

蓝光二极管抽运掺镨氟化钇锂晶体 腔内倍频 348.9 nm 紫外激光器

牛娜^{1*}, 曲大鹏¹, 窦微¹, 任广胜¹, 周阳¹, 夏磊¹, 吕敏航¹, 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 设计了蓝光二极管抽运掺镨氟化钇锂(Pr:YLF)腔内倍频 348.9 nm 紫外激光器。激光器采用 Z 型折叠腔结构, 利用 45° 合光片将抽运功率为 1.4 W 的 444 nm 蓝光和抽运功率为 1.5 W 的 469 nm 蓝光进行激光二极管合光, 并将其作为抽运源, 抽运长度为 5 mm、掺杂浓度(质量分数)为 0.5% 的 Pr:YLF 晶体。将 I 类相位匹配的三硼酸锂作为倍频晶体, 通过优化谐振腔镜膜系和腔型设计, 在抽运功率最大时, 获得了最大输出功率为 132.2 mW、中心波长为 348.9 nm 的连续紫外光输出, 抽运光到紫外光的光-光转换效率约为 4.5%。

关键词 激光器; 紫外激光器; 掺镨氟化钇锂晶体; 蓝光激光二极管

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1201003

348.9 nm Intra-Cavity Frequency-Doubling Ultraviolet Laser in Blue Laser Diode Pumped Pr:YLF Crystal

Niu Na^{1*}, Qu Dapeng¹, Dou Wei¹, Ren Guangsheng¹, Zhou Yang¹,
Xia Lei¹, Lü Minhang¹, Zheng Quan^{1,2}

¹Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin 130012, China;

²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

Abstract A 348.9 nm intra-cavity frequency-doubling ultraviolet laser in blue laser diode pumped Pr:YLF crystal is designed, in which a Z-folded cavity structure is adopted. A 444 nm blue laser diode with pump power of 1.4 W and a 469 nm blue laser diode with pump power of 1.5 W obtained are combined by a 45° combiner film as a pump laser for the Pr:YLF crystal which has a length of 5 mm and a doping concentration (mass fraction) of 0.5%. In addition, the type I phase-matched LBO crystal is chosen for frequency-doubling. By optimizing the resonator mirror coating and structural design, we achieve a continuous ultraviolet laser output with a maximum power of 132.2 mW, a central wavelength of 348.9 nm, and an optical-to-optical conversion efficiency of 4.5% when pump power is the maximum.

Key words laser; ultraviolet laser; Pr:YLF crystal; blue laser diode

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.7300

1 引言

紫外激光具有波长短、聚焦性能好、光子能量高且可进行冷处理等特点, 能激发特定的光化学反应, 在光数据存储、光谱分析、光盘控制、光化学反应、大气探测、工业加工^[1]、生物、医学及科研领域^[2] 都有

着广泛的应用。紫外激光器可分为固体紫外激光器、气体紫外激光器和半导体紫外激光器。利用激光二极管(LD)抽运的全固态激光器相较于其他类型的激光器而言, 具有效率高、性能可靠、硬件结构简单的特点, 因此应用最为广泛^[3]。通常实现紫外连续激光输出的方法是利用晶体材料的非线性效应实现变

收稿日期: 2018-07-12; 修回日期: 2018-08-01; 录用日期: 2018-08-07

基金项目: 长春市科技计划(16SS18)

* E-mail: niuna@cnilaser.com

频,先利用倍频技术得到二次谐波,然后再利用和频或倍频技术得到紫外激光。但是,这种方式需要经历两次频率转换过程,光-光转换效率大幅降低。

三价镨离子(Pr^{3+})作为一种可以直接通过下转换实现可见光输出的稀土元素离子而备受关注^[4-10],其能级跃迁可以产生数种颜色的可见光,包括深红色(约 695 nm 和 720 nm)、红色(约 640 nm)、橙色(约 605 nm)、绿色(约 522 nm)和蓝色(约 490 nm)。同时, Pr^{3+} 的出现也使通过一次频率转换获得紫外光的方法成为可能。掺镨氟化钇锂($\text{Pr}:\text{YLF}$)晶体被认为是所有 Pr^{3+} 掺杂氟化物中最有前途的一种晶体^[11]。近年来,国内外通过一次倍频 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 来获得连续紫外光的方法相继被报道。

2006年,Richter等^[12]使用光泵半导体激光器作为抽运源并采用折叠腔,通过抽运 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体获得了 639.5 nm 的基频光,再通过三硼酸锂(LBO)晶体倍频获得了 320 nm 的紫外光,其功率为 19 mW。2007年,该课题组采用更高输出功率(1.6 W)的光泵半导体(OPS)抽运 $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ 激光器,采用 LBO 晶体腔内倍频获得最大功率为 364 mW 的 320 nm 紫外激光输出,抽运光到紫外光的转换效率达 22%。同年,Ostoumov等^[13]采用输出功率为 5.3 W 的 OPS 抽运 $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$,成功获得输出功率为 1.3 W、波长为 360 nm 的激光输出,抽运光到紫外光的光-光转换效率约为 28.9%;采用 V-type 结构,得到 522 nm 处的输出功率达 2.5 W,倍频后获得功率为 620 mW 的 261 nm 紫外输出,整体的光-光转换效率约为 12.4%^[14]。2008年,Ostoumov等^[15]采用 Z 型腔结构,利用两个功率为 5.3 W 的 OPS 抽运 $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ 晶体,得到 261 nm 处的输出功率达 1 W。目前,关于利用 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体腔内倍频获得 261,320,360 nm 连续紫外光的报道较多,且输出功率不断被提升,而 349 nm 作为 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体的一条弱谱线倍频光,因获得的难度较大而鲜有报道。2013年,Liu等^[16]采用一个最大输出功率为 830 mW 的蓝光 LD 端面抽运 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体和偏硼酸钡晶体腔内倍频的方式获得了最大功率为 33 mW 的 349 nm 的紫外光,抽运光到紫外光的光-光转换效率约为 3.9%。

本文将两个不同波长的蓝光二极管合光后作为抽运源,将 349 nm 连续紫外光功率提升到 132.2 mW,同时将抽运光到紫外光的光-光转换效率提升至 4.5%,为一些生物、光学等领域对紫外光吸收带较窄的物质研究提供了实验基础。

2 实验研究

2.1 实验装置

将德国 OSRAM 公司生产的抽运功率为 1.4 W 和 1.5 W、中心波长为 444 nm 和 469 nm 的两个蓝光 LD 合光作为抽运源,对国产 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体进行端面抽运,激光器采用 Z 型折叠腔结构,腔内采用 LBO 晶体进行频率转换,实验装置如图 1 所示。

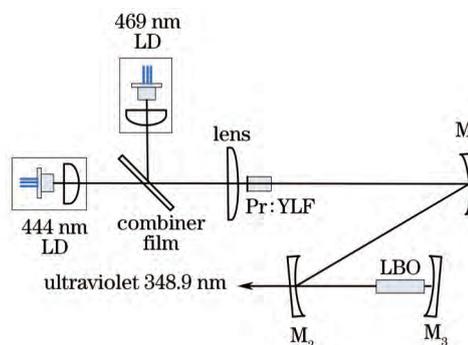


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

$\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体在蓝光波段(444,469,479 nm)存在三条比较大的吸收谱,如图 2 所示。随着蓝光 LD 的成熟化与商业化,采用蓝光二极管作为抽运源比较普遍,但限于蓝光二极管的单管功率不高,抽运功率还没有提升上来。此外, $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体对光的吸收存在偏振特性,对 π 偏振方向抽运光的吸收最强,所以采用多个二极管光纤耦合后抽运 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体时,由于光纤耦合造成抽运光偏振特性下降,会进一步降低 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体对抽运光的吸收效率。将两个波长不同的 LD 进行空间合光后作为抽运源,一方面提高了整体抽运功率,另一方面可以保留抽运光的偏振特性,提高晶体吸收效率。这种采用两种波长合光并保留偏振特性的合光技术更具有实用价值。实验中选择的是德国 OSRAM 公司生产的功率为 1.4 W、波长为 444 nm 和功率为 1.5 W、波长为 469 nm 的蓝光 LD,固定二极管时均将其方向调整为 π 偏振方向,使 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体对抽运光的吸收效率最高。两个 LD 分别采用焦距 $f=4.2$ mm 的单透镜准直,然后利用实验室自镀膜的 45° 合光片(对 444 nm 高透射,对 469 nm 高反射)将两束抽运光合在一条光路中,将其作为抽运源。合束后的光斑尺寸约为 $4.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$,然后通过焦距为 12 mm 的平凸镜将抽运光聚焦到 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体上。

激光工作物质采用 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体,尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, Pr^{3+} 的掺杂浓度(质量分数)

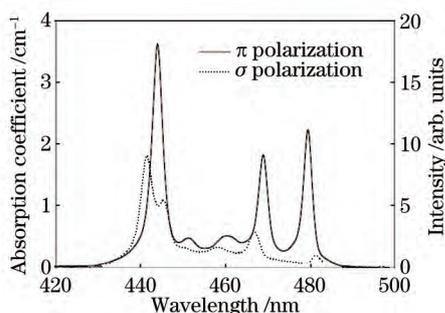


图 2 Pr:YLF 晶体偏振吸收谱

Fig. 2 Polarized absorption spectra of Pr:YLF crystal

为 0.5%，端面镀对 444~469 nm 抽运光高透射、对 698 nm 基频光高反射的膜，将该膜作为腔镜使用，另一面镀对 444~469 nm 和 698 nm 抽运光高透射的膜。倍频晶体选择 LBO(I 类相位匹配，两个切割角度分别为： $\theta = 90^\circ$ 和 $\varphi = 43.8^\circ$)，晶体长度为 10 mm，LBO 双面抛光未镀膜。Pr:YLF 晶体和 LBO 晶体分别固定在铜制机械件中进行热传导散热，并通过热电冷却器精确控温。

实验系统采用 Z 型折叠腔结构，这种结构对谐振腔内光斑设计更灵活，可以兼顾工作物质和频率变换晶体处的基频光光斑直径，从而可提高光-光转换效率。腔镜 M_1 和 M_2 是曲率半径为 200 mm 的凹面镜， M_1 表面镀对 698 nm 抽运光高反射的膜；输出镜 M_2 表面镀对 698 nm 抽运光高反射、对 349 nm 抽运光高透射的膜，全反镜 M_3 是曲率半径为 600 mm 的凹面镜，表面镀对 698 nm 和 349 nm 抽运光高反射的膜，腔镜 M_1 、 M_2 和 M_3 表面还镀有 Pt(在 600~640 nm 和 720 nm 处部分透过)。选择谐振腔臂长 $L_1 = 75$ mm, $L_2 = 75$ mm, $L_3 = 45$ mm，如图 3 所示。用 Matlab 软件模拟可得 Pr:YLF 晶体处光腰直径 ω_1 约为 150 μm ，LBO 晶体处光腰直径 ω_2 约为 120 μm 。

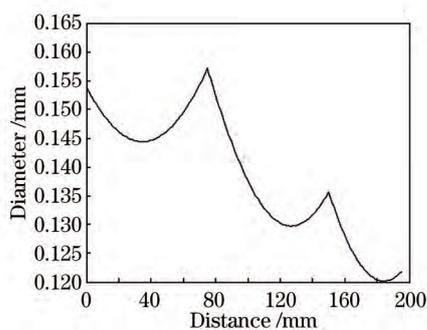


图 3 谐振腔内各位置处光斑直径

Fig. 3 Spot diameters at different positions within resonator cavity

2.2 实验结果及分析

当抽运源电流最大时，抽运光经准直镜和合光片后抽运长度为 5 mm、掺杂浓度为 0.5% 的 Pr:YLF 晶体，测试得到经聚焦镜 ($f = 12$ mm) 后 Pr:YLF 晶体对 444 nm 抽运光的吸收功率约为 1.1 W，对 469 nm 抽运光的吸收功率约为 1 W。由测量得到的 Pr:YLF 晶体吸收前后的 LD 功率可知，该实验系统对 1.4 W 的 444 nm LD 的吸收效率约为 82%，对 1.5 W 的 469 nm LD 的吸收效率约为 65%。分析得到的 Pr:YLF 晶体对抽运光的吸收效率较高的原因主要有两方面：1) 采用的德国 OSRAM 公司生产的 LD 的偏振性较好，在固定 LD 时考虑 Pr:YLF 晶体的偏振吸收特性，使 LD 输出光方向与 π 偏振方向相吻合；2) 采用的低功率 LD 线宽较窄，通过温度调节可使 LD 波长与 Pr:YLF 晶体的吸收峰相吻合。

按照所设计的腔型搭建光路，调试中发现谐振腔对镜片膜系较敏感，720 nm 基频光的谱线强度易超过 698 nm 的谱线强度，导致激光器输出 360 nm 紫外光。图 4 为采用海洋光学高精度测量仪器 HR4000 测得的 Pr:YLF 晶体的荧光曲线，可以看出 720 nm 谱线距离 698 nm 谱线较近且强度约为 698 nm 谱线的 1.6 倍。要想获得单一波长的 698 nm 基频光，需要抑制增益较强的 607, 640, 720 nm 附近的谱线。由于 607 nm、640 nm 谱线距离 698 nm 较远，所以在单镜镀膜时，其透过率大于 80%；而 720 nm 谱线距离 698 nm 谱线相对较近，所以在 720 nm 谱线处实现高透难度很大。通过这种三镜结构的折叠腔，可以将 720 nm 谱线的透过率分散在三个镜片上，从而降低镀膜难度。

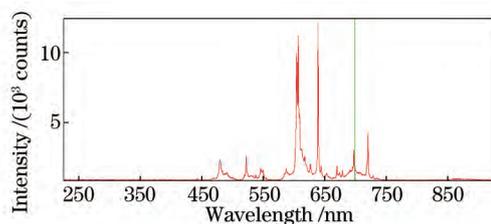


图 4 Pr:YLF 晶体的荧光谱线

Fig. 4 Fluorescence spectrum of Pr:YLF crystal

实验时，选择在 Pr:YLF 晶体端面一侧镀对 698 nm 抽运光高反射的膜，不考虑对其他谱线的抑制，在全反镜 M_1 、 M_2 和 M_3 上镀对 720 nm 和 607~640 nm 部分透过的膜。经过多次镀膜和调试，当全反镜整体对 720 nm 抽运光的透过率约为 6%、对 640 nm 抽运光的透过率大于 80% 时获得较理想的

效果。此外,针对 348.5 nm 抽运光,对 LBO 晶体定制切割角度 $\theta=90^\circ, \varphi=43.8^\circ$,也可对波长选择有一定的帮助。仔细调节 LBO 晶体角度,测试得到谱线中心波长为 348.9 nm,如图 5 所示。用 Spiricon 轮廓分析仪测得光斑的二维和三维成像如图 6 所示,光束呈高斯分布,光斑椭圆度可达 0.922。

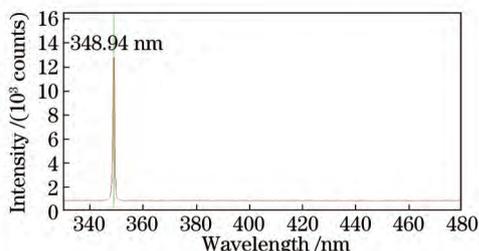
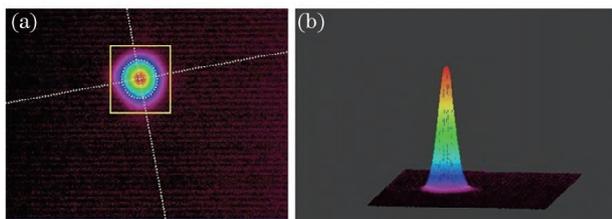


图 5 348.9 nm 紫外光的光谱

Fig. 5 Spectrum of 348.9 nm UV laser



6 348.9 nm 紫外光轮廓。(a)二维成像图;(b)三维成像图

Fig. 6 348.9 nm ultraviolet laser profile. (a) Two-dimensional image; (b) three-dimensional image

利用美国 Coherent 公司的 PS19Q 型功率计测试功率,在 1.4 W 的 444 nm 和 1.5 W 的 469 nm 两个蓝光 LD 最大抽运功率下,获得了最大输出功率为 132.2 mW 的紫外光,抽运光到紫外光的光-光转换效率约为 4.5%。根据实验测试结果,将激光器的输出特性曲线进行拟合,如图 7 所示。在最大抽运功率时,测得激光器的 2 h 功率稳定性为 1.83%,测试结果如图 8 所示。

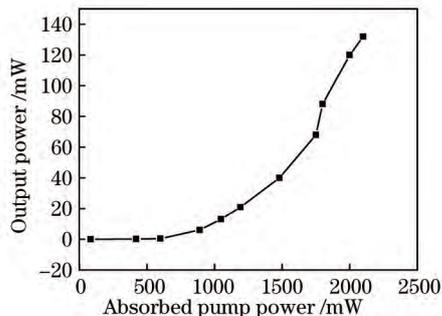


图 7 348.9 nm 激光的输出功率随吸收的抽运功率的变化

Fig. 7 Output power versus absorbed pump power for 348.9 nm laser

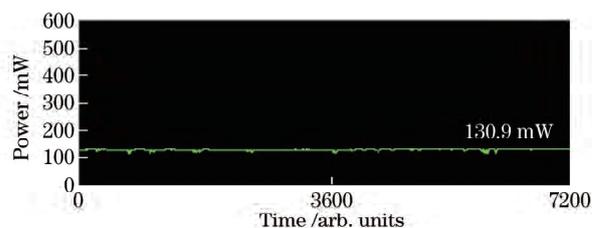


图 8 348.9 nm 激光器功率稳定性

Fig. 8 Power stability of 348.9 nm laser

3 结 论

采用 Z 型折叠腔结构,研究了双蓝光二极管合光抽运 Pr:YLF 晶体腔内倍频的全固态连续紫外激光器。通过优化腔镜膜系设计及腔长,用 Matlab 软件模拟获得了 Pr:YLF 晶体处的束腰直径约为 150 μm ,LBO 晶体处的束腰直径约为 120 μm 。在 1.4 W 的 444 nm 和 1.5 W 的 469 nm 两个蓝光 LD 最大抽运功率下,获得了最大功率为 132.2 mW 的连续紫外光输出,抽运光到紫外光的光-光转换效率约为 4.5%。实验测试得到光谱谱线的中心波长为 348.9 nm,光斑椭圆度为 0.992。在最大抽运功率下连续测量 2 h 后,得到输出紫外光的功率稳定性为 1.83%。

参 考 文 献

- [1] 聂明明, 江业文, 陆富源, 等. 《制造用紫外激光器》项目简介[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 123601.
- [2] Wu D C, Wei B, Tang G, *et al.* Turbidity disturbance compensation for UV-VIS spectrum of waterbody based on Mie scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0230007.
吴德操, 魏彪, 汤戈, 等. 基于 Mie 散射的水体紫外可见光谱浊度干扰补偿[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0230007.
- [3] Liu Q, Yan X P, Chen H L, *et al.* New progress in high-power all-solid-state ultraviolet laser[J]. Chinese Journal of 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.
- [4] Richter A, Heumann E, Osic E, *et al.* Diode pumping of a continuous-wave Pr³⁺-doped LiYF₄ laser[J]. Optics Letters, 2004, 29(22): 2638-2640.
- [5] Richter A, Heumann E, Huber G, *et al.* Power scaling of semiconductor laser pumped praseodymium-lasers[J]. Optics Express, 2007, 15(8): 5172-5178.
- [6] Cornacchia F, Richter A, Heumann E, *et al.* Visible

- laser emission of solid state pumped $\text{LiLuF}_4:\text{Pr}^{3+}$ [J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 992-1002.
- [7] Cornacchia F, Di Lieto A, Tonelli M, *et al.* Efficient visible laser emission of GaN laser diode pumped Pr-doped fluoride scheelite crystals[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15932-15941.
- [8] Gün T, Metz P, Huber G, *et al.* Power scaling of laser diode pumped $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ cw lasers efficient laser operation at 522.6, 545.9, 607.2, and 639.5 nm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 1002-1004.
- [9] Xu B, Camy P, Doualan J L, *et al.* Visible laser operation of Pr^{3+} -doped fluoride crystals pumped by a 469 nm blue laser[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1191-1197.
- [10] Huang S L, Liu Z, Zeng C H, *et al.* Blue laser diode pumped Pr:YLF green laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1202005.
黄舜林, 刘哲, 曾承航, 等. 蓝光激光二极管抽运 Pr:YLF绿光激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1202005.
- [11] Liu Z, Cai Z P, Huang S L, *et al.* Diode-pumped $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ continuous-wave deep red laser at 698 nm[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(2): 302-305.
- [12] 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.
- [13] Ostroumov V, Seelert W, Hunziker L, *et al.* UV generation by intracavity frequency doubling of an OPS-pumped Pr:YLF laser with 500 mW of cw power at 360nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6451: 645103.
- [14] Ostroumov V, Seelert W, Hunziker L, *et al.* 522/261 nm cw generation of Pr:YLF laser pumped by OPS laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6451: 645104.
- [15] Ostroumov V, Seelert W. 1 W of 261 nm cw generation in a $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ laser pumped by an optically pumped semiconductor laser at 479nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6871: 68711K.
- [16] Liu Z, Cai Z P, Xu B, *et al.* Continuous-wave ultraviolet generation at 349 nm by intracavity frequency doubling of a diode-pumped Pr:LiYF₄ laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 1500905.