

文章编号:1002-2082(2006)01-0046-05

# 被动调Q激光器输出特性的实验研究

杨昱冰, 蔡德芳, 王石语, 文建国, 过 振

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 被动调Q晶体Cr:YAG对激光器的性能起着重要的作用。对Cr:YAG被动调Q Nd:YAG激光器进行了实验研究。着重研究了抽运功率、腔长、输出镜透过率以及初始透过率等因素对激光输出脉冲序列的重复率、脉冲宽度以及输出功率的影响。实验结果表明,抽运功率是影响重复率的最大因素,抽运功率的增大可以提高重复率,并减小脉冲宽度;它对腔长的影响效果刚好相反;存在一个可使输出功率最大的最佳输出镜透过率;不同的初始透过率对输出有一定的影响。分析表明被动调Q技术适用于DPL。

**关键词:** 激光技术;被动调Q;重复率;Cr:YAG;最佳输出镜透过率

中图分类号:TN248.3<sup>++</sup>-34

文献标识码:A

## Experimental study on output characteristics of passively Q-switched laser

YANG Yu-bing, CAI De-fang, WANG Shi-yu, WEN Jian-guo, GUO Zhen

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The experimental study on Nd:YAG laser passively Q-switched by Cr:YAG is carried out. The focus is given to the influence of pumping power, cavity length, the output coupler transmission and initial transmission on the repetition rate, pulse width and output power of laser output. The experiment results were analyzed and discussed. It can be observed from the curve that an increase of pumping power results in an increase of repetition rate and decrease of pulse width, but the impact of cavity length is on the contrary side. There is an optimized output coupler transmission which can maximize the output power. Different initial transmittances have certain effects on the output. The analyses show that the passive Q-switching technology is applicable to DPL.

**Key words:** laser technology; passive Q-switching; repetition rate; Cr:YAG; optimized output coupler transmission

## 引言

激光二极管(LD)抽运的被动调Q激光器是获得高重复率纳秒、亚纳秒激光脉冲的重要技术,具有广泛的应用前景。被动调Q技术以其价格低廉,运转可靠和结构简单等优点在中小功率激光器中广泛应用。良好的被动调Q晶体Cr:YAG在激光波段具有较大的吸收截面、较短的弛豫截面和较小的

剩余吸收截面,同时还具有稳定的物化性能、良好的导热性以及抗损伤、防潮等特性。被动调Q激光器对于实现高重复率,窄脉冲宽度的脉冲序列输出具有重大意义。

本文从实验方面对LD抽运Nd:YAG被动调Q激光器的输出进行了比较全面的研究,并分析了被动调Q激光器的可行性。这项研究对提高激光器

收稿日期:2004-09-20; 修回日期:2004-10-11

基金项目:国防重点实验室基金资助(51456050104DZ0101)

作者简介:杨昱冰(1979—),男,汉族,陕西西安人,西安电子科技大学硕士研究生,主要从事DPL等新型激光器的研究。

的性能具有一定的实验指导意义。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调Q的具体理论分析见文献[1]。

## 1 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的被动调Q原理

目前,在DPL中研究比较多的是被动调Q晶体,它主要是利用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的可饱和吸收特性进行调Q。所谓可饱和吸收特性就是材料的透过率随着入射光强的增大而增大。图1是 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的能级结构。小信号时基态吸收截面 $\sigma_{13}=8.7\times 10^{-19}\text{cm}^2$ ,饱和时激发态吸收截面 $\sigma_{13}=2.2\times 10^{-19}\text{cm}^2$ [4]。当晶体内1064nm的光很弱时,粒子吸收光子能量从基态1跃迁到激发态2(达到能级3后,又迅速回到2,因为能级3的寿命短)。由于基态吸收截面远大于激发态吸收截面,所以粒子主要从基

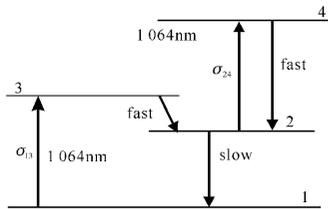


图1 Cr离子能级结构图

Fig. 1 Structural diagram of energy level of Cr ion

态向激发态跃迁。大多数光子被 $\text{Cr}^{4+}$ 离子吸收,所以光子透过晶体时损耗很大,即光的透过率比较小。随着抽运过程的继续以及工作物质自发荧光辐射的增强,粒子绝大多数都已经跃迁到激发态2。此时,假如没有激发态吸收,透过率将接近100%(由于粒子仅有很少部分向下能级跃迁,这使能级1上的粒子很少,于是仅有很少量的粒子吸收入射光子,使光子几乎可以毫无损耗地透过 $\text{Cr}^{4+}$ 晶体,即透过率很大)。但是,极大的光强使激发态粒子由2跃迁到4,导致达到激发态时光子仍有一部分被吸收,这就是激发态吸收,此时的透过率并非100%。但是比起基态吸收,此时透过率仍然很大。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的透过率随着晶体光强的增大而增大,这就形成了可饱和吸收的特性,即可用于对激光器调Q。

## 2 实验装置

实验中使用连续激光二极管抽运Nd:YAG晶体,可得到1064nm连续红外激光输出,然后在激光器谐振腔内再放入慢饱和吸收晶体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ,则可获得调Q的脉冲激光输出。激光器的实验装置如图2所示。

实验用最大输出功率为20W,波长为808nm的LD(THOMSON-CSF)为抽运源,高稳定性驱动电源对LD提供稳定的电流,以确保LD输出稳定。采用尺寸为 $\varphi 4\times 10$ 的Nd:YAG为激光工作物质,通光面为平行平面,它的一个通光面镀有对808nm抽运光高透射,对1064nm光高反射的反射膜。Nd:YAG的另一个通光面和Cr:YAG的2个通光面均镀有对1064nm光的增透膜。实验中主要使用初始透过率为82.59%的Nd:YAG,91.03%的Cr:YAG晶体仅在比较时使用。实验中对LD、Nd:YAG和Cr:YAG均采用水冷降温。实验中使用148型激光功率计测量输出功率,使用PIN光电二极管对输出脉冲进行探测,并在示波器(Tektronix TDS 3052 B)上显示脉冲波形。

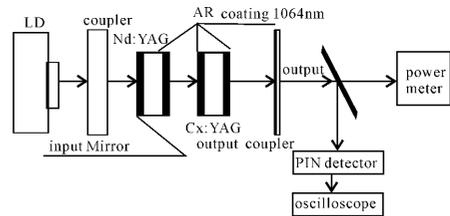


图2 被动调Q激光器实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system of passively Q-switched laser

## 3 实验结果

1) 按照图2的实验装置,改变抽运电流,得出抽运电流的变化对于输出脉冲序列的重复率、脉冲宽度及输出功率的影响曲线,如图3所示。由图3发现,随着抽运电流(抽运功率)的增加,输出脉冲序列的重复率随之明显增加,输出功率明显增大,而脉冲宽度逐渐减小。

2) 按照图2的实验装置,改变输出镜透过率,得出输出镜透过率的变化对输出脉冲序列的重复率、脉冲宽度及输出功率的影响曲线,如图4所示。由图4发现,随着输出镜透过率的增加,输出脉冲序列的重复率逐渐减小,脉冲宽度增加,同时还存在一个可使输出功率最大的最佳输出镜透过率。

3) 按照图2的实验装置,改变腔长,得出腔长的变化对于输出脉冲序列的重复率、脉冲宽度及输出功率的影响曲线,如图5所示。由图5发现,随着腔长的增加,重复率逐渐减小。

4) 根据数值模拟和实验,改变被动调Q晶体,得出初始透过率的变化对输出脉冲序列的重复率、脉冲宽度的影响曲线,如图6所示。由图6发现,随着被动调Q晶体的初始透过率的增加,输出脉冲的

重复率和脉冲宽度都随之增加。

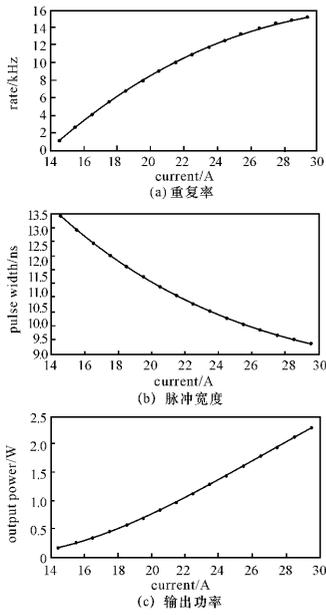


图3 输出脉冲特性与抽运电流的关系

Fig. 3 Variation of output pulse characteristic with pump current

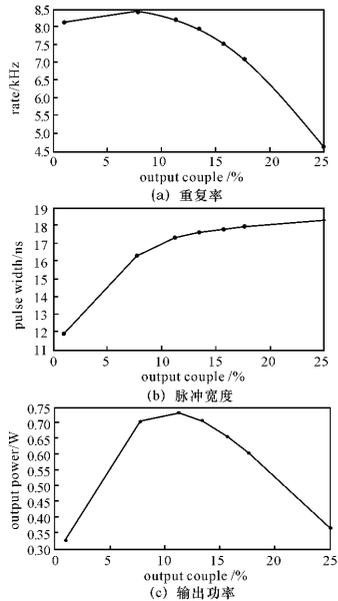


图4 输出脉冲特性与输出镜透过率的关系

Fig. 4 Variation of output pulse characteristic with output couple

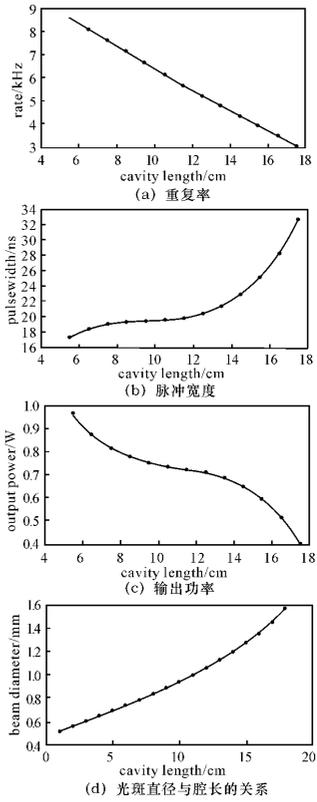


图5 输出脉冲特性与腔长的关系

Fig. 5 Variation of output pulse characteristic with cavity length

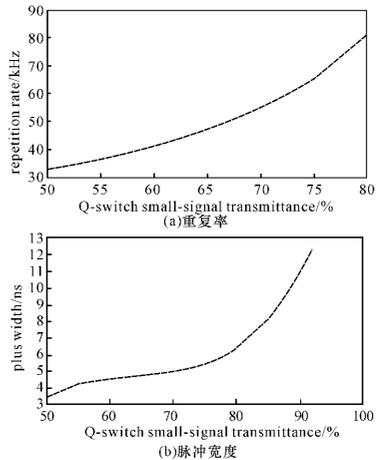


图6 输出脉冲特性与初始透过率的关系

Fig. 6 Variation of output pulse characteristic with initial transmittance

## 4 结果分析

### 4.1 抽运电流对输出脉冲的影响

随着抽运电流的增加,输出脉冲序列的重复率逐渐增大。其原因主要是当抽运电流增加时,Nd:YAG晶体的激发态反转粒子数集聚的速度增加,反转粒子数的密度增加,腔内净增益系数增加,增益到阈值所需的时间变短。因此,2次漂白可饱和吸收体的时间间隔变短,缩小了调Q的周期,从而增大了脉冲序列的重复率。

被动调Q激光器的速率方程<sup>[4]</sup>为

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{\varphi}{t_r} [2\sigma n l - 2\sigma_{gs} n_{gs} l_s - \\ &\quad 2\sigma_{es} n_{es} l_s - (\ln \frac{1}{R} + 1)] \\ \frac{dn}{dt} &= R_a - \gamma \sigma c \varphi n - \frac{n}{\tau_a} \\ \frac{dn_{gs}}{dt} &= -\sigma_{gs} \varphi n_{gs} \\ \frac{dn_{es}}{dt} &= -\sigma_{es} c \varphi n_{es} \\ n_{gs} + n_{es} &= n_0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\varphi$ 为光子密度; $\sigma$ 为增益介质的发射横截面积; $n$ 为增益介质粒子反转密度; $\sigma_{gs}, \sigma_{es}$ 分别为饱和吸收介质的基态和激发态吸收横截面积; $l$ 和 $l_s$ 分别为增益介质和饱和吸收介质的长度; $t_r$ 为谐振腔内光子的往返时间; $R$ 为输出镜的反射率; $L$ 为腔内的无用损耗; $R_a$ 为抽运速率; $\gamma$ 为粒子反转数衰减因子; $\tau_a$ 为增益介质激发态寿命; $n_0$ 为饱和吸收体总的粒子密度。在相邻2个调Q脉冲的脉冲间隔 $T_1$ 范围内基本上没有光,可以认为 $\varphi \approx 0, \frac{d\varphi}{dt} \approx 0$ 。于是速率方程式(1)中第2个方程可以化简为

$$\frac{dn}{dt} = R_a - \frac{n}{\tau_a} \quad (2)$$

对于上式在一个脉冲间隔内进行积分,得到:

$$f \approx 1/T_1 = \frac{1}{\tau_a} \ln \left( \frac{R_a \tau_a - \Delta n_i}{R_a \tau_a - \Delta n_f} \right) \quad (3)$$

式中, $f$ 为输出脉冲的重复率; $\Delta n_f$ 为调Q脉冲结束时的反转粒子数密度; $\Delta n_i$ 为调Q脉冲开始时的反转粒子数密度,对上式进行求导:

$$\frac{df}{dR_a} = \frac{\Delta n_i - \Delta n_f}{(R_a \tau_a - \Delta n_f)^2} > 0 \quad (4)$$

因为 $\Delta n_i - \Delta n_f > 0$ ,所以随着抽运电流(抽运速率)的增加,输出脉冲序列的重复率随之明显增加。

随着抽运电流的增加,输出脉冲序列的脉冲宽

度逐渐减小。

随着抽运电流的增加,输出脉冲序列的输出功率逐渐增加。其关系如下<sup>[5]</sup>:

$$E_p = \frac{T}{T + \alpha} \mu E_i = \frac{T}{T + \alpha} \left( 1 - \frac{\Delta n_f}{\Delta n_i} \right) E_i \quad (5)$$

式中, $T$ 为输出镜透过率; $E_i$ 为储存在工作物质中可以转变为激光的初始能量(即储能); $\alpha$ 为损耗系数; $\Delta n_i$ 为调Q脉冲开始时的反转粒子数密度; $\Delta n_f$ 为调Q脉冲结束时的反转粒子数密度; $\Delta n_i$ 为腔内光子数最大时的反转粒子数密度。 $\frac{\Delta n_i}{\Delta n_f}$ 与 $\frac{\Delta n_f}{\Delta n_i}$ 成反比<sup>[5]</sup>, $\frac{\Delta n_f}{\Delta n_i}$ 与 $E_p$ 成反比, $\frac{\Delta n_i}{\Delta n_f}$ 又与抽运功率成正比。所以,根据(5)式可以得出,随着抽运电流(即抽运功率)的增加, $\frac{\Delta n_i}{\Delta n_f}$ 将随之增加,而 $\frac{\Delta n_f}{\Delta n_i}$ 将减小,最终导致单脉冲能量增加。所以,单脉冲能量 $E_p$ 与抽运功率成正比,即

$$P_{out} = f^* E_p \quad (6)$$

因此,抽运功率的增大将导致重复率和单脉冲能量的增大,进而使得输出功率也增大。

### 4.2 输出镜透过率对输出脉冲的影响

随着输出镜透过率的增加,重复率逐渐减小。其原因在于,随着输出镜透过率的增加,腔内的损耗增大,导致阈值增大。这样,在抽运功率和激光器其它参数不变的情况下,‘漂白’被动调Q晶体所需要的时间就会变长,调Q脉冲的间隔就会增大,于是输出脉冲序列的重复率减小。

随着输出镜透过率的增加,脉冲宽度逐渐增大。其原因在于,随着输出镜透过率的增加,腔内损耗将变大,脉冲产生前的反转粒子数 $\Delta n_i$ 则变小,即腔内的储能减小。同时, $\Delta n_i$ 的大小是由被动调Q晶体的特性决定的,基本不变。由于脉冲宽度 $\tau_p$ 与 $\frac{\Delta n_i}{\Delta n_f}$ 成反比<sup>[2]</sup>,所以随着 $\frac{\Delta n_i}{\Delta n_f}$ 的减小,脉冲宽度 $\tau_p$ 增大,也就是说,随着输出镜透过率增加,脉冲宽度增大。

输出镜透过率增加过程中输出功率存在一个最大值。其原因在于,输出镜的透过率过大或者过小都是不合适的,过大的透过率虽然可以输出更强的光,但是它使得腔内损耗变大,腔内的储能变小,这样输出的光脉冲的脉宽会比较宽,峰值功率比较小。反之,过小的透过率虽然使得腔内的损耗减少,腔内的光强变大,但是输出的光强由于输出镜透过率太小使输出功率也变小。

对于脉冲抽运固体激光器而言,输出镜典型的最佳透过率<sup>[2]</sup>在50%~70%之间,而连续抽运固体激光器输出镜最佳透过率在2%~20%之间。对于主动调Q激光器,其最佳的输出镜透过率是根据腔内的增益和损耗参数来进行选取的。被动调Q激光器的最佳透过率的选取还应当考虑到有利于腔内反转粒子数的积累。如果提高了输出镜的透过率,腔内的光子数密度增大,这样被动Q开关的‘漂白’时间就变短了,腔内的反转粒子数只能积累到较低的水平,输出脉冲的峰值功率也会比较低。所以在被动调Q激光器中,一般取输出镜透过率比最佳值稍低一些。实验中的最佳透过率可以从图4(c)上看出,大约为15%,与理论值基本符合。

### 4.3 腔长对输出激光脉冲参数的影响

随着腔长的增加,重复率逐渐减小,输出功率也减小,但脉冲宽度明显增大。

应当指出的是,实验中增加腔长的方式为:固定腔内其他器件,移动输出镜来增加腔长。谐振腔内的光束分布<sup>[5]</sup>为

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} \quad (7)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{f\lambda}{\pi}} \quad (8)$$

$$f^2 = \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{[(L - R_1) + (L - R_2)]^2}$$

式中,  $L$  为腔长;  $z$  为被动调Q晶体的位置;  $R_1$  为有限值(由于热效应);  $R_2$  趋于无穷大;  $f$  为稳定腔等效为共焦腔时的焦距;  $\omega(z)$  为被动调Q晶体处的光束半径。根据(7)、(8)式进行数值计算,得出的结果如图5(d)所示。图5(d)表明在腔长变化范围内,随着腔长的增加,被动调Q晶体上的光斑尺寸变大,光功率密度变小。于是,‘漂白’被动调Q晶体所需要的时间变长,2个脉冲之间的时间间隔变长,输出脉冲序列的重复率变小。

由于脉冲宽度与光子寿命成正比,同时光子寿命又与腔长成正比,故随着腔长的增加,脉冲宽度也增加<sup>[6]</sup>。

腔长的增加使  $\frac{\Delta n_i}{\Delta n_t}$  减小,导致单脉冲能量减小;同时由于输出脉冲序列的重复率减小,根据(3)式可知,输出功率也减小。

### 4.4 被动调Q晶体的初始透过率对输出的影响

较低的初始透过率对应着脉冲序列的重复率较低。其对应的阈值比较高,这样在泵浦功率保持

不变的情况下,增益到阈值需要较长的时间,于是2次‘漂白’可饱和吸收体的时间间隔变长,延长了调Q的周期,从而减小了脉冲序列重复率。

较低的初始透过率对应着脉冲序列的脉冲宽度较窄。其原因在于,腔内损耗  $\alpha$  与光子寿命成反比,即与脉冲宽度成反比。较低的初始透过率对应着较高的腔内损耗  $\alpha$ ,于是具有较低初始透过率的Q开关材料就得到较窄的脉冲宽度。

由于实验中可用的被动调Q晶体数目有限,图6(a)和6(b)都是理论模拟的结果。当抽运电流均为14.5 A,腔长均为5.5 cm,输出镜透过率为11.2%时,91.03%的Cr:YAG晶体可获得16.978 ns,21.627 kHz的脉冲序列;82.53%的Cr:YAG晶体可获得13.192 ns,1.229 3 kHz的脉冲序列。

## 5 结论

本文对LD抽运的Cr:YAG被动调Q Nd:YAG固体激光器输出特性进行了实验研究,获得了以下结果:抽运功率是影响输出脉冲序列的最重要因素,随着抽运功率的增大,重复率增加,脉宽减小。腔长的增加使得重复率减小,脉冲宽度增加。同时输出镜存在一个最佳的透过率,可使输出功率最大并且初始透过率对输出有一定的影响。

由实验结果可以看出,要提高脉冲序列的重复率,首先必须提高抽运功率;采用大功率LD来抽运,还可以采用短谐振腔结构。应当选择适当的输出镜透过率和Cr:YAG的初始透过率,因为合适的输出镜透过率可以提高输出功率。这些规律对于被动调Q激光器的实际应用有一定的指导意义。

### 参考文献:

[1] Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu, et al. Optimization of Cr<sup>4+</sup>-doped saturable-absorber Q-switched lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(12): 2286-2294.

[2] Koechner W. 固体激光工程[M]. 北京: 科技出版社, 2002.

[3] 杨昱冰, 王石语, 文建国, 等. 大功率抽运DPL被动调Q的计算机模拟[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(2): 129-132.

[4] John J Degnan. Optimization of passively Q-switched lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1995, 31(11): 1890-1901.

[5] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.