

文章编号 : 0258-7025(2001)06-0481-03

# 磷酸盐钕玻璃激光器中被动调 Q 的研究 \*

冯国英 刘丹平 欧群飞 蔡邦维

(四川大学光电科学技术系 成都 610064)

**提要** 建立了包含磷酸盐钕玻璃激光增益介质, Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 晶体和谐振腔参数的速率方程组, 计算得到调 Q 脉冲波形。计算了脉冲三通放大波形。实验证实了计算结果的正确性。

**关键词** Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 晶体, 三通放大, 磷酸盐钕玻璃激光放大器

中图分类号 TN 248.1+2 文献标识码 A

## Study on Passive Q-switch in Nd: phosphate Glass Slab Laser

FENG Guo-ying LIU Dan-ping OU Qun-fei CAI Bang-wei

(Department of Opto-electronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract** The rate equations including Nd: phosphate glass medium gain, Cr<sup>4+</sup>:YAG passive Q-switch slow saturation absorber and parameter of resonator have been built up. The calculated output pulse profiles from the Q-switched oscillator and the three-pass amplifier are given. The calculation results have been compared with the experimental data showing a good consistence.

**Key words** passive Q-switched Cr<sup>4+</sup>:YAG crystal, three-pass amplifier, Nd: phosphate glass laser amplifier

Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体用作激光被动调 Q 晶体近年来发展迅速<sup>[1~4]</sup>, 但一般多用于 YAG 激光器中, 很少见到用于磷酸盐钕玻璃激光器中实现被动调 Q。本文中, 我们针对激光腔实际参数, 建立了被动调 Q 速率方程组, 其中包括激光增益介质的反转粒子数密度、增益长度、吸收系数; Cr<sup>4+</sup>:YAG 掺杂浓度、长度、谐振腔长度、激光反射镜的输出耦合率以及抽运脉冲波形等。计算出了被动调 Q 的脉冲波形和每次通过放大级的脉冲波形以及能量放大率。用实际激光系统的实验验证了计算结果的正确性。所得结果可推广用于激光系统的优化设计。

### 1 原 理

考虑增益介质长度、增益系数, 饱和和吸收介质的浓度、长度, 激光谐振腔长度、腔镜反射率等, 可建立如下被动调 Q 的速率方程组(其中, 激光增益介质为四能级系统<sup>[5]</sup>)

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -cN_1\sigma_g \frac{l_Q}{l_R}\phi + N_2/T_a \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = cN_1\sigma_g \frac{l_Q}{l_R}\phi - N_2/T_a \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_{st}}{\partial t} = -\phi N_{st}\sigma_{st}c \frac{l_g}{l_R} - N_{st}/\tau_f + (n_{tot} - N_{st})W_p \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi \left( \sigma_{st}cN_{st} \frac{l_g}{l_R} - \alpha c \frac{l_a}{l_R} - \sigma_g c N_1 \frac{l_Q}{l_R} - \sigma_e c N_2 \frac{l_Q}{l_R} + \ln R / \tau_R \right) \quad (4)$$

式中,  $N_1$  和  $N_2$  分别为饱和吸收体在吸收和弛豫过程中的基态和第一激发态的粒子数密度,  $N_1 + N_2 = N_0$ ,  $N_0$  是总粒子数密度或吸收杂质中心浓度。Cr<sup>4+</sup>:YAG 的恢复时间约为  $3.4 \mu s$ <sup>[2]</sup>, 基态吸收截面  $\sigma_g = 8.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 激发态吸收截面  $\sigma_e = 2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ <sup>[2]</sup>。  $N_{st}$  为在激光增益介质中的反转粒子数密度。 $\sigma_{st}$  为激光介质的受激发射截面(Nd: phosphate glass 的  $\sigma_{st}$  等于  $4.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )<sup>[1]</sup>。  $T_a$  为饱和吸收体基态吸收的恢复时间。 $A_{21}$  为自发辐射速率,  $W_p$  为抽运速率, 与灯光波形有关。 $R$  为输出耦合镜的反射率。 $\tau_R$  为光在腔内每往返一周时间(忽略光在腔中

\*四川省青年科技基金和教育部《高等学校骨干教师资助计划》资助项目。

收稿日期 2000-04-13; 收到修改稿日期 2000-05-29

的散射和在晶体表面的反射等其他损耗,  $\tau_R = 2l_R/c$ ,  $l_R$  为实际腔长,  $c$  为光速,  $l_g$  为增益介质的增益长度,  $\alpha$  为增益介质的吸收系数,  $l_a$  为增益介质的吸收长度,  $l_Q$  为  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的厚度。  $\phi$  为光子通量。在激光束方向自发辐射的光子密度可看成是初始光子密度, 有<sup>[5]</sup>:  $\phi_i \approx N_{st} \frac{\Omega\tau_c}{4\pi\tau_f}$ ,  $\Omega$  为激光束的立体角,  $\tau_f$  为荧光寿命。  $\tau_c$  为谐振腔内光子衰减的寿命时间,  $\tau_c = \tau_R/\epsilon$ ,  $\epsilon = -\ln R + 2\alpha l_a + 2\sigma_g N_1 l_Q + 2\sigma_e N_2 l_Q$ 。

激光脉冲通过放大器时, 输出激光的脉冲波形和激光能量的计算可参考文献 [6]。

## 2 数值计算结果

对于速率方程组(1)~(4), 由于各变量相互耦合, 一般情况下难以得到解析解。本文用四阶龙格-库塔法进行数值计算。放电网络采用 4LC 脉冲成型网络, 板条激光介质被两闪光灯对称抽运, 谐振腔型选用普通平凹腔, 平面输出耦合镜透过率选为 60%, 腔长为 80 cm。当抽运能量为 100 J 时, 激光增益介质的小信号增益系数  $g_0 = 0.016 \text{ cm}^{-1}$ , 增益长度为 125 mm, 吸收系数为  $0.004 \text{ cm}^{-1}$ , 吸收长度为 127 mm。计算表明, 若选用常规的用于 Nd:YAG 激光器的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的掺杂浓度厚度乘积参数, 不能实现被动调 Q。当  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体掺杂浓度厚度乘积为  $1.6 \times 10^{17} \text{ ions/cm}^2$  时, 可得光子通量、激光增益介质的反转粒子数密度、饱和吸收体的基态粒子数密度和透过率随时间变化的曲线(见图 1), 图中可见调 Q 脉冲宽度约为 120 ns。图 1 中, 当腔内

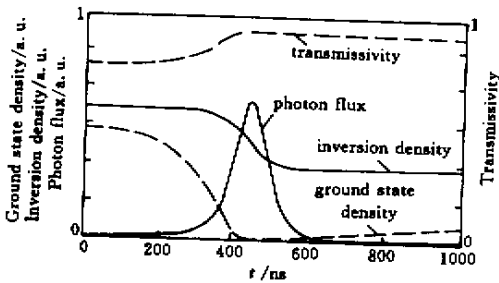


图 1 计算所得在磷酸盐钕玻璃激光器中光子通量、激活介质反转粒子数密度及  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的基态粒子数密度和透过率随时间变化的曲线

Fig.1 Results of numerical simulation: Temporal profiles of the photon flux, inversion density of the active medium, ground state density and transmissivity of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  crystal in Nd:glass laser

光子数逐渐增多时,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  透过率变大, 腔的 Q 值增加, 介质内反转粒子数密度被大量消耗, 光子数密度增大, 得到调 Q 激光脉冲输出。当光子数密度逐渐变小时,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  透过率逐渐变小。可见,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体在谐振腔内因其透过率由小变大又逐渐变小起到了光开关的作用, 压窄了输出激光脉冲。我们还计算了当  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体掺杂浓度与厚度的乘积发生变化时(其余参数均保持不变), 调 Q 脉冲宽度的变化(如图 2 所示), 浓度厚度乘积越大, 调 Q 脉冲越窄, 脉冲峰值功率越高。

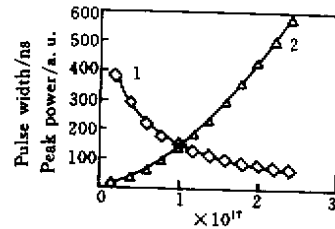


图 2 计算所得钕玻璃激光器调 Q 脉冲宽度(1)和峰值功率(2)随  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  掺杂浓度厚度乘积变化  
Fig.2 Calculated Q-switching pulse width (1) and peak power (2) vs product of thickness and consistency of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  crystal

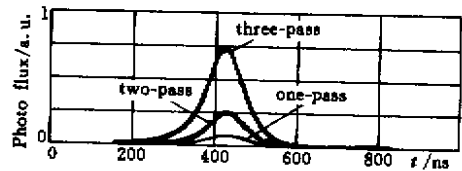


图 3 计算所得脉冲三次通过放大器后的时间波形  
Fig.3 Calculated temporal output pulse profiles

计算可得, 当放大级增益系数为  $0.065 \text{ cm}^{-1}$  时, 能量为 2.82 mJ 的脉冲一次、二次、三次通过放大器后的脉冲波形示于图 3, 一次通过后的脉冲能量为 10.4 mJ, 二次通过后的脉冲能量为 36.34 mJ, 三次通过后的脉冲能量为 109.4 mJ, 能量放大率分别为 3.68, 12.9, 38.7。可见, 脉冲能量得到明显放大, 而脉冲波形基本保持不变, 脉冲宽度仍约为 120 ns。

## 3 实验结果

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 磷酸盐钕玻璃板条激光振荡-放大器系统如图 4 所示。  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q

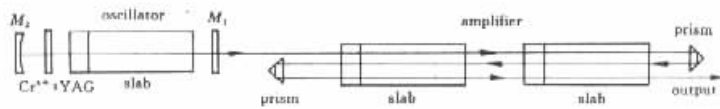
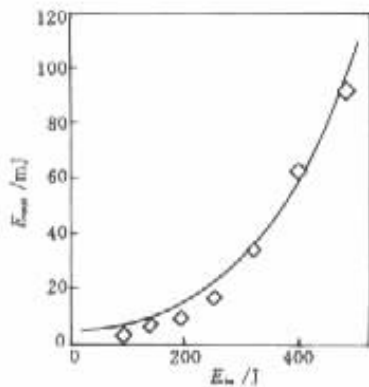
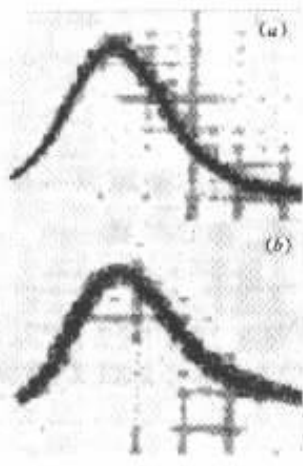
图4 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 磷酸盐钕玻璃板条三通放大系统示意图Fig.4 Schematic diagram of the Cr<sup>4+</sup>:YAG Q-switched Nd:phosphate glass slab three-pass amplifier system图5 当输入激光能量为 2.82 mJ 时 输出能量  $E_{out}$  随抽运能量  $E_p$  的变化Fig.5 Output energy  $E_{out}$  as a function of pumping energy  $E_p$  with initial input energy being 2.8 mJ ( $\diamond$ : experimental results; —: calculated results)

图6 实验测得由调 Q 振荡器输出 (a) 和三通放大后输出 (b) 的脉冲波形 (50 ns/div)

Fig.6 Measured temporal output pulse profiles from (a) the Q-switched oscillator; (b) the three-pass amplifier

晶体选用了理论计算中设计的参数。谐振腔型选为平凹腔,凹面反射镜曲率半径  $R = 5$  m,平面输出耦合镜透过率为 60%,板条尺寸为  $5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ ,重复频率为  $0.2 \sim 1$  Hz。当振荡级抽运能量为 109 J 时,得到脉宽为 120 ns,能量为 2.82 mJ 的单横

模调 Q 输出激光。三通放大后,脉冲能量随抽运能量的变化如图 5 所示,当放大级抽运能量为 441 J 时,激光能量得到明显放大,为 91 mJ,能量放大率为 32。实验测得被动调 Q 激光脉冲形状如图 6(a) 所示,三通放大后脉冲形状如图 6(b) 所示,脉宽约为 120 ns,证实了计算结果的正确性。

## 4 结 论

将新型 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体用于磷酸盐钕玻璃板条激光器中实现了被动调 Q,并实现了三通放大。理论及实验研究表明:1)多用于 Nd:YAG 的新型 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体也可用于磷酸盐钕玻璃激光器实现被动调 Q,关键技术在于参数匹配;2)理论分析与实验结果一致,证实了我们所进行的针对实际激光器运行参数的计算模型和计算结果是正确的,为设计有实用价值的调 Q 激光器提供了依据;3)在本实验条件下,调 Q 脉冲经放大后光束质量和脉冲形状基本保持不变;4)由于 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的‘漂白’原理,采用普通平凹腔,当激光介质增益不太高时,调 Q 晶体作为光开关,首先在激光束中心处即基模位置附近打开,起到了光阑的作用,得到了近衍射极限的高光束质量激光调 Q 输出。

## 参 考 文 献

- 1 I. J. Miller, A. J. Alcock, J. E. Bernard. Experimental investigation of Cr<sup>4+</sup>...YAG as a passive Q-switch. *Opt. Soc. Am. Proc. Advanced Solid-State Lasers*, 1992, **13**: 322 ~ 325
- 2 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. Cr<sup>4+</sup>:YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a Pulsed Nd:YAG laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(10): 1738 ~ 1741
- 3 K. Spariosu, W. Chen, R. Stultz *et al.*. Dual Q-switching and laser action at 1.06 and 1.44  $\mu\text{m}$  in a Nd<sup>3+</sup>:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG oscillator at 300 K. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(10): 814 ~ 816
- 4 W. Chen, K. Spariosu, R. Stultz *et al.*. Cr<sup>4+</sup>:GSGG saturable absorber Q-switch for the ruby laser. *Opt. Comm.*, 1993, **104**(1): 71 ~ 74
- 5 W. Koehner. *Solid-State Laser Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. 2526
- 6 Fan Dianyan, Yu Wenyan. A two-pass three-channel slab amplifier. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1766 ~ 1768