

# 水热法 KTP 在 355 nm 紫外激光器中的应用研究

潘俊<sup>1</sup> 朱思祁<sup>1</sup> 陈振强<sup>1,2</sup> 阳其国<sup>1</sup> 王苏娥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>暨南大学光电工程研究所, 广东 广州 510632

<sup>2</sup>暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632

**摘要** 使用水热法 KTP 晶体实现了 355 nm 紫外激光输出。实验中采用声光调 Q 技术, 选用模体值大的 V 形谐振腔结构, 对激光二极管(LD)侧抽运 Nd:YAG 模块产生的基波, 分别利用水热法 KTP 晶体二倍频、LBO 晶体三倍频, 获得了高功率、高光束质量的 355 nm 紫外激光输出。当抽运功率为 93.09 W, 重复频率为 4.9 kHz 时, 获得 4.133 W 的紫外 355 nm 激光输出, 光-光转换效率为 4.44%。

**关键词** 激光器; 水热法 KTP; 紫外激光器; 声光调 Q; 内腔三倍频

中图分类号 TN248.1; TN23

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.081405

## Application of Hydrothermal KTP in LD Side Pumped Nd:YAG Internally Frequency Tripled 355 nm Laser

Pan Jun<sup>1</sup> Zhu Siqi<sup>1</sup> Chen Zhenqiang<sup>1,2</sup> Yang Qiguo<sup>1</sup> Wang Su'e<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies, Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

**Abstract** A 355 nm ultraviolet laser with hydrothermal KTP is demonstrated. A high power ultraviolet laser with high beam quality at 355 nm is obtained by internally frequency tripling of a diode side-pumped acousto-optic (AO) Q-switched Nd:YAG laser. Type II phase-matched hydrothermal KTP and LBO crystals are used for the second harmonic generation and the third harmonic generation, severally. Using the V-shaped resonator cavity, under the pump power of 93.09 W, 4.133 W average output power at 355 nm is obtained at 4.9 kHz, corresponding to the pump-to-ultraviolet conversion efficiency of 4.44%.

**Key words** laser; hydrothermally grown KTP; ultraviolet laser; acousto-optic Q-switch; intracavity frequency tripling

**OCIS codes** 140.7240; 140.3610; 140.3580; 140.3480; 140.3540

## 1 引言

紫外(UV)激光器以其波长短、易聚焦、分辨率高等优点而被广泛应用在光学信息存储、紫外固化、大气探测、精密材料加工、光刻、光印刷、光谱分析、医疗等方面<sup>[1~5]</sup>。长期以来,准分子紫外激光器是获得紫外波段激光的主要来源。随着半导体激光技术的不断成熟,以激光器二极管(LD)作为抽运源的全固态紫外晶体激光器逐渐成为紫外激光器发展的主要方向。目前,LD抽运全固态紫外激光输出主要是利用两块非线性光学晶体对近红外固体激光进行倍频(SHG)和三倍频(THG)来实现的。国内外已有大量文献对 355 nm、266 nm 紫外激光器进行了报道<sup>[6~11]</sup>,使用的非线性光学晶体组合主要有 LBO(SHG)+LBO(THG)、KTP

收稿日期: 2012-05-11; 收到修改稿日期: 2012-05-18; 网络出版日期: 2012-06-07

基金项目: 广东省省部产学研项目(2009B091300072, 2010B090500022, 2009B090600040)和中央高校基本科研业务费专项(21611515)资助课题。

作者简介: 潘俊(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: panj\_103@yahoo.com.cn

导师简介: 陈振强(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光技术与激光器件方面的研究。

E-mail: tzqchen@jnu.edu.cn(通信联系人)

(SHG)+LBO(THG)等。然而,前期报道中使用的倍频晶体 KTP 都是熔盐法生长的<sup>[12,13]</sup>,尚未见到有关温差水热法 KTP 在 355 nm 紫外激光器中应用的报道。由于温差水热法 KTP 相对于熔盐法 KTP 具有抗激光损伤阈值高、灰迹现象不明显等优点,使得其在紫外激光器的应用中具有很好的前景。

本文报道的是温差水热法 KTP 晶体在获得 355 nm 紫外激光方面的应用研究结果。分别利用温差水热法 KTP 晶体与熔盐法 LBO 晶体对 LD 侧抽运的 Nd:YAG 产生的声光调 Q 1064 nm 激光进行腔内倍频和三倍频,实现了平均功率 4.133 W 的 355 nm 紫外激光输出,光-光转换效率达到 4.44%。

## 2 实验装置

实验结构如图 1 所示,采用的是 V 形谐振腔结构,声光 Q 开关、侧抽运模块、倍频晶体(水热法 KTP)处在同一条支路,三倍频晶体 LBO 处于另一条支路。这样的腔型结构有效地避免了水热法 KTP 晶体在 355 nm 波段的强吸收<sup>[14]</sup>。

Nd:YAG 激光棒尺寸为  $\Phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ ,掺杂浓度(原子分数)为 0.3%,激光棒两端镀有 1064 nm 增透膜,侧面打毛;抽运源采用的是江苏吉泰公司生产的半导体激光组件,LD 抽运 808 nm 最大功率为 150 W。声光 Q 开关为英国 Gooch & Housego 公司的 QS27-4S-B,重复频率从 1~50 kHz 连续可调,两端镀 1064 nm 增透膜。由于 V 形腔折叠处的输出镜为平镜,为了尽量避免热透镜效应,腔长应尽可能短,折角尽可能小。基频光谐振腔由 M1、声光 Q 开关、侧抽运模块、M2 组成,腔长 145 mm。平面镜 M1 镀 1064 nm/532 nm 高反膜( $R > 99\%$ );平面镜 M2 镀 1064 nm 高透膜( $T = 80\%$ )、532 nm/355 nm 高反膜( $R > 99.5\%$ )。平面镜 M2、水热法 KTP 晶体、平面镜 M4 构成 532 nm 的谐振腔,其腔长为 157 mm。而 355 nm 紫外激光的谐振腔由平面镜 M3、LBO 晶体、平面镜 M4 构成,腔长 57 mm。平面镜 M3 镀 1064 nm/532 nm 高反膜( $R > 99\%$ )、355 nm 高透膜( $T > 99.5\%$ );平面镜 M4 镀 1064 nm/532 nm 高反膜( $R > 99\%$ )、355 nm 高反膜( $R > 99.5\%$ )。

实验中分别采用水热法 KTP 晶体、LBO 晶体作为倍频和三倍频晶体。水热法 KTP 晶体的参数为:II 类临界相位匹配,切割角为  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 24.6^\circ$ ,尺寸为  $4.5 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm} \times 10.269 \text{ mm}$ ,晶体两面镀有 1064 nm/532 nm 双色增透膜。LBO 晶体的参数为:II 类临界相位匹配,切割角为  $\theta = 42.2^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ,尺寸为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ,晶体两面镀有 1064 nm/532 nm/355 nm 三色增透膜。为了保证非线性晶体的温度需求,使用热电制冷(TEC)片进行冷却,将晶体用锡纸包裹放入特殊加工的紫铜块调节架中并和 TEC 控制芯片连接。

## 3 实验结果及分析

当注入抽运功率 93.09 W,调 Q 重复频率为 4.9 kHz 时,获得 355 nm 紫外激光的平均功率为 4.133 W,光-光转换效率达到 4.44%。当重复频率为 4.9 kHz 时,355 nm 激光平均输出功率随抽运功率的变化,如图 2 所示。激光器的阈值功率约为 34 W,355 nm 平均功率随抽运功率的增大而增大,当 LD 的抽运功率为 93.09 W 时达到最大值。此时由于热透镜效应的影响,抽运功率增大,输出功率反而减小。

图 3 给出了抽运功率为 93.09 W 时,355 nm 激光平均输出功率随调 Q 重复频率的变化曲线。调 Q 频率为 4.9 kHz 时,其能量分布如图 4 所示。从在 355 nm 紫外激光平均输出功率为 4.133 W 时所拍摄的激光远场光斑,可以看出激光光斑基本为圆对称,经 Spiricon 公司的 M2-200S-FW 分析仪测定光束质量因子  $M^2 = 1.1$ ,近似为 TEM<sub>00</sub> 模。在侧抽运系统中,实现了接近基模的紫外激光,其主要原因在于系统运行在腔的热稳定区边缘,此时高阶模已经处于非稳区,即高阶模振荡被抑制,而基模处于稳定区内。

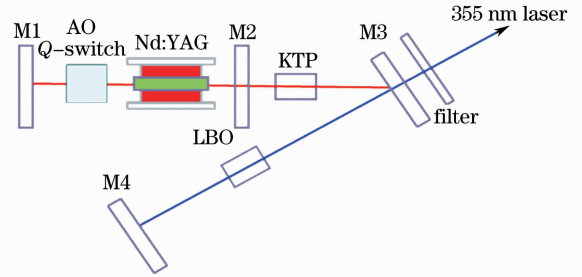


图 1 355 nm 紫外激光器实验装置图

Fig. 1 Experiment setup of 355 nm ultraviolet lasers

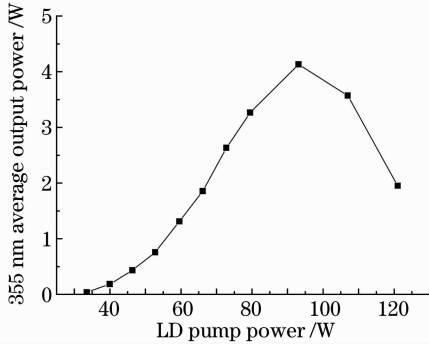


图2 355 nm 激光平均输出功率随抽运功率的变化曲线(4.9 kHz)

Fig.2 355 nm average output power versus the LD pump power at the repetition rate of 4.9 kHz

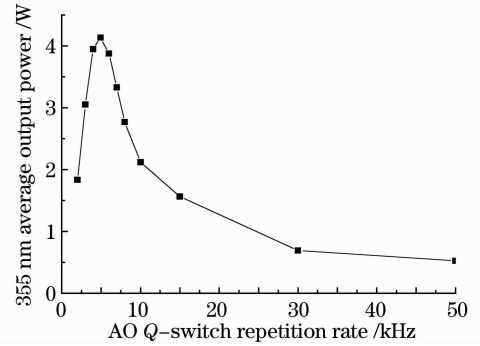


图3 355 nm 激光平均输出功率随调 Q 频率的变化曲线

Fig.3 355 nm average output power versus the AO Q-switch repetition rate

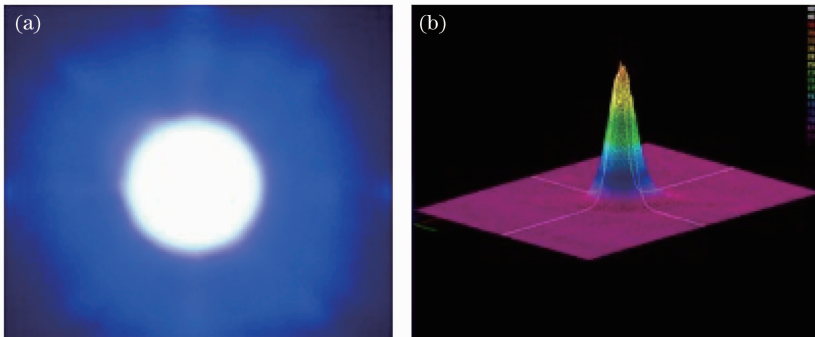


图4 355 nm 激光的远场光斑及能量分布图

Fig.4 Far field spot shape and 3D profile of the 355 nm laser

## 4 结 论

报道了一台 LD 侧面抽运 Nd:YAG 激光晶体,在 V 形谐振腔中利用水热法 KTP 晶体和 LBO 晶体分别进行内腔二倍频和三倍频而获得 355 nm 的激光器。通过声光调 Q 技术实现了较高平均功率、高光束质量的 355 nm 激光输出。当抽运功率为 93.09 W、调 Q 重复频率为 4.9 kHz 时,获得 4.133 W 的紫外 355 nm 激光输出,光-光转换效率为 4.44%。据作者所知,这是国内首次利用水热法 KTP 晶体应用在 355 nm 紫外激光输出的报道。

致谢 感谢国家特种矿物材料工程技术研究中心(桂林)提供晶体方面的帮助。

## 参 考 文 献

- Baitao Zhang, Haitao Huang, Jianfei Yang *et al.*. Generation of 7.8 W at 355 nm from an efficient and compact intracavity frequency-tripled Nd:YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(11): 2369~2372
- Liu Huan, Gong Mali. Compact LD end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> intracavity frequency-tripled 355 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1341~1346
- 刘欢, 巩马理. 紧凑型激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 内腔三倍频 355 nm 紫外激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1341~1346
- Lü Yanfei, Zhang Xihe, Yao Zhihai *et al.*. Laser-diode pumped all-solid-state continuous-wave ultraviolet laser at 355 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1048~1050
- 吕彦飞, 张喜和, 姚治海等. 激光二极管抽运全固态 355 nm 连续波紫外激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1048~1050
- Y. Bai, Y. H. Li, Z. G. Shen *et al.*. Electro-optical Q-switch low-repetition-rate narrow-pulse-width UV pulse laser at 355 nm generated by pulsed-diode-pumped Nd:YAG[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(11): 791~795

- 5 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
- 6 Bastian Gronloh, Marco Hofer, Rolf Wester *et al.*. High power UV generation at 355 nm by means of extracavity frequency conversion of a high repetition rate Innoslab MOPA system[C]. *SPIE*, 2009, **7193**: 71930Y
- 7 Fuqiang Jia, Quan Zheng, Qinghua Xue *et al.*. High-power high-repetition-rate UV light at 355 nm generated by a diode-end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(15): 2975~2979
- 8 Tan Chengqiao, Zheng Quan, Xue Qinghua *et al.*. LD end pumped Nd:YAG outcavity fourth hamonic generation high power ultraviolet laser[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(7): 490~492  
谭成桥, 郑 权, 薛庆华 等. LD 端泵 Nd:YAG/Cr:YAG 腔外变频产生高功率紫外[J]. 激光与红外, 2005, **35**(7): 490~492
- 9 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**(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
- 10 Wang Yun, Fan Xiuwei, Peng Qianqian *et al.*. LD pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal ultraviolet laser with LBO frequency tripling [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(5): 550~553  
王 云, 范秀伟, 彭倩倩 等. LD 泵浦 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体 LBO 三倍频紫外激光器[J]. 光电子 • 激光, 2005, **16**(5): 550~553
- 11 Liu Huan, Gong Mali. Compact LD end-pumped Nd:YAG intracavity frequency-tripled quasi-continuous 355 nm laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(8): 5443~5449  
刘 欢, 巩马理. 紧凑型 LD 端面抽运 Nd:YAG 内腔三倍频准连续 355 nm 紫外激光器[J]. 物理学报, 2009, **58**(8): 5443~5449
- 12 Gao Heng, Peng Xujin, Zhao Gang *et al.*. LD pumped all-solid-state quasi-continuous-wave ultraviolet laser[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(s1): 263~264  
高 恒, 彭旭金, 赵 刚 等. LD 泵浦 355nm 准连续紫外激光器[J]. 光学技术, 2008, **34**(s1): 263~264
- 13 Wang Xu, Liu Lei, Liu Juan *et al.*. Study of Q-switching ultraviolet light Nd:YAG laser[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(7): 537~541  
王 旭, 刘 磊, 刘 娟 等. 调 Q 脉冲紫外光 Nd:YAG 激光器的研究[J]. 激光与红外, 2006, **36**(7): 537~541
- 14 Huang Lingxiong, Huo Hande, Zhang Ge *et al.*. Growth and optical character of KTP crystals by hydrothermal method [J]. *J. of Synthetic Crystals*, 2007, **36**(2): 256~259  
黄凌雄, 霍汉德, 张 戈 等. KTP 晶体的水热法生长及其光学性能测量[J]. 人工晶体学报, 2007, **36**(2): 256~259