

## 高效率、高峰值功率 351 nm 准连续紫外激光器

崔建丰<sup>1,2</sup>, 高涛<sup>2</sup>, 张亚男<sup>2</sup>, 王迪<sup>2</sup>, 姚俊<sup>1</sup>, 岱钦<sup>1</sup>

(1. 沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159;  
2. 鞍山紫玉激光科技有限公司, 辽宁 鞍山 114000)

**摘要:** 报道了一台高效率、高峰值功率 351 nm 紫外激光器。采用激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YLF 晶体声光调 Q 获得准连续窄脉宽 1 053 nm 基波振荡, 腔外两块 LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>(LBO)晶体紧贴输出镜放置, 对基频光进行二倍频和三倍频, 获得了高峰值功率 351 nm 紫外激光输出。在 LD 抽运功率为 14 W、声光调 Q 激光器的调制频率为 1 kHz 的工作条件下, 基波平均输出功率为 1.45 W 时, 得到 351 nm 紫外激光平均输出功率 450 mW, 1 053 nm 基频光到 351 nm 紫外光转换效率高达 31.04%, 脉冲宽度为 7.5 ns, 峰值功率达 60 kW, 光束质量良好。

**关键词:** 激光器; 351 nm 紫外激光器; 腔外三倍频; 高峰值功率

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0605004

## High efficiency and high peak power 351 nm quasi-continuous ultraviolet laser

Cui Jianfeng<sup>1,2</sup>, Gao Tao<sup>2</sup>, Zhang Ya'nan<sup>2</sup>, Wang Di<sup>2</sup>, Yao Jun<sup>1</sup>, Dai Qin<sup>1</sup>

(1. School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;  
2. Anshan ZY Laser Technology Co.,Ltd, Anshan 114000, China)

**Abstract:** A Laser Diode (LD) end-pumped Nd:YLF quasi-continuous 351 nm ultraviolet laser with high efficiency and high peak power was demonstrated under acousto-optical Q-switched operation, by using extracavity frequency-doubled and frequency-tripled with two LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> (LBO) crystals cling to the output mirror. An average output power at 351 nm of 450 mW was obtained at repetition rate of 1 kHz, pumped power of 14 W and output power of fundamental wave of 1.45 W. The optical-to-optical conversion efficiency is up to 31.04% and pulse width is 7.5 ns corresponding to the peak power as high as 60 kW. The beam quality is satisfactory.

**Key words:** laser; 351 nm ultraviolet laser; extra-cavity frequency-tripling; high peak power

收稿日期: 2016-10-05; 修订日期: 2016-11-11

基金项目: 辽宁省科技计划(2014220040); 科技部科技型中小企业技术创新基金(C262100678); 沈阳市科技计划(F16-210-6-00)

作者简介: 崔建丰(1977-), 男, 客座教授, 博士, 主要从事半导体抽运、灯抽运高平均功率调 Q 激光器、大能量激光器及激光微加工系统方面的研究。Email: cuijf@163.com

## 0 引言

紫外激光器因其波长短、可聚焦能力强、光子能量大等优点,在激光精密加工、激光医疗、光谱分析等领域有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。目前国内外针对 355 nm 紫外波段的研究主要集中在高重频高功率和低重频高功率紫外激光器上,并取得显著成果<sup>[4-6]</sup>,而 Nd:YLF 晶体的 1 053 nm 谱线三倍频获得高重频高功率 351 nm 紫外波段的研究报道却很少,人们只是针对 Nd:YLF 的 1 053 nm 基波谱线和倍频获得的 527 nm 绿光谱线进行了一些研究<sup>[7-8]</sup>。因 Nd:YLF 晶体较长的上能级寿命,在调 Q 脉冲运转中使其更容易获得高功率的基频光,经三倍频后获得高功率的 351 nm 紫外光,在激光标刻、打孔等工业领域有着广泛的应用前景。神光装置三倍频光波长为 351 nm,高功率的 351 nm 紫外激光器可以作为神光装置靶瞄准模拟光源<sup>[9]</sup>。虽然 Y.J.Huang 等人<sup>[10]</sup>利用半球腔被动调 Q 腔外三倍频方式获得了峰值功率 72 kW 的 351 nm 紫外激光,但其频率为 100 Hz,光光转换效率为 26%,无法满足人们对高重频 351 nm 紫外激光的要求,且被动调 Q 方式不能对激光脉冲进行主动控制,限制了其应用范围。文中激光二极管 (LD) 端面抽运 Nd:YLF 晶体声光调 Q 方式,获得了高功率连续准连续的 1 053 nm 基频光,经腔外二倍频和三倍频,实现了重复频率 1 kHz 功率 450 mW 的 351 nm 紫外激光运转,峰值功率达到 60 kW,光光转换效率高达 31.04%。腔外无聚焦系统,结构简单,易于操作,有利于高功率紫外激光器产品的小型化生产。

## 1 实验装置

LD 端面抽运 Nd:YLF 腔内三倍频 351 nm 紫外激光器结构如图 1 所示。采用国产 808 nm 光纤输出半导体激光器做为抽运源,最大输出功率为 40 W,光纤芯径 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.22。通过调节制冷系统工作温度,使其工作波长在 806 nm 附近,与 Nd:YLF 晶体吸收峰匹配。通过耦合透镜将抽运光整形为直径 600  $\mu\text{m}$  左右的圆形光斑,会聚角约为 0.147 rad。Nd:YLF 晶体尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 12 mm,Nd<sup>3+</sup>离子掺杂浓度为 1.0 at.%,a 轴切割,通光长度 12 mm,两

个通光面分别镀 1 053 nm 和 806 nm 增透膜,为提高晶体散热效率,晶体采用钎焊的方式直接焊接到紫铜晶体热沉上,晶体热沉采用循环水冷却,制冷温度设定在 19  $^{\circ}\text{C}$ 。谐振腔采用简单的线性腔结构,谐振腔腔长 100 mm 左右,由腔镜 M1 和 M2 组成。平凹镜 M1,曲率半径  $R=-500$  mm,平面镀 806 nm 高透膜,凹面镀 806 nm 高透膜、1 053 nm 高反膜。平面镜 M2 为输出镜一面镀 1 053 nm 部分透过膜,另一面镀 1 053 nm 高透膜。腔内插入布儒斯特片,抑制 Nd:YLF 晶体的 1 047 nm 谱线振荡。腔内插入声光 Q 开关(QS041-10G-IN2,英国古奇公司),重复频率设置为 1 kHz。LBO1 为倍频晶体,尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 25 mm,采用 I 类临界相位匹配,切割角度  $\theta=90^{\circ}$ , $\Phi=12^{\circ}$ 。LBO2 为三倍频晶体,尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 25 mm,采用 II 类临界相位匹配,切割角度  $\theta=45.1^{\circ}$ , $\Phi=90^{\circ}$ ,基频光在两块 LBO 晶体中的偏振匹配如图 2 所示。两块晶体通光面均镀 1 053 nm、527 nm 和 351 nm 高透膜以降低损耗。两块晶体紧贴输出镜 M2 放置,分别采用制冷系统控温,控温精度  $\pm 0.1$   $^{\circ}\text{C}$ 。平面镜 M3 和 M4 为 45 $^{\circ}$ 反射镜,一面镀 45 $^{\circ}$  351 nm 高反膜,1 053 nm 和 527 nm 高透膜,另一面镀 1 053 nm 和 527 nm 高透膜,用于滤除出射激光中剩余的 1 053 nm 基频光和 527 nm 倍频光。

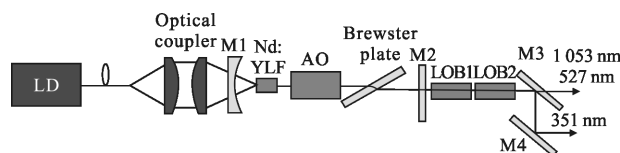


图 1 351 nm 紫外激光器实验结构示意图

Fig.1 Schematic diagram for 351 nm ultraviolet laser

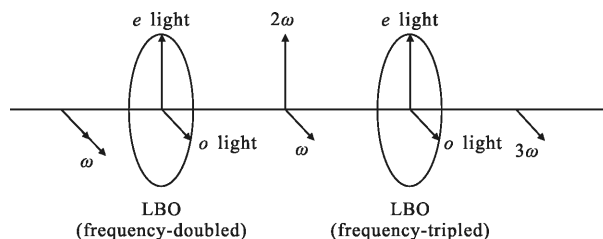


图 2 两块 LBO 晶体中二倍频(I类)、三倍频(II类)光束偏振匹配

Fig.2 Schematic of polarization states of the second(type I) and third (type II)harmonic for laser beams in two LBO crystals

## 2 实验结果及分析

重复频率为 1 kHz 时,采用 LabMax\_TOP 型激光

功率计(Coherent 公司),在未加入两块 LBO 晶体和 M3、M4 分光镜测量了 1 053 nm 基频光功率,紧贴 M2 后加入 LBO1 晶体,将 M3、M4 换成 1 053 nm 和 527 nm 分光镜(镀 45°1 053 nm 高反膜,527 nm 高透膜),测量了 527 nm 绿光功率,加入 LBO2 晶体,并将 M3、M4 换成 1 053 nm 和 527 nm 高透 351 nm 高反的分光镜,测试了 351 nm 紫外光的输出功率,图 3 给出了三种波长激光功率与 LD 抽运功率的关系。当 LD 抽运功率最大 14 W 时,1 053 nm 基频光功率 1.45 W,光光转换效率为 10.36%。527 nm 绿光功率为 665 mW,倍频效率为 45.86%,351 nm 功率为 450 mW,脉宽 7.5 ns、1 053 nm 基频光到 351 nm 紫外光转换效率达到 31.04%。

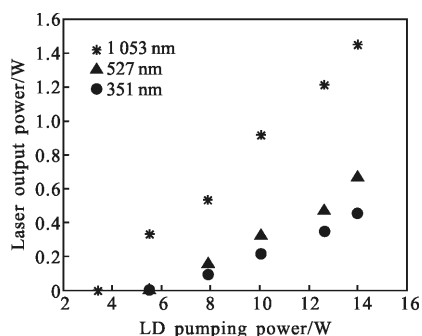


图 3 1 053、527、351 nm 激光的输出功率

Fig.3 Laser output power of laser at 1 053, 527, 351 nm

三种波长激光功率随 LD 抽运功率增加而增大,实验中 LD 抽运功率超过 14 W,继续增加,虽然基频光和绿光功率随之增大,但光束质量变差,影响了 351 nm 紫外光转换效率,351 nm 紫外光功率下降。

图 4 给出了重频为 1 kHz 和 6 kHz 时 351 nm 紫外激光输出功率与 LD 抽运功率之间的关系,可以

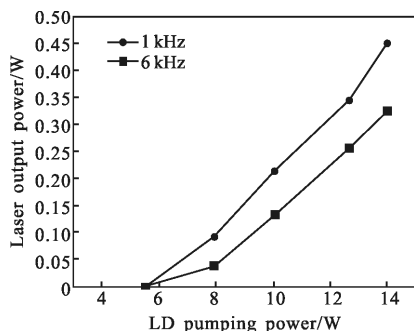


图 4 不同重复频率激光输出功率与抽运功率的关系

Fig.4 Output power versus pump power under different repetition rate

看出:重复频率为 1 kHz 和 6 kHz,351 nm 紫外激光输出功率均随 LD 抽运功率的增加而增大,LD 注入功率为 14 W,重复频率 6 kHz 时,351 nm 紫外激光功率最大为 324 mW。重复频率的增加使得基频激光单脉冲储能时间降低,反转粒子数与阈值反转粒子数的比值下降,从而影响激光脉冲的上升沿时间,使得脉冲宽度变宽,1 053 nm 基频光峰值功率下降,三倍频转换效率下降,导致 351 nm 紫外激光功率下降。

采用的 DET10A 型探测器(THORLABS 公司)和 SDS1302CE 型存储示波器(SIGLENT 公司)测量激光脉冲宽度,重复频率 1 kHz 时 351 nm 紫外激光的脉冲形状如图 5 所示,激光脉冲宽度为 7.5 ns。

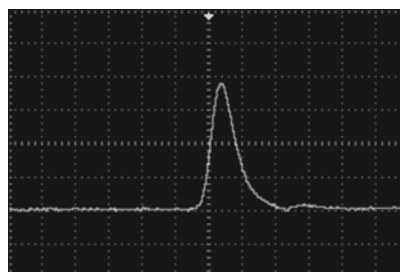


图 5 351 nm 激光单脉冲形状

Fig.5 Single pulse shape of the 351 nm laser

采用相纸随机记录一组激光器出光口光斑,如图 6 所示,光斑为圆形,能量分布均匀,光束质量较好。通过在腔内插入布儒斯特片抑制了 Nd:YLF 晶体的 1 047 nm 强谱线振荡,获得了单一的 351 nm 紫外谱线,如图 7 所示。



图 6 351 nm 紫外激光光斑图

Fig.6 Spot shape of 351 nm ultraviolet laser

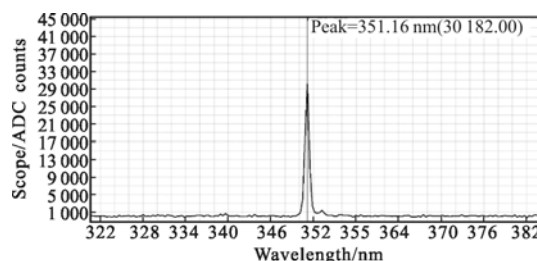


图 7 351 nm 紫外激光光谱图

Fig.7 Spectrum of 351 nm ultraviolet laser

### 3 结 论

文中采用 LD 端面抽运 Nd:YLF 晶体,声光调 Q

腔外二倍频、三倍频实现了高效、高功率351 nm准连续紫外激光输出。LD注入功率为14 W,重复频率为1 kHz时,获得了平均功率450 mW的351 nm紫外激光输出,脉冲宽度仅为7.5 ns,峰值功率高达60 kW,光光转换效率达到31.04%,光束质量较好。研制的351 nm紫外激光器采用的是简单的线性腔结构,简单紧凑,腔外无聚焦系统,易于调节,实用性好,便于产品化生产。

#### 参考文献:

- [1] Feng Aixin, Zhuang Xuhua, Xue Wei, et al. Damage characteristics of polysilicon under wavelengths of 1 064 nm, 532 nm and 355 nm laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 461-465. (in Chinese)  
冯爱新, 庄绪华, 薛伟, 等. 1 064 nm、532 nm、355 nm 波长脉冲激光辐照多晶硅损伤特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 461-465.
- [2] Li Xue, Wu Yalan, Huang Xin, et al. Comparison between 355 nm and 407 nm laser exciting Hoechst33342 in the detection of apoptosis [J]. *West China Medical Journal*, 2013, 28(6): 875-878. (in Chinese)  
李雪, 吴亚兰, 黄鑫, 等. 355 nm 和 407 nm 激光激发 Hoechst33342 检测细胞凋亡的比较研究 [J]. 华西医学, 2013, 28(6): 875-878.
- [3] Yu Wancheng, Hu Xiaobo, Cui Yingxin, et al. Laser ablation of 6H -SiC single crystals and spectral characterization [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(4): 1255-1260.
- [4] Zhang Yangyang, Wang Lirong, Yang Yingying, et al. The high-energy all-solid-state 355 nm ultraviolet laser [J]. *Laser Journal*, 2015, 36(8): 11-13. (in Chinese)  
张洋洋, 王丽荣, 杨盈莹, 等. 高能量全固态 355 nm 紫外激光器[J]. 激光杂志, 2015, 36(8): 11-13.
- [5] Xiong Jingping, Qian Jinning, Chen Risheng, et al. Intracavity triple frequency ultraviolet laser with high power and high efficiency [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52: 071403. (in Chinese)  
熊景平, 钱金宁, 陈日升, 等. 高效高功率腔内三倍频紫外激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52: 071403.
- [6] Dudley D R, Mehl O, Wang G Y, et al. Q-switched diode pumped Nd:YAG rod laser with output power of 420 W at 532 nm and 160 W at 355 nm[C]//SPIE, 2009: 7193.
- [7] Xu S, Wei Y, Huang C H, et al. Efficient end pumped Q-switched 1 053 nm Nd:YLF laser with a plane-parallel resonator [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(6): 1387-1389.
- [8] Lu Tingting, Wang Juntao, Huang Minjie, et al. Efficient and compact diode-end-pumped conductively cooled Q-switched Nd:YLF laser operating at 527 nm [J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 10(8): 081403.
- [9] Zhao Dongfeng, Dai Yaping, Huang Guanlong, et al. Improvement of target area for  $3\omega$  shot experiments in SG-II facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(4): 441-444. (in Chinese)  
赵东峰, 戴亚平, 黄关龙, 等. 神光-II 装置三倍频实验中靶场单元技术的改进[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(4): 441-444.
- [10] Huang Y J, Tang C Y, Tzeng Y S, et al. Efficient high-energy passively q-switched Nd:YLF/Cr<sup>3+</sup>:YAG UV laser at 351 nm with pulsed pumping in a nearly hemispherical cavity [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4): 519-521.