

文章编号: 1007-6654(2014)01-0081-04<sup>②</sup>

## 全固态单纵模脉冲 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器

焦月春, 马亚云, 李渊骥, 张宽收<sup>†</sup>

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

**摘要:** 设计并研制了全固态调 Q 脉冲单纵模 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器。利用 880 nm 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 通过四镜环形谐振腔中插入声光调 Q 晶体、标准具, 并优化激光谐振腔的结构, 获得了重复频率为 200 Hz、脉宽为 26.6 ns 的单纵模脉冲 1.064 μm 激光输出。当泵浦功率为 15 W 时, 单纵模激光输出的单脉冲能量为 570 μJ、脉冲能量稳定性优于 3%。

**关键词:** 全固态脉冲激光器; 单纵模; 声光调 Q; 能量稳定性

**中图分类号:** O431

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/ASQO20142001.0081

### 0 引言

具有体积小、光束质量好、转换效率高及使用寿命长等优点的全固态激光器, 可以通过调 Q 技术获得高重复频率、高平均功率的脉冲激光输出。单纵模脉冲激光器具有很好的相干性、峰值功率高、方向性好等特点, 被广泛应用于多普勒激光雷达、光学合成孔径以及固体介质受激布里渊散射(SBS)的研究等领域。特别是单纵模脉冲激光器以其脉冲幅度稳定、时域无调制等特点在高能量激光放大系统中常作为脉冲种子源。目前已有多种方法能使激光器实现单纵模运转, 例如用扭转模腔、短腔谐振、标准具选模及双折射滤光片选模等<sup>[1-3]</sup>。但要获得稳定的高平均功率、高单脉冲能量激光输出, 仍需采用环形谐振腔, 通过消除空间烧孔效应进行精密选模。1997年, I. Freitag<sup>[4]</sup>等利用可饱和吸收体 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q, 实现了二极管泵浦非平面 Nd:YAG 环形激

光器, 在 kHz 的水平上, 获得最大输出 800 mW, 脉冲宽度小于 3 ns, 单脉冲能量 70 μJ 的单纵模激光输出。2001年, M. Trobs<sup>[5]</sup>等设计了环形腔结构激光器, 采用预脉冲电光调 Q 技术, 在 100 Hz 时, 获得了脉冲宽度为 37 ns, 单脉冲能量为 0.3 mJ 的单纵模激光输出。2007年, 郝二娟<sup>[6]</sup>等采用激光二极管泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器, 在腔内插入 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 晶体, 获得了脉宽 100 ns、重复频率为 21 kHz 的单纵模被动调 Q 激光输出。被动调 Q 虽然本身具有选模作用<sup>[7]</sup>, 容易实现单纵模运转, 但是此方式稳定性较差、不能控制脉冲的重复频率且输出单脉冲能量较低。电光调 Q 的响应速度快, 但是要用到高压驱动电源, 某些场合应用不便。

为研制稳定的单纵模脉冲激光器, 我们在设计和优化环形激光谐振腔、并在腔内插入标准具

<sup>②</sup> 收稿日期: 2013-11-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61227015), 国家重大科学研究计划(2010CB923101), 国家自然科学基金创新研究群体(61121064)

**作者简介:** 焦月春(1989—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事全固态激光技术研究。E-mail: jyc369834669@163.com

**† 通讯作者:** E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

的基础上,通过内腔声光调 Q 技术,实验获得了脉宽为 26.6 ns、单脉冲能量达 570 μJ、能量稳定性优于 3 % 的单纵模激光输出。

### 1 理论分析

在激光器谐振腔中,不同激光纵模有着相同的几何损耗,但是由于不同纵模之间的频率差异因而具有不同的小信号增益系数。因此可以利用不同纵模之间的增益差异,或在腔内引入非几何损耗差,通过模式竞争使激光器实现单纵模振荡。根据 Sooy 的理论<sup>[7]</sup>,相邻纵模  $m$  和  $n$  在腔内经历  $q$  次往返后,对应内腔功率  $P_m$  和  $P_n$  的关系可写为:

$$\frac{P_m}{P_n} = \left( \frac{1 - \delta_m}{1 - \delta_n} \right)^q (1 - \delta_m)^q \left[ \left( \frac{g_m}{g_n} \right)^{-1} \right], \quad (1)$$

其中  $\delta_m, g_m, \delta_n$  和  $g_n$  分别为纵模模式  $m$  和  $n$  在腔内的往返损耗和增益。由公式(1)可以看出,为实现单纵模运转,应使  $\delta_m$  与  $\delta_n$  及  $g_m$  与  $g_n$  的差值尽量大。一般情况,对于固体激光器,可以设计环形谐振腔,通过在腔中插入光学单向器,使激光单向行波运转,通过消除空间烧孔效应使激光器单纵模运转。但由于激光介质的增益特性决定了  $g_m$  与  $g_n$  之间的差值比较小,当激光器脉冲运转时,为获得稳定的单纵模运转,一方面需要在腔内加入标准具对相邻纵模损耗进行调制,另一方面可以通过缩短谐振腔长,增加脉冲建立过程中光在腔内的往返次数  $q$ 。

为进一步优化脉冲激光器的输出特性,我们可以通过设计激光器输出耦合镜的透射率,来优化输出激光脉冲的脉宽和能量。根据 Degnan 的调 Q 激光理论<sup>[8]</sup>,当激光器抽运功率一定的情况下,存在一个最佳的输出耦合镜透射率  $R_{opt}$ :

$$R_{opt} = e^{\left[ \frac{-\delta^2 - 1 - \log \left[ \frac{\delta}{z} \right]}{\log \left[ \frac{\delta}{z} \right]} \right]}, \quad (2)$$

对应的激光脉冲宽度  $t_p$  为:

$$t_p = \frac{t_r}{\delta} \left[ \frac{\ln(z)}{z(1 - a[1 - \ln(a)])} \right], \quad (3)$$

式中  $a = (z - 1)[z \ln(z)]$ , 其中  $z = \frac{2g_0 l}{\delta}$  为无量纲常数,  $g_0$  为小信号增益系数,  $l$  为晶体长度,  $\delta$  为单程损耗。  $t_r$  为振荡往返时间。利用公式(2)

和(3)及相应的实验参数,可以计算出,当抽运功率为 15 W 时,输出耦合镜的最佳透射率为 20 %,对应输出激光脉宽为 28 ns。

### 2 实验装置

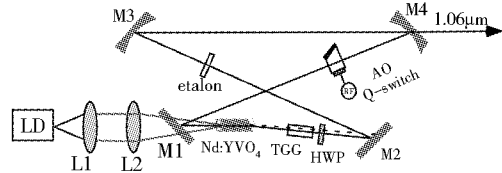


Fig. 1 Experimental setup for single-longitudinal mode pulse laser

图 1 单纵模脉冲激光器实验装置图

图 1 为全固态调 Q 脉冲单纵模 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器的实验装置图。抽运源采用德国 LIMO 公司生产的光纤耦合输出的激光二极管(LD),光纤芯径为 400 μm、中心波长为 880 nm。LD 抽运光经透镜 L1 和 L2 准直聚焦后的腰斑半径为 330 μm。激光晶体选用楔形复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,尺寸为 3 mm × 3 mm × (5 + 15) mm,掺杂部分 Nd<sup>3+</sup> 的质量百分比为 0.2 %,晶体两端面均镀 880 nm 和 1.06 μm 减反膜 ( $R_{880 \text{ nm}}, R_{1.06 \mu\text{m}} < 0.25\%$ )。楔形晶体可以起到偏振分束器的作用,在不同偏振方向模式的竞争中,保证  $\pi$  偏振光优先于  $\sigma$  偏振光在腔内起振,提高激光器的线偏振度和偏振方向的稳定性。实验中将 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体用铟膜包住放置于紫铜控温炉内,用控温精度为  $\pm 0.01$  °C 的温度控制仪(宇光公司:Model YG-4S)将晶体温度控制在 21 °C。激光谐振腔为由镜片 M1—M4 构成的环形谐振腔,平面镜 M1 为输入耦合镜,镀 45° 880 nm 高透膜以及 1.06 μm 高反膜 ( $T_{880 \text{ nm}} > 95\%$  &  $R_{1.06 \mu\text{m}} > 99.7\%$ ); 平面镜 M2 镀 45° 1.06 μm 高反膜 ( $R_{1.06 \mu\text{m}} > 99.7\%$ ); M3 和 M4 是曲率半径  $R = 100$  mm 的平凹镜, M3 镀 1.06 μm 高反膜 ( $R_{1.06 \mu\text{m}} > 99.7\%$ ); M4 为激光器输出耦合镜 ( $T_{1.06 \mu\text{m}} = 20\%$ )。考虑激光晶体的热焦距,当抽运光功率为 15 W 时,把激光晶体等效为一个焦距为 800 mm 的薄透镜,利用 ABCD 传输矩阵对激光谐振腔进行了优化设计,结合实验研究,确定了

两凹面镜 M3 和 M4 之间光学腔长为 103 mm, 剩余腔长为 400 mm。在该实验条件下, 激光晶体处的振荡光斑半径为 380  $\mu\text{m}$ , 满足抽运模式匹配, 使激光器可以单横模稳定运转。激光器谐振腔中的  $\lambda/2$  波片和 TGG 晶体构成的光学单向器, 使激光在腔内实现单向行波运转, 实现单纵模激光运转。在腔内插入厚度为 500  $\mu\text{m}$  不镀膜的标准具(etalon), 增大相邻纵模间的损耗差, 进一步保证激光器稳定单纵模运转。通过在谐振腔中插入声光 Q 开关(AO), 使激光器脉冲运转, RF 为加在声光 Q 开关上的射频信号。

### 3 实验结果与分析

当激光器在重复频率 200Hz 脉冲运转时, 用快速响应探测器(DET 10A)探测、示波器(Tektronix 公司: Model DPO7254)记录了激光脉冲的输出波形图。当

抽运功率为 15 W、谐振腔内没有插入标准具时, 实验测量的激光脉冲波形, 如图 2(a)所示。可以看出脉冲波形上附加了一个周期性的强度调制, 且其调制频率恰好等于光在腔内循环一周所需要的时间。该调制可以理解是激光器相邻纵模发生拍频, 激光器为多纵模运转。通过微调光学单向器, 并在谐振腔内加入标准具后, 实验测量的激光脉冲波形, 如图 2(b)所示。可以看出脉冲波形为光滑曲线, 表明激光器为单纵模运转。实际测量的激光脉宽为 26.6 ns。从图(2)可以看出输出脉冲波形上升沿较快, 而下降沿较缓慢, 原因是在声光 Q 开关全部关断后, 声波通过光束直径范围仍有一定的渡越时间。

当激光器单纵模脉冲运转时, 用激光能量计(Newport 公司: Model 1935-C)测量了 1.06  $\mu\text{m}$  脉冲激光的单脉冲能量。图 3 为 1.06  $\mu\text{m}$  激光

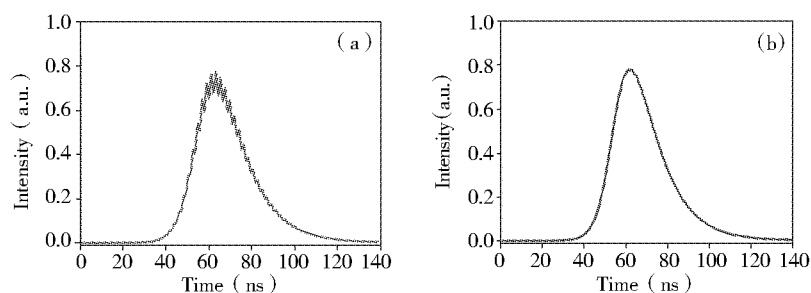


Fig. 2 Output pulse curve of multi-longitudinal-mode laser (a) and single-longitudinal-mode laser (b)

图 2 (a)多纵模激光脉冲波形(b)单纵模激光脉冲波形脉冲图

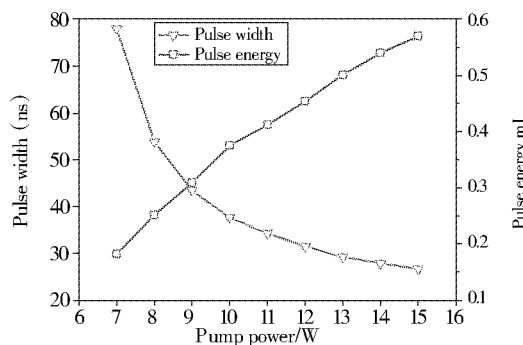


Fig. 3 Laser pulse energy and pulse width versus the incident pump power

图 3 激光单脉冲能量和脉冲宽度随抽运功率的变化曲线

单脉冲能量和脉冲宽度随抽运功率的变化曲线。当泵浦功率为 15 W 时, 单纵模激光输出的单脉冲能量为 570  $\mu\text{J}$ 。从图 3 可以看出, 在抽运功率增大的

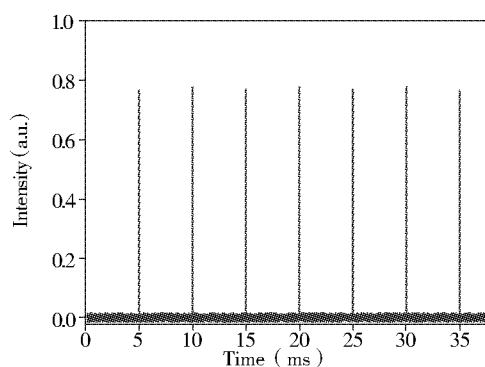


Fig. 4 Output pulse train of single-longitudinal-mode pulse laser

图 4 脉冲单纵模激光器的输出激光脉冲序列

初期, 脉冲宽度迅速减小, 原因是在泵浦功率增大初期, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体上能级粒子数迅速增加, 受激跃迁速率极大加快, 导致脉冲上升沿快速缩短, 从而使

脉冲宽度迅速减小。进一步提高抽运功率,激光跃迁速率对脉冲形成的影响降低,因此输出脉冲的宽度逐步稳定减少。

图4为全固态调Q脉冲单纵模Nd:YVO<sub>4</sub>激光器输出能量为570 μJ时,实验测量的输出激光脉冲序列。可以看出,输出脉冲激光的能量稳定性优于3%。

#### 4 结论

本文采用中心波长为880 nm的LD端面直接

#### 参考文献:

- [1] GUO Lin, WANG Gui-Ling, ZHANG Hong-Bo, *et al.* Passively Q-Switch Nd:KLuW Laser with Semiconductor Saturable Absorber[J]. *Chin Phys Lett*, 2007, **24**(6):1583-1585.
- [2] Steinmetz A, Nodop D, Limpert J, *et al.* 2 MHz repetition rate, 200 ps pulse duration from a Monolithic, Passively Q-Switched Microchip Laser[J]. *App Phys B*, 2009, **97**:317-320.
- [3] Carlos Sotelo, Robert D. Stultz. Single-frequency Yb: YAG microchip laser with ultra-low timing jitter[J]. *Lasers, Sources, and Related Photonic Devices Technical Digest*, 2012, AT4A(12):1-3.
- [4] Freitag I, Tunnermann A, Welling H. Passively Q-switched Nd: YAG ring Lasers with high average output Power in Single-frequency Operation[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(10):706-708.
- [5] Trobs M, Graf Th. Compact, dual-configuration, single-frequency, Q-switched Nd: YAG laser[J]. *Opt Communic*, 2001, 187:385-388.
- [6] 郝二娟, 檀慧明, 李特, 等. LD端面泵浦单频调Q激光器的研制[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(1):41-43.
- [7] Sooy W R. The Nature Selection of Mode in a Passive Q-switched Laser [J]. *Appl Phys Lett*, 1965, **7**(2):36-37.
- [8] John J Degnan. Theory of the Optimally Coupled Q-Switched Laser[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1989, **25**(2):214-220.

### All-solid-state Single-longitudinal-mode Pulse Nd:YVO<sub>4</sub> Ring Laser

JIAO Yue-chun, MA Ya-yun, LI Yuan-ji, ZHANG Kuan-shou

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** An all-solid-state single-longitudinal-mode Q-switch pulse Nd:YVO<sub>4</sub> ring laser was designed and fabricated. A Nd:YVO<sub>4</sub> crystal was directly pumped by an 880 nm laser diode, and a ring cavity formed by 4 mirrors was designed and optimized, an acoustic-optic Q-switch and an etalon was inserted in the cavity, a single-longitudinal-mode pulse laser was achieved with the repetition rate of 200 Hz and the pulse width of 26.6 ns. At pump power of 15 W, the measured pulse energy was 570 μJ with the energy stability of better than 3%.

**Key words:** all-solid-state laser; single-longitudinal-mode; acoustic-optic Q-switch; energy stability

抽运Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,设计并优化四镜环形谐振腔,通过在谐振腔中插入声光调Q晶体、标准具等,研制出全固态脉冲Nd:YVO<sub>4</sub>激光器,获得了重复频率为200 Hz、脉宽为26.6 ns的单纵模脉冲1.064 μm激光输出。当泵浦功率为15 W时,单纵模激光输出的单脉冲能量为570 μJ、脉冲能量稳定性优于3%。这种稳定性良好的单纵模脉冲激光器可作为种子源用于高能量激光放大系统。