双波长蓝光 LD 抽运 Pr:YLF 晶体倍频 261 nm 紫外激光器

陈 晴[1*],浦双双[1],牛 娜[1],周 阳[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: 利用不同波长的蓝光激光二极管,采用不同方式抽运掺镨氟化钇锂(Pr:YLF)晶体,利用 I 类相位匹配的偏硼酸钡(BBO)为倍频晶体,腔内倍频产生中心波长为 261.37 nm 连续紫外激光器。采用 V 型折叠腔结构,利用两支不同波长的蓝光激光二极管(444 nm 和 469 nm)单独泵浦晶体,经过优化,将两支蓝光激光二极管合光后作为抽运源,增大泵浦功率的同时,保留了 Pr:YLF 晶体对其高的偏振吸收效率。Pr:YLF 晶体的长度为 5 mm,掺杂浓度为 0.5%,在抽运光功率为 2 800 mW 时获得了最大输出功率 245 mW 的连续紫外 261.37 nm 激光器,光光转换效率约为 8.75%。

关键词: 激光器; 紫外激光器; 掺镨氟化钇锂晶体; 双波长泵浦

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200090

261 nm frequency-doubling UV laser in bi-wavelength blue laser diode pumped Pr:YLF crystal

Chen Qing[1*],Pu Shuangshuang[1], Niu Na[1], Zhou Yang[1], Zheng Quan[1,2]

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

Abstract: The phase matching BBO was utilized as a frequency-doubling crystal to produce continuous ultraviolet laser with a central wavelength of 261.37 nm and the blue laser diodes with different wavelengths were used to pump the Pr:YLF in different ways. Two different wavelength blue laser diodes (444 nm and 469 nm) were used to pump Pr:YLF separately with V-shaped folded cavity structure. The two blue laser diodes were combined as the pumping source to increase the pumping power while retaining the high polarization absorption efficiency of Pr:YLF crystal after optimization. The length of Pr:YLF crystal was 5 mm, the doping concentration was 0.5%. Continuous 261.37 nm ultraviolet laser output with the maximum output power of 245 mW was obtained when the pumping power was 2 800 mW. The optical-to-optical efficiency was about 8.75%.

Key words: laser; ultraviolet laser; Pr:YLF crystal; two wavelength pump

收稿日期: 2020-05-11; **修订日期:** 2020-06-21

基金项目: 吉林省科技发展计划(20170203013GX)

作者简介: 陈晴(1991-),女,助理工程师,硕士,主要从事固体激光器方面的研究。Email: chenqinglaser@163.com

0 引 言

固体激光器具有尺寸小、使用方便、功率大的特点，在军事、加工、医疗、科研等领域有广泛的应用前景[1-2]。固体激光器是由泵浦源、谐振腔、工作物质三部分组成，其中工作物质是在晶体或玻璃中均匀地掺入少量激活离子，由于 Pr^{3+}离子可以产生可见光波段的激光[3]，近几年，越来越多的科研工作者开始研究掺 Pr^{3+}可见光固体激光器[4-5]。同时利用非线性频率转换技术，采用非线性晶体倍频，产生紫外波段的激光，因此紫外激光器的应用也越来越广泛[6-8]。在基因测序、光数据存储、大气探测、拉曼光谱、空间光通信和医疗等领域紫外激光器有着广泛的应用前景[9]。

随着半导体行业的发展，商业化的蓝光二极管产品促进了掺 Pr^{3+}激光器的快速发展。目前，InGaN 半导体激光器可提供在 440~470 nm 之间的瓦级功率输出，可以作为大多数掺 Pr^{3+}激光晶体的泵浦源。在激光器中，泵浦源端面抽运工作物质时在晶体端面会产生热透镜效应，由于热透镜效应会影响固体激光器的输出光束质量和光光转换效率，为了降低热透镜效应的产生，工作介质选用具有较低声子能量的氟化物激光材料。掺镨氟化钇锂(Pr:YLF)工作晶体这些年被广泛地研究报道。1977 年，Esterowitz 等人利用脉冲染料激光器作为泵浦源抽运掺镨氟化钇锂(Pr:YLF)晶体[10]。2004 年，A. Richter 等人利用蓝光二极管抽运 Pr:YLF 晶体产生全固态的红光激光器[11]，利用蓝光二极管替代脉冲染料激光器作为泵浦源，实现激光器小型化的可能性。随着 InGaN 二极管激光器的发展和商业化，可以实现在可见光谱区的高功率和紧凑化的全固态激光器。Hansen 等人在 2010 年实现了 523 nm 绿光 358 mW 的输出功率，泵浦源采用 1 W 的 InGaN 激光二极管，最高斜效率达到 54%[12]。2011 年徐斌等人用 469 nm 蓝光二极管泵浦 Pr 晶体，获得了多种可见光输出[13]。这些可见激光的另一个优势是，可以利用频率变换技术在腔内倍频出连续的紫外激光。2008 年相干公司利用光泵半导体 479 nm 泵浦 Pr 晶体，实现了 261 nm 波长 1 W 功率输出[14]。国内关于波长 261 nm 紫外激光器的研究比较少，文中利用双波长蓝光激光二极管合光作为抽运源，实现了高稳定性连续 Pr:YLF 全固态紫外 261 nm 激光器。通过双波长泵浦的方式，增加了 261 nm 输出功率，同时相比于国外采用的光泵半导体为泵浦源，利用二极管作为泵浦源具有成本低的优势。另外电源通过光电反馈的技术，提高激光器的长期稳定性和可靠性。从而使 261 nm 紫外激光器更适合用于荧光吸收、拉曼光谱、基因检测、生物化工等科研或工业应用中。

1 实验研究

1.1 Pr:YLF 晶体光谱特性

三价镨离子(Pr^{3+})在可见光波段存在多条跃迁，其发射波长覆盖了蓝光、绿光、橙光、红光等区域。掺镨氟化钇锂(Pr:YLF)晶体，易于生长，同时作为激光器晶体其转换效率高，对温度不敏感，被广泛研究。单轴晶体 Pr:YLF 的吸收谱线和发射谱线具有偏振特殊性质。图 1 是长度为 5 mm，掺杂浓度为 0.5%的 Pr:YLF 晶体在室温下测试的吸收谱线，其峰值波长分别为 444、469、479 nm。当电场 E 与晶体 c 轴平行时为 π 偏振，另一种情况，当电场 E 与晶体 a 轴平行时为 σ 偏振。从图 1 中分析，当利用 π 偏振方式泵浦时，晶体对蓝光的吸收效率更高。Pr:YLF 在 444 nm 波段处具有高的吸收系数和宽的吸收线宽，是目前最常用的泵浦波段。Pr:YLF 在 479 nm 波段处吸收线宽小于 469 nm 波段处的吸收线宽，实验中需要采用热电冷却器(TEC)精确控温方式对泵源的中心波长进行控制，由于线宽的原因，仍不能保证晶体对泵浦光的有效吸收。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。为了提高 261 nm 的输出功率，实验研究不同波长泵浦和

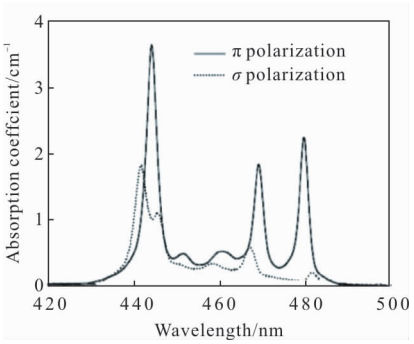

图 1 Pr:YLF 晶体的偏振吸收谱线

Fig.1 Polarized absorption spectra of Pr:YLF crystal

不同方式泵浦对 261 nm 激光输出功率的影响。实验发现，利用 Pr:YLF 晶体对光的吸收具有偏振特性，采用两个波长不同的 LD 进行空间合光后作为抽运源，进一步提高了晶体对泵浦源的吸收效率。这种采用两种波长合光并保留偏振特性的泵浦技术更具有实用价值。

1.2 实验装置及结果分析

实验中谐振腔结构采用 V 型腔，这种腔型方便调整工作晶体内的模式匹配，同时可以兼顾提高倍频效率，实验装置如图 2 所示。

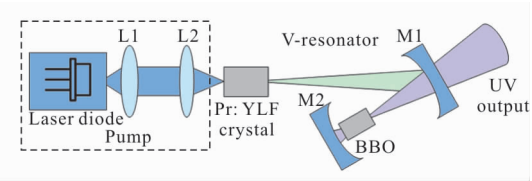

图 2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic layout of experiment

根据 Pr:YLF 晶体吸收光谱研究，其在 π 偏振方向对泵浦光有最大的吸收，因此为了最大限度吸收泵浦光，实验中将泵浦光的偏振调整到平行于 Pr:YLF 晶体 *c* 轴方向。利用 1.4 W 波长 444 nm 和 1.5 W 波长 469 nm 的蓝光二极管(OSRAM)分别单独泵浦 Pr:YLF 晶体。两个波长的 LD 采用一样的准直透镜和聚焦透镜，准直透镜 L1 焦距为 4.2 mm，聚焦镜 L2 焦距为 12 mm。两支 LD 经过准直后的参数如表 1 所示。

表 1 波长 444、469 nm 蓝光二极管的基本参数

Tab.1 Basic parameters of blue light diode with wavelength of 444 nm and 469 nm

Wavelength/nm	Max power/W	M_x^2	M_y^2
444	1.4	2.1	9.8
469	1.5	1.8	10.7

采用晶体尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm 的 Pr:YLF 晶体作为激光的工作物质，其中 Pr^{3+}离子的掺杂浓度为 0.5%，为了将泵浦光最大透过率传输进晶体中，设计时将晶体靠近泵浦源的端面作为腔镜，并在其端面镀有 444~469 nm 高透射介质膜、522 nm 基频光的高反射介质膜，晶体的另一面镀有 444~469 nm 和 522 nm 高透射的介质膜。倍频晶体选择具有大的双折射、低的色散、损伤阈值高的 BBO 晶体，利用 I 类相位匹配倍频方式，实验中选择长度是 3 mm 的 BBO 晶体，49°的切割角度，由于紫外波段很容易打坏晶体端面上的增透膜，从而影响激光器的寿命，所以 BBO 晶体两个端面未镀膜。为了精确地控制 LD 和晶体的工作温度，将 LD、工作晶体 Pr:YLF 和倍频晶体 BBO 分别固定在导热性能好的铜制热沉上进行散热，同时利用热电冷却器(TEC)控制温度。

在 V 腔中，平凹镜 M1 作为输出镜，其曲率半径为 200 mm，M1 表面镀有对 522 nm 高反射的介质膜。全反镜 M2 是曲率半径为 100 mm 的平凹镜，其表面镀有对倍频光 261 nm、基频光 522 nm 高反射的介质膜。在满足稳定腔的条件下，V 型谐振腔的长臂为 105 mm，短臂为 58 mm。如图 3 所示，借助于 ABCD 矩阵传输形式，当热透镜曲率 R_{th} 取 300 mm 时，计算可得腔内 Pr:YLF 晶体处的光腰半径约为 140 μm，BBO 晶体处光腰半径约为 63 μm。

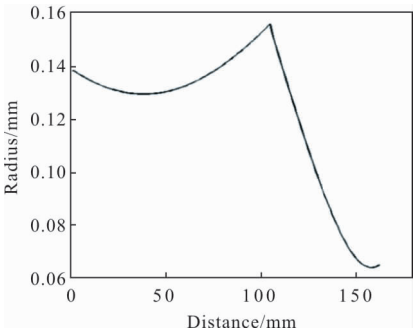

图 3 谐振腔内各位置的光斑半径

Fig.3 Spot radius at different positions within resonator cavity

实验中，为了实现工作晶体 Pr:YLF 对泵浦光有高的吸收效率，在固定晶体时，保留 Pr:YLF 晶体的偏振吸收特性，将泵浦光 LD 的出光方向与晶体的 π 偏振方向一致。在测试中通过对 LD 的温度控制，从而控制 LD 的中心波长与 Pr:YLF 晶体的吸收峰重合。

利用 Coherent 的 PS19Q 功率计测试，单支 444 nm LD 泵浦实现 149 mW 功率输出，单支 469 nm LD 实现 110 mW 功率输出。功率输出特性曲线如图 4所示，其中横坐标对应泵浦光功率，纵坐标对应紫外 261 nm 激光输出功率。晶体对泵浦光 444 nm LD 的最大吸收效率约为 84%，对泵浦光 469 nm LD 的最大吸收效率约为 65%，由于 Pr:YLF 晶体对 444 nm

LD 吸收效率高，从而获得更高功率的 261 nm 紫外激光。

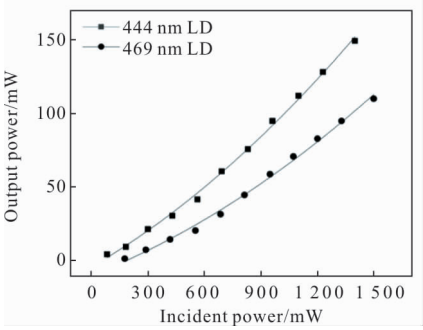

图 4 261 nm 激光的输出功率特性

Fig.4 Output characteristic of 261 nm laser

为了进一步提高紫外波长 261 nm 激光的输出功率，通过采用自由空间合束方法加大泵浦功率。如图 5 所示，利用透镜焦距为 4.2 mm 的透镜 L1 将 444 nm LD 和 469 nm LD 单独准直，然后采用波长合束的方式，用 45°合光片将两支 LD 合成一束光，合光片是公司自镀的 45°444 nm 高透射、469 nm 高反射介质膜。同时在固定两支 LD 时，采用以 π 偏振的方式泵浦 Pr:YLF 晶体。经过合束后的光斑尺寸约为 4.3 mm×1.3 mm，合束后的光束利用平凸镜 L2 (f=12 mm) 将泵浦光聚焦到工作物质 Pr:YLF 上，腔型和腔内光学参数保持不变。

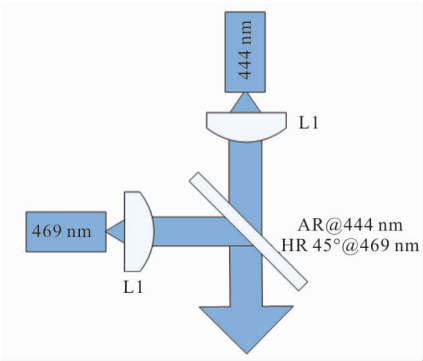

图 5 444 nm 和 469 nm LD 合光示意图

Fig.5 Schematic diagram of 444 nm and 469 nm LD combine beam

实验中，Pr:YLF 晶体对 444 nm 和 469 nm LD 合束后的最大吸收效率为 74%，因为采用 π 偏振方向泵浦，保留着晶体对泵浦光高的吸收效率。利用光谱仪测试激光谱线中心波长为 261.37 nm，如图 6 所示。

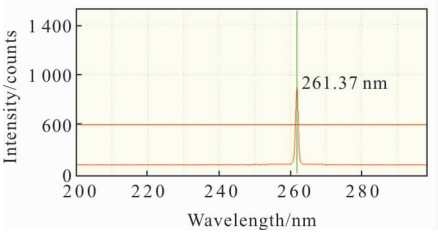

图 6 261.37 nm 紫外光光谱测试

Fig.6 Spectrum of UV laser at 261.37 nm

利用 Spiricon 轮廓分析仪和 M^2 仪器测试 261.37 nm 激光的光斑如图 7 所示。此光斑图对比于单支 LD 泵浦晶体的光斑图，分析由于 BBO 倍频晶体存在走离角，导致光斑是长条型，而并非是双波长泵浦导致。激光器在 X、Y 两个方向的 M^2 值分别为 2.28 和 1.89。

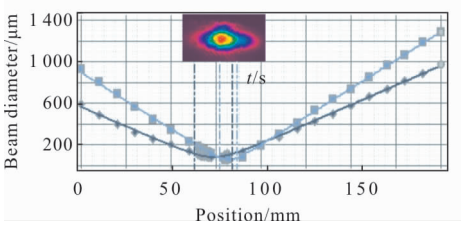

图 7 261.37 nm 激光的光斑和 M^2 测试图

Fig.7 Laser beam and M^2 at 261.37 nm

利用 Coherent 的 PS19Q 功率计测试，在 444 nm 和 469 nm LD 空间合束的泵浦方式下，优化腔长获得的最大输出功率为 245 mW 的 261.37 nm 激光，其中相对于抽运光的光光转换效率约为 8.75%。根据实验测试结果，激光的输出特性曲线拟合结果如图 8 所示。其中横坐标表示泵浦光的功率，纵坐标表示紫外激光器的输出功率。测试 2 h 功率 RMS 稳定性为 1.62%，如图9 所示。

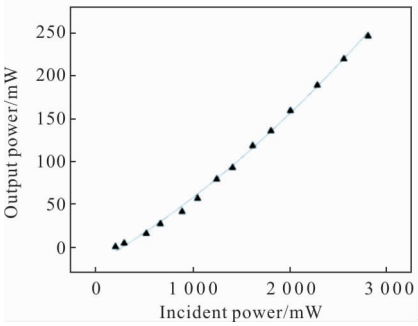

图 8 444 nm 和 469 nm LD 合光泵浦紫外 261.37 nm 的输出功率

Fig.8 Output power of 261.37 nm UV laser using 444 nm and 469 nm LD beam pump combination

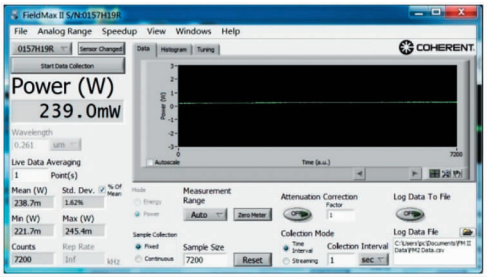

图 9 紫外 261.37 nm 激光器的功率稳定性

Fig.9 Power stability of the 261.37 nm UV laser

2 结 论

文中选用国产的 Pr:YLF 晶体作为激光增益介质，利用蓝光二极管泵浦作为泵浦源，其中输出功率 1.4 W 的 444 nm 和 1.5 W 的 469 nm LD 分别单独作为泵浦源，对比了两支不同波长的 LD 产生的 261 nm 的功率值分别为 149、110 mW。根据实验结果分析对泵浦光的吸收效率越大，输出功率越大。从这个角度，为了提高紫外激光器的输出功率，采用这两支波长为 444、469 nm 蓝光激光二极管合光作为泵浦源，不仅提高了泵浦光的功率，同时保留晶体对泵浦光偏振的高吸收率。最终获得了波长 261.37 nm，最大功率 245 mW 激光输出。相对于抽运功率的光光转换效率为 8.75%。随着泵浦功率的增加，斜效率是激光器总输出功率的最重要影响因素。从激光器的使用价值方面考虑，当工作晶体对泵浦光的吸收存在偏振特性时，建议在保留偏振特性的前提下，优先选用两种波长合光技术。后续实验可以通过选用谱线更窄、波长控制优异的 InGaN 二极管，优化腔型设计，优化输出镜的透射率等途径，进一步提高紫外 261 nm 激光的输出功率和斜效率。

参考文献：

[1] Wang Xianshuang, Guo Shuai, Xu Xiangjun, et al. Fast recognition and classification of tetrazole compounds based on laser-induced breakdown spectroscopy and raman spectroscopy[J]. ***Chinese Optics***, 2019, 12(4): 888-895. (in Chinese)

[2] Zhong Kun, Su Wei, Peng Bo, et al. Model of underwater target laser scanning detection based on undershoot distance [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2020, 49(2): 0203004. (in Chinese)

[3] Richter A, Heumann E, Huber G, et al. Power scaling of semiconductor laser pumped Praseodymium-lasers [J]. ***Optics Express***, 2007, 15(8): 5172-5178.

[4] Gün T, Metz P, Huber G. Power scaling of laser diode pumped Pr^{3+}: $YLiF_4$ 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.

[5] Qu B, Xu B, Luo S, et al. InGaN-LD-pumped continuous-wave deep red laser at 670 nm in Pr^{3+}:$LiYF_4$ crystal [J]. ***IEEE Photonics Technology Letters***, 2015, 27(4): 333-335.

[6] Niu N, Qu D P, Dou W, 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)

[7] Zhu P, Zhang C, Zhu K, et al. 303 nm continuous wave ultraviolet laser generated by intracavity frequency-doubling of diode-pumped Pr^{3+}:$LiYF_4$ laser [J]. ***Optics & Laser Technology***, 2018, 100: 75-78.

[8] Niu N, Pu S S, Chen Q, et al. 302 nm continuous wave generation by intracavity frequency doubling of a diode-pumped Pr:YLF laser [J]. ***Applied Optics***, 2018, 57(33): 9798-9802.

[9] Sasaki T, Mori Y, Yoshimura M, et al. Recent development of nonlinear optical borate crystals: key materials for generation of visible and UV light [J]. ***Materials Science & Engineering R: Reports***, 2000, 30(1-2): 1-54.

[10] Esterowitz L, Allen R, Kruer M, et al. Blue light emission by a Pr:$LiYF_4$ - laser operated at room temperature [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1977, 48(2): 650-652.

[11] Richter A, Heumann E, Osiac E, et al. Diode pumping of a continuous-wave Pr^{3+}-doped $LiYF_4$ laser [J]. ***Optics Letters***, 2004, 29(22): 2638-2640.

[12] Hansen N O, Bellancourt A R, Weichmann U, et al. Efficient green continuous-wave lasing of blue-diode-pumped solid-state lasers based on praseodymium-doped $LiYF_4$[J]. ***Applied Optics***, 2010, 49(20): 3864-3868.

[13] 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.

[14] Ostroumov V, Seelert W. 1 W of 261 nm cw generation in a Pr^{3+}: $LiYF_4$ laser pumped by an optically pumped semiconductor laser at 479 nm[C]//SPIE, 2008, 6871: 68711K.