

高效高功率腔内三倍频紫外激光器

熊景平 钱金宁 陈日升

核工业理化工程研究院, 天津 300180

摘要 报道了一台高效高功率的腔内三倍频 355 nm 紫外激光器。倍频与和频均采用 II 类相位匹配方式。选择谐波的偏振方向以提高 1064 nm 基频光到 355 nm 三倍频光的转换效率。在一个简单的线性谐振腔中, 采用一个激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 的模块, 双声光 Q 开关进行调制, 以两块 LBO 晶体分别作为倍频晶体与和频晶体。在 10 kHz 重复频率下, 当抽运光功率约为 623 W 时, 获得最大输出功率为 51.5 W 的 355 nm 激光, 脉冲宽度为 36.5 ns, 光-光转换效率大于 8%。测得 x 与 y 方向的光束质量因子分别为 $M_x^2=10.89$, $M_y^2=12.32$ 。

关键词 激光器; 紫外激光器; 三倍频; 355 nm; LBO

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071403

Intra-Cavity Triple Frequency Ultraviolet Laser with High Power and High Efficiency

Xiong Jingping Qian Jinning Chen Risheng

Research Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China

Abstract A intra-cavity triple frequency 355 nm ultraviolet laser with high power and high efficiency is reported. Type-II phase matching is used both in second harmonic generation and third harmonic generation. Polarization states of harmonic lasers are selected to improve the conversion efficiency from the fundamental laser at 1064 nm to the third harmonic laser at 355 nm. A simple linear resonance cavity is composed of a laser diode side-pumped Nd:YAG module, two acousto-optic Q-switches, two LBO crystals separately as a second harmonic generator and a third harmonic generator. A maximum output power at 355 nm of 51.5 W is obtained at repetition rate of 10 kHz under the optical pump power of 623 W. The corresponding pulse width is 36.5 ns at 355 nm, the optical-optical efficiency is more than 8%. The measured beam quality factor in x and y -directions are $M_x^2=10.89$, $M_y^2=12.32$, respectively.

Key words lasers; ultraviolet laser; triple frequency; 355 nm; LBO

OCIS codes 140.3480; 140.3540; 140.3610; 190.2620

1 引言

紫外(UV)激光由于其波长短,具有光子能量大,聚焦性能好的特点。用于加工材料时,高能量光子可以直接破坏材料的化学键,热影响区域极小,是一种冷处理过程,因此,可以获得好的加工质量。当前,紫外激光器已经广泛应用于科研、军事和工业等领域,尤其是钻孔、打标、划片、焊接等工业微加工领域^[1-3]。激光二极管(LD)抽运的全固态 355 nm 紫外激光器具有体积小、效率高、寿命长等诸多优点,近年来发展迅速,成为激光技术领域的研究热点之一^[4-10]。采用 Nd:YAG 激光器输出的 1064 nm 激光作为基频光进行腔外或腔内三倍频(THG)是获得 355 nm 紫外激光的常用方法。采用腔外三倍频方法时,要获得高功率的 355 nm 激光,1064 nm 基频光须同时具备高功率和高光束质量。为了获得高功率高光束质量的基频光,往往需要对一束高光束质量的种子光进行多级放大,但是系统整体结构复杂^[4-6]。利用腔内三倍频产生高功率的 355 nm 激光,具有结构简单、实用性好的优点^[8-10]。本文采用一个 LD 侧面抽运 Nd:YAG 棒的模块,通过声光 Q 开关调制,在腔内使用两块 LBO 晶体分别进行二倍频(SHG)和三倍频,实现了功率大于 50 W 的 355 nm 紫外激光输出。

收稿日期: 2015-03-03; 收到修改稿日期: 2015-03-09; 网络出版日期: 2015-06-12

基金项目: 中核集团青年科技创新团队项目(2013年)

作者简介: 熊景平(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事高功率全固态激光器方面的研究。

E-mail: xjp8210@163.com

2 实验设计

用于腔内三倍频研究的LD侧面抽运模块,其808 nm抽运光最大额定功率为800 W。Nd:YAG棒的尺寸为 $\Phi 4 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$,Nd掺杂原子数分数为0.6%,其静态热透镜焦距随抽运光功率的变化(测量值与拟合曲线)如图1所示。

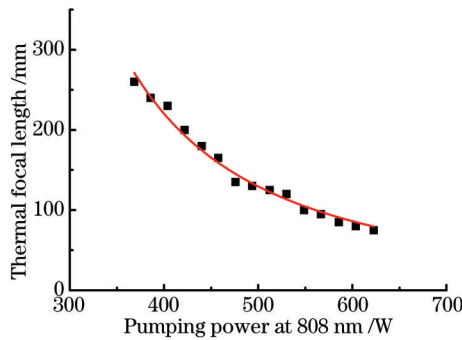


图1 抽运模块的热透镜焦距

Fig.1 Thermal focal length of pumping module

为了实现高功率的355 nm三倍频紫外激光输出,倍频晶体与和频晶体均选择损伤阈值高且生长工艺成熟的LBO晶体。要提高从1064 nm基频光到355 nm三倍频光的转换效率,还需要进行合理的三倍频设计。三倍频的偏振匹配结构有两种方式可供选择,一种方式是I类倍频+II类和频,如图2(a)所示,该方式适合基频光为线偏振的情况;另一种方式是II类倍频+II类和频的偏振失配设计^[1],如图2(b)所示,适合基频光为椭圆偏振的情况。考虑到Nd:YAG激光器产生的1064 nm基频光不是线偏光,如果采用I类倍频+II类和频的三倍频结构产生355 nm紫外激光,就需要在腔内加入选偏元件,这将增大谐振腔的复杂性和不稳定性。于是,本文采取了II类倍频+II类和频的三倍频结构来产生355 nm紫外激光。理论上,这种匹配方式初始入射基频光的o光和e光的光子数最佳比例为2:1。由于参与和频的基频光与二倍频光在空间和时域上不能完全匹配,入射基频光o光和e光的理想光子数比应显著大于2:1。

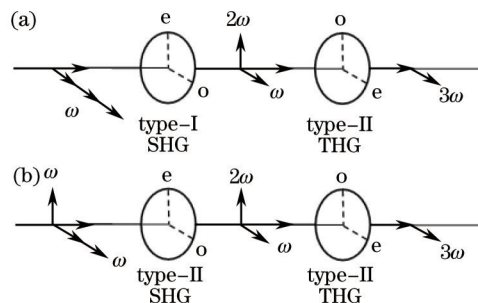


图2 二倍频与三倍频的偏振匹配示意图。(a) I类倍频+II类和频;(b) II类倍频+II类和频

Fig.2 Schematic of polarization states match of SHG and THG. (a) Type I SHG+type II THG; (b) type II SHG+type II THG

根据基频光的偏振特性,选择倍频晶体与和频晶体的方向,可获得相对较高的三倍频转换效率。尽管通常认为Nd:YAG产生的1064 nm激光为非偏振光,但本实验所用模块的1064 nm输出光却呈现出明显的偏振性,用偏振棱镜测得1064 nm基频光中p光与s光的功率比约为5:1,推测原因可能是受到808 nm抽运光的偏振特性影响。利用模块的偏振特性进行相应的偏振匹配设计,就能提高基频光到三倍频光的转换效率。根据测量结果,当取基频光p光为o光,s光为e光进行倍频,使尽可能多的基频光最终转换为三倍频紫外光。

采用简单紧凑的平平直通谐振腔结构,设计了如图3所示的腔内三倍频355 nm紫外激光器实验装置。激光器谐振腔由全反镜M1、声光Q开关(Q1、Q2)、抽运模块、谐波反射镜M2、两块LBO倍频晶体及输出镜M3构成。谐振腔接近于对称平平腔,腔长约为530 mm。为了增强对激光的关断能力,采用了两个正交放置的声光Q开关(Q1、Q2)进行调制。其中,M1镜对1064 nm波长高反,M2镜对波长1064 nm高透,对波长532 nm/355 nm高反,M3镜对波长1064 nm/532 nm高反,对波长355 nm高透。LBO1为倍频晶体,长度为25 mm,LBO2为和频晶体,长度为30 mm,两晶体均采用II类临界相位匹配,由水冷机控制其温度,控温精度为 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。LBO1的切割角度 $\theta=21.1^\circ$, $\varphi=90^\circ$,通光面镀对波长1064 nm/532 nm增透膜,LBO2切割角度

$\theta=42.5^\circ$, $\varphi=90^\circ$, 通光面镀对波长 1064 nm/532 nm/355 nm 增透膜。M4 镜与 M3 镜完全相同, 用于滤除出射激光中残留的少量 1064 nm 基频光与 532 nm 倍频光。

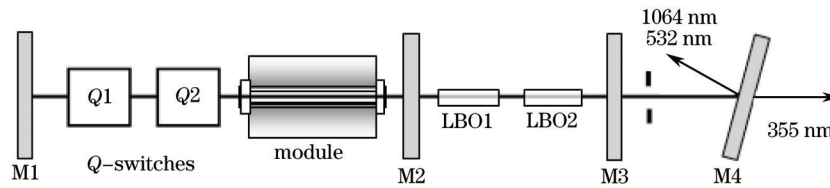


图3 腔内三倍频 355 nm 紫外激光器实验装置图

Fig.3 Schematic setup of intra-cavity frequency-tripled 355 nm UV laser

3 实验结果与分析

使用图3的实验装置,在调Q重复频率为 10 kHz 时,分别对 1064 nm 红外基频光、532 nm 绿色倍频光与 355 nm 紫外和频光的输出特性进行了测量。

首先在图3所示谐振腔结构中,不加入倍频晶体、和频晶体以及镜片 M2 与 M4,将紫外输出镜 M3 换成对波长 1064 nm 透射率为 20% 的耦合输出镜,测量 1064 nm 基频光的输出功率与脉冲宽度。

然后保持谐振腔长度不变,腔内加入谐波反射镜 M2 与 LBO 倍频晶体,输出镜更换为绿光输出镜(对 1064 nm 高反和对 532 nm 高透),测量 532 nm 倍频绿光的输出功率与脉宽。

最后恢复图3所示的实验装置,进行腔内三倍频实验,记录 355 nm 紫外激光功率与脉宽。基频 1064 nm、倍频 532 nm 与和频 355 nm 激光输出功率与脉宽的测量数据如图 4、5 所示。

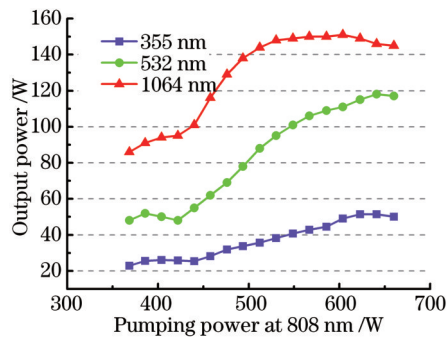


图4 1064、532、355 nm 激光的输出功率

Fig.4 Output power of laser at 1064, 532 and 355 nm

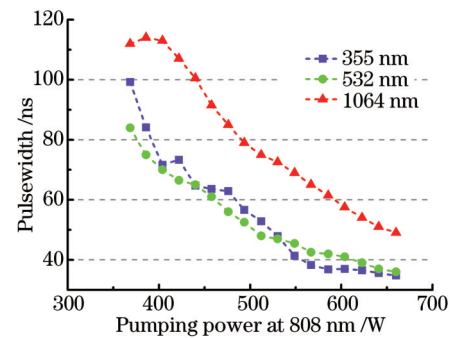


图5 1064、532、355 nm 激光的脉宽

Fig.5 Pulse width of laser at 1064, 532 and 355 nm

在重复频率为 10 kHz, 808 nm 抽运光功率约为 604 W 时, 1064 nm 基频光最大输出功率为 151 W, 相应脉宽为 57.5 ns。当抽运光功率约为 641 W 时, 获得最大的 532 nm 绿光功率为 118 W, 对应脉宽为 37 ns。当抽运光功率约为 623 W 时, 355 nm 激光最大输出功率达 51.5 W, 脉冲宽度为 36.5 ns, 光-光转换效率为 8.27%。若继续增加抽运光功率, 355 nm 激光功率将不再增加, 反而略有下降。

从 355 nm 激光的输出曲线可以看到, 在抽运光功率为 440 W 左右时, 355 nm 激光功率出现了小幅下降, 这是因为在此附近存在一个谐振腔不完全对称导致的小非稳区, 继续增加抽运功率则谐振腔进入新的稳区, 激光输出功率又开始增大, 当抽运功率达到 623 W 以上时, 由于模块严重的热透镜效应, 谐振腔开始进入深度非稳区, 故 355 nm 激光功率不再增加。

当 355 nm 激光的输出功率约 50 W 时, 近场空间能量分布如图 6 所示。使用移动刀口法^[12]测算了 355 nm 紫外激光的光束质量因子, 得到 x 方向与 y 方向的 M^2 因子分别为 $M_x^2=10.89$, $M_y^2=12.32$ 。

改变声光 Q 开关的调制频率, 355 nm 紫外激光的输出参数亦随之变化。图 7 为不同重复频率下测得的 355 nm 紫外激光功率与脉宽, 激光平均功率在 10 kHz 时最大, 脉宽则随重复频率增加而增大。

在重复频率为 10 kHz, 输出功率约为 42.5 W 时, 对研制的 355 nm 紫外激光器样机(图 8)进行了 6 h 的短时间考核, 紫外激光功率平均值为 42.56 W, 最大值为 42.82 W, 最小值为 41.74 W, 功率波动幅度约为 $\pm 1.3\%$, 考核数据如图 9 所示。从考核数据看, 激光功率比较稳定, 造成功率波动的主要原因是 LBO 晶体温度变化

导致的轻微相位失配。

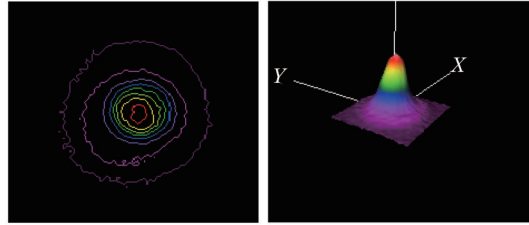


图6 355 nm 激光近场能量分布

Fig.6 Near-field intensity profile of 355 nm laser beam

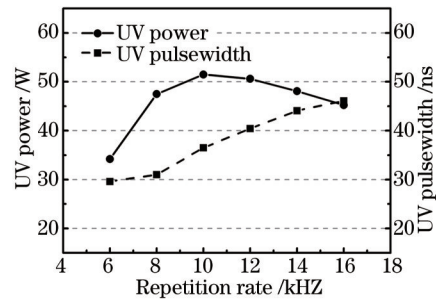


图7 不同重复频率时 355 nm 激光功率与脉宽

Fig.7 Output power and pulse width of 355nm laser at different repetition rates

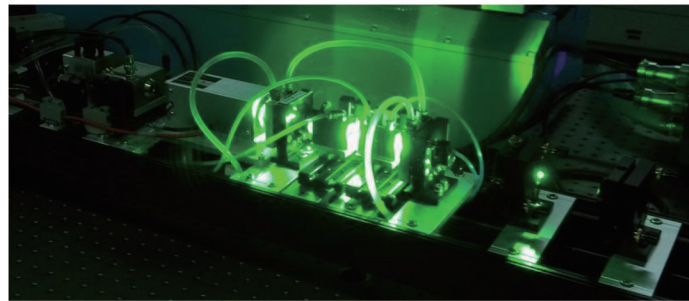


图8 355 nm 紫外激光器实物图

Fig.8 Picture of 355 nm UV laser

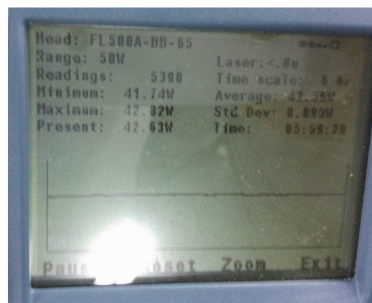


图9 6 h 内的 355 nm 激光功率波动

Fig.9 Power fluctuation of 355 nm laser in 6 h

4 结 论

使用一个 Nd:YAG 侧面抽运模块,进行了腔内三倍频紫外激光器的实验研究,获得了高效高功率的 355 nm 激光输出。在重复频率为 10 kHz,抽运光功率约为 623 W 时,355 nm 紫外激光最大输出功率为 51.5 W,脉冲宽度为 36.5 ns,光-光转换效率大于 8%,测得 x 方向和 y 方向的光束质量因子 M^2 分别为 10.89 和 12.32。研制的 355 nm 紫外激光器采用平平直通谐振腔,结构简单紧凑,调节方便,实用性好。通过对抽运模块和倍频设计的优化,将有望获得更高功率、更高转换效率以及更好光束质量的 355 nm 紫外激光。

参考文献

- 1 Zhang Fei, Duan Jun, Zeng Xiaoyan, *et al.*. Study of blind holes drilling on flexible circuit board using 355 nm UV laser[J]. Chinese J lasers, 2009, 36(12): 3143-3148.
张 菲, 段 军, 曾晓雁, 等. 355 nm 紫外激光加工柔性线路板盲孔的研究[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3143-3148.
- 2 Luo Gongxu, Chen Jun, Wang Guoqing, *et al.*. Application of UV laser micro-processing[J]. Applied Laser, 2011, 31(3): 228-231.
骆公序, 陈 俊, 王国庆, 等. 紫外激光精细加工应用研究[J]. 应用激光, 2011, 31(3): 228-231.
- 3 Jiang Zhaohua, Zhang Wei, Pan Yong, *et al.*. UV laser fine processing system with two optical module and its application[J]. Applied Laser, 2011, 31(4): 279-284.
姜兆华, 张 伟, 潘 涌, 等. 紫外激光双光头精细加工系统及其应用[J]. 应用激光, 2011, 31(4): 279-284.
- 4 Liu Qiang, Yan Xingpeng, Chen Hailong, *et al.*. New progress in high-power all-solid-state ultraviolet laser[J]. Chinese J lasers, 2010, 37(9): 2289-2298.
柳 强, 闫兴鹏, 陈海龙, 等. 高功率全固态紫外激光器研究新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2289-2298.
- 5 Li Bin, Yao Jianquan, Ding Xin, *et al.*. High efficiency extra-cavity frequency conversion UV laser[J]. High Power Laser and Particle Beam, 2011, 23(2): 290-292.
李 斌, 姚建铨, 丁 欣, 等. 高效腔外频率变换紫外激光器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 290-292.
- 6 Yang Tao, Zhao Shuyun, Zhang Chi, *et al.*. LD end pumped 355 nm UV laser[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(3): 279-282.
杨 涛, 赵书云, 张 弛, 等. LD 端面泵浦 355 nm 紫外激光器[J]. 激光与红外, 2012, 42(3): 279-282.
- 7 Zheng Boran, Yao Yucheng, Huang Chuyun. Experiment of double-end-pumped intra-cavity triple frequency ultraviolet laser[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 155-157.
郑伯然, 姚育成, 黄楚云, 等. 双端抽运腔内和频紫外激光器的实验研究[J]. 激光技术, 2013, 37(2): 155-157.
- 8 Dong Yunsheng, Guo Qiang, Wang Shouzhong, *et al.*. High power ultraviolet Nd: YAG laser pumped by laser-diode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 449-451.
董云升, 郭 强, 王首长, 等. 激光二极管泵浦高功率 Nd: YAG 紫外激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 449-451.
- 9 Hu Ailan, Guo Qiang, Wu Bian, *et al.*. LD pumped 355-nm quasi-CW ultraviolet laser[J]. Chinese J lasers, 2009, 36(7): 1810-1813.
胡爱兰, 郭 强, 吴 边, 等. LD 抽运 355-nm 准连续紫外激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1810-1813.
- 10 D R Dudley, O Mehl, G Y Wang, *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: 71930Z.
- 11 W Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Trans. BeiJing: Science Press, 2002: 534-536.
W.克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002: 534-536.
- 12 Lü Baida. Laser Optics: Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 81-83.
吕百达. 激光光学-光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 81-83.

栏目编辑: 宋梅梅