

文章编号:1004-4213(2010)06-1078-4

# 高重复频率 LD 端面抽运声光调 Q 腔内倍频绿光激光器\*

王秋明, 林永钦, 王鑫, 王晶, 颜彩繁<sup>†</sup>

(南开大学 物理科学学院, 天津 300071)

**摘要:**利用 LD 端面抽运声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为抽运源, 采用线性腔实现了 KTP 腔内倍频高效绿光激光的输出. 在调 Q 脉冲重复频率为 40 kHz、1 064 nm 输入光的功率为 1 608 mW 的条件下, 获得了 999 mW 单横模(TEM<sub>00</sub>模)的绿光输出, 相应的光-光转换效率为 62.1%. 绿光激光器输出光谱的半峰宽小于 0.11 nm, 其输出功率的不稳定度为 ±1.2%.

**关键词:**腔内倍频; 高重复频率; 输出特性

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103906.1078

## 0 引言

激光二极管抽运的调 Q 腔内倍频绿光激光器是获得高重复频率、高峰值功率的较为理想的可见光源. 它具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、寿命长等独特优点, 引起人们的极大关注<sup>[1-11]</sup>. 尤其是中小功率的绿光激光器可用于光存储、显示、信息处理、光通讯、医疗和科研等领域.

北京工业大学的王登顺等<sup>[3]</sup>实现了列阵半导体激光端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 绿光激光器的稳定输出. 当抽运光的功率为 915 W 时, 得到了 520 mW 的稳定绿光, 相应的光-光转换效率为 5.5%. 清华大学的冯立春等<sup>[5]</sup>利用 LD 抽运声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频绿光激光器, 在泵浦功率为 1 W、重复频率为 50 kHz 时, 获得了平均功率为 224 mW 的 532 nm 脉冲激光输出, 总的光-光转换效率为 22.4%. 胡森等<sup>[10]</sup>在重复频率为 15 kHz、基频光(1 064 nm)的功率为 2.99 W 时, 声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频绿光激光器输出了 1.37 W 的绿光.

目前, 关于倍频激光器输出光谱特性的报道很少. 本文采用线性腔结构, 对激光二极管端面抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 声光调 Q 绿光激光器的输出特性, 以及光谱特性进行了讨论. 当声光调 Q 重复频率为 40 kHz、近红外光的输入功率约为 1.6 W 时, 得到了脉宽为 28 ns、输出平均功率约为 1.0 W 的

稳定的绿光输出. 近红外光到绿光的转换效率大于 62%. 此时绿光激光器输出光谱的半峰宽为 0.11 nm.

## 1 实验装置

LD 端面抽运声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频绿光激光器的实验装置如图 1. LD 采用 Limo 公司生产的光纤耦合半导体激光器, 当 LD 的抽运电流为 45 A 时, 其最大输出功率为 30 W, 相应的输出光的中心波长为 809 nm. 随着控制温度和抽运电流的改变, LD 输出的中心波长有一定的移动, 结温上升时其峰值波长漂移约为 0.3 nm/°C. 光纤的芯径为 400 μm, 数值孔径为 0.22.

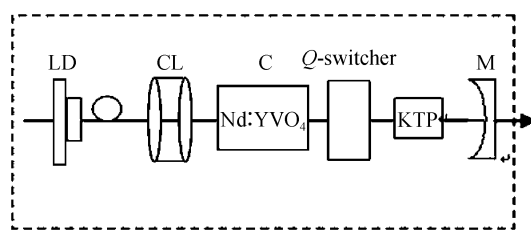


图 1 腔内倍频绿光激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of A-O Q Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP

激光增益介质为 *a* 向切割的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体(掺 Nd 离子的浓度为 0.5%), 尺寸为 3 mm×3 mm×4.2 mm, 通光长度为 4.2 mm. 激光晶体靠近聚光透镜的一端镀有对 808 nm 的光高透、1 064 nm 和 532 nm 的光高反膜, 作为激光器谐振腔的一个腔镜, 减少了额外使用腔镜而引起的新的损耗. Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的另一个端面镀有 1 064 nm 和 532 nm 双增透介质膜, 耦合透镜把 LD 抽运光聚焦到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中, 其光斑尺寸约为 250 μm.

声光调制器在腔内靠近 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体放置, 声光调 Q 驱动源为桂林星辰公司生产的 QSD5027,

\*南开大学物理学基地项目(J0730315)和南开大学第六届本科创新项目(BX6-197)资助

<sup>†</sup> Tel: 022-23505581 Email: yancaf@nankai.edu.cn

收稿日期: 2009-01-01

修回日期: 2010-01-12

其最大射频功率为 50 W,调 Q 重复频率可在 0.2~50 kHz 范围内连续设定. 倍频晶体选用的是 II 类相位匹配的 KTP 晶体 ( $\theta=90^\circ, \varphi=23.4^\circ, @1\ 064\ \text{nm}$ ), 其尺寸为 3 mm×3 mm×7 mm, 两个通光面镀有 1 064 nm 和 532 nm 双增透介质膜, 以降低腔内的损耗. 为了提高倍频晶体的基频光的功率密度, 应将倍频晶体紧贴着调 Q 开关放置. Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和 KTP 晶体均使用铜箔包裹并分别安装在铜块上, 铜块上下通入水冷却. 冷却水由恒温冷却水循环装置进行温度控制, 控温准确度为  $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ . 输出耦合镜选用曲率半径为 250 mm 的平凹镜, 凹面镀有对 1 064 nm 高反和 532 nm 高透的介质膜, 平面镀有对 532 nm 的增透膜. 谐振腔采用平凹腔结构, 腔长约为 170 mm. 腔内参量的设计采用的是光学谐振腔的图解分析与设计方法<sup>[12]</sup>.

## 2 实验结果与讨论

使用北京光电技术研究所生产的 M92 型激光功率计对激光器输出的平均功率进行了测量. LD 抽运源(808 nm)直接显示的是抽运电流, 图 2 给出了 LD 抽运电流与 1 064 nm 激光输出功率的关系曲线. 从实验曲线可以看出, 当 LD 的抽运电流小于 18 A 时, 1 064 nm 激光输出的平均功率随着抽运电流的增加基本上呈线性的增加. 当抽运电流大于 18 A 时, 继续加大抽运电流, 1 064 nm 激光输出的平均功率并非线性地增大. 这可能是由于晶体的热透镜效应, 使得 1 064 nm 激光输出的平均功率发生了起伏变化. 所以, 要想获得更大的 1 064 nm 的激光输出, 必须对热透镜效应进行补偿. 因此, 本文只讨论 LD 抽运电流小于 18 A 时绿光激光器的输出特性.

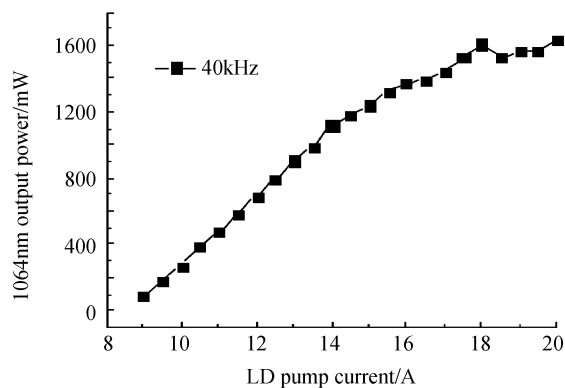


图 2 1 064 nm 激光输出的平均功率与 LD 抽运电流的关系  
Fig. 2 Average output power of 1 064 nm laser versus LD pumping current

在调 Q 重复频率为 40 kHz 时, 绿光激光器输出的平均功率与 1 064 nm 抽运功率的变化曲线如图 3.

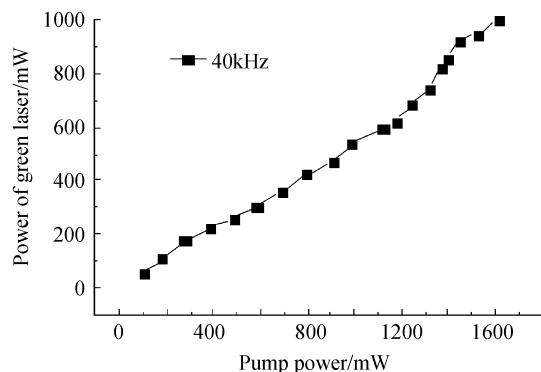


图 3 绿光激光器的输出平均功率与输入 1 064 nm 基频光功率的关系曲线

Fig. 3 Green output power as a function of incident pump power at 1 064 nm

从图 3 可以看出, 绿光激光器的振荡阈值功率为 95 mW. 在抽运功率小于 1 600 mW 时, 随着注入光的平均功率的增加, 绿光激光器输出的平均功率基本上呈线性的增加. 当 1 064 nm 抽运光的功率为 1 443 mW 时, 绿光激光器输出的功率为 926 mW, 相应的光-光转换效率为 64.2%; 当抽运光的最大功率为 1 608 mW 时, 声光调 Q 倍频激光器获得了 999 mW 的绿光输出, 其光-光转换效率为 62.1%. 目前, 由于调整架的体积较大, 使得激光器的谐振腔较长. 在今后的实验中要设法缩短谐振腔的长度, 减小腔内的损耗, 优化腔模参量, 以进一步提高绿光激光器输出的平均功率和光-光转换效率.

在绿光激光器输出的平均功率为 999 mW 时, 用激光功率计进行了 90 min 的定时监测, 取出 45 个点进行统计, 得到功率的不稳定度为  $\pm 1.2\%$ .

图 4 显示的是绿光激光器输出的脉冲宽度与 LD 抽运电流的变化曲线. 在调 Q 重复频率为 40 kHz 的条件下, 电流每变化 0.5 A, 用数字荧光示波器(美国泰克公司, TDS3052B 型 500 MKz 示波器)显示并测量绿光激光器输出的脉冲宽度. 从实验曲线可以看出, 当抽运电流从 8.5 A 变化到 10.5 A 时, 随着抽运电流的增加, 脉冲宽度从 138.8 ns 迅

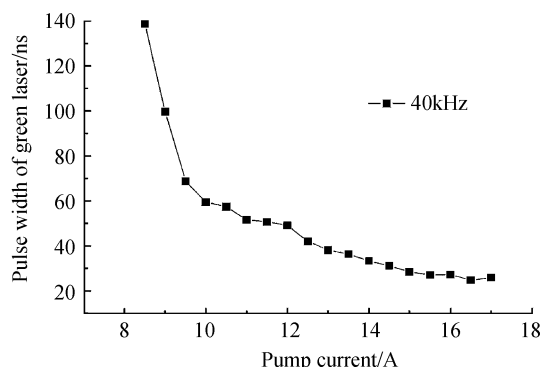


图 4 绿光激光器输出的脉宽与抽运电流的关系曲线  
Fig. 4 Pulse width of green laser versus pumping current

速减少到约 57.4 ns. 此时绿光激光器输出脉冲宽度变化大的原因, 主要是由于在振荡阈值附近, 激光器输出的功率稳定性较差. 当抽运电流大于 10.5 A 以后, 脉冲宽度随着抽运电流的增加而缓慢变窄. 当抽运电流为 17 A 时, 绿光激光器输出的脉冲宽度为 25.9 ns.

采用法国 JY 公司生产的 iHR320 光栅光谱仪对绿光激光器输出的光谱进行了测量, 光谱仪的测量范围为 300 nm~5 500 nm, 其最小分辨率为 0.06 nm. 图 5 给出了在调 Q 重复频率为 40 kHz, 绿光激光器输出功率为 0.68 W 时的输出光谱. 从图可以看出绿光激光器输出光谱的中心波长为 530.2 nm.

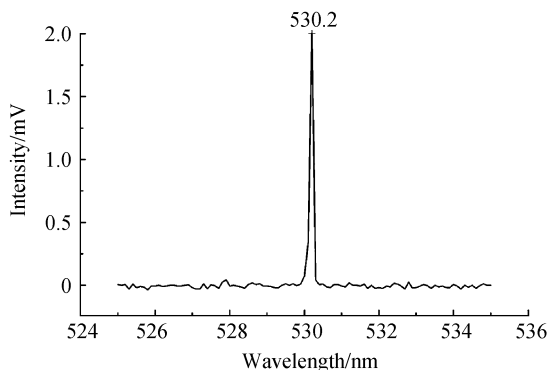


图 5 绿光激光器输出的典型光谱

Fig. 5 Typical output spectrum of the green laser

用高斯拟合曲线对绿光激光器输出的光谱进行拟合计算, 获得光谱的半峰宽为 0.11 nm. 这说明绿光激光器输出光的单色性是非常好的.

用 CCD 及其图像处理软件对 LD 端面抽运声光调 Q Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器输出的激光光斑进行了采集与分析, 得到倍频激光器输出光斑的椭圆度为 0.96, 为单横模输出光斑.

### 3 结论

LD 端面抽运声光调 Q Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器, 采用简单的平凹腔结构, 实现了低阈值稳定的单横模绿光输出. 其阈值功率为 95 mW, 当抽运功率为 1.6 W, 获得了脉冲宽度为 28 ns, 平均功率约为 1.0 W 的稳定的绿光输出.

#### 参考文献

[1] SHEN D Y, YANG H R, LIU J G, *et al.* Efficient and compact intracavity-frequency-doubled Nd : GdVO<sub>4</sub>/KTP laser end-pumped by a fiber-coupled laser diode[J]. *Appl Phys*, 2001, **B72**:263-266.

[2] XUE Qing-hua, ZHENG Quan, YE Zi-qing, *et al.* Analysis of eigenstates on LD-pumped Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP intracavity-doubled green laser[J]. *Chinese J Laser*, 2003, **30**(10): 877-880.  
薛庆华, 郑权, 叶子青, 等. LD 抽运腔内倍频 Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP 绿光激光器的本征态分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 877-880.

[3] WANG Deng-shun, LI Gang, CHEN Meng, *et al.* Study of green laser by intracavity frequency doubling of a LD-array pumped Nd : YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chinese J Laser*, 2004, **31**(4): 395-398.  
王登顺, 李港, 陈檬, 等. 阵列半导体激光端面抽运 Nd : YVO<sub>4</sub> 绿光激光器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 395-398.

[4] LI Long, TIAN Feng, ZHAO Zhi-min, *et al.* LD end-pumped folded cavity Nd : YVO<sub>4</sub>/LBO laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **3**(4): 396-399.  
李隆, 田丰, 赵致民, 等. LD 端面泵浦折叠腔 Nd : YVO<sub>4</sub>/LBO 激光器[J]. *光子学报*, 2004, **3**(4): 396-399.

[5] FENG Li-chun, HUO Yu-jing, HE Shu-fang, *et al.* LD-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate[J]. *Chinese J Laser*, 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.

[6] GONG Chuan-bo, CHEN Chang-shui, Bian WU, *et al.* All solid-state passively Q-switched frequency-doubled intra-cavity Nd : GdVO<sub>4</sub>/KTP laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2005, **3**(2): 94-96.

[7] ZHANG Yu-ping, ZHENG Yi, ZHANG Hui-yun, *et al.* High stability LD-pumped CW laser at 532nm by intracavity-doubled Nd : YVO<sub>4</sub> laser using KTP [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 971-973.  
张玉萍, 郑义, 张会云, 等. 高稳定 LD 泵浦腔内倍 Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP 连续绿光激光器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 971-973.

[8] LI Chun-ming, GAO Lan-lan, TAN Hui-ming, *et al.* Intracavity frequency doubling multi-longitudinal-mode low noise green laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 1-4.  
李春明, 高兰兰, 檀慧明, 等. 腔内倍频多纵模低噪声绿激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1): 1-4.

[9] SU Yan-li, JIANG Qi-chang, HE Jing-liang. LD-pumped Acousto-optical Q-switched 532 nm laser with narrow pulse width[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(5): 430-431.  
苏艳丽, 姜其畅, 何京良, 等. LD 泵浦声光调 Q 窄脉宽 532 nm 激光器[J]. *红外与激光*, 2007, **37**(5): 430-431.

[10] HU Miao, GE Jian-hong, CHEN Jun, *et al.* Fourth harmonic all-solid-state low power ultraviolet laser by BBO crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 203-207.  
胡淼, 葛剑虹, 陈军, 等. BBO 晶体四倍频全固态小功率紫外激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(2): 203-207.

[11] LIN Hong-yi, TAN Hui-ming, NAN Nan, *et al.* LD end-pumped intracavity frequency doubled Yb : YAG green laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 22-25.  
林洪沂, 檀慧明, 南楠, 等. 腔内倍频多纵模低噪声绿激光器[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 22-25.

[12] ZHANG Guang-yin, GUO Shu-guang. Graphic analysis and design method of optical resonator [M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2003: 35-41.  
张光寅, 郭曙光. 光学谐振腔的图解分析与设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 35-41.

## High Repetition Rate LD-end-pump Acousto-optic Q-switched Intracavity Frequency Doubling Green Laser

WANG Qiu-ming, LIN Yong-qin, WANG Xin, WANG Jing, YAN Cai-fan  
(School of Physics Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** A high effect green laser is realized by acousto-optic (A-O) Q-switched intracavity frequency doubling Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP laser, which is formed with a simple two-mirror line cavity. The TEM<sub>00</sub> mode green light power of 999 mW is obtained with 1 608 mW of an input 1 064 nm fundamental pump power at the pulse repetition rate of 40 kHz. The corresponding to optical-optical conversion efficiency is up to 62.1%. The spectral width (full width at half maximum) of green laser is about 0.11 nm or less.  $\pm 1.2\%$  instability of output power is obtained.

**Key words:** Intracavity frequency doubling; High repetition rate; Output characteristics; Spectrum



**WANG Qiu-ming** was born in 1987. He works as a lecturer, and his research interests focus on the design and analysis of lasers and cavity.



**YAN Cai-fan** was born in 1960. She is a senior engineer, and her research interests focus on photoelectron, laser and spectroscopy technology.