

# LD 抽运 $\text{Er}^{3+}$ , $\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光器的理论分析和数值计算\*

吴朝晖 宋 峰† 刘淑静 蔡 虹 苏 静 田建国 张光寅

(南开大学光子学中心, 天津 300071)

(弱光非线性光子学材料先进技术及制备教育部重点实验室 天津 300457)

(2005 年 11 月 14 日收到 2006 年 1 月 19 日收到修改稿)

研究了以  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  晶体为饱和吸收体的 LD 抽运  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃激光器. 针对双掺离子之间的能量传递和  $\text{Er}^{3+}$  的多种跃迁过程, 结合  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  晶体中  $\text{Co}^{2+}$  离子的饱和吸收特性, 给出了详尽的速率方程, 在其基础上进行了数值分析, 分析了输出镜透过率、激光介质长度、谐振腔长度、腔内往返损耗、饱和吸收体长度对激光阈值、峰值功率、单脉冲能量以及脉冲宽度的影响.

关键词:  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  晶体, 被动调 Q,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃, 速率方程

PACC: 4255B, 4260, 0260

## 1. 引 言

激光二极管抽运的  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光器能够产生纳秒量级宽度的激光脉冲, 而且由于其热性能较好, 可掺杂激活粒子浓度高、单位增益大, 很短的长度就可以得到较大的增益 (如采用 1mm 即可以得到上百 mW 的连续激光或 2kW 以上的脉冲激光输出), 因而体积小, 价格低, 可望广泛应用于激光测距、光传感乃至光通信中, 因而引起了人们的浓厚兴趣. 用做被动调 Q 的元件有掺 Er, U, Co 等的晶体、半导体饱和吸收镜等材料, 目前国外比较成熟的被动调 Q 钕玻璃激光器采用的多是  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  晶体. 迄今, 人们已经用这种饱和吸收晶体获得了脉冲宽度 2.3ns, 峰值功率 2kW 以上的调 Q 激光脉冲<sup>[1-3]</sup>. 我们也已经成功地实现了脉冲宽度为 7.4ns, 峰值功率为 2.2kW 的激光输出<sup>[4, 5]</sup>.

$\text{Er}^{3+}$  离子能级丰富, 再掺入 Yb 离子以后, 可以使抽运光更好地被吸收转换, 但同时也会增加一些新的能量转移过程. 国外有文献对闪光灯抽运的单掺  $\text{Er}^{3+}$  被动调 Q 激光器的运转特性作了一些理论分析<sup>[6]</sup>, 但是未曾见到对 LD 抽运的双掺  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  被

动调 Q 激光器的理论模型. 为了更好地了解这种激光器的被动调 Q 特性, 选择合理参数, 我们在全面、仔细地分析了 Er, Yb 共掺磷酸盐玻璃各能级之间的能量转移、跃迁等过程的基础上, 结合  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  晶体的能级跃迁, 根据速率方程理论建立了 1.54 $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光器的速率方程模型, 并通过计算机求解给出数值解, 得出腔内往返损耗、激光介质长度、饱和吸收体长度、输出镜透过率、谐振腔长度对激光阈值、峰值功率、单脉冲能量以及脉冲宽度的影响.

## 2. 理论模型及速率方程

对  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  共掺的磷酸盐玻璃, 其能级跃迁过程如图 1 所示<sup>[6]</sup>. 当采用 980nm 左右的激发光时,  $\text{Yb}^{3+}$  基态吸收能量跃迁到  $^2F_{5/2}$  能级 (图 1 中过程 1), 而后通过能量转移过程 (ET) 将能量传递给  $\text{Er}^{3+}$ , 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:  $^2F_{5/2}(\text{Yb}^{3+}) + ^4I_{15/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow ^2F_{7/2}(\text{Yb}^{3+}) + ^4I_{11/2}(\text{Er}^{3+})$  (ET1),  $^2F_{5/2}(\text{Yb}^{3+}) + ^4I_{13/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow ^2F_{7/2}(\text{Yb}^{3+}) + ^4F_{9/2}(\text{Er}^{3+})$  (ET2).  $A_{w1}$ ,  $A_{w2}$  和  $A_{w3}$  分别代表  $\text{Er}^{3+}$  的 ( $^4I_{11/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow ^4I_{13/2}(\text{Er}^{3+})$ ) ( $^4I_{9/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow$

\* 教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: 560-9031-2) 及优秀青年教师资助计划 (天津市自然科学基金 (批准号: 05YFGPX05100) 及教育部留学回国人员基金 (批准号: 452023160) 资助的课题.

† E-mail: fsong@nankai.edu.cn

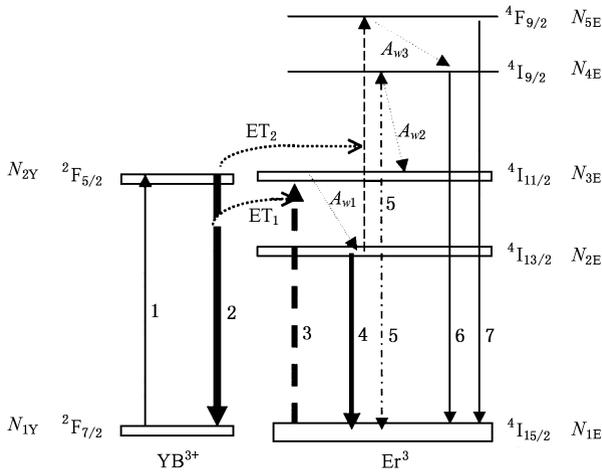


图 1 Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> 共掺磷酸盐玻璃能级及相关跃迁示意图

<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>(Er<sup>3+</sup>)和(<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>(Er<sup>3+</sup>)→<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>(Er<sup>3+</sup>))多光子无辐射弛豫过程. 在激光上能级<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>的粒子除了受激辐射回基态发出 1.54μm 激光以外, 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)<sup>[7,8]</sup>.

Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体(MALO)是一种便宜而且在自然界容易找到的共激活晶状材料. Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 有一个正尖晶石结构, 其中 Co<sup>2+</sup> 取代了四面配位的 Mg<sup>2+</sup> 离子, 尖晶体中的 Co<sup>2+</sup> 在 1.54μm 激光波段左右有很宽的吸收带, 有着足够大的吸收截面(约 3 × 10<sup>-19</sup> cm<sup>2</sup>), 它还有着充足的激发态寿命(达 350 ± 40ns)和非常小的激发态吸收损耗<sup>[19]</sup>, 这意味着它可以作为 1.54μm 激光器的理想饱和吸收体. 用它作为饱和吸收体所获得的激光效率可以与主动调 Q 的激光器相媲美.

考虑到 Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> 共掺的磷酸盐玻璃以及饱和吸收体的能级激发和跃迁过程<sup>[7,8]</sup>, 可以得出调 Q 运转时的速率方程组

$$\frac{dN_{2Y}}{dt} = \sigma_y N_Y F - k_1 N_{2Y} N_{1E} - k_2 N_{2Y} N_{2E} - N_{2Y} \gamma_y, \quad (1)$$

$$\frac{dN_{2E}}{dt} = k_1 N_{2Y} N_{1E} - N \frac{c_0}{n_1} \sigma_e \phi - N_{2E} \gamma_e - CN_{2E}^2, \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{\tau_R} \left[ 2\sigma_e (2N_{2E} - N_E) l_1 - 2\sigma_{gsa} N_{s1} l_2 - 2\sigma_{esa} (N_{s0} - N_{s1}) l_2 - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - \delta \right], \quad (3)$$

$$\frac{dN_{s1}}{dt} = -\sigma_{gsa} \frac{c_0}{n_2} \phi N_{s1} + \frac{N_{s0} - N_{s1}}{\tau_a}. \quad (4)$$

(1)–(4) 式中,  $N_{2Y}$  为 Yb<sup>3+</sup> 的 <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>, <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 能级的粒子数密度,  $N_Y$  为 Yb<sup>3+</sup> 离子总粒子数密度,  $N_{1E}$ ,  $N_{2E}$  分别为 Er<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级的粒子数密度,  $N = N_{2E} - N_{1E}$  为反转粒子数密度,  $N_E = N_{2E} + N_{1E}$  近似为 Er<sup>3+</sup> 离子总粒子数密度;  $\phi$  为腔内光子数密度;  $k_1 N_{2Y} N_{1E}$ ,  $k_2 N_{2Y} N_{2E}$  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<sup>3+</sup> 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;  $\gamma_y, \gamma_e$  分别为 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>(Yb<sup>3+</sup>), <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>(Er<sup>3+</sup>) 能级的自发辐射概率;  $F$  为抽运光子流密度;

$\sigma_y$  为 Yb<sup>3+</sup> 的吸收截面;  $\tau_R = \frac{2l}{c_0 \left[ \ln\left(\frac{1}{R}\right) + \delta \right]}$  为光子

在腔内的寿命,  $\delta, c_0$  分别为腔内往返损耗和真空中的光速,  $R$  为输出镜反射率,  $l = (n_1 - 1)l_1 + (n_2 - 1)l_2 + L$  为谐振腔的有效腔长, 其中  $n_1$  为 Er 玻璃折射率,  $n_2$  为饱和吸收体折射率,  $l_1$  为 Er 玻璃长度,  $l_2$  为饱和吸收体长度,  $L$  为谐振腔的物理腔长;  $\sigma_e$  为 Er<sup>3+</sup> 受激辐射截面,  $\sigma_{gsa}$  和  $\sigma_{esa}$  分别为 Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体的基态和激发态吸收截面;  $N_{s1}$  为饱和吸收体的基态粒子数密度,  $N_{s0}$  为饱和吸收体的粒子数总密度,  $\tau_a$  为饱和吸收体激发态寿命.

当脉冲开始发生时 (1)–(3) 式为零, 并利用  $N_{s1}(t=0) = N_{s0}, \phi = 0$ , 我们得到阈值抽运光子流密度  $F_{th}$ . 考虑到是端面抽运, 因此阈值抽运功率

$$P_{pump}^{th} = \frac{h\nu_p S \alpha l_1 F_{th}}{1 - \exp(-\alpha l_1)}, \quad (5)$$

其中  $h\nu_p$  为抽运光子能量,  $\alpha = \sigma_y N_y$  为增益介质对抽运光的吸收系数,  $S = \pi\omega_p^2$  为平均抽运光斑面积,  $\omega_p$  为平均抽运光斑束腰.

对单脉冲输出功率  $P_{out}(t)$  峰值功率  $P_{max}$ 、输出脉冲能量  $E$  和脉冲宽度  $W$  有<sup>[9]</sup>

$$P_{out}(t) = \frac{h\nu_e c_0 A \ln\left(\frac{1}{R}\right)}{2} \phi(t), \quad (6)$$

其中  $h\nu_e$  为激光光子能量,  $A = \pi\omega_e^2$  为激光光斑面积,  $\omega_e$  为激光光斑束腰.

当  $\phi$  取最大值  $\phi_{max}$  时, 得到峰值功率

$$P_{max} = \frac{h\nu_e c_0 A \ln\left(\frac{1}{R}\right)}{2} \phi_{max}, \quad (7)$$

$$E = \int_0^{\infty} P_{\text{out}}(t) dt, \quad (8)$$

$$W = \frac{E}{P_{\text{max}}}. \quad (9)$$

振荡光在腔内往返一次的总增益和总损耗为  $\text{Gain} = 2\sigma_e N l_1$ ,  $\text{Loss} = 2\sigma_{\text{gsa}} N_{s1} l_2 + 2\sigma_{\text{esa}} (N_{s0} - N_{s1}) l_2 + \ln\left(\frac{1}{R}\right) + \delta$ , 利用龙格-库塔(Runge-Kutta)方法对上述被动调 Q 激光器的速率方程进行数值计算, 可以得到总增益、总损耗及输出功率  $P_{\text{out}}(t)$  在单脉冲形成过程中的变化情况. 如图 2 所示, 当总增益大于总损耗, 输出功率随着腔内光子数的增加而逐渐增加, 当腔内光子数达到一定值时饱和吸收体开始饱和, 总损耗减小, 输出功率开始迅速增加, 总增益随之减小, 到总增益等于总损耗时输出功率达到峰值功率. 此后总增益小于总损耗, 输出功率由于损耗而迅速递减直至振荡停止.

在图 2 的单脉冲形成过程中, 当  $P_{\text{out}}(t)$  取极大值时可得到峰值功率  $P_{\text{max}}$ , 由(8)式对输出功率积分

可以得到单脉冲输出能量  $E$ , 进而由(9)式可得到脉冲宽度  $W$ .

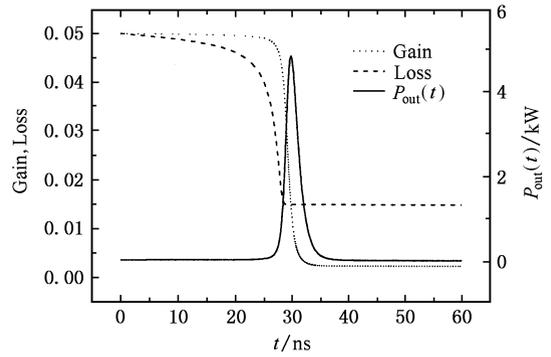


图 2 脉冲形成中总增益、总损耗及输出功率随时间的变化

### 3. 数值计算及结果

我们用 Matlab 对方程组进行数值模拟, 在计算中用到的主要参数取自文献 [1], 其他的见标注, 如表 1 所示.

表 1 数值模拟及实验中主要参量的取值

参量	取值	参考文献	参量	取值	参考文献
$\sigma_y/\text{cm}^2$	$11.65 \times 10^{-21}$		$\omega_p/\mu\text{m}$	50	
$\sigma_e/\text{cm}^2$	$8 \times 10^{-21}$		$\omega_c/\mu\text{m}$	50	
$\gamma_y/\text{s}$	1000	[7]	$\sigma_{\text{gsa}}/\text{cm}^{-1}$	$3.5 \times 10^{-19}$	
$\gamma_e/\text{s}$	125		$\sigma_{\text{esa}}/\text{cm}^{-1}$	$1 \times 10^{-20}$	
$N_E/\text{m}^3$	$9.88 \times 10^{25}$		$\tau_a/\text{s}$	$3.4 \times 10^{-7}$	
$N_Y/\text{m}^3$	$2.01 \times 10^{27}$		$N_{s0}/\text{m}^3$	$1.29 \times 10^{24}$	
$\alpha/\text{cm}^{-1}$	23.4		$n_1$	1.5	
$C/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$6 \times 10^{-19}$	[11]	$n_2$	1.75	
$k_1/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$5 \times 10^{-16}$	[11]	$h/\text{J} \cdot \text{s}$	$6.63 \times 10^{-34}$	
$k_2/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$5 \times 10^{-16}$	[12, 13]	$c_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$3 \times 10^8$	

经计算, 可得到以下一些重要结果:

#### 3.1. 输出镜存在最佳透过率

在计算输出镜透过率的影响时我们取了如下参数:  $l_1 = 1\text{mm}$ ,  $l_2 = 0.4\text{mm}$ ,  $L = l_1 + l_2$ ,  $\delta = 0.004$ . 由图 3(a)所示, 输出镜的透过率越大, 损耗越大, 阈值抽

运功率也随之迅速增加, 而激光输出脉冲能量的增加随着透过率的增大而逐渐饱和; 由图 3(b)所示, 峰值功率和脉冲宽度对于不同的透过率分别存在一个极大值和极小值, 在本图计算所采用的参数下, 峰值功率取最大对应的最佳透过率在 6% 左右, 脉冲宽度取最小的最佳透过率在 5% 左右.

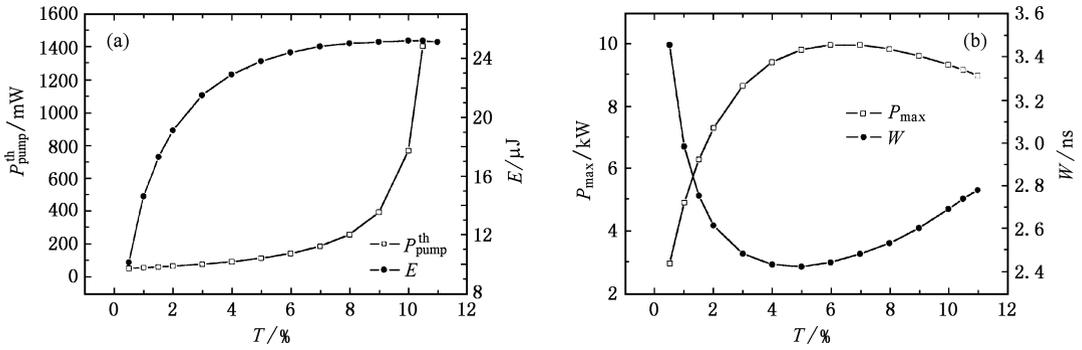


图 3 输出镜透过率对阈值抽运功率、脉冲能量、峰值功率和脉冲宽度的影响

### 3.2. $Er^{3+}$ 玻璃长度的影响

在计算  $Er^{3+}$  玻璃长度的影响时我们取了如下参数： $l_2 = 0.4\text{mm}$ ， $L = 3\text{mm}$ ， $\delta = 0.004$ 。由图 4(a)可以看出，介质长度较小时，阈值抽运功率相当高，随

着长度的增加，阈值急剧下降，并在 1mm 左右达到一个最小值，此后又开始缓慢的增加；在假设腔内往返损耗不变的前提下，脉冲能量为恒定值。由图 4(b)可见，峰值功率随着介质长度增加而降低，脉冲宽度则随之递增。

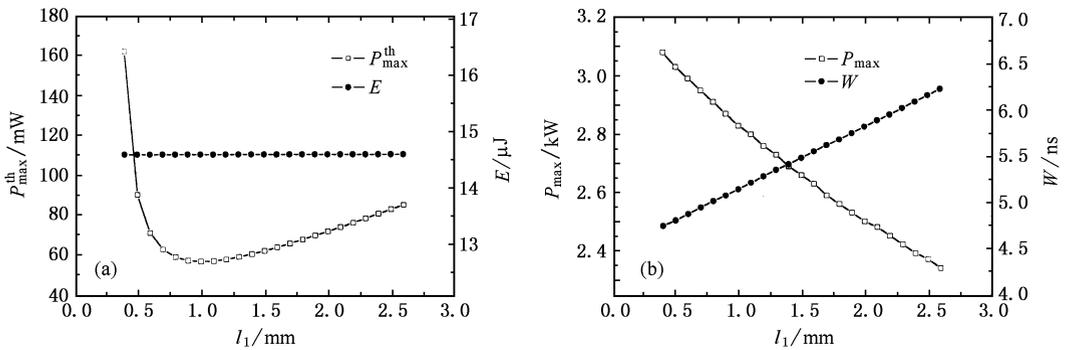


图 4  $Er^{3+}$  玻璃长度对阈值抽运功率、脉冲能量、峰值功率和脉冲宽度的影响

### 3.3. 谐振腔长度的影响

计算中我们取  $l_1 = 1\text{mm}$ ， $l_2 = 0.4\text{mm}$ ， $\delta = 0.004$ 。我们发现，如图 5(a)所示，若腔长的改变过程中假

设腔内往返损耗不变，则腔长对阈值抽运功率及脉冲能量均没有影响；但是，腔长的变化改变了腔内光子寿命，如图 5(b)所示，随着腔长的增长，峰值功率迅速变低，脉冲宽度近似线性增加。

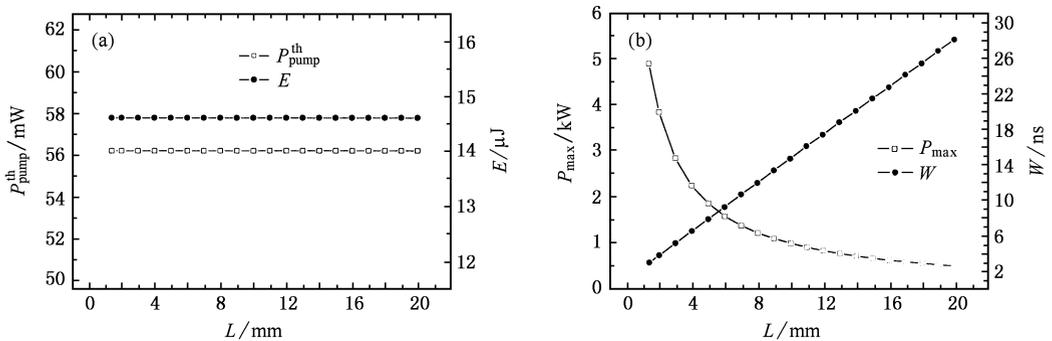


图 5 谐振腔长度对阈值抽运功率、脉冲能量、峰值功率和脉冲宽度的影响

### 3.4. 饱和吸收体长度的影响

改变饱和吸收体的长度  $l_2$  相当于改变饱和吸收体的初始透过率. 计算中我们取  $l_1 = 1\text{mm}$ ,  $L =$

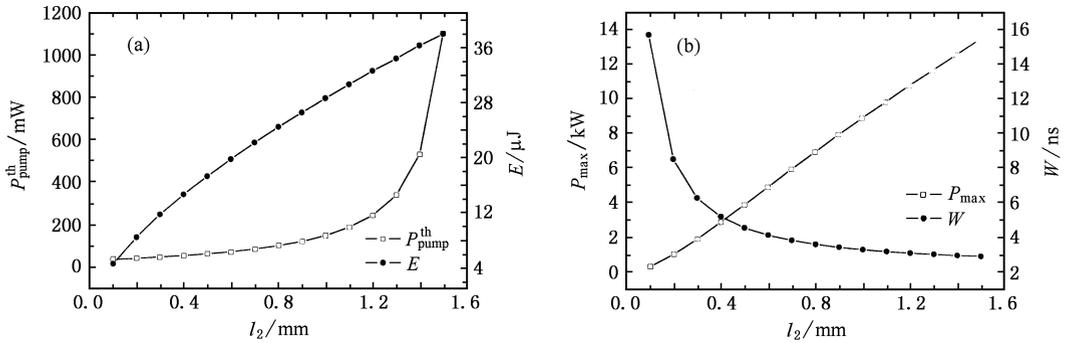


图6 饱和吸收体长度对阈值抽运功率、脉冲能量、峰值功率和脉冲宽度的影响

## 4. 结 论

参考  $\text{Er}^{3+}$  玻璃发光文献及被动调 Q 激光实验文献中的数据, 我们提出了适用于  $1.54\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光器的速率方程模型. 通过数值计算, 得出了腔内往返损耗、激光介质长度、饱和吸收体长度、输出镜透过率、谐振腔长度对激光阈值、峰值功率、单脉冲能量以及脉冲宽度的影响, 从而可以根据实际需要选择合适参量设计此类被动调 Q 激光器. 经过数值计算, 我们可以得出以下主要结论:

$3\text{mm}$ ,  $\delta = 0.004$ . 如图 6(a) 所示, 很明显,  $l_2$  变长导致饱和吸收体损耗增加, 阈值抽运功率增加, 脉冲能量亦随之增大, 但是, 由图 6(b) 可见, 饱和吸收体长度越长, 峰值功率越大, 脉冲宽度越小.

1. 输出镜存在最佳透过率, 使得峰值功率最高或脉冲宽度最窄, 两个最佳透过率略有不同.

2.  $\text{Er}^{3+}$  玻璃长度存在一个最佳值使得阈值抽运功率最小.

3. 谐振腔长度对峰值功率和脉宽影响很大, 为了得到最高的峰值功率和最窄的脉冲, 必须尽可能地压缩腔长.

4. 增加饱和吸收体长度能够有效地提高脉冲能量和峰值功率, 并压缩脉宽, 但是会急剧增加阈值抽运功率. 而且, 由于吸收体长度增加, 同时会导致腔内损耗的增加, 又会改变激光输出特性. 因此, 必须选择一个合适值来满足实际要求.

[1] Karlsson G, Pasiskevicius V, Laurell F, Tellefsen J A, Denker B, Galagan B I, Osiko V V, Sverchkov S 2000 *Appl. Opt.* **39** 6188  
 [2] Karlsson G, Laurell F, Tellefsen J, Denker B, Galagan B, Osiko V, Sverchkov S 2002 *Appl. Phys.* **B 75** 41  
 [3] Denker B, Galagan B, Osiko V V 2002 *Laser Physics* **12** 697  
 [4] Song F, Wu Z H, Meng F Z, Zhang C B, Tian J G, Zhang G Y 2004 *Chines J. Lasers* **31** 668 (in Chinese) [宋峰、吴朝晖、孟凡臻、张潮波、田建国、张光寅 2004 中国激光 **31** 668]  
 [5] Song F, Wu Z H, Liu S J, Cai H, Tian J G, Zhang G Y 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1195  
 [6] Kalashnikov V L, Shcherbitsky V G, Kuleshov N V, Girard S, Moncorge R 2002 *Appl. Phys.* **B 75** 35  
 [7] Song F, Meng F Z, Ding X, Zhang C B, Yang J, Zhang G Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1233 (in Chinese) [宋峰、孟凡臻、丁欣、

张潮波、杨嘉、张光寅 2002 物理学报 **51** 1233]  
 [8] Wu Z H, Song F, Liu S J, Qin B, Su J, Tian J G, Zhang G Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5637 (in Chinese) [吴朝晖、宋峰、刘淑静、覃斌、苏静、田建国、张光寅 2005 物理学报 **54** 5637]  
 [9] Wu R, Myers M, Denker B 2000 *OSA TOPS Adv. Solid State Lasers* **34** 254  
 [10] Degnan J J 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **25** 214  
 [11] Gapontsev V P, Matitsin S M, Isineev A A, Kravchenko V B 1982 *Opt. Laser Technol.* **14** 189  
 [12] Taccheo S, Sorbello G, Longhi S, Laporta P 1999 *Opt. Quantum Electron.* **31** 249  
 [13] Laporta P, Longhi S, Taccheo S, Svelto O 1993 *Opt. Commun.* **100** 311

# Theoretical analysis and numerical calculation of LD pumped passively Q-switched $\text{Er}^{3+}$ , $\text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphate glass lasers<sup>\*</sup>

Wu Zhao-Hui Song Feng<sup>†</sup> Liu Shu-Jing Cai Hong

Su Jing Tian Jian-Guo Zhang Guang-Yin

<sup>1</sup> *Photonics Center, Nankai University, Tianjin 300071, China*

<sup>2</sup> *Key Laboratory of Advanced Technique and Fabrication for Weak-Light Nonlinear Photonics Materials,*

*Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300457, China*

(Received 14 November 2005; revised manuscript received 19 January 2006)

## Abstract

An analytical model of passively Q-switched diode-pumped Er-Yb :glass laser with a  $\text{Co}^{2+}$  : $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  plate as a saturable absorber has been developed. Considering energy transfer between  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$ , upconversion luminescence and the transition processes of the  $\text{Co}^{2+}$  in the  $\text{Co}^{2+}$  : $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  plate, rate equations of the passively Q-switched laser are presented and useful conclusions are drawn by numerical analysis in the paper. The model is very useful for optimizing these kind of lasers.

**Keywords** :  $\text{Co}^{2+}$  : $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  plate, passively Q-switched,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  co-doped phosphate glass, rate equation

**PACC** : 4255B, 4260, 0260

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Tianjin City (Grant No. 05YFGPGX05100), Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. 560-9031-2), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars (Grant No. b2a2023160), State Education Ministry and the Excellent Young Teachers Program of MOE, P. R. C.

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