

文章编号: 0258-7025(2008)02-0206-05

# 高重复率窄脉宽 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器

李小莉 邵 杰 臧华国 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 部分端面抽运的混合腔板条激光器是一种新型的全固态激光器,采用这种结构,实现了高重复率调 Q 运转。在脉冲抽运情况下,1 kHz 运转时,得到脉宽 4.6 ns,单脉冲能量 4.5 mJ 的激光输出。在连续抽运调 Q 输出情况下,5 kHz 高重复率运转时,获得了脉宽 6 ns,单脉冲能量 3.1 mJ 的脉冲序列输出,平均功率超过 15 W;当重复率高达 25 kHz 时,得到脉宽 9.5 ns,单脉冲能量 1.2 mJ 的激光输出,平均功率达 30 W。实验结果表明,输出水平还有很大的提升空间。

**关键词** 激光器;Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器;高重复率;电光调 Q

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## High Repetition Rate Short Pulse Width Nd:YVO<sub>4</sub> Slab Laser

Li Xiaoli Shao Jie Zang Huaguo Lu Yutian

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Partially end-pumped hybrid resonator slab laser is one kind of novel solid-state laser. High repetition rate Q-switched operation using this structure was achieved. An output pulse train with 4.6 ns pulse width and 4.5 mJ pulse energy was obtained at 1 kHz repetition rate. In the condition of continuous pumping with 5 kHz operation, Q-switched laser with pulse width of 6 ns and pulse energy of 3.1 mJ was obtained, and output power was more than 15 W. The width and energy were 9.5 ns and 1.2 mJ respectively when the repetition rate reached 25 kHz, and output power was 30 W. Experimental results show that the output level has great potential for further development.

**Key words** lasers; Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser; high repetition rate; electro-optical Q-switched

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的全固态激光器以其效率高、寿命长、结构紧凑、使用维护方便等优点,已被广泛应用于生产、生活的各个方面。而在激光雷达、空间通信、激光测距以及激光精细加工等许多领域<sup>[1~4]</sup>中需要高重复率窄脉宽的激光输出<sup>[5,6]</sup>。调 Q 技术是压缩脉宽、提高峰值功率以获得重复巨脉冲的一种有效方法。声光 Q 开关由于开关速度慢,形成的脉冲宽度一般比较宽<sup>[7~9]</sup>;而被动 Q 开关工作稳定性很差,不利于应用。电光 Q 开关可以弥补上述缺点,得到稳定的窄脉宽输出,具有不可替代的优势。由于电光调 Q 需要在腔内插入检偏器、泡克耳斯盒等元件,增加了谐振腔损耗。选择高增益、低阈值、偏振输出的 Nd:YVO<sub>4</sub> 作为增益介质就可以降低这些不利影响。同时 Nd:YVO<sub>4</sub> 的荧光寿命较

短,适合于高重复率调 Q 运转。但由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体热导率较差(只有 Nd:YAG 的一半)、抗损伤阈值低,限制了其在大功率下的应用。

德国夫琅禾费激光所的杜可明等<sup>[10~12]</sup>研制出一种新型的部分端面抽运混合腔板条激光器。该激光器利用板条激光器散热性能优良的特点,使 Nd:YVO<sub>4</sub> 可以在高功率输出下运转。同时由于采用混合腔结构,在很短的腔长内就可以实现大功率高光束质量的激光输出,而且短腔也有利于压缩脉宽。本文采用这种结构,实现了部分端面抽运混合腔板条激光器的高重复率调 Q 运转,取得了较好的实验结果。

## 2 实验装置

整个系统结构如图 1 所示。抽运源采用自制激

收稿日期:2007-06-12; 收到修改稿日期:2007-10-10

作者简介:李小莉(1971—),女,安徽人,助理研究员,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail:xlili@mail.siom.ac.cn

光二极管阵列堆。从激光二极管出来的抽运光被整形为细长而均匀的光束,入射到晶体端面。波导起到混束的作用,使抽运光均匀化。谐振腔是部分端面抽运混合腔结构,它由两个全反柱面镜  $M_1$ ,  $M_2$  组成。在竖直平面内两个柱面镜构成了一个平-平腔;在水平面内构成了一个正支共焦非稳腔。共焦非稳腔输出的激光束会被自动准直;另外,与负支非稳腔相比,正支非稳腔结构不会在腔内出现振荡激光的焦点,避免调 Q 运转时,腔内光学元件遭到破坏。实验中  $M_1$  的曲率半径为 500 mm,  $M_2$  的曲率半径为 -350 mm,腔长约 80 mm。

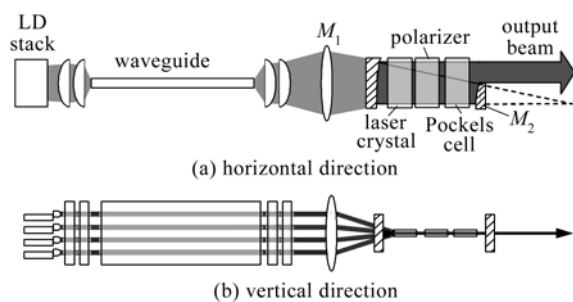


图 1 电光调 Q 装置示意图

Fig. 1 Electro-optical Q-switched experimental setup

为了配合板条状的激光介质及条状激光振荡输出,减小晶体及系统的尺寸,降低成本,实验中所用的检偏器及电光晶体均制作成板条状结构。激光晶体为 Nd:YVO<sub>4</sub>,掺杂原子数分数为 0.5%, a 轴切割,尺寸规格为 12 mm × 10 mm × 1 mm。12 mm × 1 mm 的两个面作为通光面,镀 808 nm 和 1064 nm 的增透膜。其余四个面打毛,以抑制自激振荡。两个 12 mm × 10 mm 的大面与微通道水冷热沉装置紧密联结,以达到良好的冷却效果。电光晶体选择了抗损伤阈值高、压电效应较小的 BBO 晶体,晶体尺寸约为 14 mm × 18 mm × 1.8 mm。板条状的结构大大降低了调 Q 所需的电压。实验中所加电压  $V_{\lambda/4}$  约为 2400 V。由于增益介质的厚度仅为 1 mm,还可以改用厚度更小的 BBO 晶体(小于 1.8 mm),使调 Q 电压进一步降低。采用的检偏器为  $\alpha$ -BBO(高温相偏硼酸钡)晶体。 $\alpha$ -BBO 是负单轴晶体,具有从 189 ~ 3500 nm 的宽透光范围,还具有很大的双折射性、良好的机械性能和较高的损伤阈值。实验中所用晶体尺寸为 14 mm × 12 mm × 1 mm。

电光晶体放置于谐振腔内靠近输出镜的位置,在它和激光介质之间加入了检偏器。Nd:YVO<sub>4</sub> 输出激光的偏振方向在水平方向上,与检偏器的方向一致。

实验装置实物如图 2 所示。图中从左到右依次是输入腔镜, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 检偏器, 电光调 Q 晶体和输出腔镜。

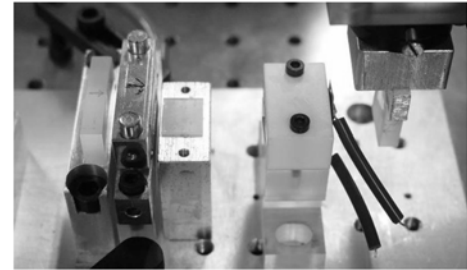


图 2 调 Q 实验谐振腔实物图

Fig. 2 Image of Q-switched resonator setup

在电光晶体上未加电压时,激光振荡可以正常产生;当给电光晶体加上  $\lambda/4$  电压时,水平偏振的振荡激光经过电光晶体后,变为圆偏振光,由输出镜  $M_2$  反射回来,再次通过电光晶体,变为垂直方向的线偏振光,不能通过检偏器,从而抑制了激光振荡的产生。

高频高压驱动源是实现高重复率调 Q 的一个关键部件,利用进口的高频开关组件,自行研制驱动和控制电路,制成了高重复率电光 Q 开关驱动源。图 3 给出了 25 kHz 时的驱动源输出的高压脉冲波形,其中图 3(b)是将图 3(a)时间轴展开得到的,仅保留一个脉冲的下降沿。从图 3 中可以看出,脉冲下降沿很陡,下降时间小于 10 ns;上升沿较缓,但是整个脉冲持续时间小于 20  $\mu$ s。该驱动源为实现高重复率调 Q 提供了保证。

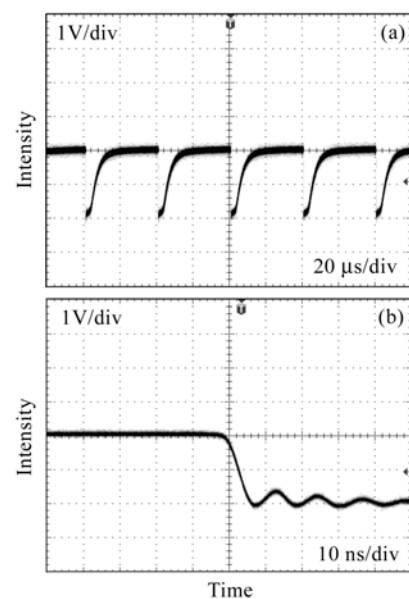


图 3 高压驱动源输出波形

Fig. 3 Export waveform of high voltage drive

### 3 脉冲抽运电光调 Q 实验

采用脉冲抽运方式,抽运脉冲宽度  $200\ \mu\text{s}$ ,  $1\ \text{kHz}$  调 Q 运转时,获得了单脉冲能量  $4.6\ \text{mJ}$ ,脉宽  $4.5\ \text{ns}$  的高重复率脉冲输出。不同重复率下的输入-输出能量曲线如图 4 所示。 $1\ \text{kHz}$  时单脉冲能量及脉宽随抽运能量的变化曲线分别如图 5, 6 所示。此时光-光转换效率低于  $10\%$ ,斜率效率低于  $20\%$ 。效率低是由于  $\text{Nd:YVO}_4$  的上能级寿命只有  $100\ \mu\text{s}$  左右,为获得更大的单脉冲能量,用了  $200\ \mu\text{s}$  抽运脉宽,能量有很大损失;另外脉冲抽运时,峰值功率很高, Q 开关没有完全关闭也会降低效率。

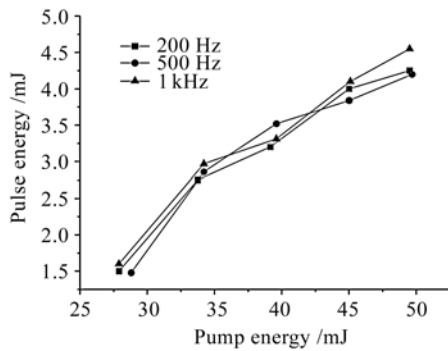


图 4 不同重复率时的输入-输出能量曲线  
Fig. 4 Pulse energy versus pump energy at different repetition rates

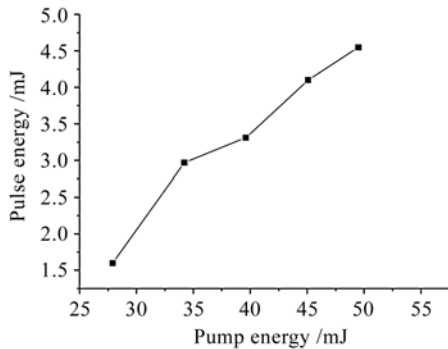


图 5  $1\ \text{kHz}$  时单脉冲能量随抽运能量的变化  
Fig. 5 Single pulse energy versus pump energy at the repetition rate of  $1\ \text{kHz}$

同样采用脉冲抽运方式,  $1\ \text{kHz}$  调 Q 运转,抽运脉宽  $100\ \mu\text{s}$  时,可获得单脉冲能量  $3.5\ \text{mJ}$ ,脉宽  $5.1\ \text{ns}$  的输出,光-光转换效率  $13\%$ ,斜率效率  $31\%$ 。

图 7 给出了典型的调 Q 脉冲波形。

改变抽运脉冲宽度,得到了重复率  $1\ \text{kHz}$  时输出功率随抽运脉冲宽度的变化曲线,如图 8 所示。可以看出,随着抽运脉冲宽度的增加,输出逐渐趋于饱和。这是因为所使用的增益介质  $\text{Nd:YVO}_4$  的上

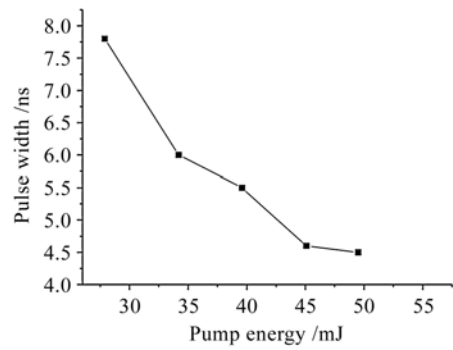


图 6  $1\ \text{kHz}$  时脉宽随抽运能量的变化  
Fig. 6 Pulse width versus pump energy at the repetition rate of  $1\ \text{kHz}$

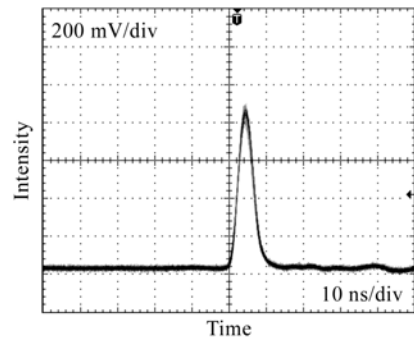


图 7 典型的调 Q 脉冲波形  
Fig. 7 Typical Q-switched pulse profile

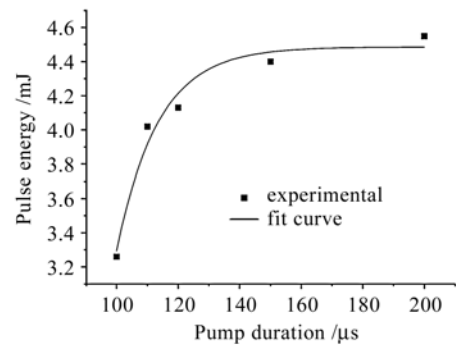


图 8  $1\ \text{kHz}$  时脉冲能量随抽运脉宽的变化  
Fig. 8 Pulse energy versus pump duration at the repetition rate of  $1\ \text{kHz}$

能级寿命约  $100\ \mu\text{s}$ ,随着抽运脉冲宽度的增大,增加的抽运能量越来越多地被自发辐射所消耗,不能转化为上能级储能。所以,脉冲抽运方式下,抽运脉冲宽度略大于增益介质的上能级寿命为宜。对于使用的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体,最佳抽运脉冲宽度约  $120\sim 130\ \mu\text{s}$ 。

### 4 连续抽运电光调 Q 实验

连续抽运的情况下,腔内插入检偏器及电光晶

体,抽运功率为119 W时得到了33 W的连续激光输出,光-光转换效率约为28%,斜率效率接近40%。

连续抽运调Q输出的实验结果如图9~11所示,分别给出了不同重复率下的功率曲线、单脉冲能量曲线和脉宽曲线。可以看出,输出功率并没有出现饱和的迹象。可以预计,随着抽运功率的加大,输出水平将进一步提高。受高压驱动源功率所限,未能完成高于25 kHz重复率的实验。

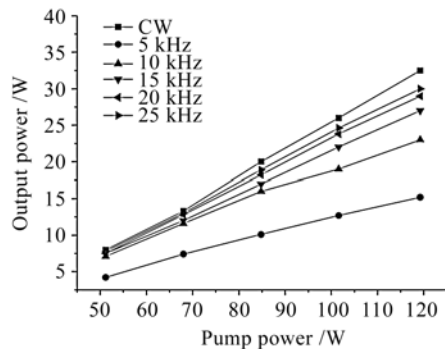


图9 平均输出功率曲线

Fig. 9 Average output power versus pump power

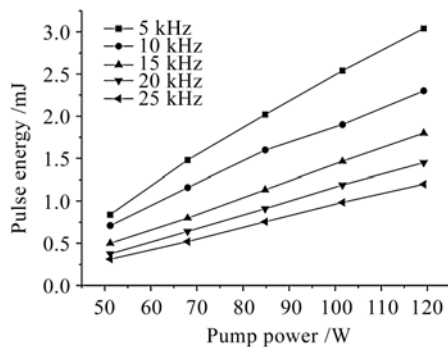


图10 单脉冲能量随频率及功率的变化

Fig. 10 Single pulse energy versus pump power at different repetition rates

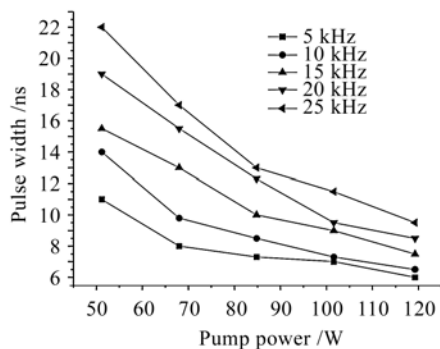


图11 脉宽随频率及功率的变化

Fig. 11 Pulse width versus pump power at different repetition rates

可以看出,在连续抽运调Q输出情况下,5 kHz

高重复率运转时,获得了脉宽6 ns,单脉冲能量3.1 mJ的脉冲序列输出,平均功率超过15 W;当重复率高达25 kHz时,得到脉宽9.5 ns,单脉冲能量1.2 mJ的激光输出,平均功率达30 W。

用Spiricon公司生产的M<sup>2</sup>-200型光束传输分析仪测量了混合腔连续运转时的输出光的M<sup>2</sup>因子。在抽运功率110 W,激光输出41.5 W时,即最大输出的情况下,测得非稳腔方向M<sub>x</sub><sup>2</sup> = 1.59,稳腔方向M<sub>y</sub><sup>2</sup> = 1.55。在调Q运转时,用CCD检测到的输出光束的光场分布与连续运转时的图样没有明显变化,这说明获得了高光束质量的窄脉冲激光。

## 5 结 论

实现了部分端面抽运混合腔板条激光器的高重复率调Q运转。获得了最高重复率25 kHz的窄脉宽激光输出,平均功率达30 W。实验结果表明,输出水平还有很大的提升空间,通过增加抽运源功率、改进高压电源就可以获得平均功率更大、脉冲重复率更高的激光输出。

致谢 感谢朱小磊研究员在实验中给予的帮助。感谢付文强等在电路方面的大力帮助。

## 参 考 文 献

- John J. Zayhowski, Alexander L. Wilson, Jr.. Pump-induced bleaching of the saturable absorber in short-pulse Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched microchip lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(12):1588~1593
- Jeffrey W. Tripp, Arkady Ulitsky, Sergey Pashin *et al.*. Development of a compact high-resolution 3D laser range imaging system [C]. *SPIE*, 2003, **5088**:112~122
- Yang Xichen, Wang Yu, Ying Zhaolong *et al.*. Microstructure and properties of high power laser welding of ship steel plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):866~870  
杨洗陈,王雨,应朝龙等. 高功率激光焊接船板的组织性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):866~870
- Liu Liren. Laser communications in space II test and verification techniques on the ground [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):147~155  
刘立人. 卫星激光通信II地面检测和验证技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):147~155
- Zhimin Wang, Jianqiu Xu, Weibiao Chen. High-power passively Q-switched ultra-thin slab lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(Suppl.):36~38
- Feng Yongwei, Dai Shutao, Zhu Xiaolei. 1 kHz electro-optic Q-switched Nd:YAG laser with complete compensation of thermally induced depolarization loss [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1190~1193  
冯永伟,戴殊韬,朱小磊. 热退偏损耗完全补偿的千赫兹电光调Q Nd:YAG激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1190~1193
- Feng Lichun, Huo Yujin, He Shufang *et al.*. LD-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):461~465  
冯立春,霍玉晶,何淑芳等. 激光二极管抽运声光调Q高重复

- 频率 532 nm 激光器[J]. 中国激光, 2005, **32**(4):461~465
- 8 Takashige Omatsu, Tomohiro Isogami, Ara Minassian *et al.*. >100 kHz Q-switched operation in transversely diode-pumped ceramic Nd<sup>3+</sup>:YAG laser in bounce geometry [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **249**:531~537
- 9 Li Xudong, Yu Xin, Yu Junhua *et al.*. Laser diode double-end-pumped acousto-optically Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):461~464  
李旭东, 于欣, 于俊华等. 激光二极管双端抽运声光调 Q 高重复频率 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(4):461~464
- 10 Keming Du, Yan Liao, Peter Loosen. Nd:YAG slab laser end-pumped by laser-diode stacks and its beam shaping [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **140**:53~56
- 11 Shi Peng, Li Daijun, Zhang Hengli *et al.*. High power partially end-pumped slab laser with hybrid resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):491~494  
石鹏, 李代军, 张恒利等. 大功率部分端面抽运混合腔板条激光器[J]. 光学学报, 2004, **24**(4):491~494
- 12 Shi Peng, Zhang Hengli, Wang Yongdong *et al.*. High repetition rate electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with high beam quality output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5):641~644  
石鹏, 张恒利, 汪永东等. 高重复率电光调 Q 的高光束质量 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器[J]. 光学学报, 2004, **24**(5):641~644