

文章编号: 0258-7025(2008)10-1469-04

# 低时间抖动的增益开关型被动调 Q 激光器

徐美健 蒋东宾 蒋新颖 段文涛 党 钊 张雄军 於海武 隋 展

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 被动调 Q 激光器的输出抖动一般较大, 为了降低这一输出时间抖动, 同时实现激光器的小型化, 可以根据增益开关工作原理, 利用电源控制抽运功率密度变化, 实现被动调 Q 情况下的增益开关。根据这一原理研制了环形激光二极管(LD)抽运增益开关调 Q 激光器。这种新型被动调 Q 激光器的输出能量为 30 mJ, 输出脉冲宽度约 16 ns。实验中将传统的两套抽运源减少为一套, 通过控制电源波形直接形成抽运功率的增益台阶脉冲, 减少了影响时间跳动的因素。多次统计测量结果表明, 激光脉冲与电源输出外触发信号的时间抖动小于 1  $\mu$ s。根据测量的抽运预脉冲功率稳定性和阶跃脉冲的瞬时抽运功率计算的输出抖动与实验结果基本相符。

**关键词** 激光器; 激光二极管抽运激光器; 被动调 Q; 时间抖动; 增益开关

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083510.1469

## A Low Time Jittering Passive Q-switching Laser with Gain Switching

Xu Meijian Jiang Dongbin Jiang Xinying Duan Wentao

Dang Zhao Zhang Xiongjun Yu Haiwu Sui Zhan

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** Generally, a passive Q-switching laser has a wider time jitter. In order to reduce the jitter time and the size of the laser, gain switching principle is researched. According to the principle, the pumping power density is controlled by the power which generates a step current. A Q-switched laser pumped with a ring laser diodes according to gain switching principle is developed. A 30 mJ output energy and about 16ns pulse duration of this kind of passive Q-switching laser are obtained. There is only one set of pumping source to be used in the experiment. Gain step pulse is directly obtained by controlling the waveform of current, and the factors which affect the laser pulse jitter are reduced by this way. Statistic reports of multi-measurement indicate that the laser pulse jittering time is less than 1  $\mu$ s comparing with the trigger signal. According to the measured stability of pre-pumping and the transient power of the step pulse, the jitter time  $\Delta\tau_d$  is calculated, which agrees well with the experimental result.

**Key words** lasers; laser diode pumped laser; passively Q-switching; time jittering; gain switching

## 1 引 言

高效率、高功率 Q 开关固体激光器可以使用主动调 Q 和被动调 Q 技术。相对于主动调 Q, 被动调 Q 激光器具有结构简单、体积小、重量轻, 无需外加调 Q 电源的优点<sup>[1~3]</sup>。但是, 被动调 Q 激光器的脉冲输出稳定性较差, 无法满足在需要精确时间时序方面的应用。模式间的竞争、横模之间拍频以及抽运功率的稳定性被认为是造成脉冲输出不稳定的原因<sup>[4,5]</sup>。一般情况下, 在腔内加入选模元件, 控制抽

运源的输出稳定性是常用的方法。Jacob B. Khurgin 等报道了一种结合增益开关和小型激光二极管(LD)抽运的固体激光器被动 Q 开关的新方法<sup>[6]</sup>, 利用由一个长的低强度脉冲紧跟着一个短的高强度脉冲形成的复合抽运脉冲来减少时间跳动, 已将时间跳动减小 10 倍以上。本文沿用文献<sup>[6]</sup>的方法, 设计研制了环形 LD 抽运的被动调 Q 增益开关激光器。不同的是文献<sup>[6]</sup>利用两套抽运系统, 分别提供较低功率的长脉宽预脉冲和高功率短脉宽的

收稿日期: 2007-12-27; 收到修改稿日期: 2008-01-30

基金项目: 中国工程物理研究院重点基金(2007A05001)资助项目。

作者简介: 徐美健(1979—), 男, 辽宁人, 研究实习员, 目前主要从事重复频率固体激光技术的研究。

E-mail: flrc2003@163.com

阶跃脉冲,利用精确的时间控制技术将两脉冲严格按照时序运行。本文利用一套电源提供抽运,通过控制电源波形直接形成抽运功率的增益台阶脉冲,避免了同步系统的不稳定对时间跳动的影响,同时也满足了系统小型化的需要。

## 2 实验装置及原理分析

实验装置如图 1 所示。谐振腔为由介质棒和调 Q 晶体构成的平行平面腔,激光器总腔长约 120 mm。介质棒为长 30 mm,直径 4 mm 的 Nd:YAG 晶体,采用环形 LD 侧面抽运。LD 阵列由 3 个环状并排组成,每个环满功率为 1.25 kW,共 3.75 kW。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  调 Q 晶体厚度为 1 mm,其初始透过率为 50%,激光器采用由增益开关控制的被动调 Q 工作方式。

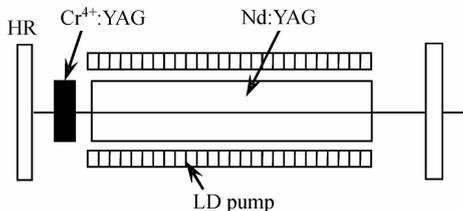


图 1 被动调 Q 激光器光路图

Fig. 1 Schematic of passive Q-switching laser

被动调 Q 增益开关激光器的工作原理<sup>[5~10]</sup>如下:腔的损耗(Q 值)始终不变,它的高储能(高粒子数反转)是由极高抽运速率的纳秒级短脉冲抽运来实现的,即依靠在极短的时间内获得高增益而获得激光巨脉冲。其运行机制可以分为三个阶段:

第一阶段为预抽运过程,即图 2(a)中  $t_1$  部分。采用低于阈值的抽运功率将介质中的反转粒子数抽运到接近初始反转粒子数的临界区域,为下一阶段的 Q 开关的开启积累足够的反转粒子数。第二阶段在上一阶段抽运的基础上叠加一个短脉宽、高功率的脉冲( $t_2$  部分),在高强度的抽运脉冲激励下,原本已接近临界区域的上能级反转粒子数将迅速超过阈值形成激光输出,大大缩短了脉冲发生的不确定度。第三阶段,激光输出完成,抽运脉冲恢复为低功率抽运状态,为下一周期的激光输出做好准备。

对于实际运行的被动调 Q 器件,阈值反转浓度可以在一定的范围内启动 Q 开关,即  $N_{G,th} + \delta N_{G,th}$ 。 $N_{G,th}$  是调 Q 状态下的粒子数阈值反转密度,抽运功率与激光输出时间抖动关系如图 3 所示。阈值反转的时间抖动  $\delta t$  主要与抽运功率在  $\delta N_{G,th}$  范围内作用时间的长短有关,高的抽运功率在较短时间内使反

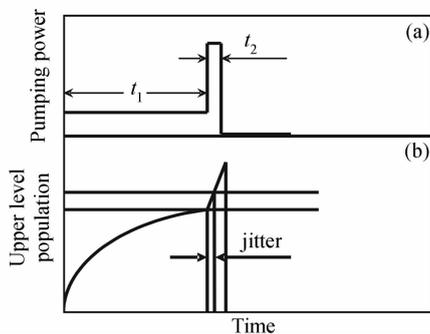


图 2 增益开关工作原理

Fig. 2 Operating principle of gain switching

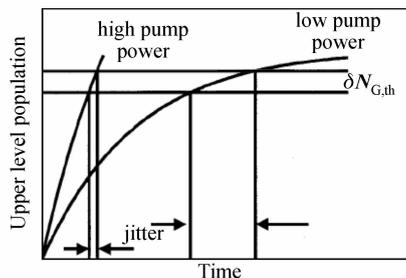


图 3 抽运功率与时间抖动的关系

Fig. 3 Relationship between pumping power and timing jitter of laser output

转粒子数超过阈值,形成激光脉冲输出,因此相对低功率状态有较小的时间抖动。增益开关正是利用这一原理,首先利用低功率预脉冲将调 Q 晶体的反转粒子数抽运到其反转的临界状态,然后进行一个持续时间短、功率高的脉冲抽运,使反转粒子数迅速超过阈值,形成激光输出,有效地减小输出时间抖动。

通常实现增益开关效果可以通过两种方式,如图 4 所示。第一种方式,利用两套抽运系统,即一套抽运系统提供较低功率的长脉宽预脉冲,另一套提

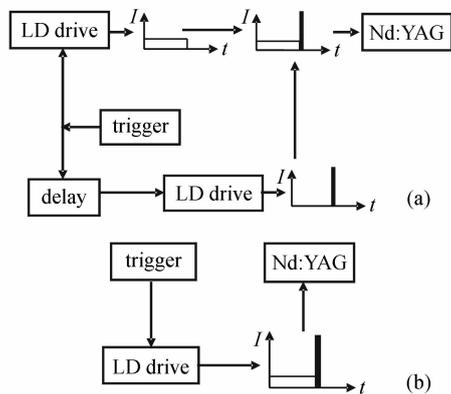


图 4 增益开关实现方式。(a) 两套抽运源; (b) 一套抽运源

Fig. 4 Performance method of gain switching. (a) two sets pumping source; (b) one set pumping source

供一个高功率短脉宽的阶跃脉冲,利用精确的时间控制技术将两脉冲严格按照时序运行。这种方式对电源的研制要求相对较低,但是要有两套独立的抽运源,并且它们在工作时间上必须保持精确的相对延时,两套系统的工作时间误差是影响激光输出抖动的关键因素之一。另一种方式是由一套电源提供抽运,抽运功率的增益台阶脉冲是通过控制电源波形直接形成的。这种方式对电源的要求相对较高,电源除了提供较为稳定的预脉冲外还要形成上升时间短、输出稳定的阶跃脉冲。两者比较,第二种方式无需外加同步系统,并且需要的抽运系统较少,因此更有利于系统的小型化。

### 3 实验结果与分析

采用如图 5 所示波形的电源进行抽运,预抽运脉冲宽度约  $200 \mu\text{s}$ ,阶跃脉冲宽度为  $9.8 \mu\text{s}$ 。实验中,阶跃脉冲电流值取  $90 \text{ A}$ ,调节预脉冲电流值,使反转粒子数恰好在  $200 \mu\text{s}$ 处达到激光阈值临界区域且达到稳定,此时电流为  $30 \text{ A}$ ,对应的抽运功率约  $1.8 \text{ kW}$ 。然后进行阶跃脉冲抽运,使激光在阶跃脉冲宽度内输出。图 6 为激光脉冲与电脉冲在输出时序上的关系,其中通道 1 为电源输出外触发信号,通道 2 为激光脉冲,通道 3 为 LD 输出端信号。由图 6

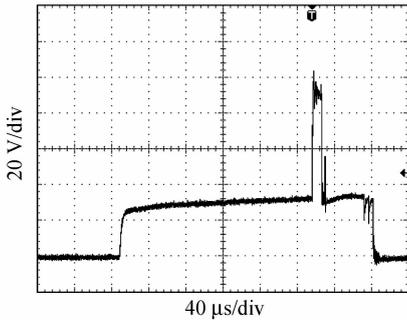


图 5 LD 驱动脉冲波形

Fig. 5 Output pulse shape of the LD driver

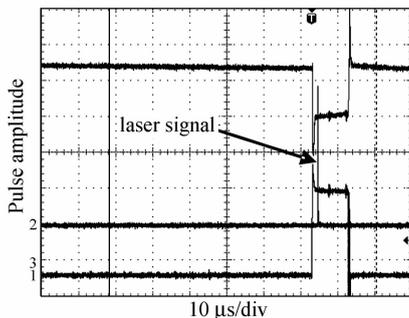


图 6 激光与电脉冲的时序关系

Fig. 6 Sequence of laser and driving pulse

可见,激光脉冲在阶跃脉冲作用时间内输出,说明阶跃脉冲已经工作。由于实验中环形 LD 并未采用主动冷却方式,因此激光器采取单次工作方式。激光波形如图 7 所示,其脉冲半峰全宽约为  $16 \text{ ns}$ ,此时激光输出能量约为  $28 \text{ mJ}$ 。

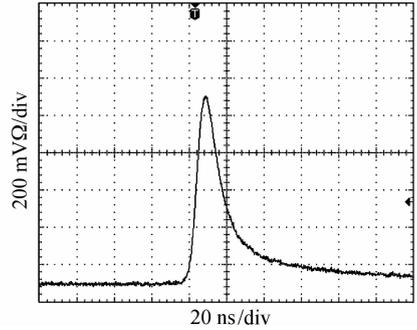


图 7 激光输出波形

Fig. 7 Output pulse shape of the laser

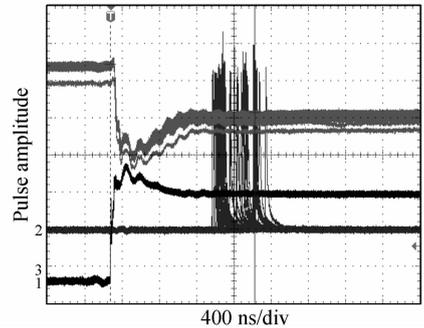


图 8 激光输出时间抖动

Fig. 8 Time jittering of the laser output

利用光电探测器测量输出激光与电源输出外触发信号之间的时间抖动关系,如图 8 所示。其中通道 1 为电源输出外触发信号,此信号作为触发的标准时间信号;通道 2 为激光输出信号累计。测试结果表明,电源外触发信号与电源输出的阶跃脉冲前沿相对稳定,两信号之间的时间晃动小于  $10 \text{ ns}$ 。40 发次发射的统计结果表明,所有被测发次与基准信号的时间抖动小于  $1 \mu\text{s}$ 。

由于采用  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  调 Q 晶体,其阈值反转密度反比于腔内光子寿命和增益介质的发射截面,正比于可饱和吸收体的掺杂浓度、体积、吸收截面(即可饱和吸收体的总吸收能力,吸收越大,阈值反转越高)。因此激光器达到阈值所需的时间<sup>[9]</sup>为

$$\tau_d = \tau_G \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}, \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为抽运功率对阈值抽运功率的比值,  $\tau_G$  为增益介质上能级光子寿命,对于式中  $\alpha$  有

$$\alpha = p_{\text{eff}} \tau_G / N_{G,\text{th}}^0, \quad (2)$$

$$p_{\text{eff}}(\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}) = \eta P / h\nu_L V, \quad (3)$$

式中  $N_{G,\text{th}}^0$  为上能级粒子数阈值密度, 实验中使用的调 Q 晶体的上能级粒子数阈值密度为  $1.43 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ;  $p_{\text{eff}}$  为激光上能级的有效抽运速率,  $P$  为抽运功率,  $\eta$  为抽运耦合效率、吸收效率等总的乘积(此处取  $\eta = 0.6$ ),  $V$  为增益介质有效体积, 针对  $1.06 \mu\text{m}$  波长激光  $h\nu_L = 1.87 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。对于(1)式, 显然  $\alpha \Rightarrow \infty$  时,  $\tau_d = 0$ 。对(1)式微分, 有

$$\Delta\tau_d = \frac{\tau_G}{1-\alpha} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\tau_G}{1-\alpha} \frac{\Delta P}{P}。 \quad (4)$$

对电源的输出电流稳定性的测试结果表明, 抽运电流稳定性优于 1%。根据电流与功率的对应关系, 抽运功率稳定性约为 1%。由(1)~(4)式计算不同抽运参数下激光输出抖动  $\Delta\tau_d$ 。对于 1.8 kW 和 3.75 kW 的抽运功率对应的时间抖动分别为  $5 \mu\text{s}$  和  $1.2 \mu\text{s}$ 。实验结果与理论结果符合得较好。

## 4 结 论

设计研制了环形 LD 抽运的被动调 Q 增益开关激光器, 实验测试了在增益开关作用下激光输出时间的抖动范围, 获得了小于  $1 \mu\text{s}$  的时间抖动结果。实验表明, 增益开关技术对提高被动调 Q 激光器输出脉冲时间稳定性有较好改善。分析认为, 抽运源输入功率的稳定性和阶跃脉冲功率强度是影响输出时间抖动的主要原因。

## 参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 39~45  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 39~45
- 2 Lu Changyong, Li Li, Liu Xu *et al.*. Laser diode-pumped

- passively Q-switched laser with corner-cube resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1228~1231  
卢常勇, 李莉, 刘旭等. 角锥棱镜腔激光二极管抽运被动调 Q 激光器[J]. 光学学报, 2007, **27**(7):1228~1231
- 3 Liang Tian, Ding Zheng, Qi Wenzong. Numerical simulations of upconversion effects in passively Q-switched solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):791~796  
梁田, 丁征, 齐文宗. 被动调 Q 固体激光器上转换效应的数值模拟[J]. 中国激光, 2007, **34**(6):791~796
- 4 Yang Yubing, Wang Shiyu, Cai Defang *et al.*. Experiment on output instability of passively Q-switched laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1):60~65  
杨昱冰, 王石语, 蔡德芳等. 被动调 Q 激光器输出波动因素的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(1):60~65
- 5 Wang Weiyu, Gong Mali, Liu Xingzhan *et al.*. Stability of passively Q-switched solid-state lasers and pre-pumping mechanism [J]. *Laser & Infrared*, 2000, **30**(2):74~77  
王为宇, 巩马里, 刘兴占等. 被动调 Q 固体激光器的稳定性及增益预抽运技术[J]. 激光与红外, 2000, **30**(2):74~77
- 6 Jacob B. Khurgin, Feng Jin, Gregory Solyar *et al.*. Cost-effective low timing jitter passively Q-switched diode-pumped solid-state laser with composite pumping pulses [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6):1095~1097
- 7 Hong Zhi, Chen Jun, Ge Jianhong. Self Q-switched controllable output of LD pumped  $\text{Cr}^{4+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  codoped YAG laser using pre-pumping method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(10):913~916  
洪治, 陈军, 葛剑虹. 用预抽运技术实现  $\text{Cr}^{4+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  双掺 YAG 激光器自调 Q 可控输出[J]. 光子学报, 2000, **29**(10):913~916
- 8 Zhang Guowei. Temporal characteristics of the gain-switched tunable solid-state laser-theory [J]. *Laser Technology*, 1995, **19**(3):129~134  
张国威. 增益开关型固体可调谐激光器的时间特性—理论[J]. 激光技术, 1995, **19**(3):129~134
- 9 Hu Miao, Chen Jun, Ge Jianhong *et al.*. Temporal characteristics of the gain-switched microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):475~480  
胡淼, 陈军, 葛剑虹等. 增益开关型微片激光器的时间特性[J]. 中国激光, 2007, **34**(4):475~480
- 10 Gong Mali, Yan Ping, Xie Tao *et al.*. Study of pre-pumping mechanism for passively Q-switched lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):585~589  
巩马里, 闫平, 谢韬等. 被动 Q 开关激光器的预抽运技术[J]. 中国激光, 2003, **30**(7):585~589