

文章编号 : 0258-7025(2001)06-0487-04

# 用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作调 $Q$ 元件的激光器特性的研究\*

宋晏蓉 李瑞宁 刘媛媛 赵建明 周国生

(山西大学电子系 太原 030006)

**提要** 用  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  作为调  $Q$  元件,采用腔内加透镜的方法,实现了  $\text{Nd}:\text{YAG}$  调  $Q$  激光输出,得到了平缓、光滑的脉冲波形。从理论上分析了加透镜后激光腔内结构、腔参数对输出功率、脉宽等参数的影响。

**关键词** 调  $Q$  激光器,可饱和吸收体,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

中图分类号 TN 248.1+3 文献标识码 A

## Study on Passive $Q$ -switching for CW Laser by Using $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

SONG Yan-rong LI Rui-ning LIU Yuan-yuan ZHAO Jian-ming ZHOU Guo-sheng

(Department of Electronics & Information Science, Shanxi University, Taiyuan 030006)

**Abstract** In this paper, the method of making passive  $Q$ -switching laser by using a saturable absorber  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  is improved. With putting a lens in the laser cavity, the characteristics of the laser such as peak power, pulse width are changed. The output pulse shape becomes smoothly. Those characteristics are discussed theoretically.

**Key words**  $Q$ -switch, saturable absorber,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

### 1 引 言

调  $Q$  激光器主要分为两大类,主动调  $Q$  激光器和被动调  $Q$  激光器。相比之下,被动调  $Q$  激光器只需一饱和吸收材料,设备相应较简单。常用的可饱和吸收体有染料调  $Q$  元件、固体可饱和吸收元件如色心元件等。但染料溶液存在化学稳定性差,需经常更换,热性质不佳等缺点,色心元件存在退化现象等,使激光器的应用受到限制。近年来,由于掺四价铬的各种晶体具有较宽的荧光谱(1.1~1.58  $\mu\text{m}$ ),可同时做激光晶体和可饱和吸收元件而受到普遍关注<sup>[1,2]</sup>。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  具有饱和光强小、导热性好、化学性质稳定、损伤阈值高等特点,很容易做成体积小、价格便宜的脉冲激光器。

但被动调  $Q$  激光器一般输出稳定性较差。有些文章用加光阑<sup>[3]</sup>的方法改善调  $Q$  输出的稳定性,但势必会使一些功率损失掉,同时输出功率的高低受  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的掺杂浓度的限制,若想提高输

输出功率,需更换调  $Q$  晶体。

本文采用在腔内加透镜的新方法使光入射到可饱和吸收体上的功率密度发生变化,进而改变腔中光子与可饱和吸收体基态、激发态粒子间的耦合系数,从而改变输出功率的大小,提高输出稳定性。从耦合速率方程出发,讨论了透镜大小、位置对调  $Q$  激光器输出峰值功率和脉宽的影响,并进行了一系列计算,进一步证实了此法的可行性。用激光腔中加透镜的方法在实验中收到了良好的效果。

### 2 理论计算

在分析腔中加有透镜的可饱和吸收体调  $Q$  过程时,可用一般带有激发态吸收的可饱和吸收体耦合速率方程来描述。但加了透镜之后,方程中的激光介质反转粒子数、可饱和吸收体基态粒子数与腔中光子数的耦合系数会有所不同,将受到腔中增益介质、可饱和吸收体上光斑大小的影响,进而影响输出脉冲的峰值功率、脉宽等参数,具体分析如下。耦合速率方程为<sup>[4]</sup>

$$\frac{dn}{dt} = [k_g N_g - k_a N_a - \beta k_a (N_{a0} - N_a) - 1/\tau_c]n \quad (1)$$

$$\frac{dN_g}{dt} = R_p - \gamma_g N_g - k_g N_g n \quad (2)$$

\*国家自然科学基金(编号:10074041)和山西省自然科学基金资助课题。

收稿日期 2000-03-10;收到修改稿日期 2000-04-25

$$\frac{dN_a}{dt} = \gamma_a(N_{a0} - N_a) - k_a N_a n \quad (3)$$

其中  $n$  为激光腔中的光子数,  $N_g$  为激光反转粒子数,  $N_a$  为可饱和吸收体基态粒子数,  $N_{a0}$  为  $N_a$  的初始值,  $\gamma_g = 1/\tau_g$ ,  $\tau_g$  为激光辐射上能级寿命,  $\gamma_a = 1/\tau_a$ ,  $\tau_a$  为饱和吸收体恢复时间,  $R_p$  代表抽运速率,  $\beta = \sigma_e/\sigma_a$ ,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_e$  分别为可饱和吸收体基态、激发态吸收截面,  $\tau_c = l_c[\alpha/2 - \ln R]$  为腔中光子寿命, 其中  $l_c$  为 Nd:YAG 激光器腔长,  $\alpha$  为腔内损耗,  $R$  为输出镜的反射率,  $c$  为真空中光束。

$k_g$ ,  $k_a$  为对应的激光介质反转粒子数、可饱和吸收体基态粒子数与腔中光子数的耦合系数, 是本文讨论的重点。其表达式为:  $k_g = 2\sigma_g/(t_r s_g)$ ,  $k_a = 2\sigma_a/(t_r s_a)$ , 其中  $t_r$  为光子在腔中来回一周所需时间, 当腔长固定后, 它是一个定值,  $\sigma_g$  为激光发射截面。耦合系数  $k_g$ ,  $k_a$  受激光介质、可饱和吸收体的固有参数  $\sigma_g$ ,  $\sigma_a$  影响, 亦受激光腔的腔参数  $s_a$ ,  $s_g$  限制。 $s_a$ ,  $s_g$  为腔中的可饱和吸收体、增益介质上光斑的有效截面积, 它们与腔的参数、透镜位置有关。图 1 所示为实验采用的加透镜的调 Q 激光器结构和参数图 (a) 是 (b) 的等效腔 (b) 中的各参数亦是等效长度 (所用腔参数为: 总腔长  $l_c = 70$  cm, 激光介质长 8 cm, 折射率  $n_r = 1.63$ ,  $z_3 = 30$  cm,  $R_1, R_2$  取无穷大, 即两端镜为平镜。由腔中高斯光束的传输规律可知, 入射到可饱和吸收体、激光介质上的光斑大小受腔中透镜焦距大小和所处位置决定, 具体计算如下:

腔中两端镜上光斑半径  $w_1, w_2$  的表达式为

$$w_i^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \left[ \frac{g_j}{g_i(1 - g_i g_j)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$g_i = 1 - \frac{d_1 + d_2}{R_i} - \frac{d_j}{f} \left( 1 - \frac{d_i}{R_i} \right) \quad (5)$$

其中  $i = 1, 2$ ;  $j = 2, 1$ ;  $L = d_1 + d_2 - d_1 d_2 / f$ ,  $f$  为

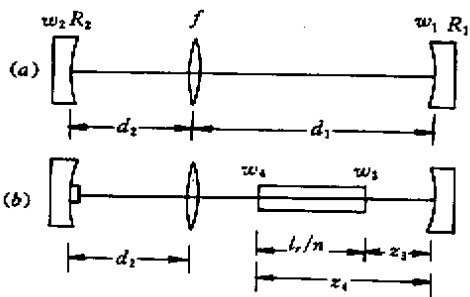


图 1 调 Q 激光器结构和参数图

Fig.1 Structure graph of Q-switch laser

透镜焦距。

激光棒两端的光斑半径  $w_3, w_4$  的表达式为

$$w_k^2 = w_1^2 \left[ \left( 1 - \frac{z_k}{R_1} \right)^2 + \left( \frac{\lambda z_k}{\pi w_1^2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中  $k = 3, 4$ 。

将(4)(6)式代入下式, 即可得激光增益介质、可饱和吸收体的有效截面面积

$$s_g = \pi \frac{w_3^2 + w_4^2}{2}, \quad s_a = \pi w_2^2 \quad (7)$$

两面积之比为  $r_o = \frac{s_g}{s_a}$  (8)

将  $r_o, s_a$  与透镜焦距大小、位置的变化曲线画出, 如图 2 所示。从图中可看出, 当  $f$  取某一值时 (如 18 cm),  $d_2$  的取值在  $d_2 > f$  的范围内 (如 18 ~ 30 cm), 这是由腔的稳定性分析得出的。当  $d_2 < f$  时, 腔处于非稳区, 是不可取的。 $d_2 < 30$  cm 是由腔的机械参数决定的。通过改变透镜位置、焦距的大小来改变  $s_a, s_g$  的值, 进而改变  $k_g, k_a$  的变化。从耦合速率方程组 (1) ~ (3) 可看出, 当  $k_g, k_a$  变化时, 调 Q 的过程也会发生变化, 具体影响有以下几个方面。

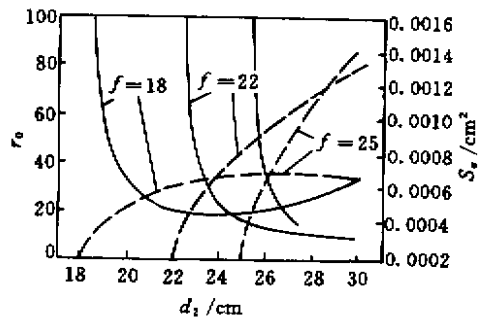


图 2  $r_o, s_a$  随  $d_2$  的变化曲线

实线代表  $r_o-d_2$ , 虚线代表  $s_a-d_2$ ,  $f$  单位为 cm

Fig.2 Curves of  $r_o, s_a$  vs  $d_2$  respectively

solid curve is for  $r_o-d_2$ , dashed curve is for  $s_a-d_2$ , unit of  $f$  is cm

### 2.1 对输出峰值功率、脉宽的影响

将受  $s_a, s_g$  (或  $f, d_2$ ) 影响的  $k_g, k_a$  值代入耦合速率方程 (1) ~ (3), 用龙格-库塔数值解法计算调 Q 脉冲输出的峰值功率、脉宽的大小, 可画出相应的曲线图, 如图 3, 图 4 所示。计算中所用各参数为:  $\sigma_g = 3 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup>,  $\sigma_a = 4.3 \times 10^{-18}$  cm<sup>2</sup>,  $\sigma_e = 8.2 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup>,  $N_{a0} = 9.9 \times 10^{15}$ ,  $N_{g0} = 1.5 \times 10^{18}$ ,  $l_r = 8$  cm,  $n_r = 1.63$  (激光介质长度和折射率),  $l_q = 0.2$  cm,  $n_q = 1.8$  (调 Q 晶体长度和折射率),  $l_c = 70$  cm,  $R = 0.8$ ,  $\alpha = 0.26$ 。比较图 2, 图 3 可看出, 当  $f$  一

定时,峰值功率的变化趋势与  $r_o$  的变化趋势是相对应的,则若想改变输出峰值功率的大小,只需调节透镜在腔中的位置即可。图4是相应的脉宽图,亦与  $r_o$  的变化趋势相对应。从变化趋势可看出,随着  $s_g/s_a$  的比值  $r_o$  的减小,输出脉冲峰值功率增大,脉宽减小;当  $r_o$  增大时,峰值功率减小,脉宽增大。

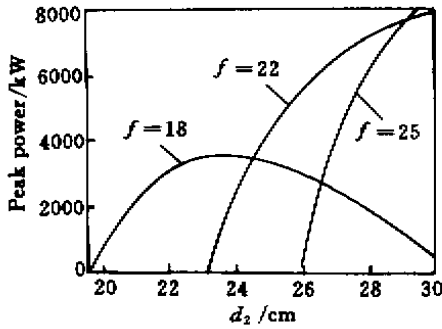


图3 峰值功率随  $d_2$  的变化曲线

$f$  分别为 18 cm 22 cm 25 cm

Fig.3 Peak power vs  $d_2$

from left to right  $f = 18 \text{ cm}, 22 \text{ cm}, 25 \text{ cm}$

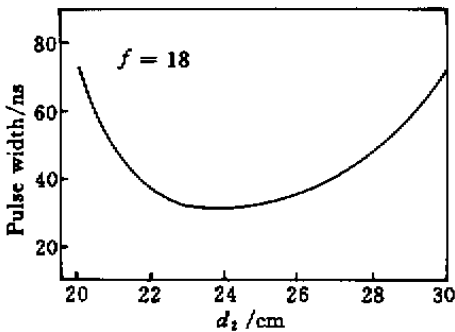


图4 脉宽随  $d_2$  的变化曲线  $f = 18 \text{ cm}$

Fig.4 Pulse width vs  $d_2$  with  $f = 18 \text{ cm}$

## 2.2 提高激光器的输出功率

当腔中无透镜时,计算出其输出峰值功率为 45 kW。而从图3可看出,加了透镜之后,在  $d_2$  的大部分调节范围内,可以获得高于不加透镜时的峰值功率值。

图5是用龙格-库塔数值解法模拟调  $Q$  建立过程的图形,取透镜  $f = 18 \text{ cm}$ ,不同  $d_2$  值时模拟而成。从此图亦可证明上述结论。

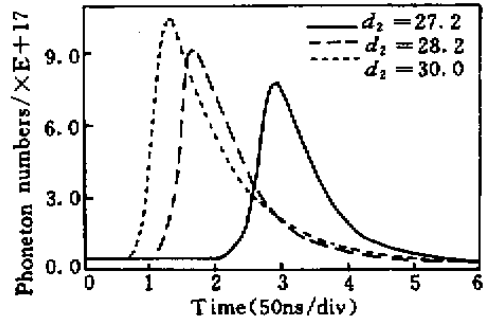


图5 腔中光子数随时间变化过程,  $f = 18 \text{ cm}$

Fig.5 Photon numbers vs time with different value

$d_2$  when  $f = 18 \text{ cm}$

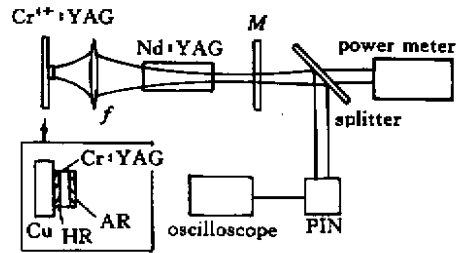


图6 实验装置图

Fig.6 Configuration of experiment

## 3 实验

实验装置如图6所示。将普通连续 Nd:YAG 激光谐振腔中的后镜换成可饱和吸收元件  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体薄片,此薄片前表面镀  $1.06 \mu\text{m}$  的增透膜,后表面镀全反膜,使其既作可饱和吸收体,又作为谐振腔的后端镜。此薄片厚 1 mm,用导热胶粘到一铜块上,使其冷却。Nd:YAG 激光棒长 80 mm,直径 5 mm。整个激光谐振腔长 70 cm,由于镜架的限制,透镜距  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  薄片最大距离为 30 cm。用功率计和示波器同时检测波形和输出功率值。图7(a)(b)分别为加透镜前后的输出脉冲图。由图可看出,加透镜后脉冲波形明显变光滑、规则。由于所用激光器的输出功率较大,当在腔中加透镜后,在可饱和吸收体上光斑的峰值功率明显增大,以至将晶体表面烧坏,因此目前阶段无法将峰值功率随透镜焦距、位置的变化曲线测出。

下面估算一下所需调  $Q$  晶体表面的损伤阈值。取脉宽  $\tau = 60 \text{ ns}$ ,重复频率  $f = 80 \text{ kHz}$ ,峰值功率  $p_0 = 500 \text{ kW}$ ,光斑面积  $S_A = 0.0002 \text{ cm}^2$ ,可计算出入射到调  $Q$  晶体表面的功率密度  $P_c = 12 \text{ MW/cm}^2$ 。在

现有技术下晶体表面镀膜的伤害阈值大于  $P_c$  是可以达到的,因此在腔内加透镜的方法是可行的。

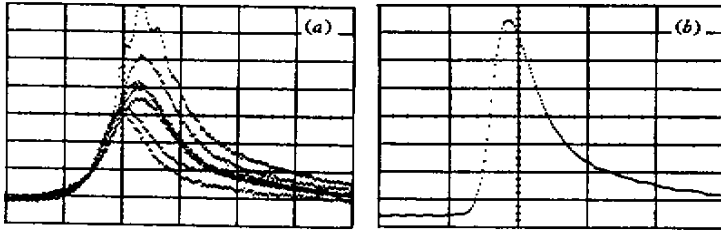


图 7 不加透镜(a)和加透镜(b)时的脉冲波形

Fig.7 Pulse shape without a lens(a) and with a lens(b)

## 4 结 论

综上所述,若想提高  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  调  $Q$  脉冲激光器的输出稳定性和输出功率,可在腔中加一透镜,这样既可以对输出脉冲整形,还可以提高输出峰值功率,并且可通过微调透镜在腔中位置,使输出功率、脉宽连续变化。

### 参 考 文 献

- 1 Zhigang Zhang, Tadasi Nakagawa, Kenji Torizuba *et al.*. Self-starting mode-locked  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  laser with a low-loss broadband semiconductor saturable absorber mirror. *Opt. Lett.*, 1997, **22** (13):1006 ~ 1008
- 2 Zhao Shengzhi, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*.  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $Q$ -switched laser characteristics of  $\text{Nd}:\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **19**(2) 211 ~ 215 (in Chinese)
- 3 Ding Yanhua, Ouyang Bin, Xu Jun *et al.*. Stability and power improvement in passive  $Q$ -switching of CW Nd:YAG laser using  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ . *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(3): 197 ~ 201 (in Chinese)
- 4 Yen-Kuang Kuo, Man-Fang Huang, Milton Birnbaum. Tunable  $\text{Cr}^{4+}:\text{YSO}$   $Q$ -switched Cr:LiCAF laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(4) 657 ~ 663