

文章编号: 0258-7025(2004)08-0915-04

# 实用的 LD 抽运预激光电光调 Q 单纵模激光器

林宏奂<sup>1</sup>, 隋 展<sup>1</sup>, 李明中<sup>1</sup>, 唐 军<sup>1</sup>, 张申金<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; <sup>2</sup> 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要** 使用设计新颖的双台阶脉冲发生器产生双台阶电脉冲, 为低压 KTP 晶体泡克耳斯盒提供调 Q 驱动, 将端面抛光的 Nd:YLF 棒置于激光腔中, 采用二极管激光器抽运, 通过调节第二台阶电脉冲的幅度和持续时间, 利用预激光和标准具效应的选模特性实现了 Nd:YLF 激光器稳定、低同步晃动的单脉冲、单纵模脉冲输出。脉冲宽度 6.7 ns, 脉冲能量 1.156 mJ, 峰值功率 0.17 MW, 单纵模几率 100%, 单脉冲能量稳定度 3%, 调 Q 触发电脉冲和输出激光脉冲相对时间抖动 < 4 ns。激光器外围电路简单, 系统可靠性高, 结构简单紧凑, 容易调整。

**关键词** 激光技术; 固体激光器; 单纵模; 预激光; 标准具; KTP 晶体

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Practical Laser-Diode Pumped Prelase Electro -Optic Q-Switched Single-Longitudinal-Mode Laser

LIN Hong-huan<sup>1</sup>, SUI Zhan<sup>1</sup>, LI Ming-zhong<sup>1</sup>, TANG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Shen-jin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academic of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)  
(<sup>2</sup>College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** A single-longitudinal-mode Nd:YLiF<sub>4</sub> (Nd:YLF) laser pumped by laser diode array, using a novel two-step Q-switching driver for the low-voltage KTiPO<sub>4</sub> (KTP) Pockels cell was obtained. The amplitude and lasting time of the driver's second step pulse is adjustable and the Nd:YLF rod is end polished. Stable, low time jitter single longitudinal mode output was generated taking the advantages of pre-lase and etalon. The laser has produced pulse with width of 6.7 ns, energy of 1.156 mJ and a peak power of 0.17 MW. This laser holds the good single longitudinal mode probability of 100% and the stability of pulse energy of 3%. The time jitter between the Q-switching trigger and output pulse is less than 4 ns. The laser is easy to adjust and would have practical use in many fields with its simple peripheral electronic equipment and high reliability.

**Key words** laser technique; solid-state laser; single longitudinal mode; pre-lase; etalon; KTP crystal

## 1 引 言

单纵模激光器是高功率激光系统重要的注入光源, 同时在精密测量、彩色显示、全息照相、高分辨率光谱学等领域都有广泛的应用。由于半导体激光器输出稳定、长寿命, 单色性好, 用它作为抽运源, 激光器可以做得很小, 热效应低, 模式匹配好, 因此在单纵模激光器方面有很好的应用前景。已经发展了激

光二极管(LD)抽运预激光声光调 Q 单纵模激光器<sup>[1]</sup> 以及激光二极管抽运的预激光声光调 Q 锁模激光器<sup>[2]</sup> 等。本文采用新型双台阶脉冲发生器作为调 Q 驱动脉冲源以及低压 KTP 晶体泡克耳斯盒(半波电压约 800 V), 将端面抛光的 Nd:YLF 棒作为标准具置于平凹腔中使用 LD 侧面抽运, 利用预激光和腔内 F-P 效应的选模特性使激光器实现了稳定可靠的单脉冲、单纵模运转, 大大简化了光学和

收稿日期: 2003-10-14; 收到修改稿日期: 2004-04-12

作者简介: 林宏奂(1978—), 男, 四川成都人, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心硕士研究生, 主要从事固体激光技术的研究工作。E-mail: Happylin2003@hotmail.com

电学系统,具有实用价值。

## 2 理论分析

激光器中单纵模的产生是模式竞争的结果。利用不同纵模之间的增益差异,对腔内损耗进行调制,使欲得到的纵模损耗最小,通过模式竞争使其最终保存下来,实现单纵模振荡。根据 Sooy 的理论<sup>[3]</sup>,相邻纵模  $m$  和  $n$  在腔内经历  $q$  次往返后,对应功率  $P_m$  和  $P_n$  的关系可以用下式描述

$$\frac{P_m}{P_n} = \left( \frac{1-L_m}{1-L_n} \right)^q (1-L_m)^{q[(g_n/g_m)-1]}$$

其中  $L_m$  和  $g_m$  为模式  $m$  在腔内的往返损耗和增益系数; $L_n$  和  $g_n$  为模式  $n$  在腔内的往返损耗和增益系数。由于激光工作物质增益特性决定了  $g_n$  和  $g_m$  之间的差别很小,因此若要实现选模应使  $L_m$  和  $L_n$  的差别尽量大,同时尽量增大从噪声中建立起脉冲所需要的往返次数  $q$ 。对于前者,通过腔内插入标准具,利用 F-P 效应可以提高  $L_m$  和  $L_n$  的差别。对于后者,一般的调 Q 激光器,脉冲建立的时间是一定的,模式在腔内的往返次数较少,无法有效选模。而预激光调 Q 激光器克服了上述缺点,延长了脉冲建立时间,增大了模式的往返次数,从而提供了有效的选模机制。

预激光单纵模调 Q 激光器就是在加上电光调制低 Q 值的条件下,增加激光器受激辐射时间,使得在打开调 Q 开关时,激光器已处于单纵模准稳态运转,在抽运的后期打开 Q 开关,则可输出稳定的单纵模脉冲(如图 1 所示)<sup>[4]</sup>。可以看出,预激光实现选模的关键有两点:一是提高准稳态运转时的腔内损耗,使尽量少的靠近中心频率的纵模起振;二是增大准稳态运转的时间,提供尽量多的模式往返次数。然而,准稳态运转时的腔内损耗并不是越高越好,同时准稳态运转的时间也不是越长越好:损耗越大,预激光就越弱,但它消耗的上能级粒子数就越少,抽运的后期打开 Q 开关后剩余的上能级粒子数就越多,种子光获得的增益就越高,反之,损耗小,预激光就强,它消耗的上能级粒子数就多,种子光获得的增益就低,因此在保证单纵模输出的情况下,准稳态运转时的腔内损耗存在最佳值,使最终输出脉冲的能量最大,脉宽最短;准稳态运转的时间越长意味着预激光将消耗更多的上能级粒子数,这将使 Q 开关完全打开后输出的主脉冲能量降低,脉宽增大,在保证稳定单模输出情况下,应尽量减少准稳态运转的时间。

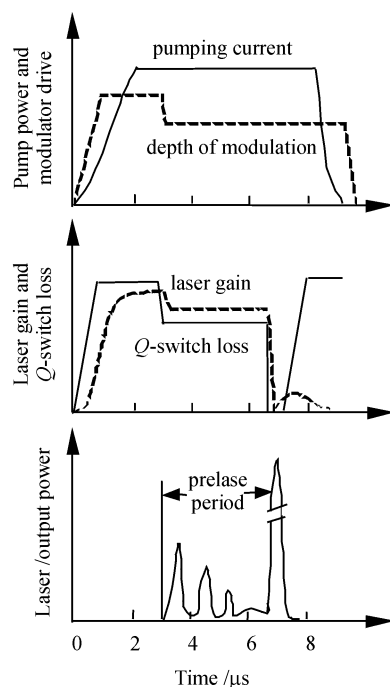


图 1 预激光激光器工作原理示意图:LD 抽运电流、调制深度、调 Q 损耗、脉冲输出的对应关系

Fig. 1 Schematic of LD current, depth of modulation, Q-switch loss pulse output to obtain the proper pre-ase conditions in the opt-electro oscillator

## 3 实验与结果

### 3.1 实验光路及设备

如图 2 所示,实验中使用薄膜偏振片(TFP)作为水平起偏器,它和 KTP 晶体泡克耳斯盒共同作用实现激光器的调 Q 运转。小孔确保激光器输出单横模脉冲。抽运模块由环形 LD 阵列, Nd:YLF 棒以及温控系统组成,在不同抽运功率下,可得 1~20 倍单程小信号增益。LD 阵列工作频率 1 Hz,最大输出功率 2.5 kW,实验所用 Nd:YLF 棒直径 3 mm,通光长度 30 mm,两端为不镀膜的抛光面。输出平平镜对 1053 nm 的透过率为 82%。平凹反射镜曲率半径 1 m,对 1053 nm 的反射率为 99.99%,谐振腔总长 20 cm,输出光脉冲经过分束器 ( $T_{1053 \text{ nm}} = 50\%$ ),一束直接进入能量计(Molelectron Energy Max 500),另一束光经过衰减器后通过光纤耦合进入高速光电管(Tektronix SD-43 8 GHz),并连接在高速示波器上(Tektronics TDS 694 3 GHz)。为泡克耳斯盒提供驱动脉冲的是双台阶脉冲发生器,泡克耳斯盒退压式工作,通过 DG535 数字脉冲发生器与 LD 抽运实现同步。Nd:YLF 棒处于薄膜偏振片

和 KTP 晶体之间,这样只需给泡克耳斯盒加上  $\lambda/4$  波电压(约 400 V)就可关断激光器,使之无法自由振荡,也就大大降低了双台阶脉冲发生器对电子器件的要求。

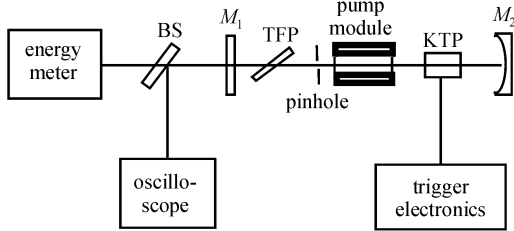


图 2 实验装置图  
Fig. 2 Experiment setup

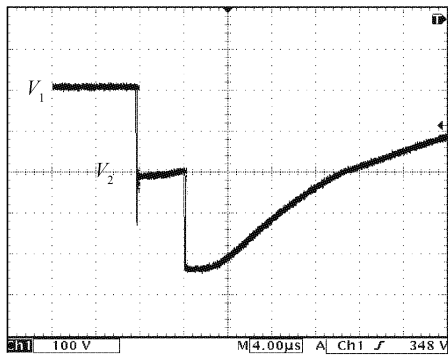


图 3 双台阶脉冲发生器工作波形  
Fig. 3 Two-step Q-switching pulse of the driver

### 3.2 实验及结果

#### 3.2.1 单纵模的实现

激光器实现单纵模输出的关键是双台阶脉冲发生器,其工作波形如图 3 所示。 $V_1$  为 440 V(1/4 波电压),  $V_2$  的输出幅度和持续时间可调,分别为 50 ~ 420 V 和 0 ~ 10  $\mu$ s。从理论分析部分可以看出,在腔内实现单纵模运转的关键有两点:一是使尽量少的靠近中心频率的纵模起振并尽可能提高相邻纵模间损耗;二是尽量增加各纵模在腔内的往返次数。实现第一点的关键是调节  $V_2$  幅度使激光器工作于高损耗状态,使少数靠近中心频率的模式起振和利用腔内标准具效应,对相邻纵模反射率实现调制,从而增大可能振荡纵模间的相对损耗,达到选频目的。第二点的关键在于调节  $V_2$  的持续时间,增大脉冲的建立时间,同时尽可能缩短腔长。在不加驱动电脉冲激光器自由振荡的情况下,仔细调节腔镜和 Nd:YLF 棒使激光器达到最佳输出状态。在加上驱动电脉冲后,调节  $V_2$  幅度和持续时间,在示波器观察到脉冲波形由多纵模叠加形成的拍频(如图 4(a)所

示)变成平滑干净的输出脉冲波形(如图 4(b)所示),在保证输出单纵模脉冲的情况下继续调节,直到脉冲输出能量最大为止。实验观测到当抽运光功率增大(提高 LD 的抽运电流),激光器仍能够输出单纵模脉冲,并且脉冲能量增大,脉宽变短。这是因为抽运功率增大后工作物质积累了更多的上能级粒子,预激光作为种子光在 Q 开关完全打开后腔内振荡获得了更高的增益。在阈值抽运电流为 37 A 时(抽运光功率约 600 W)稳定输出单纵模后,将 LD 抽运电流最大提高 3 A(抽运光功率提高约 60 W),得到了脉冲宽度 6.7 ns,脉冲能量 1.156 mJ 的脉冲输出,如果再增加抽运电流,输出的是多纵模脉冲。长时间对输出脉冲进行观测,单纵模几率达到 100%(连续 500 个)。

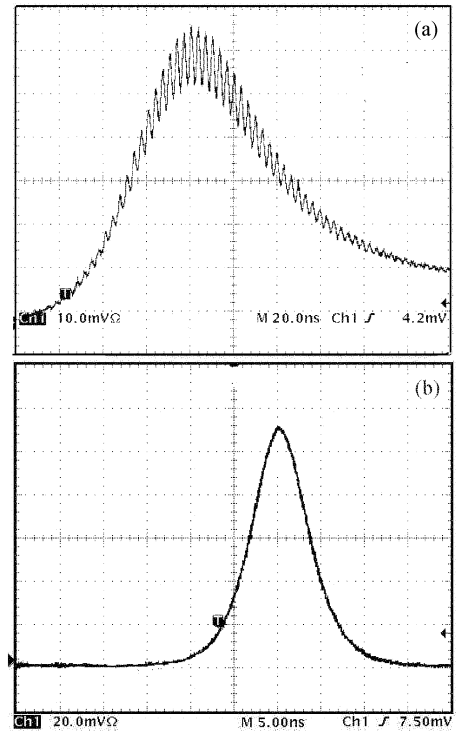


图 4 (a) 相邻纵模叠加的拍频现象;  
(b) 稳定的单纵模脉冲  
Fig. 4 (a) Beat frequency of two modes;  
(b) Stable single-longitudinal output pulse

#### 3.2.2 双脉冲现象及其抑制

当  $V_2$  幅度较小时(250 V 左右),输出双脉冲,如图 5 所示。提高示波器的时间分辨率观察两脉冲,发现它们实际上是多模振荡形成的拍频脉冲。可以将其解释为一种“双调 Q”现象。此时由于  $V_2$  幅度已经足够小,激光器实际上开始输出调 Q 脉冲,但 Q 开关并没有完全打开,因此工作物质的上能级粒

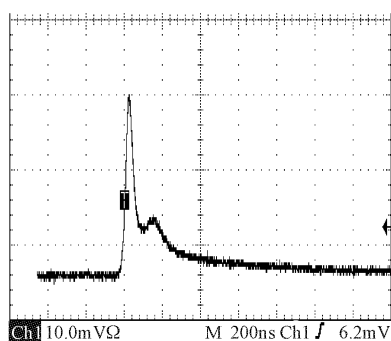


图 5 “双调 Q”现象

Fig. 5 “Double Q-switching” pulses

子没有消耗完,当 Q 开关完全打开后,剩下的上能级粒子释放能量,形成二次调 Q 脉冲输出。调节  $V_2$  持续时间,第二脉冲相对于第一脉冲的延时也随之变化。调节  $V_2$  幅度,两脉冲的相对幅度也随之改变:继续降低  $V_2$  幅度,第一脉冲幅度随之增强,第二脉冲随之减弱,最后激光器仅输出多纵模单脉冲;如果提高  $V_2$  幅度,情况则相反,第二脉冲幅度随之增强,而第一脉冲随之减弱,最后输出单纵模单脉冲。

实验中还观察到了另一种双脉冲现象,此时  $V_2$  幅度已经足够高仅产生预激光。它类似于图 5 所示的波形,只是第二脉冲的幅度要小得多,并且在主脉冲后几百纳秒范围内随机抖动。提高示波器的时间分辨率观察这时的双脉冲,二者都是光滑的,没有拍频现象。这实际上是主纵模偏离标准具透过峰相邻模式起振造成的<sup>[5]</sup>。由于用于冷却 Nd:YLF 棒的水温的波动,Nd:YLF 棒的长度也会因此随机波动,虽然长度波动范围极小,但也足够使得主纵模偏离标准具透过峰相邻模式起振,由于长度波动的随机性,副脉冲和主脉冲的相对时间位置也是随机的,这也是造成激光器输出不稳定的重要因素。当该脉冲出现时,主脉冲发生较大的抖动,脉宽和能量都较单脉冲输出时宽和低。实验中通过仔细调节 Nd:YLF 棒的倾角和提高冷却水温度的控制精度使主纵模对准标准具透过峰输出稳定的单纵模脉冲。文献<sup>[5]</sup>指出通过精确控制腔长也可消除这种双脉冲。

### 3.2.3 输出脉冲稳定度分析

由于 Nd:YLF 棒的双折射性质,其热致退偏特性将不可避免地利用光的偏振特性调 Q 激光器输出的脉冲能量和脉宽产生影响。同时,由于激光器利用了 Nd:YLF 棒的 F-P 效应选模,温度的漂移

将使 Nd:YLF 棒的长度发生变化,从而造成主纵模偏离标准具透过峰使输出脉冲不稳定。实验初期,由于 Nd:YLF 棒的冷却系统不能提供较好的控温效果,激光器输出脉冲十分不稳。在提高了控温的精度后,输出脉冲的稳定度大为提高。对激光器的模式稳定度、能量和脉宽稳定度进行观测(连续 500 个脉冲),输出脉冲的单纵模几率 100%,能量稳定度为 3%,脉宽稳定度为 4%,调 Q 触发电脉冲和激光脉冲输出间的抖动  $< 4$  ns。导致能量波动的主要原因在于国产激光二极管一致性还存在问题,抽运能量并不稳定,另外激光工作物质冷却控制、外界机械振动的干扰还有一些不确定因素。相信对以上环节的进一步优化可进一步提高输出脉冲的稳定度。

## 4 结 论

采用 LD 环形抽运 Nd:YLF 棒,以低压 KTP 晶体作为电光调 Q 开关,获得了脉冲宽度为 6.7 ns,单脉冲能量 1.156 mJ,峰值功率 0.17 MW 的稳定的、低时间抖动的单脉冲、单纵模输出。由于采用 LD 抽运和设计新颖的双台阶脉冲发生器提供调 Q 驱动脉冲,激光器的光-光转换效率高,并且外围电路大为简化,系统可靠性大为提高,其结构简单紧凑,容易调整,具有实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Youming, Zhou Fuzheng, Hu Wen-tao *et al.*. Prelase single longitudinal mode Q-switched Nd:YAG laser pumped by a diode-laser-array [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(1):42~46  
陈有明,周复正,胡文涛等. 激光二极管抽运预激光调 Q Nd:YAG 单纵模激光器研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(1):42~46
- 2 Chen Youming, Zhou Fuzheng, Hu Wentao *et al.*. Prelase Q-switched and mode-locked solid-state laser side-pumped by a laser-diode-array [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(9):1205~1208  
陈有明,周复正,胡文涛等. 半导体激光抽运预激光锁模调 Q 固体激光器研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(9):1205~1208
- 3 W. R. Sooy. The natural selection of modes in a passive Q-switched laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**(2):36~37
- 4 Dirk J. Kuizenga. Short-pulse oscillator development for the Nd:glass laser-fusion systems [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9):1694~1708
- 5 Cao Weilou, Chen Qin hao, Sun Yunlong *et al.*. Investigation of a single-axial-mode Nd:YLF oscillator for laser fusion system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1986, **6**(9):769~775  
曹渭楼,陈庆浩,孙云龙等. 用于激光核聚变的可长时间单纵模稳定运转的 Nd:YAG 和 Nd:YLF 激光振荡器的研究[J]. *光学学报*, 1986, **6**(9):769~775