移时的激光输入-输出曲线与实验相当符合, 进一步验证了我们的结论.

共协上转换及累积能量转移减小了激光上能级粒子数密度, 而且被共协上转换及累积能量转移吸收的抽运光能量通过高能级的多光子无辐射弛豫到激光上能级, 造成了激光介质中热沉积的增加. 这既降低了激光的效率, 又加剧了热透镜效应^[10]. 上转换对热透镜效应的影响不仅表现在产生更多的热量上, 而且由于上转换概率的非线性, 在抽运光的光束截面内, 上转换加剧了热不均匀性, 使得热透镜效应增大^[11].

为了提高激光输出的效率, 减小上转换效应的不利影响, 我们通常可以采取两种方法^[12]: 一是降低激光晶体的掺杂浓度, 然而掺杂浓度的降低势必会降低激光输出效率^[2]; 二是减小谐振腔腔内损耗, 当腔内损耗减小时激光阈值降低, 激光上能级粒子数减少, 从而上转换概率变小, 反之, 例如在调 Q 运转的激光中, 上转换效应的影响尤其强烈^[13].

此外, 通过数值模拟计算, 我们可以通过改变激光器的运行参数, 选择最优化参量以降低上转换对激光输出的不利影响. 这是我们下一步将要进行的工作.

[1] Meng F Z, Song F, Zhang C B *et al* 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1739
 [2] Song F, Meng F Z, Ding X *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1233 (in Chinese) [宋峰, 孟凡臻, 丁欣等 2002 物理学报 **51** 1233]
 [3] Gapontsev V P, Matitsin S M, Isineev A A *et al* 1982 *Opt. Laser Technol.* **14** 189
 [4] Tanguy E, Larat C, Pocholle J P 1998 *Opt. Commun.* **153** 172
 [5] Hwang B C, Jiang S B, Luo T *et al* 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 833
 [6] Zhou B K, Gao Y Z, Chen J H *et al* 1995 *Principle of Lasers* (Beijing: National Defence Industry Press) pp112—114 (in Chinese) [周炳钨、高以智、陈家骅等 1995 激光原理(北京: 国防工业出版社)第 112—114 页]

[7] Taccheo S, Sorbello G, Longhi S *et al* 1999 *Opt. Quantum Electron.* **31** 249
 [8] Karlsson G, Pasiskevicius V, Laurell F *et al* 2000 *Appl. Opt.* **39** 6188
 [9] Laporta P, Longhi S, Taccheo S *et al* 1993 *Opt. Commun.* **100** 311
 [10] Blows J L, Omatsu T, Dawes J *et al* 1998 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **10** 177
 [11] Feng Y, Song F, Zhao L J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 335 (in Chinese) [冯衍、宋峰、赵丽娟等 2001 物理学报 **50** 335]
 [12] Yang L, Huang W L, Qiu J L *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2471 (in Chinese) [杨林、黄维玲、丘军林等 2003 物理学报 **52** 2471]
 [13] Lan Y P, Chen Y F, Wang S C 2000 *Appl. Phys. B* **71** 27

Influence of upconversion effect on Er^{3+} , Yb^{3+} co-doped phosphate glass lasers *

Wu Zhao-Hui Song Feng[†] Liu Shu-Jing Qin Bin Su Jing Tian Jian-Guo Zhang Guang-Yin

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

(Received 20 December 2004 ; revised manuscript received 22 June 2005)

Abstract

An analytical model of cw longitudinally diode-pumped Er^{3+} , Yb^{3+} co-doped phosphate glass lasers that includes the influence of cooperative upconversion and cumulative energy transfer effects has been developed. The results of general output modeling were applied to a laser with Gaussian beams , and numerical calculation has been made to study the influence of cooperative upconversion and cumulative energy transfer effects , where the dependence of laser output on the influence of cooperative upconversion and cumulative energy transfer effects was investigated in particular. Especially , we find that the influence of cooperative upconversion on the threshold can be up to 22% . The model is in good agreement with measurements of the laser in a plane-plane cavity. Further numerical analysis will be developed. Our results are useful for optimizing the parameters of this kind of lasers.

Keywords : cooperative upconversion , cumulative energy transfer effects , Er^{3+} , Yb^{3+} co-doped phosphate glass lasers , numerical analysis

PACC : 4255B , 4260

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60377033 ,60025512) , the Program for the New Century Excellent Talents in University of the Ministry of Education of China , the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars from the Ministry of Education of China , and the Excellent Young Teachers Program of the Ministry of Education of China.

[†] E-mail : fsong@nankai.edu.cn