

文章编号: 0258-7025(2005)01-0049-04

# 调 Q 激光自锁模与脉冲峰值功率的输出不稳定性

吴 边

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 从理论上解释了调 Q 钕玻璃, YAG 激光器存在的模式自锁定现象所引起的调 Q 激光脉冲功率输出的不稳定性。为了从根本上消除模式自锁定所引起的调 Q 激光脉冲波形的随机调制现象, 实验采用预激光调 Q 与法布里-珀罗(F-P)标准具平板组合技术, 获得了脉宽约为 40 ns, 脉冲能量为 85 mJ 的稳定调 Q 输出, 其脉冲能量稳定性和脉冲功率稳定度分别为  $\pm 2\%$  和  $\pm 3\%$ , 激光输出的谱线宽度为  $6.9 \times 10^{-4}$  nm。单纵模输出几率达到 89%。采用上述方法, 使自锁模式的调制现象得到有效地消除, 从而使调 Q 激光器可以稳定地输出。

**关键词** 激光技术; 调 Q 激光; 模式自锁定; 单纵模; 脉冲功率稳定性

**中图分类号** TN 248.3<sup>+</sup>4 **文献标识码** A

## Model Target Existed in Q-Switched Laser and Instability of Output Pulse Power

WU Bian

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** In this paper, the instability of Q-switched laser pulse power output which was resulted from the phenomena of model target existed in Q-switched Nd-glass and YAG laser is reported. In order to dispel the phenomena of Q-switched laser waveform random modulation fundamentally, the pre-Q-switching and the Fabry-Perot (F-P) standard panel assemble were used, a steady Q-switched laser output in pulse width of 40 ns and pulse energy of 85 mJ was obtained. The stabilities of pulse energy and pulse power were  $\pm 2\%$  and  $\pm 3\%$ , respectively, line width was  $6.9 \times 10^{-4}$  nm, the probability of single longitudinal mode output was 89%. With above-mentioned method, the modulating phenomena of mode target was eliminated, the stable pulse power output of Q-switched Nd-glass laser was realized.

**Key words** laser technique; Q-switched laser; mode target; single longitudinal mode; stability of pulse power

### 1 引 言

激光调 Q 技术是目前最为重要的激光单元功能技术之一。激光调 Q 的理论与技术已日趋成熟, 调 Q 激光器已获得极为广泛的应用。目前存在的一个深层次的问题是调 Q 激光脉冲波产生的随机性调制现象而引起的激光脉冲功率(脉冲峰值功率)输出的不稳定性。这不仅严重制约着调 Q 激光器

的更好应用, 同时也将因激光脉冲峰值功率的突然增大而加剧调 Q 高功率激光器系统中的光束自聚焦破坏, 对调 Q 激光器系统的安全运行及激光束质量的提高造成严重影响。因此, 深入理解引起调 Q 激光输出脉冲峰值功率不稳定性的物理原因, 探索实现调 Q 激光脉冲功率稳定输出的有效技术途径, 有着十分重要的意义<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2003-06-13; 收到修改稿日期: 2004-04-29

作者简介: 吴 边(1972—), 男, 江苏无锡人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生, 主要研究方向为激光器件及其应用。E-mail: bianwu@vip.sina.com

## 2 调 Q 激光脉冲输出功率不稳定性及其物理原因

### 2.1 调 Q 激光器输出的不稳定性

目前对调 Q 激光器的输出稳定性,通常都只注意到输出激光脉冲能量的稳定性问题。由于调 Q 激光的所有应用几乎都与激光脉冲功率(脉冲峰值功率)有关,因而调 Q 激光器输出稳定性重点在于输出脉冲功率的稳定性,而不只是输出激光脉冲能量的稳定性。通常的调 Q 激光器,特别是最重要的电光调 Q 激光器,其输出激光脉冲波形实际上总是存在一定程度的调制现象<sup>[2,3]</sup>,而且调制完全是随机出现的,由于调制深度的不同,在这种情况下即使激光脉冲能量实现了稳定,输出激光脉冲峰值功率仍将有很大的不稳定性。图 1(a),(b)分别给出了 7834 存贮示波器记录下来的钕玻璃电光调 Q 激光器与 YAG 电光调 Q 激光器输出激光脉冲波形存在的不同深度的调制现象。可以看出,电光调 Q YAG 激光器输出激光脉冲波形存在的调制比钕玻璃电光调 Q 激光器更为严重。

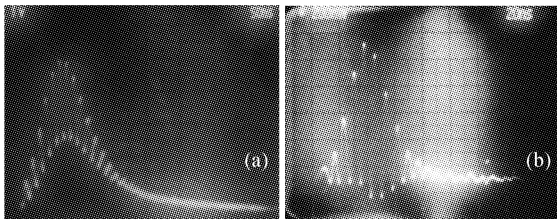


图 1 钕玻璃电光调 Q 激光器(a)和 YAG 电光调 Q 激光器(b)的自锁模波形

Fig. 1 Waveform of self-mode-locking Q Nd-glass laser (a) and YAG laser (b)

在这种情况下,要实现调 Q 激光器脉冲功率的稳定输出,必须:1) 实现输出激光脉冲能量的稳定;2) 实现输出激光脉冲波形的光滑无调制。

由于实现调 Q 激光脉冲功率的稳定输出,必须有效消除调 Q 激光脉冲波形存在的随机性调制现象,故所涉及的物理问题与技术问题要比实现激光脉冲能量的稳定输出困难复杂得多。

### 2.2 调 Q 激光脉冲波形产生调制、引起脉冲功率不稳定输出的物理原因

对调 Q 激光脉冲波形调制现象产生的物理原因,目前比较一致的理解是激光模式自锁定(相邻纵模拍频信号的锁定)的结果,即这些存在于调 Q 脉冲波形的调制实际上是自锁模序列脉冲。由于自锁模

通常是不稳定的,每次调 Q 过程中被锁定的纵模数不尽相同,被锁定的纵模数越多,调 Q 脉冲波形存在的调制深度就越大,激光脉冲峰值功率就越高;反之,调制深度就越小,脉冲功率就越低,具有随机特征。因而造成了调 Q 激光脉冲功率的不稳定输出。

## 3 提高激光脉冲功率输出稳定性的技术途径

### 3.1 可能的技术途径

鉴于调 Q 激光脉冲波形产生的调制、引起激光脉冲功率不稳定输出的物理原因是调 Q 激光模式的自锁定,要提高调 Q 激光脉冲功率的输出稳定性,可以采取的技术途径有:1) 设法使模式自锁定所必要的频率与相位条件得不到很好的满足;2) 使尽可能多的纵模参与振荡,减少被锁定的纵模数目与总的振荡纵模数目比值;3) 实现单纵模运转。

在以上三种技术途径中,最为有效的是实现单纵模运转。

### 3.2 实现单纵模运转的技术途径

为了使调 Q 激光器在实现单纵模运转的同时,能保持激光的高功率输出,采用预激光调 Q 与法布里-珀罗(F-P)标准具平板组合技术途径。

#### 3.2.1 预激光调 Q 过程

激光器不同横模的损耗是不同的,同一横模的不同纵模的增益是不相同的,通常  $TEM_{00}$  模的损耗最小( $r_{mm} = r_{00}$ ),与中心频率对应的纵模受激辐射截面最大( $\sigma = \sigma(\nu_0)$ ),即增益最大,与之相应的临界振荡条件要求最低( $N_{co} = r_{00}/[\sigma(\nu_0)l]$ , $l$  为激光介质长度),最容易建立振荡。采用由成形电缆所形成的高压方波驱动的电光 Q 开关,由于其可对调 Q 激光器腔的损耗进行精密控制,即精密控制激光临界振荡条件,故通过预激光调 Q 不仅可对振荡横模实现有效的控制选择(选出与最小损耗对应的  $TEM_{00}$  模),同时可以实现对振荡纵模的控制选择,原则上同样可以选择出临界振荡条件最低的纵模( $r = r_0$ ),但由于  $\nu = \nu_0$  纵模与附近相邻纵模之间的净增益差异甚小,仅靠精确控制施加于电光晶体上的电压值难以实现单纵模振荡,为此在腔内插入一个法布里-珀罗平板( $R = 2 \times 4\%$ ),以增大  $\nu = \nu_0$  附近相邻纵模之间的增益差异<sup>[4,5]</sup>。

#### 3.2.2 预激光调 Q 组合法布里-珀罗平板实现单纵模运转原理

由于预激光阶段是在阈值附近振荡,加上法布

里-珀罗平板所具有的纵模选择作用,起振的纵模数少;且激光形成时间长,纵模之间的竞争较为充分,易形成单纵模振荡。当预激光脉冲形成后,通常在第一个尖峰脉冲的持续时间( $\mu\text{s}$ 量级)内,将 Q 开关不失时机地打开,使已形成的预激光脉冲(单纵模)在腔内来回振荡获得足够的放大。为此,电光调 Q 开关管必须采用快响应的快速开关管,如冷阴极管、雪崩晶体管串等。图 2 给出了预激光调 Q 组合法布里-珀罗标准具平板钕玻璃激光器的光路排布。

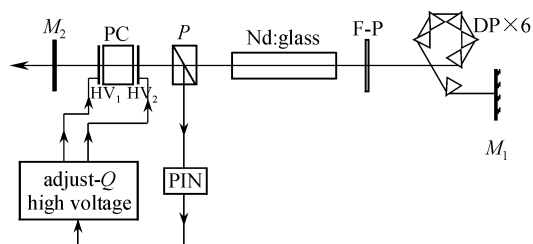


图 2 实验装置光路示意图

Fig. 2 Scheme diagram of experimental arrangement

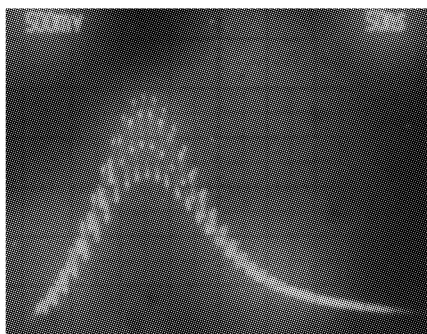


图 3 钕玻璃电光调 Q 激光器的自锁模波形

Fig. 3 Waveform of self-mode-locking Q-switched Nd-glass laser without inserting F-P

考虑到磷酸盐钕玻璃的增益带宽达 28 nm 之多,为使预激光调 Q 与法布里-珀罗组合技术对限制选择纵模更为有效,以进一步提高单纵模运转的几率,特在腔内插入了六块由超白 ZF<sub>6</sub> 加工而成的色散棱镜组。

工作物质为  $\phi 8 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的磷酸盐钕玻璃棒,法布里-珀罗平板厚度  $d = 1 \text{ mm}$ ,腔长为 800 mm,输出透过率  $T = 80\%$ 。

当激光器 Q 开关以普通调 Q 运转时(不插入法布里-珀罗平板),经测定输出激光线宽为 0.064 nm,激光脉冲波形如图 3 所示,存在严重的自锁模调制。

在预激光调 Q 运转下,由于当 Q 开关完全打开后,所有的纵模都将起振,故必须在这些后起振的纵

模还未形成激光之前,迅速将 Q 开关关闭。为此必须精确控制 Q 开关开启的时间长短,即必须精确控制施加到电光晶体上高压方波的时间宽度。故采用由成形电缆形成的高压方波技术(如图 4(a),(b)),高压方波的时间宽度  $\Delta t = 2l'/v$ ,  $l'$  为成形电缆的长度,  $v$  为电信号在电缆中传播的速度( $\text{m}/5 \text{ ns}$ )。高压方波的波形如图 5 所示。

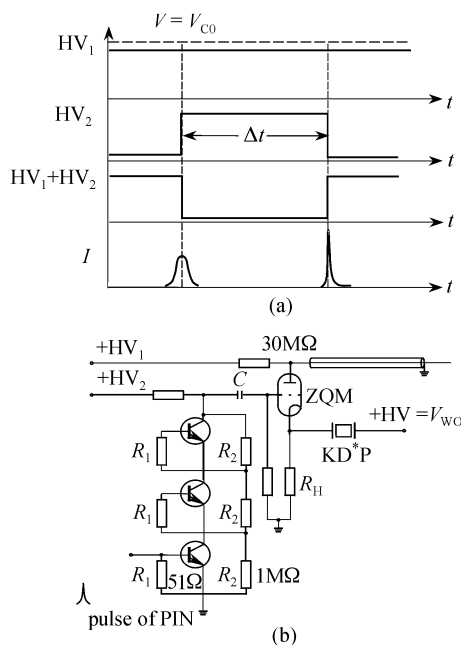


图 4 高压方波原理图(a)和专用电路图(b)

Fig. 4 (a) Principle diagram of square waveform; (b) Special circuit diagram of high-voltage circuit

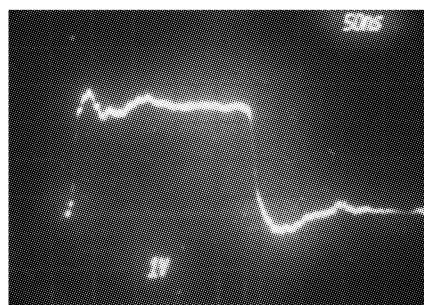


图 5 高压方波输出波形

Fig. 5 High voltage output waveform

## 4 实验结果分析

采用预激光选纵模调 Q 技术途径,获得了脉冲波形光滑无调制的高功率激光稳定输出。实现单横模( $\text{TEM}_{00}$ )输出(如图 6 所示)和单纵模输出(如图 7(a)所示)。使用 Tex 7834 型 400 MHz 存储示波器对锁模脉冲波形进行观察,激光输出脉宽约为 40

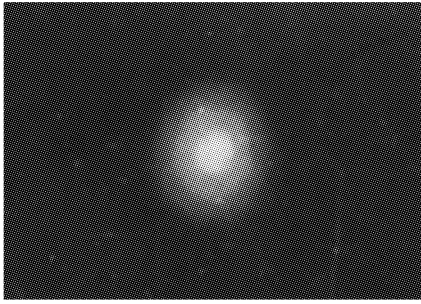


图 6 单横模输出光斑  
Fig. 6 Facula of TEM<sub>00</sub>

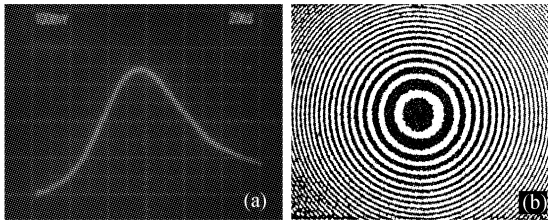


图 7 单纵模输出  
(a) 激光波形; (b) 光谱环

Fig. 7 Laser waveform of single longitudinal mode  
(a) laser waveform (20 ns/div); (b) F-P spectrum

ns, 激光脉冲能量为 85 mJ。

由法布里-珀罗标准具(厚 5 cm)所测得的光谱环见图 7(b)所示, 根据实验测量计算得到激光器输出的谱线宽度  $\Delta\lambda_s = 6.9 \times 10^{-4}$  nm, 而谐振腔的相邻纵模间隔为  $\Delta\lambda = \lambda_0^2 / (2L) = 7.1 \times 10^{-4}$  nm, L 为谐振腔的腔长(光学长度), 由此说明在此线宽内只

能有一个纵模实现了单纵模输出。激光脉冲能量稳定性和脉冲功率稳定性分别为  $\pm 2\%$  和  $\pm 3\%$ 。

实验测量 300 次的激光输出, 得到 268 次的单纵模输出, 单纵模输出几率达到 89%。

总之, 由于采取上述方法, 使自锁模式的调制现象得到有效的消除, 从而使调 Q 激光器可以稳定地输出调制度很小而波形相当光滑的激光脉冲。

致谢 谨对中国科学技术大学强激光实验室在实验过程中给予的技术合作及有益讨论表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Dong Jun, Deng Peizhen, Zhang Yinghua *et al.*. Performance of Cr, Yb: YAG self-Q-switched laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3):193~196  
董俊, 邓佩珍, 张影华等. Cr, Yb: YAG 微片的自调 Q 激光特性[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3):193~196
- 2 Guo Dahao, Wu Hongxing, Wang Shengbo *et al.*. Self-mode-locking in silicate glass laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(3):198~201  
郭大浩, 吴鸿兴, 王声波等. 掺钕硅酸盐玻璃激光器中的自锁模现象[J]. *光学学报*, 1991, **11**(3):198~201
- 3 Fan Liming, Zhu Guoying, Chen Shisheng *et al.*. Self-mode-locking in Nd: YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(1):16~20  
樊立明, 朱国英, 陈时胜等. Nd: YAG 激光器中的自锁模[J]. *光学学报*, 1992, **12**(1):16~20
- 4 Lan Xinju, Yao Jianquan, Li Yu *et al.*. *Laser Technique* [M]. Beijing: Science Press, 2000. 184~186  
蓝信钜, 姚建铨, 李昱等编. *激光技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 184~186
- 5 M. Born, E. Wolf. *Principle of Optics* [M]. Oxford London: Pergamon Press, 1964. 256