

大功率准连续 355 nm 紫外全固态激光器的研究

田明¹ 王菲^{1*} 李玉瑶¹ 焦正超¹ 罗宽¹ 车英¹ 王晓华²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 报道了一台激光二极管(LD)侧面抽运Nd:YAG腔内倍频与和频准连续355 nm紫外激光器。采用双头Q开关调制的LD侧面抽运Nd:YAG激光器,通过在腔内置入I类非临界相位匹配的三硼酸锂(LBO)晶体进行倍频获得532 nm波长准连续激光,置入两块II类相位匹配的LBO晶体对基频光和倍频光进行两次和频,从而获得了大功率准连续355 nm紫外激光输出。在注入电功率为939.6 W、重复频率为8 kHz时,355 nm激光最大输出功率为15.3 W,脉宽为90 ns,总转换效率为1.63%,其光束质量 M_x^2, M_y^2 分别为4.23和4.56,功率不稳定性为 $\pm 2.7\%$ 。

关键词 激光器;全固态紫外激光器;声光调Q;和频;三硼酸锂晶体

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.081401

Study on a High Power QCW 355 nm Laser Diode Pumped Solid State Laser

Tian Ming¹ Wang Fei¹ Li Yuyao¹ Jiao Zhengchao¹ Luo Kuan¹

Che Ying¹ Wang Xiaohua²

¹School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A laser diode(LD) side pumped acousto-optic Q-switched Nd:YAG solid state 355 nm ultraviolet laser is reported by using intra cavity double frequency and sum frequency mixing. The Nd:YAG crystal is side-pumped by a LD, the intra cavity green radiation is generated using a type I non-critical phase matched lithium triborate (LBO) and subsequent frequency mixing in two type II LBO crystals. A high power and high repetition rate 355 nm ultraviolet laser is obtained by sum frequency mixing back and forth. The output power of 15.3 W at 355 nm is obtained at the pump power of 939.6 W and repetition frequency of 8 kHz with pulse width as short as 90 ns. The conversion efficiency is 1.63%. The beam quality M_x^2, M_y^2 is 4.33 and 4.56, respectively, and the degree of power instability is $\pm 2.7\%$.

Key words lasers; all solid state ultraviolet laser; acousto-optic Q switch; sum frequency mixing; lithium triborate crystal

OCIS codes 140.3610; 140.3480; 190.4223

1 引言

紫外激光器具有能量集中、波长短、单光子能量、分辨率高及聚焦光斑小等优点,在太阳能电池、集成电路、半导体照明及快速微成型等领域具有广泛的应用前景^[1-4]。半导体抽运全固态激光器通过非线性光学频率变换手段^[5-6]获得的紫外激光器具有光束质量好、可靠性高、工作稳定性好及体积紧凑等突出优势,占据了紫外激光器应用的绝大部分份额。

紫外激光器中应用最广泛的当属355 nm波长激光,进一步拓宽紫外激光器的应用范围是研究人员不懈追

收稿日期: 2013-11-03; 收到修改稿日期: 2014-01-08; 网络出版日期: 2014-07-02

基金项目: 吉林省科技支撑计划(20110328)

作者简介: 田明(1971—),男,副教授,主要从事光电技术方面的研究。E-mail: tianming@cust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: feewang@163.com

求的目标,但在一定程度上受制于355 nm紫外激光的输出功率和光束质量,因此研究高功率和高光束质量的355 nm紫外激光器势在必行^[7-9]。目前,获得355 nm的基频光激光介质主要有Nd:YAG^[5,8-10]和Nd:YVO₄^[4,6,11]晶体,由于Nd:YVO₄晶体不易生长大尺寸,只适用于激光二极管(LD)端面抽运方式,成本较高,热导率低,大功率抽运时热效应严重,而Nd:YAG晶体则可以避免上述问题,适于LD侧面抽运,目前已经实现了160 W、355 nm激光输出^[10]。

本文采用LD侧面抽运Nd:YAG晶体,利用双头声光Q开关对谐振腔进行调制,在腔内置入I类非临界相位匹配的三硼酸锂(LBO)晶体进行倍频,获得532 nm波长准连续激光,置入两块II类相位匹配的LBO晶体对基频光和倍频光进行和频,从而获得了大功率准连续355 nm紫外激光输出。

2 激光器实验装置

采用平行平面对称腔结构,激光晶体(等效为透镜)为Nd:YAG晶体,位于等效谐振腔的中心位置,掺杂浓度为0.6%(原子数分数),尺寸为 $\phi 3\text{ mm}\times 110\text{ mm}$,有效长度为100 mm,双端面镀制对1064 nm的减反射膜(反射率 $R_{1064}\leq 0.3\%$)。利用辅助透镜构造开普勒望远镜系统法^[12]测量晶体热焦距范围为190 mm~ ∞ ,应用软件LASCAD优化设计激光器谐振腔腔长为600 mm。

实验装置如图1所示。半导体侧面抽运模块GM采用三向均匀抽运方式,最大注入电功率为939.6 W,LD峰值波长为 $808\text{ nm}\pm 3\text{ nm}$ 。平面镜M₁和M₂为激光器基频光1064 nm波长的两个谐振腔镜,M₁镜对1064 nm波长高反射($R\geq 99.8\%$),M₂镜的左侧面镀制对1064 nm、532 nm和355 nm三个波长高反射($R_{1064, 532, 355}\geq 99.5\%$)的光学薄膜,镀膜测试曲线如图2所示。M₃镜为平面分色镜,与谐振腔光轴呈45°角放置,其对45°角入射的1064 nm波长光反射率高于99.4%,对355 nm波长光透射率高于99.5%。M₄镜亦为平面分色镜,其对1064 nm和355 nm波长光的透射率高于99.8%,而对532 nm波长光的反射率高于98%。图1中Qr为石英旋光片,用于补偿Nd:YAG晶体热退偏效应,从而改善基频光光束质量,同时又可以提高声光Q开关的关断连续激光能力,其双面镀制对1064 nm的减反射膜($R_{1064}\leq 0.3\%$)。声光调制器为英国古奇公司(Gooch & Housego)生产的水冷型双头声光Q开关,置于Nd:YAG晶体的左侧,每一个输入头可注入最大射频功率为50 W。

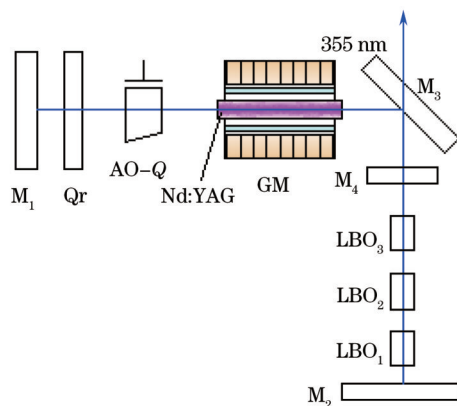


图1 准连续355 nm激光器实验装置

Fig.1 Experimental setup of QCW 355 nm laser

532 nm倍频光由I类非临界相位匹配LBO晶体(LBO₁)对基频光1064 nm倍频来获得。532 nm倍频光和1064 nm基频光在II类相位匹配的三倍频晶体LBO晶体(LBO₂和LBO₃)中进行和频而产生355 nm紫外激光,三倍频晶体的相位匹配角 θ 、 ϕ 分别为42.4°和90°。三个LBO晶体的双端面均镀制1064 nm、532 nm和355 nm三个波长的减反射膜层($R_{1064, 532, 355}\leq 0.3\%$),尺寸均为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,这些晶体侧面包裹薄铜箔,然后被装夹到铜热沉中进行控温。

3 实验结果与分析

通过分光测量获得355 nm波长激光的输出功率曲线如图3所示。随着抽运功率的增大,355 nm波长光输出功率呈现增长的趋势,由于基频光功率密度的增大,倍频光功率密度也相应增大,因而355 nm波长激

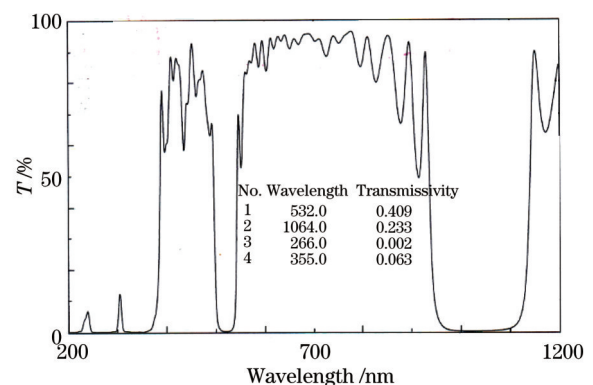


图2 M₂镜表面薄膜测试曲线

Fig.2 Test curve of film on the M₂ mirror

光输出功率曲线的斜率在逐渐增大。在不同重复频率下,355 nm 波长光输出功率曲线存在一定的差异,在重复频率为 8 kHz 时输出功率最大,达到 15.3 W,而其他重复频率下的最大输出功率低于 15.3 W。由于腔内基频光功率密度低,重复频率为 20 kHz 时 355 nm 激光输出功率始终低于重复频率为 8 kHz 时的输出功率。在重复频率为 4 kHz 时 355 nm 激光输出功率曲线与 8 kHz 时的输出功率曲线存在交叉,即在抽运电流低于 26 A 时,由于重复频率低,其相应的基频光脉冲宽度较窄,相比之下,4 kHz 时基频光功率密度高于 8 kHz 时基频光功率密度。随着抽运电流的进一步加大,尽管 4 kHz 时基频光功率密度较高,同样由于脉冲宽度较窄而使得平均功率下降,而 8 kHz 时基频光功率密度有所提升,且此时平均功率较高,因此 355 nm 激光输出功率较高。

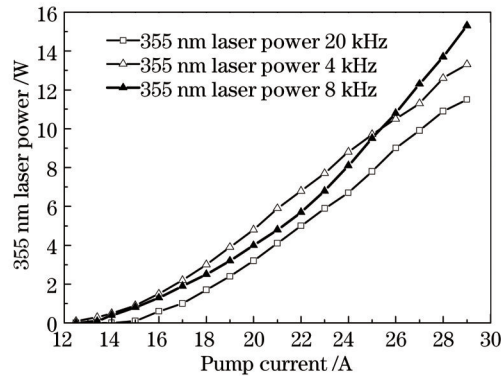


图3 355 nm 激光功率曲线

Fig.3 Curve of 355 nm laser power

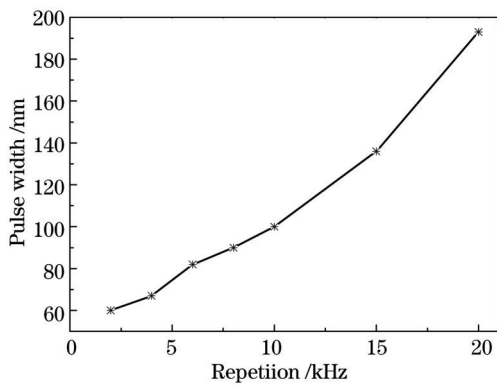


图4 不同重复频率下 355 nm 激光脉宽曲线

Fig.4 Pulse width of 355 nm at different repetition rates

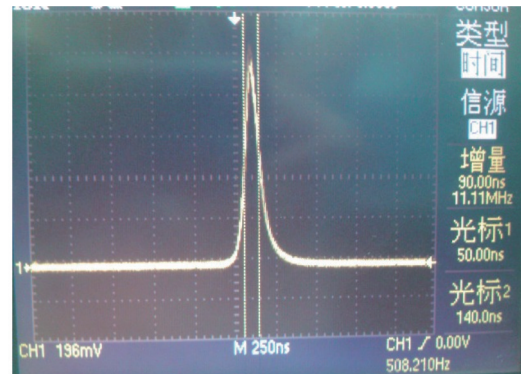


图5 8 kHz 时 355 nm 激光脉冲波形

Fig.5 Pulse shape of 355 nm laser at 8 kHz

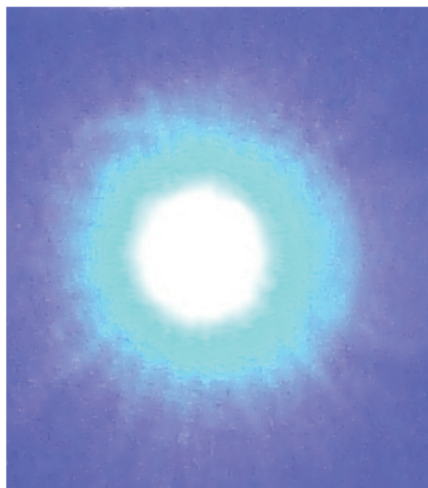


图6 355 nm 激光光斑

Fig.6 Beam spot of 355 nm laser

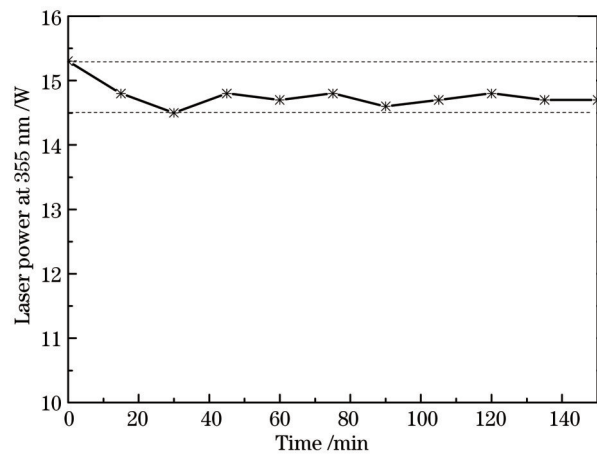


图7 355 nm 激光功率稳定性曲线

Fig.7 Curve of 355 nm laser power stability

在最大抽运功率下,不同重复频率对应的 355 nm 激光脉冲宽度如图 4 所示,重复频率愈高获得的脉冲宽度愈宽。在重复频率为 8 kHz 时,355 nm 激光功率为 15.3 W,脉冲波形如图 5 所示,脉冲宽度为 90 ns,采用激光光束质量测量仪对输出的 355 nm 激光进行测量,其光束质量 M_x^2, M_y^2 分别为 4.23 和 4.56,光斑如图 6 所示。连续运转 2.5 h,平均每 15 min 记录一次激光功率,数据如图 7 所示,激光功率最大为 15.3 W,最低为 14.5 W,功率不稳定性为 $\pm 2.7\%$ 。不同时刻激光功率有一定的变化,单纯从记录时间点的功率来看,功率相对稳定,但功率计显示的数据变化表明功率波动频繁,这主要是由于非线性光学晶体温度失配所致。

4 结 论

利用双头 Q 开关来调制大功率 LD 侧面抽运 Nd:YAG 激光器,在腔内置入 I 类非临界相位匹配的 LBO 晶体进行倍频获得 532 nm 波长准连续激光,采用 L 型谐振腔结构来提高倍频转换效率。为了有效地提高和频转换效率,在谐振腔内置入两块 II 类相位匹配的 LBO 晶体对基频光和倍频光进行和频,从而获得了大功率准连续 355 nm 紫外激光输出。在注入电功率为 939.6 W,重复频率为 8 kHz 时,355 nm 激光最大输出功率为 15.3 W,脉宽为 90 ns,总转换效率为 1.63%,功率不稳定性为 $\pm 2.7\%$,其光束质量 M_x^2, M_y^2 分别为 4.23 和 4.56。

参 考 文 献

- 1 S R I Gabran, R R Mansour, M M A Salama. Maskless pattern transfer using 355 nm laser [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(5): 710-716.
- 2 Li Bin, Yao Jianquan, Ding Xin, *et al.*. High efficiency extra-cavity frequency conversion UV laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(8): 2065-2068.
李 斌,姚建铨,丁 欣,等. 激光二极管侧面抽运高功率 266 nm 紫外激光器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 2065-2068.
- 3 Guo Yajing, Tang Shunxing, Tang Qing, *et al.*. Study of laser-induced damage in fused silica by 351 nm laser near-field irradiation [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502004.
郭亚晶,唐顺兴,唐 清,等. 基于激光近场辐照的 351 nm 激光诱导熔石英损伤研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502004.
- 4 Yang Huan, Huang Shan, Duan Jun, *et al.*. Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103003.
杨 焕,黄 珊,段 军,等. 飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103003.
- 5 Lu Tingting, Li Xiaoli, Zang Huaguo, *et al.*. Watt level high repetition rate ultraviolet laser with $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ electro-optic Q-switch [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0402005.
陆婷婷,李小莉,臧华国,等. $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 晶体电光调 Q 高重复频率瓦级紫外激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0402005.
- 6 Hong Hailong, Liu Qiang, Huang Lei, *et al.*. High-beam-quality all solid state 355 nm ultraviolet pulsed laser based on a master-oscillator power-amplifier system pumped at 888 nm [J]. Appl Phys Express, 2012, 5(9): 092705.
- 7 C Jung, W Shin, B A Yu, *et al.*. Enhanced 355-nm generation using a simple method to compensate for walk-off loss [J]. Opt Express, 2012, 20(2): 941-948.
- 8 B Li, J Yao, X Ding, *et al.*. High efficiency generation of 355 nm radiation by extra-cavity frequency conversion [J]. Opt Commun, 2010, 283(18): 3497-3499.
- 9 B T Zhang, H T Huang, J F Yang, *et al.*. Generation of 7.8 W at 355 nm from an efficient and compact intracavity frequency-tripled Nd:YAG laser [J]. Opt Commun, 2010, 283(11): 2369-2372.
- 10 Pan Jun, Zhu Siqi, Chen Zhenqiang, *et al.*. Application of hydrothermal KTP in LD side pumped Nd:YAG internally frequency tripled 355 nm laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 081405.
潘 俊,朱思祁,陈振强,等. 水热法 KTP 在 355 nm 紫外激光器中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 081405.
- 11 Y J Huang, P Y Chiang, H C Liang, *et al.*. Efficient high-power UV laser generated by an optimized flat-flat actively Q-switched laser with extra-cavity harmonic generations [J]. Opt Commun, 2012, 285(1): 59-63.
- 12 Wang Fei, Feng Jinliang, Wei Jianwei, *et al.*. Measurement of thermal focus length by accessorial lens to constitute Keplerian telescope system [J]. J Optoelectronics·Laser, 2006, 17(2): 219-221.
王 菲,冯进良,魏剑维,等. 辅助透镜构造开普勒望远系统法测量热焦距[J]. 光电子·激光, 2006, 17(2): 219-221.