

# 紧凑型激光二极管抽运全固态 355 nm 连续波紫外激光器

刘 欢<sup>†</sup> 巩马理

(清华大学精密仪器与机械学系,光子与电子技术研究中心,北京 100084)

(2008 年 12 月 23 日收到,2009 年 2 月 6 日收到修改稿)

报道了一台激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内腔三倍频 355 nm 激光连续输出的全固态紫外激光器.激光腔采用紧凑型简单凹平直腔,腔长仅为 70 mm.利用两块 LBO 晶体进行腔内倍频、和频,当注入抽运功率为 25.27 W 时,获得最大功率为 30.6 mW 的 355 nm 连续波输出,光光转换效率为 0.12%,输出功率短期不稳定性为 5.3%,355 nm 激光输出光束质量良好.通过采用内腔倍频技术和设计合理的腔参数,实现了中小功率连续输出的全固态紫外激光器的小型化、便携化,进一步拓宽了紫外激光器的应用领域.

关键词:激光二极管端面抽运,内腔三倍频,连续波,355 nm 激光

PACC:4260D,4260F,7280H,7840

## 1. 引 言

紫外激光器具有波长短、易聚焦、能量集中、分辨率高等优点,在光学信息存储、精密材料加工、光印刷、医疗等方面具有广泛的用途<sup>[1-4]</sup>.与传统紫外波段的准分子激光器相比,激光二极管抽运的全固态紫外激光器由于具有效率高、体积小、性能稳定等诸多特点,已成为紫外激光器发展的主要方向.全固态紫外激光器主要是利用倍频、和频技术在非线性晶体(如 KTP, LBO, BBO, CLBO, CBO 等)中进行腔外或腔内频率转换得到 Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub> 或 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光的三次或四次谐波<sup>[2-8]</sup>.腔外倍频技术获得的紫外激光稳定性好,是获得大功率紫外激光的常用方法,但对腔匹配条件要求苛刻,结构复杂.目前国内外已有大量关于利用腔外倍频技术获得紫外激光的文献报道<sup>[6-15]</sup>.腔内倍频技术获得的紫外激光转换效率较高,适合于中小功率紫外激光的输出,腔内光学元件较少,激光器结构紧凑,体积小,有利于紫外激光器的广泛应用,但利用内腔倍频技术获得紫外激光的报道却相对缺乏<sup>[16-22]</sup>.

紫外激光器的运转方式分为脉冲运转和连续运转.脉冲紫外激光器峰值功率高、脉宽窄,主要应用

于激光加工领域,连续紫外激光器主要应用于光盘母盘刻录、半导体掩膜检验和光纤布拉格光栅的制造等.目前关于脉冲紫外激光器的报道屡见不鲜,而关于连续紫外激光器的报道则比较少见.1994 年, Zimmermann 等<sup>[23]</sup>用主振荡激光二极管功率放大器为光源,采用 KN 作为倍频晶体, BBO 作为四倍频晶体,获得了 2.1 mW 的 243 nm 连续紫外激光输出.1995 年, Kaneda 等<sup>[24]</sup>利用 BBO 晶体实现了腔外三倍频,获得了 186 mW 的 355 nm 连续波输出.2004 年, Sakuma 等<sup>[25]</sup>选用 CLBO 晶体作为三倍频晶体,采用腔外倍频技术实现了输出功率达 5 W 的 266 nm 连续波紫外激光器稳定运转. Coherent 公司目前推出了 200 mW 的全固态连续 266 nm 单频深紫外激光器.国内在连续紫外激光器领域发展较缓慢.2006 年,申高等<sup>[19]</sup>报道了连续 355 nm 激光输出,输出功率仅 6 mW.2007 年,吕彦飞等<sup>[20]</sup>利用两台激光器分别输出 1064 nm 激光和 532 nm 激光,然后合束进行腔内和频,实现了 114 mW 的连续 355 nm 激光输出.此方案虽然实现了较高功率的 355 nm 连续波输出,但两台激光器体积大,不易调节,成本高.本文采用简单凹平直腔结构,利用两块 LBO 晶体对激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体连续 1064 nm 激光进行了内腔二倍频和三倍频,实现了紧凑型

<sup>†</sup> E-mail: lh@mail. tsinghua. edu. cn

355 nm 连续波紫外激光器稳定运转.

## 2. 激光器腔型设计

在内腔倍频固体激光器中,常见的谐振腔有线性直腔、V 型腔和 Z 型腔等折叠谐振腔.采用折叠腔可在腔内形成多个束腰,将倍频晶体放置到较小的束腰处可提高倍频效率,但腔内元件较多,导致损耗增大,折叠腔内存在像散,影响光斑质量.采用线性直腔的优势是腔内元件较少,结构紧凑小巧,光路易于调节,对抽运功率的允许范围较大,而光束质量和倍频效率一般,但通过合理的腔参数设计,可以实现比较理想的倍频光输出.实验中我们采用紧凑型直腔结构,通过控制腔长和仔细调节光路,得到了较好的实验结果.

激光晶体的热透镜效应会使腔内光束模式变差,发散角增加,从而影响到腔内倍频效率和输出功率.在腔内倍频激光器的设计过程中应首先考虑激光晶体的热透镜效应,再根据热透镜焦距设计出合适的腔结构.

端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热透镜焦距公式可以表示为<sup>[26-27]</sup>

$$\frac{1}{f_r} = \frac{\xi P_{\text{abs}}}{4\pi K_c \omega_p^2} \left[ \frac{dn}{dT} + (n-1) \right] \alpha_T, \quad (1)$$

式中  $P_{\text{abs}}$  为吸收的抽运功率,  $\xi$  是热负荷比,  $K_c$  为热导率,  $\omega_p$  为平均抽运光斑半径,  $n$  为 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的折射率,  $\frac{dn}{dT}$  为折射率温度系数,  $\alpha_T$  为热膨胀系数.实验中采用的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的各项参数为  $\xi = 0.4$ ,  $K_c = 5.23 \text{ W/(K}\cdot\text{m)}$ ,  $\omega_p = 200 \mu\text{m}$ ,  $n = 2.192$ ,  $\frac{dn}{dT} = 5.092 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_T = 4.43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .注入抽运功率与激光晶体热透镜焦距的关系如图 1 所示.由图 1 可知,随着抽运功率的升高,激光晶体的热透镜焦距逐渐缩短,当注入抽运功率为 20 W 时,激光晶体的热透镜焦距大约为 75 mm.

随着抽运功率的升高,激光晶体的热透镜效应

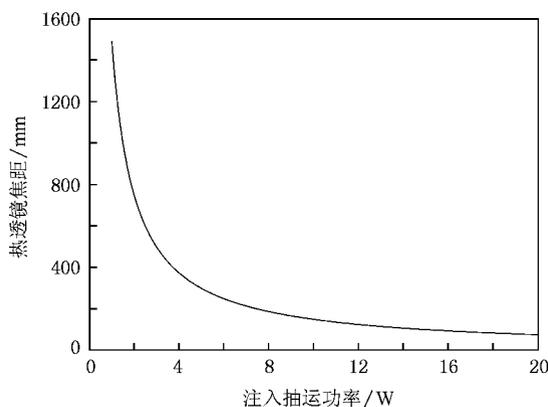


图 1 注入抽运功率与热透镜焦距的关系

不断加剧,这严重影响着激光腔的稳定性.实验中采用的激光腔结构如图 2 所示,输入镜为曲率半径为 200 mm 的平凹镜,输出镜为平镜,腔长为 70 mm.根据 ABCD 定律,当激光晶体的热透镜焦距为 120 mm 时基频光在腔内的光斑分布如图 3 所示.基频光光斑位置以 M1 镜的反射面为基准(见图 2),由此可知,基频光在激光晶体入射面的光斑半径为 295  $\mu\text{m}$ ,在输出镜上的光斑半径为 80  $\mu\text{m}$ ,基频光束腰位于输出镜上.为了获得较高的倍频效率,我们将二倍频和三倍频晶体靠近输出镜放置.当腔长为 70 mm 时激光晶体的热透镜焦距与基频光在激光晶体上光斑尺寸的关系如图 4 所示.根据已计算出的热透镜焦距与注入抽运功率的关系可知,注入抽运功率不高于 13.4 W 时,谐振腔处于第一稳区中,当注入抽运功率高于 13.4 W,谐振腔进入第二稳区,计算结果表明该紫外激光器的腔型结构能够满足实验要求.

## 3. 实验装置

LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 内腔三倍频 355 nm 连续波紫外激光器的结构如图 2 所示.谐振腔结构为紧凑型凹平直腔,腔长仅为 70 mm.采用德国 JENOPTIK 公司的 808 nm 光纤输出半导体激光器作

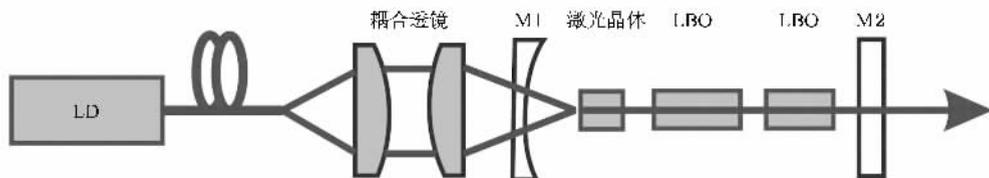


图 2 355 nm 紫外激光器实验结构示意图

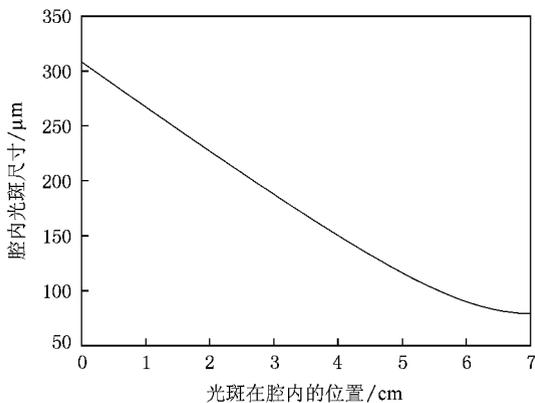


图3 基频光在腔内各个位置的光斑尺寸

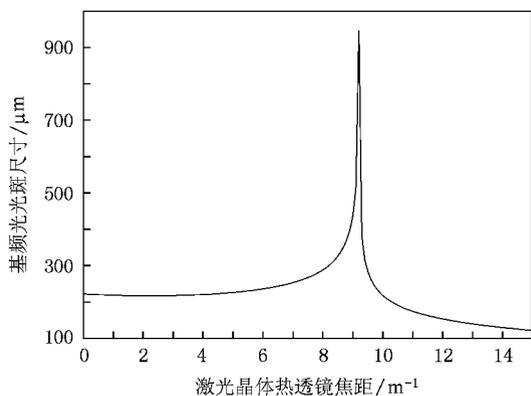


图4 激光晶体的热透镜焦距与基频光在激光晶体上光斑尺寸的关系

为抽运源,最大输出功率为 30 W,光纤芯径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.22.光学耦合系统可以将抽运光聚焦成直径约为 400  $\mu\text{m}$  的光斑,对 808 nm 激光的透过率大于 97%.增益介质为 0.3at.% 掺杂的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,尺寸为 3 mm × 3 mm × 9 mm,其中入射端面镀有对 808 和 1064 nm 高透的膜系,出射端面镀有对 1064 nm 高透的膜系.Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体由铜片紧紧包裹被放置于紫铜热沉中,通过半导体制冷器进行温度控制.根据第 2 节的腔型设计,我们选择曲率半径为 200 mm 的平凹镜 M1 作为反射镜,凹面镀有 1064 nm/532 nm 高反膜( $R > 99.9\%$ ).M1 镜上未镀有对 808 nm 高透的膜系,通过实际测量得知,M1 镜对 808 nm 的透过率大约为 80%.输出镜 M2 为平面镜,对 1064,532 和 355 nm 激光的透过率分别为 0.19%、0.57% 和 88.18%.

考虑各种非线性晶体的优缺点和实验中最佳相位匹配条件,我们采用了两块由福建福晶科技有限

公司提供的 LBO 晶体作为二倍频和三倍频晶体.二倍频晶体的参数为:I 类临界相位匹配,切割角  $\theta = 90^\circ$ , $\varphi = 12^\circ$ ,尺寸为 3 mm × 3 mm × 20 mm.晶体两面镀有对 1064 nm/532 nm 增透双色膜.三倍频晶体的参数为:II 类临界相位匹配,切割角  $\theta = 43.9^\circ$ , $\varphi = 90^\circ$ ,尺寸为 3 mm × 3 mm × 15 mm.谐振腔内的激光束在两块 LBO 晶体中的偏振匹配如图 5 所示.晶体两面镀有对 1064 nm/532 nm/355 nm 增透三色膜.由于允许温度分别只有 7.04 和 3.47 K·cm,为了获得稳定的紫外光输出,我们设计并制作了一个半导体制冷和风冷相结合的高精度温度控制系统,该系统能够对 LBO 晶体的温度进行精确的控制,其温度控制精度可达到  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ,完全能够满足实验中对 LBO 晶体温度控制的需要.

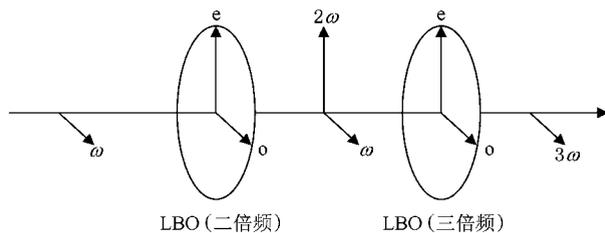


图5 LBO 晶体中倍频(I 类)和 LBO 晶体中三倍频(II 类)光束的偏振匹配情况

## 4. 实验结果及分析

355 nm 连续波紫外激光器的输出功率随抽运功率的变化曲线如图 6 所示.激光器的阈值抽运功率为 0.5 W,当注入抽运功率为 25.27 W 时,355 nm 连续波输出功率为 30.6 mW,光光转换效率为 0.12%.转换效率较低的原因主要是实验中采用的

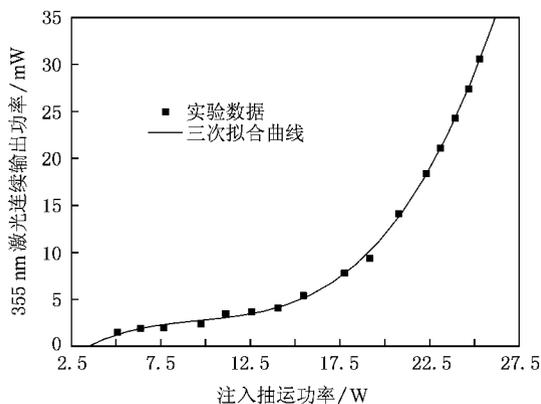


图6 355 nm 激光连续输出功率与注入抽运功率的关系

Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体掺杂浓度较低,更适合于声光调 Q 运转的紫外激光器,下一步我们将采用一块掺杂浓度为 0.7at.% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,有望获得更高的 355 nm 连续波输出功率和光光转换效率.另外实验中我们采用 TEC 电制冷的方式对 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体进行温度控制,当注入抽运功率高于 15 W 时,仅依赖 TEC 制冷已无法控制 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的温度,导致激光晶体热透镜效应加剧,光光转换效率偏低.下一步我们将采用 TEC 电制冷和水冷相结合的方式对 Nd:YVO<sub>4</sub> 进行控温,进一步提高光光转换效率.从图 6 可知,实验数据和三次拟合曲线符合很好,355 nm 输出功率未达饱和,说明激光器的腔型设计和各元件选择是十分合适的.

我们对 355 nm 激光输出功率的短期不稳定性进行了分析,每隔 1 min 读取一个输出功率,在 15 min 内,输出功率的不稳定度为

$$\Delta P/\bar{P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}} \cdot \frac{1}{\bar{P}} \quad (n=15). \quad (2)$$

图 7 给出了当注入抽运功率为 24.6 W 时,355 nm 激光连续输出功率在 15 min 之内的输出功率稳定性测试结果,输出功率短期不稳定性为 5.3%.

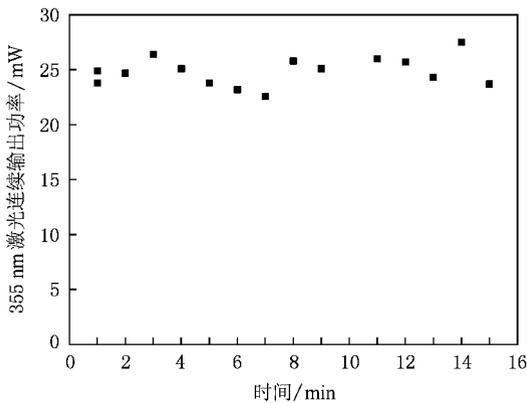


图 7 当注入抽运功率为 24.6 W 时,355 nm 激光连续输出功率的短期稳定性

由于激光腔采用紧凑型直腔结构,导致基频光斑质量受到影响,另外 532 nm 绿光存在一定的走离角,因此 355 nm 激光输出功率 30.6 mW 时的远场光斑略呈现椭圆形,如图 8 所示.



图 8 355 nm 激光的远场光斑图

## 5. 结 论

本文报道了一台 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> LBO 内腔三倍频 355 nm 连续波稳定输出的小型紫外激光器.采用简单凹平直腔结构,腔长仅为 70 mm.当注入抽运功率为 25.27 W 时,355 nm 激光连续输出功率达到最大 30.6 mW,光光转换效率为 0.12%,光束质量良好.当注入抽运功率为 24.6 W 时,355 nm 激光连续输出功率的短期不稳定性为 5.3%.综合考虑该台紧凑型 355 nm 连续波紫外激光器的各项输出参数及其小型化程度,我们认为此实验结果是目前我们所了解到的在国内关于中小功率连续紫外激光器报道中最好的结果之一.全固态紫外激光器的小型化、便携化将进一步扩展紫外激光器的应用领域,我们的工作成果将在小型紫外激光器产品化方面具有重要的应用价值.

[1] He J L, Lu X Q, Jia Y L, Man B Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2106 (in Chinese) [何京良、卢兴强、贾玉磊、满宝元 2000 物理学报 **49** 2106]

[2] Shen G, Tan H M, Fu X H, Nan N, Zhao Y H 2008 *Chin. J. Lasers* **35** 191 (in Chinese) [申高、檀慧明、付喜宏、南楠、赵玉环 2008 中国激光 **35** 191]

[3] Chang L B, Wang S C, Kung A H 2002 *Opt. Commun.* **209** 397

[4] Wu R K 1993 *Appl. Opt.* **32** 971

[5] Wang Y, Fan X W, Peng Q Q, Liu J, He J L 2005 *Journal of Optoelectronics Laser* **16** 550 (in Chinese) [王云、范秀伟、彭倩倩、刘杰、何京良 2005 光电子激光 **16** 550]

[6] Kitano H, Matsui T, Sato K, Ushiyama N, Yoshimura M, Mori Y, Sasaki T 2003 *Opt. Lett.* **28** 263

- [ 7 ] Wang G L , Geng A C , Bo Y , Li H Q , Sun Z P , Bi Y , Cui D F , Xu Z Y , Yuan X , Wang X Q , Shen G Q , Shen D Z 2006 *Opt. Commun.* **259** 820
- [ 8 ] Kojima T , Konno S , Fujikawa S , Yasui K , Yoshizawa K , Mori Y , Sasaki T , Tanaka M , Okada Y 2000 *Opt. Lett.* **25** 58
- [ 9 ] Mizuuchi K , Morikawa A , Sugita T , Yamamoto K , Pavel N , Taira T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3959
- [ 10 ] Wan Y F , Han K Z , Zuo C H , He J L 2007 *Acta Photon. Sin.* **36** 2182 ( in Chinese ) [ 万云芳、韩克祯、左春华、何京良 2007 光子学报 **36** 2182 ]
- [ 11 ] Jia F Q , Zheng Q , Xue Q H , Bu Y K , Qian L S 2007 *Appl. Opt.* **46** 2975
- [ 12 ] Liu X M , Li D J , Shi P , Haas C R , Schell A , Wu N L , Du K M 2007 *Opt. Commun.* **272** 192
- [ 13 ] Bi Y , Feng Y , Gong H R , Zhang H B , Xu Z Y 2003 *Chin. Opt. Lett.* **1** 91
- [ 14 ] Shi C H , Fan Z W , Zhang Y , Zhang J , Niu G , Wang P F , Cui J F , Pei B 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 27 ( in Chinese ) [ 石朝辉、樊仲维、张 瑛、张 晶、牛 岗、王培峰、崔建丰、裴 博 2007 中国激光 **34** 27 ]
- [ 15 ] Guo L , Wang G L , Zhang H B , Cui D F , Wu Y C , Lu L , Huang J Y , Xu Z Y 2007 *Appl. Phys. B* **88** 197
- [ 16 ] Jing L 2007 *Opt. Commun.* **277** 114
- [ 17 ] Sun Z P , Li R N , Bi Y , Yang X D , Bo Y , Hou W , Liu X C , Zhang H B , Cui D F , Xu Z Y 2004 *Opt. Express* **12** 6428
- [ 18 ] Du C , Wang Z , Liu J , Xu X , Fu K , Xu G , Wang J , Shao Z 2002 *Appl. Phys. B* **74** 125
- [ 19 ] Shen G , Tan H M , Liu F 2007 *Opto-Electronic Engineering* **34** 23 ( in Chinese ) [ 申 高、檀慧明、刘 飞 2007 光电工程 **34** 23 ]
- [ 20 ] Lü Y F , Zhang X H , Yao Z H , Tan H M , Xia J , Wang Z Q , Li C L , Zhang F D 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 1048 ( in Chinese ) [ 吕彦飞、张喜和、姚治海、檀慧明、夏 菁、王志强、李昌立、张凤东 2007 中国激光 **34** 1048 ]
- [ 21 ] Chen D Z , Guo H Q , Qing G B , Liu Y , Gao J B , Lu Y B 2006 *Laser Technology* **29** 514 ( in Chinese ) [ 陈德章、郭弘其、卿光弼、刘 韵、高剑波、路英宾 2006 激光技术 **29** 514 ]
- [ 22 ] Zhang J , Fan Z W , Qi Y , Bi Y , Shi C H , Zhang Y , Pei B , Zhao J B 2006 *Journal of Optoelectronics Laser* **17** 1474 ( in Chinese ) [ 张 晶、樊仲维、元 岩、毕 勇、石朝辉、张 瑛、裴 博、赵剑波 2006 光电子激光 **17** 1474 ]
- [ 23 ] Zimmermann C , Vuletic V , Hemmerich A 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 2318
- [ 24 ] Kaneda Y , Kubota S 1995 *Opt. Lett.* **20** 2204
- [ 25 ] Sakuma J , Asakawa Y , Obara M 2004 *Opt. Lett.* **29** 92
- [ 26 ] Shen H Y 1990 *Chin. Phys. Lett.* **7** 174
- [ 27 ] Chen Y F 2000 *Appl. Phys. B* **70** 475

## Compact laser diode end-pumped Nd :YAG intracavity frequency-tripled quasi-continuous 355 nm laser

Liu Huan<sup>†</sup> Gong Ma-Li

( Center for Photonics and Electronics , Department of Precision Instruments and Mechanology , Tsinghua University , Beijing 100084 , China )

( Received 23 December 2008 ; revised manuscript received 6 February 2009 )

### Abstract

A diode-end-pumped Nd :YVO<sub>4</sub> intracavity frequency-tripled continuous-wave 355 nm laser has been demonstrated. The laser cavity is the simple concave-to-plane linear cavity , which is short and compact. The laser cavity length is only 70 mm. The efficient second and third-harmonic waves are generated by two lithium triborate ( LBO ) crystals successfully. The 355 nm laser output power is 30.6 mW at a pump power of 25.27 W with an optical-to-optical efficiency of 0.12% and the corresponding beam quality is satisfactory. The instability of the output power of 27.4 mW is less than 5.3% . By using the technology of intracavity frequency conversion and choosing the proper parameters in cavity design , the miniaturization and handiness of the all-solid-state continuous-wave ultraviolet lasers with the relatively low output powers are improved greatly , which will broaden the application fields of the ultraviolet lasers.

**Keywords :** laser diode end-pumped type , intracavity third harmonic generation , continuous wave , 355 nm laser

**PACC :** 4260D , 4260F , 7280H , 7840

<sup>†</sup> E-mail : lh@mail. tsinghua. edu. cn