

基于掺 Pr^{3+} 晶体的单纵模 320 nm 紫外激光器

李世杰¹, 季鑫¹, 陈曦¹, 李奇¹, 王斌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:介绍了一种瓦级输出功率的单纵模 320 nm 紫外激光器。采用功率 20 W 的 444 nm InGaN 激光二极管作为泵浦源, 端面泵浦 15 mm 长的 $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 晶体, 使用布鲁斯特角度切割的 LBO 晶体作为腔内倍频晶体, 采用环形谐振腔技术进行单纵模的选取。在优化反射镜参数后, 当入射泵浦功率为 18 W 时, 320 nm 紫外单纵模激光器的最大输出功率为 1.17 W, 是目前已知最高 320 nm 单频输出功率, 线宽小于 5.53 MHz。该研究展示了环形腔技术在高性能单频紫外激光制备中的优越性, 为相关领域提供了新的技术路径和性能参考。

关键词:紫外激光器; $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 晶体; 单纵模; 环形谐振腔; 320 nm

中图分类号:TN244;O437 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.004

Single longitudinal mode 320nm UV laser based on Pr^{3+} -doped crystals

LI Shi-jie¹, JI Xin¹, CHEN Xi¹, LI Qi¹, WANG Bin¹, ZHENG Quan^{1,2}

(1. Changchun New Industries Optoelectronics Tech. Co., Ltd., Changchun 130012, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: A single longitudinal mode 320 nm UV laser with high output power is introduced in this paper. The pump source, a 20 W 444 nm InGaN laser diode, is utilized for end-pumping a 15 mm-long $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ crystal. And a Brewster cut LBO crystal is used inside the ring cavity for frequency doubling. The single longitudinal mode UV laser is employed as the intracavity frequency-doubling crystal, while a ring resonator technique is adopted for single-longitudinal-mode selection. After optimizing the mirror parameters, when an incident pump power of 18 W is applied, the maximum output power of the 320 nm UV single longitudinal mode laser reaches 1.17 W, representing the highest known output power for a 320 nm single frequency laser. And the linewidth is less than 5.53 MHz. This study demonstrates the advantages of ring cavity technology in high-performance UV laser production and provides new technical pathways and performance references for related fields.

Keywords: UV laser; $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ crystal; single longitudinal mode; ring resonator; 320 nm

1 引言

单纵模紫外激光器不仅具有传统紫外激光器的典型属性, 如波长短、聚焦能力强、单光子能量高, 而且具有更长的相干长度和更窄的光谱线宽, 被广泛应用于各个领域, 包括工业精密加工、紫外光刻、光

谱分析、军事、激光医疗等^[1]。由于其独特的特性, 近年来受到国内外研究人员的广泛关注。

产生单频紫外(UV)激光的典型方法通常是利用倍频技术实现包括红、橙、绿、蓝等波长的可见光激光输出, 然后再通过和频方法并与适当的单纵模

作者简介:李世杰(1983-),男,硕士,高级工程师,主要从事全固态超快激光方面的研究。E-mail:lisyj@cnolaser.com

通讯作者:季鑫(1985-),女,硕士,中级工程师,主要从事全固态超快激光方面的研究。E-mail:cni-jessie@163.com

收稿日期:2025-03-31;修订日期:2025-06-03

选择技术相结合,最终获得单频紫外激光输出。然而,非线性频率变换过程中需要至少两个非线性晶体,最终导致激光系统的高复杂性、高成本和低效率等负面影响。

许多三价稀土离子在可见光谱中具有辐射跃迁,而其中,三价镨离子(Pr³⁺)是实现高效可见光激光器的最成功的稀土离子之一。由于其通过下转换直接发射可见光的独特性质,Pr³⁺引起了研究人员的极大关注^[2-4]。它在可见光谱中表现出多种跃迁,包括 720 nm、695 nm、639 nm、605 nm、522 nm 和 490 nm 处的波长。Pr³⁺的发现使得通过单一频率转换过程产生紫外(UV)激光器成为了可能。在各种材料中,Pr³⁺:LiYF₄晶体由于其长能级寿命、大激发发射截面和成熟的生长过程等优点,已成为非线性晶体产生可见光的理想替代品^[5]。近年来,在全球范围内对紫外(UV)激光器和单频紫外激光器进行了广泛的研究^[6-10]。目前,关于连续波 Pr³⁺单频激光器的研究报告还不多见。2006年,Richer等人利用二极管泵浦的固态激光器作为泵浦源,采用折叠腔结构泵浦 Pr³⁺:LiYF₄晶体,然后使用三硼酸锂(LBO)晶体作为倍频晶体实现倍频,最终获得功率为 19 mW 的连续 320 nm 紫外激光输出^[11]。J. Kojou 等人分别在 2012 年和 2014 年通过 InGaN 二极管泵浦 Pr³⁺:LiYF₄晶体和腔内倍频实现了 320 nm 和 261 nm 脉冲紫外激光输出^[12-13]。2019年,Shogo Fujita 等人利用 Co²⁺:MgAl₂O₄晶体作为可饱和吸收体对 Pr³⁺:YLF 激光进行调 Q,最终实现了 320 nm (7.0 μJ, 63.3 ns, 64.6 kHz) 和 261 nm (0.2 μJ, 356 ns, 82.0 kHz) 的紫外脉冲输出^[14]。

本文以 Pr³⁺:LiYF₄晶体做为激光增益介质,以 444 nm 的 InGaN 二极管激光器为泵浦源,以布鲁斯特角切割的 I 类相位匹配 LBO 晶体做为倍频晶体,通过构建尺寸紧凑的稳定四镜环形激光腔,实现了 320 nm 的 Pr³⁺单频激光输出。当入射泵浦功率为 18 W 时,320 nm 紫外单纵模激光器的最大输出功率为 1.17 W,是目前已知最高 320 nm 单频输出功率,线宽小于 5.53 MHz。预计该 Pr³⁺:LiYF₄晶体的单纵模 320 nm 激光器将是一种新的且前途远大的紫外激光器。

2 实验方案设计及理论分析

640 nm 是 Pr³⁺的辐射跃迁谱线之一,具体对

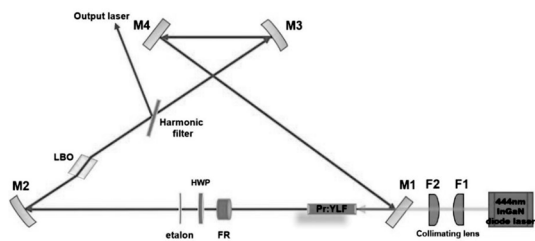
应³P₀→³F₂,属于四能级系统。对 640 nm 进行二倍频就可以获得 320 nm 紫外激光。Pr³⁺:LiYF₄晶体在蓝光波段存在三个主要的吸收带,分别是 444 nm、469 nm、479 nm。同时 Pr³⁺对 π 偏振方向的泵浦光吸收率最高,具有偏振吸收特性。在固定泵浦激光二极管时,将其出光方向调整为 π 偏振方向注入到 Pr³⁺:LiYF₄晶体中,提高其对泵浦光的吸收效率。

实验装置采用了如图 1 所示的四镜环形腔结构。采用功率 20 W 的 444 nm InGaN 激光二极管作为泵浦源,该波长位于 Pr³⁺:LiYF₄晶体吸收波段内,有足够大的吸收截面(9.0 × 10⁻²⁰ cm²)和较大的吸收带线宽(1.8 nm)。LD 采用 200 μm 芯径光纤耦合输出以压缩快轴发散角。平凸透镜 F1(R = 7.656)和 F2(R = 10.2)构成准直聚焦系统,将泵浦光耦合到激光增益介质中,聚焦光束的焦斑位于晶体中心处。激光增益介质为 a 切割 Pr³⁺:LiYF₄晶体,长度为 15 mm,掺杂浓度为 0.1%。晶体两端涂覆 444 nm 和 639 nm 抗反射涂层,以最大限度地减少插入损耗,增强光透射和系统性能。用铝箔包裹的 Pr³⁺:LiYF₄晶体安装在水冷冷却的铜块夹具中,以保持 15 °C 的最佳温度来有效去除晶体内部的热负载。

环形腔结构是实现单频激光工作的关键技术,本实验过程的四镜环形腔,折叠角约为 10°,用于最小化像散的不利影响。整个共振腔由四个反射镜组成,M1 和 M4 为平面镜,M2 和 M3 为曲率半径为 100 mm 的平面镜。M1 为 444 nm 镀防反射涂层,639 nm 镀高反射涂层。M2、M3 和 M4 反射镜完全相同,在 444 nm 处具有高透射率,在 639 nm 和 320 nm 处具有高反射率。

通过在 M1 和 M2 之间集成由 639 nm 处的法拉第旋转器(FR)和半波片(HWP)构成光隔离器,以此来控制激光束的单向传播,消除了反向传播激光束产生的驻波的形成,从而有效地避免了空间-空穴烧孔(SHB)效应。随着腔内各种模式的增益逐渐饱和,除了中心频率之外的所有纵模都在模式竞争中被抑制,最终实现了单纵模激光输出。法拉第旋转器(FR)包括具有 639 nm 抗反射涂层的 φ3 × 3 TGG 磁光晶体和磁铁(5700 GS)。使用厚度为 2 mm 的薄玻璃板作为 F-P 标准具,利用 F-P 标准具的窄带选模特性可以进一步增强单频激光的输出稳定性。为了提高其寿命,切削角为 θ = 90° 和 φ =

53.5°, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 7 mm 的 LBO 倍频晶体不进行任何镀膜处理。此外, 平行端面的 LBO 晶体容易构成复合腔, 导致反射光在腔内振荡, 引起点闪烁和输出功率不稳定。因此, 采用布鲁斯特角切割 LBO 晶体可以有效地减轻这些不利影响, 提高系统的稳定性和寿命。此外, 采用热电冷却器 (TEC) 精确控制激光介质和倍频晶体的温度。位于 LBO 晶体后的谐波片 (带涂层 639 nm AR, 320 nm HR, 布鲁斯特角 55.59°) 用作 320 nm 激光的输出镜。



注: F1, F2: 平面凸透镜; M1, M4: 平面反射镜; 晶体: Pr:YLF; 倍频晶体: Brewster 切割 LBO; FR: 法拉第旋转器; HWP: 半波片; M2, M3: 平面凹透镜, 曲率半径为 100 mm

图 1 单长模 320 nm 紫外激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of single longitudinal mode 320 nm UV laser

3 实验结果与分析

为了提高倍频转换的效率, 在共振腔中实现了较小的束腰半径, 以精确定位 LBO 晶体的放置位置。本实验采用了一种四镜环形谐振器结构, 如图 1 所示, 其中 M2 和 M3 是具有相同曲率半径的凹面镜。四镜环形腔的等效线性腔配置如图 2 所示。利用经典的 ABCD 传输矩阵理论, 使用 reZonator 软件模拟了共振腔内不同位置的光斑尺寸分布, 如图 3 所示。通过将折叠角优化为 10°, 发现像散效应显著降低, 如整个共振腔长度的矢状面和切面上几乎相同的光斑尺寸所证明的那样。LBO 晶体位于最小束腰附近。为了有效地减轻走离效应对倍频效率的影响, 旨在选择总腔长较短的谐振腔结构 ($L = d1 + d2 + d3 + d4 = 440$ mm), 并选择曲率半径较大 ($R = 100$ mm) 的平面镜 M2 和 M3。这确保了两个平面镜 M2 和 M3 之间相对较大的腰半径, 从而最大限度地提高非线性倍频转换效率, 同时最小化走离效应引起的副作用。图 4 说明了谐振腔的稳定性参数曲线作为 $d2$ 的函数, 表示两个凹面镜之间的距离。根据仿真结果, 当为 $d2$ 选择一个范围为 121 ~ 124 mm 的值时, 获得了一个最佳的稳定工作点。

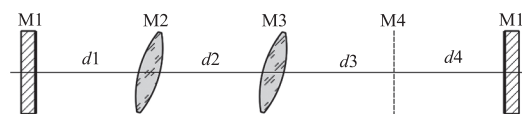


图 2 环形腔等效图

Fig. 2 Equivalent diagram of the ring resonator

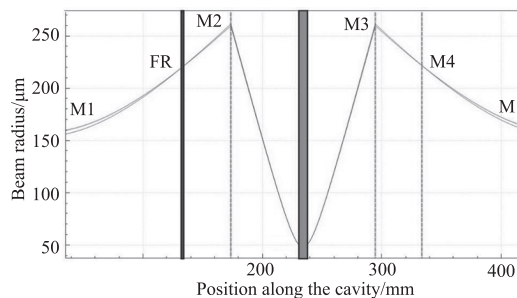


图 3 激光谐振腔中光束半径变化的模拟

Fig. 3 Simulation of beam radius variation along the laser resonator

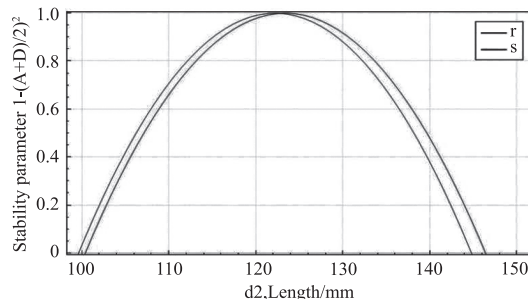


图 4 谐振腔的稳定性参数随凹面镜 M2 和 M3 间距 $d2$ 变化的曲线

Fig. 4 The curve of the stability parameter of the resonator as a function of the distance $d2$ between the concave mirrors M2 and M3

使用功率计测量了 320 nm 紫外激光器的功率, 以研究其对注入泵浦功率的依赖性, 如图 5 所示。在 18 W 的入射泵浦功率下, 对于工作在 320 nm 的单纵模激光器, 我们实现了 1.17 W 的最大输出功率。为了评估其稳定性, 320 nm 紫外激光器的功率被连续监测了两个小时, 如图 6 所示。从结果中可以明显看出, 320 nm 紫外激光器的功率稳定性被确定为大约 0.783 %。

使用 Spiricon 轮廓仪和 Thorlabs 光束质量测试设备对 320 nm 激光器的光束质量 (M^2) 进行了测试, 结果如图 7 所示。测试表明, 水平方向 (M^2_X) 的光束质量为 1.47, 而垂直方向 (M^2_Y) 为 1.50。

使用 HighFinesse WS/7L - UV 波长计对输出激光器的波长进行了测试, 测试结果为 319.915 nm, 测量结果如图 8 所示。图 9 表明光谱中没有其他纵模, 激光器为单纵模运行。

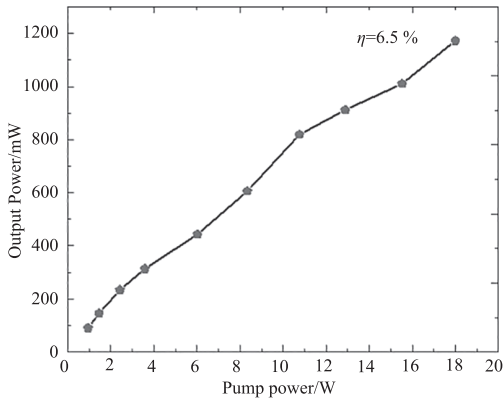


图5 单纵模 320 nm 紫外激光器的输出功率特性
Fig. 5 The output power characteristics of single longitudinal mode 320 nm ultraviolet laser

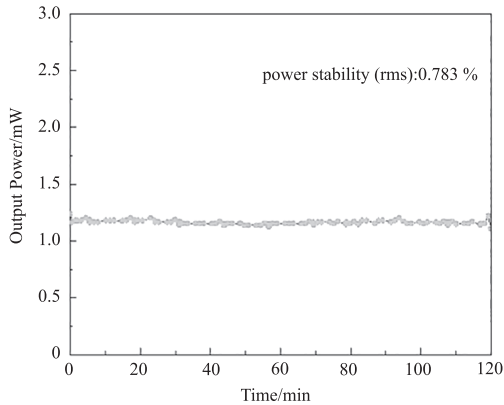


图6 320 nm 单频激光器的功率稳定性
Fig. 6 The power stability of 320 nm laser

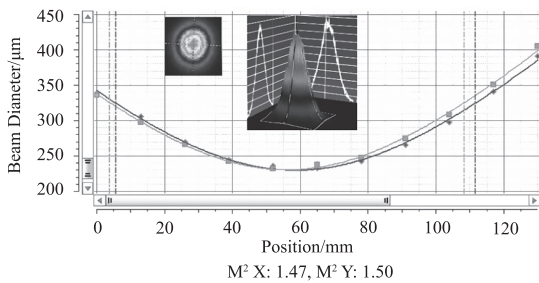


图7 320 nm 单频激光器的光斑与 M^2
Fig. 7 The beam spot and M^2 of 320 nm laser

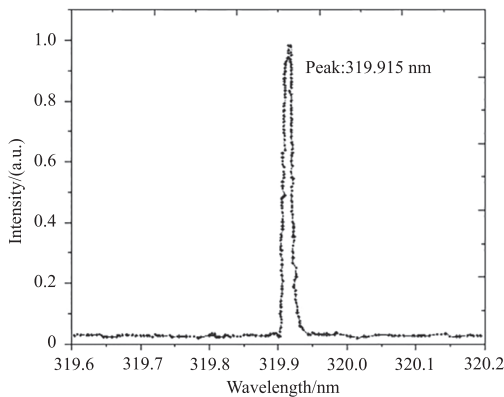


图8 320 nm 单频激光器的波长
Fig. 8 Wavelength of 320 nm laser

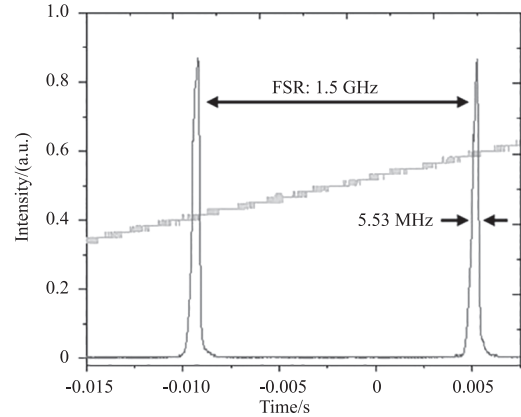


图9 F-P 扫描干涉仪测量的 SLM 光谱图

Fig. 9 SLM spectrum measured with an F-P scanning interferometer

值得注意的是,实验中观察到了模式跳跃的现象,这主要是由于当前研究是在开放实验室环境中进行的,不可避免地受到了空气扰动和机械振动等环境因素的影响。为了实现无模式跳跃的单频 Pr^{3+} 环形激光器在紫外光波段的应用,未来的研究应采用反馈技术来精确控制激光腔的长度,以抵消这些环境因素的影响。

4 结论

选择了 π 偏振方向的 444 nm 蓝光激光二极管作为泵浦源,并在注入激光增益介质之前进行了准直和聚焦。使用 $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 晶体与环形振荡器成功获得了 320 nm 单纵模紫外连续波激光输出。在注入功率为 18 W 的情况下,实现了 1.17 W 的最大连续输出功率,在连续测试 2 h 期间保持了超过 99.2% 的功率稳定性。这是目前已知全固态 320 nm 单纵模紫外激光器的最高输出功率的报告。

通过选择参数更合适的 Pr^{3+} 晶体,调整 LBO 长度,优化共振腔的热透镜效应,实施双端泵浦等结构,可以进一步实现激光器性能上的优化。

参考文献:

[1] Zhang C, Divitt S, Fan Q B, et al. Low-loss metasurface optics down to the deep ultraviolet region [J]. Light-Science & Applications, 2020, 9: 55.
[2] Gün T, Metz P, Huber G. Power scaling of laser diode pumped $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ cw lasers: efficient laser operation at 522.6 nm, 545.9 nm, 607.2 nm, and 639.5 nm [J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 1002-1004.
[3] 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.
- [4] Zheng W X,Zou J Y,Wang D,et al. Exploring the potential of $\text{Pr}^{3+}:\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$ mixed crystal for diode-pumped watt-level continuous-wave lasers in the visible region[J]. *Optics & Laser Technology*,2022,151:108023.
- [5] 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.
- [6] Li X Q,Qu D P,Chen Q,et al. 320 nm ultraviolet laser in blue laser diode double end pumped Pr:YLF crystal(Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2020,49(12):20201070. (in Chinese)
李昕奇,曲大鹏,陈晴,等. 蓝光二极管双端抽运 Pr:YLF晶体 320 nm 紫外激光器(特邀) [J]. *红外与激光工程*,2020,49(12):20201070.
- [7] Zhao B S,Qin W X,Li F Q,et al. All-solid-state CW single-frequency deep UV 266 nm laser [J]. *Journal of Quantum Optics*,2020,26(2):194–201. (in Chinese)
赵彪山,秦玮霞,李凤琴,等. 全固态连续单频 266 nm 深紫外激光器[J]. *量子光学学报*,2020,26(2):194–201.
- [8] Gün T, Metz P, Huber G. Efficient continuous wave deep ultraviolet $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ laser at 261.3 nm [J]. *Applied Physics Letters*,2011,99(18):181103.
- [9] Dou W,Pu S S,Qu D P,et al. Generation of continuous wave deep UV radiation at 273 nm based on frequency doubling of a diode pumped Pr:YLF laser [J]. *Applied Physics B*,2023,129(2):30.
- [10] Zhang Y S,Zou J Y,Zheng W X,et al. Watt-level continuous-wave intracavity frequency-doubled Pr:YLF-LBO laser at 320 nm [J]. *Chinese Optics Letters*,2021,19(9):091406.
- [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] Kojou J,Watanabe Y,Kojima Y,et al. Intracavity second-harmonic generation at 320 nm of an actively Q-switched Pr:LiYF₄ laser [J]. *Applied Optics*,2012,51(9):1382–1386.
- [13] Kojou J,Abe R,Kariyama R,et al. InGaN diode pumped actively Q-switched intracavity frequency doubling Pr:LiYF₄ 261 nm laser [J]. *Applied Optics*,2014,53(10):2030–2036.
- [14] Fujita S,Tanaka H,Kannari F. Intracavity second-harmonic pulse generation at 261 and 320 nm with a $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ laser Q-switched by a $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ spinel saturable absorber [J]. *Optics Express*,2019,27(26):38134–38146.