

蓝光二极管双端抽运 Pr:YLF 晶体 320 nm 紫外激光器 (特邀)

李昕奇¹, 曲大鹏¹, 陈 晴¹, 刘天虹^{1,2}, 郑 权^{1,2*}

(1. 长春新产业光电技术有限公司, 吉林 长春 130012;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 设计了一种采用不同波长的蓝光二极管合光作为抽运源并采用双端抽运的方式抽运 Pr:YLF 晶体 320 nm 紫外激光器。该激光器结构采用 V 型折叠腔结构, 使用波长分别为 444 nm 和 469 nm、抽运功率分别为 3 W 和 1.4 W 的蓝光激光二极管作为抽运源, 对 12 mm 长、0.3% 掺杂浓度的 Pr:YLF 晶体进行抽运, 并且使用三硼酸锂晶体作为倍频晶体来实现倍频, 匹配方式为 I 类相位匹配。通过对谐振腔参数进行优化, 当 5 700 mW 的抽运功率注入晶体时, 输出了 1 005 mW 最大输出功率的 320 nm 紫外连续激光, 光光转换效率约为 17.6%。

关键词: 320 nm 紫外激光器; 双端抽运; 不同波长; 掺镨氟化钪锂晶体

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201070

320 nm ultraviolet laser in blue laser diode double end pumped Pr:YLF crystal (*Invited*)

Li Xinqi¹, Qu Dapeng¹, Chen Qing¹, Liu Tianhong^{1,2}, Zheng Quan^{1,2*}

(1. Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Changchun 130012, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A 320 nm ultraviolet laser with Pr:YLF crystal was pumped by different wavelength blue laser diode was designed and double end pumping mode was adopted. The structure of the laser is V-folded cavity. A 444 nm blue laser diode with pump power of 3 W and a 469 nm blue laser diode with pump power of 1.4 W was used as pump source. The Pr:YLF crystal has a length of 12 mm and a doping concentration of 0.3%. The phase-matched LBO crystal was used as frequency doubling crystal. By optimizing the resonator parameters, when the incident pump power is 5 700 mW, the maximum output power of 320 nm ultraviolet continuous laser with 1 005 mW is output, and the optical conversion efficiency is about 17.6%.

Key words: 320 nm UV laser; double-end-pumped; different wavelength; Pr:YLF crystal

收稿日期: 2020-10-24; 修订日期: 2020-11-27

基金项目: 吉林省科技攻关计划项目 (20170203013GX)

作者简介: 李昕奇 (1997-), 男, 学士, 主要从事全固态激光器方面的研究。Email: lixq@cnilaser.com

通讯作者: 郑权 (1973-), 男, 博士, 主要研究方向为高性能及大功率全固态激光器。E-mail: zhengquan@cnilaser.com

0 引言

紫外波段的激光拥有波长短、更好的聚焦效果、高单光子能量等特点,在工业加工、科学研究、军事及医疗等领域被广泛应用^[1]。用紫外激光对体硅进行加工可以减少对环境的污染,减少繁琐的步骤^[2]。激光器因工作物质的不同分为固体激光器、气体激光器和半导体激光器。紫外激光器也同样分为这三种。固体激光器的转换效率一般较低,而使用激光二极管作为抽运源的全固态激光器具有效率更高等特点。

一般产生紫外激光的常规方法是先利用倍频效应,然后再利用和频效应,最后得到紫外激光。但是这种获得紫外激光的方式需要进行两次频率变换的过程,最终会导致转换效率很低。

很多三价稀土离子都具有可见的辐射跃迁,其中三价镨离子(Pr^{3+})是实现高效可见激光最成功的稀土离子之一。由于 Pr^{3+} 具有能直接通过下转换的方式输出可见光的特性,受到了科研人员的广泛关注^[3-4],它在可见光谱范围内(包括 720、695、640、605、522、490 nm)存在多条跃迁。 Pr^{3+} 的发现使只利用一次频率转换进而实现输出紫外激光有了可能性。其中,Pr:YLF 晶体被认为是最有前途的一种晶体,具有能级寿命较长、受激发射截面较大、生长工艺较成熟等优势^[5]。近年来,国内相继报道了几种获得紫外激光的方法^[6-9]。

2004 年, A.Richer 和 E.Humann 等采用氮化镓激光二极管泵浦 Pr:YLF 晶体^[10],成功输出了 640 nm 的红色激光,斜效率达 24%。2006 年, Richer 等^[11]使用光泵半导体激光器作为泵浦源,并且使用折叠腔的结构对 Pr:YLF 晶体进行抽运,将三硼酸锂(LBO)晶体作为倍频晶体进行倍频,获得了功率为 19 mW 的 320 nm 连续紫外激光。2007 年, Richter 等又使用更高功率的光泵半导体作为抽运源,使用 LBO 晶体作为倍频晶体,输出了 320 nm 紫外激光,其最高输出功率为 364 mW,光光转换效率达 22%。2019 年, Naoto Sugiyama 等^[12]使用锁模 Pr:YLF 振荡器成功输出 5.9 μJ 320 nm 激光。国内对 320 nm 紫外激光的研究较少,文中将四个蓝光激光二极管作为抽运源,采用合光双端抽运的方式抽运 Pr:YLF 晶体,再用 LBO 晶

体实现腔内倍频,最后得到了 1005 mW 的 320 nm 连续紫外激光。

1 实验设计及装置

640 nm 作为三价镨离子(Pr^{3+})在可见光波段的辐射跃迁之一,对 640 nm 激光进行频率转换就可以输出 320 nm 激光。如图 1 所示, Pr:YLF 晶体在蓝光波段存在着三个比较大的吸收谱,但是单管蓝光激光二极管存在功率不高的劣势,而且不同偏振方向的抽运光注入 Pr:YLF 晶体的吸收效率不同。其中, π 偏振方向的抽运光注入 Pr:YLF 晶体的吸收效率最高。 π 偏振方向和 δ 偏振方向抽运光注入 Pr:YLF 晶体的吸收对比如图 2 所示。所以使用多个蓝光激光二极管进行抽运 Pr:YLF 晶体。为了提高晶体对抽运光的吸收效率,采用自由空间合束的方式进行合光,这种合光的方式可以保留抽运光的偏振特性。同时,为了让 Pr:YLF 晶体对抽运光尽可能多的吸收,将激光二极管

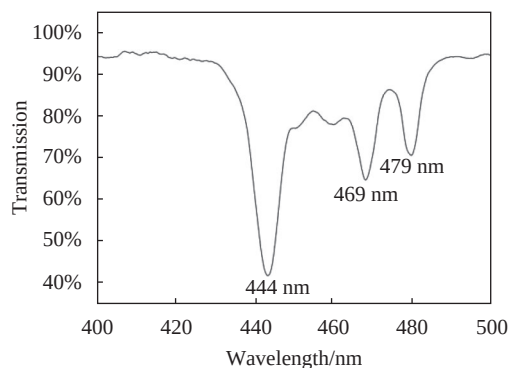


图 1 Pr:YLF 晶体在蓝光波段的吸收谱线

Fig.1 Absorption spectra of Pr:YLF crystal in blue band

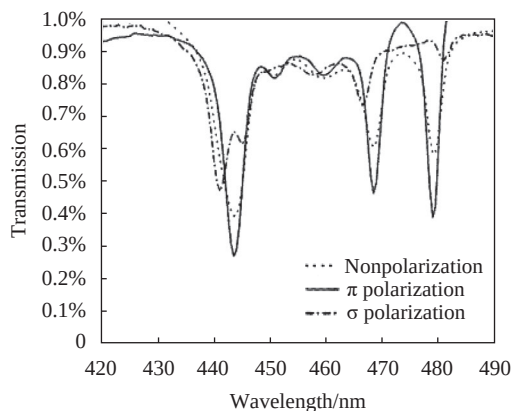


图 2 Pr:YLF 晶体的偏振吸收谱线

Fig.2 Polarized absorption spectra of Pr:YLF crystal

的固定方向调整为 π 偏振方向固定。同侧的两个 LD 使用透镜进行准直, 透镜的焦距为 4.2 mm, 再用两个柱面镜将慢轴的光进行整形, 使整形后的抽运光具有更好的对称性, 最后使用 45° 合光片将两束抽运光整合为一条光路, 将对 444 nm 高透射、对 469 nm 高反射的膜镀在合光片的表面。经过合束后的光再经

过柱面镜组整形, 整形后的光斑尺寸约为 4.3 mm×3.2 mm, 谐振腔两侧分别使用 120、150 mm 焦距的平凸透镜对抽运光进行聚焦。

实验的谐振腔结构采用 V 型折叠腔, 如图 3 所示。

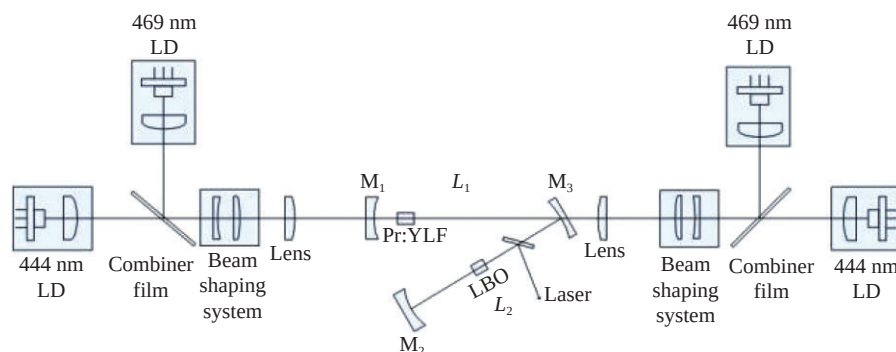


图 3 腔型结构图

Fig.3 Schematic diagram of resonator structure

采用尺寸为 $\varnothing 5 \times 12$ mm、0.3% 掺杂浓度的 Pr:YLF 晶体作为激光晶体, 将对 444~469 nm 抽运光 and 640 nm 基频光高透射的膜镀在激光工作物质表面。将切割角度分别为 $\theta=90^\circ$ 和 $\psi=53.4^\circ$ 的 10 mm 长的 LBO 晶体作为倍频晶体, 并在两个端面镀有对 640、320 nm 增透的膜。使用半导体制冷器 (TEC) 来精确控制激光工作物质和倍频晶体的温度。

由于 V 型折叠腔结构对谐振腔内光斑的调整更方便, 同时又可以兼顾倍频晶体处的基频光光斑直径, 进而提高倍频效率。腔镜 M_1 为曲率半径为 50 mm 的凹面镜, 并镀有对 640 nm 高反射、对 444~469 nm 抽运光增透的膜。腔镜 M_2 为曲率半径为 100 mm 的凹面镜, 并镀有对 640、320 nm 高反射的膜。腔镜 M_3 为曲率半径为 50 mm 的凹面镜, 并镀有对 640、320 nm 高反射、对 444~469 nm 抽运光增透的膜。在 LBO 与腔镜 M_3 之间插入平面镜 M_4 , M_4 两个表面镀 640 nm 增透膜, 朝向 LBO 方向镀 320 nm 高反膜。谐振腔臂长 $L_1=145$ mm, $L_2=133$ mm, Pr:YLF 晶体距腔镜 M_1 的距离为 20 mm, LBO 晶体距腔镜 M_3 的距离为 77 mm。如图 4 所示, 使用 Matlab 软件模拟谐振腔内光斑尺寸, 得到激光晶体处光腰直径 ω_1 约为 71 μm , 倍频晶体处光腰直径 ω_2 约为 48 μm 。

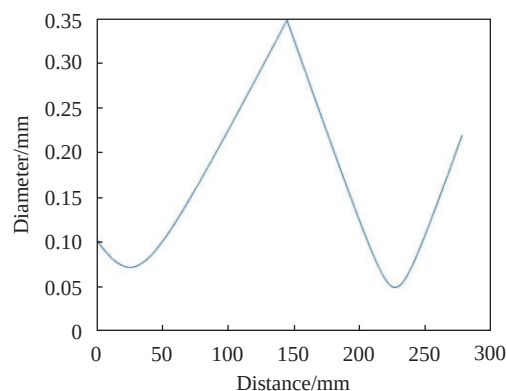


图 4 谐振腔内各位置的光斑直径

Fig.4 Spot diameters at different positions within resonator cavity

2 实验结果及分析

当注入抽运功率为 5 700 mW 时, 测试得到经焦距为 120 mm 的聚焦镜后对 444、469 nm 抽运光的吸收效率分别约为 93%、83%, 经焦距为 150 mm 聚焦镜后对 444、469 nm 抽运光的吸收效率分别约为 95%、85%。

按照所设计的腔型搭建实验光路, 仔细调节 LD 准直透镜、柱面整形镜组的相对位置, 使 LD 泵浦光具有更好的对称性。使用 TEC 对抽运源的温度进行精确控制, 让抽运源的发射波长更好地吻合晶体的

吸收峰。仔细调节腔长与晶体制冷温度,使激光器达到最佳状态。

使用光谱仪测试得到 319.706 nm 为谱线中心波长,如图 5 所示。

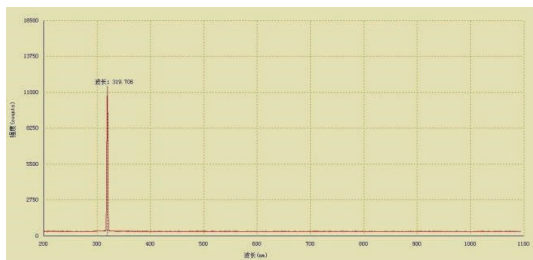


图 5 320 nm 紫外光光谱测试

Fig.5 Spectrum of 320 nm UV laser

使用型号为 PS19Q 的 Coherent 功率计测试功率,连续测量 2 h,获得了最大功率为 1005 mW 的 320 nm 紫外激光,光光转换效率约为 17.6%,得到该激光器 2 h 的功率稳定性为 2.37%,平均功率为 962.9 mW,测试结束时功率为 995 mW,测试结果如图 6 所示。

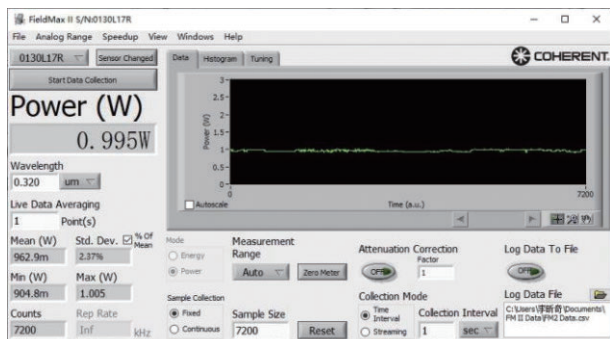


图 6 320 nm 紫外激光功率稳定性

Fig.6 Power stability of 320 nm UV laser

使用轮廓分析仪测得激光光斑如图 7 所示。

使用 Thorlabs 的光束质量因子 (M^2) 测量系统测量该激光器的 M^2 ,测量结果显示为 M^2 X:1.20, M^2 Y:1.02,如图 8 所示。

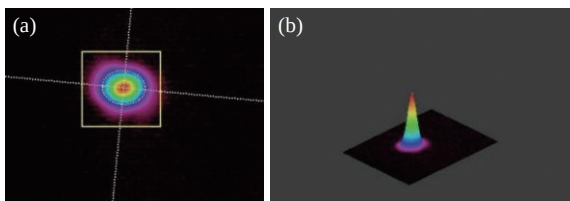


图 7 320 nm 紫外激光光斑图

Fig.7 Light spot of 320 nm UV laser

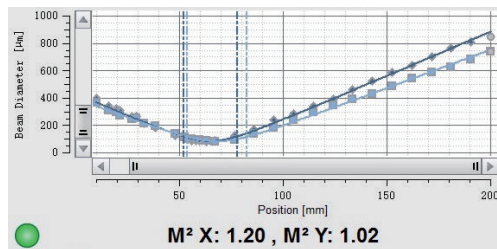


图 8 光束质量因子 (M^2)

Fig.8 Beam quality factor (M^2)

3 结 论

采用 444 nm 和 469 nm 不同波长的蓝光 LD 合光双端泵浦的方式抽运 Pr:YLF 晶体,并进行腔内倍频输出 320 nm 紫外激光。通过对 LD 光束的整形和对腔长的优化,当 5700 mW 的抽运功率注入激光晶体时,获得了 320 nm 紫外激光输出,其最大输出功率为 1005 mW,光光转换效率约为 17.6%,连续测量 2 h 后,得到输出 320 nm 紫外光的功率稳定性为 2.37%,该项成果已实现产业化。

参考文献:

- [1] Zhang C, Divitt S, Fan Q, et al. Low-loss metasurface optics down to the deep ultraviolet region [J]. *Light Sci Appl*, 2020, 9: 55.
 - [2] Luo G X, Jing C, Wang Y T, et al. UV picosecond laser direct etching on bulk silicon [J]. *Applied Physics*, 2019, 39(6): 1002-1005.
 - [3] Richer A, Heumann E, Huber G, et al. Power scaling of semiconductor laser pumped praseodymium laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5172-5178.
 - [4] Cornacchia F, Richer A, Heumann E, et al. Visible laser emission of solid state pumped LiLuF₄:Pr³⁺ [J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 992-1002.
 - [5] Liu Z, Cai Z P, Huang S L, et al. Diode-pumped Pr³⁺:LiYF₄ continuous-wave deep red laser at 698 nm [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(2): 302-305.
 - [6] Niu Na, Qu Dapeng, Dou Wei, et al. 348.9 nm intra-cavity frequency-doubling UV laser in blue laser diode pumped Pr:YLF crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1201003. (in Chinese)
- 牛娜,曲大鹏,窦微,等. 蓝光二极管抽运掺镨氟化钪晶体腔内倍频 348.9 nm 紫外激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201003.

- [7] Dou Wei, Pu Shuangshuang, Niu Na, et al. Combined dual-wavelength laser diode beam end-pumped single longitudinal mode $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}_4$ 360 nm ultraviolet laser [J]. *Acta Phys Sin*, 2019, 68(5): 054202. (in Chinese)
窦微, 浦双双, 牛娜, 等. 双波长二极管合束端面抽运掺镨氟化钇锂单纵模 360 nm 紫外激光器[J]. 物理学报, 2019, 68(5): 054202.
- [8] Chen Qing, Pu Shuangshuang, Niu Na, et al. 261 nm frequency-doubling UV laser in bi-wavelength blue laser diode pumped $\text{Pr}:\text{YLF}$ crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S1): 20200090. (in Chinese)
陈晴, 浦双双, 牛娜, 等. 双波长蓝光 LD 抽运 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体倍频 261 nm 紫外激光器[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S1): 20200090.
- [9] Wang Jinyan, Li Qi, Chen Xi, et al. A high-frequency all-solid-state ultraviolet laser at 244 nm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0901010. (in Chinese)
王金艳, 李奇, 陈曦, 等. 全固态高重复频率 244 nm 紫外激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0901010.
- [10] Richter A, Heumann E, Osiać E, et al. Diode pumping of a continuous-wave Pr^{3+} -doped LiYF_4 laser [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2638-2640.
- [11] Richter A, Pavel N, Heumann E, et al. Continuous-wave ultraviolet generation at 320 nm by intracavity frequency doubling of red-emitting praseodymium lasers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3282-3287.
- [12] Naoto Sugiyama, Shogo Fujita, et al. Diode-pumped 640 nm $\text{Pr}:\text{YLF}$ regenerative laser pulse amplifier [J]. *Optical Society of America*, 2019, 44(13): 3370-3373.