中国光学
Chinese Optics
核心期刊

蓝光二极管抽运Pr：YLF腔内倍频连续深紫外激光器

牛娜 窦微 浦双双 刘天虹 魏程亮 宋海龙 郑权

Continuous deep ultraviolet laser by intracavity frequency doubling of blue laser diode pumped PrYLF

NIU Na, DOU Wei, PU Shuang-shuang, LIU Tian-hong, WEI Cheng-liang, SONG Hai-long, ZHENG Quan

引用本文:
牛娜, 窦微, 浦双双, 刘天虹, 魏程亮, 宋海龙, 郑权. 蓝光二极管抽运Pr：YLF腔内倍频连续深紫外激光器[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1395-1399. doi: 10.37188/CO.2021-0077
NIU Na, DOU Wei, PU Shuang-shuang, LIU Tian-hong, WEI Cheng-liang, SONG Hai-long, ZHENG Quan. Continuous deep ultraviolet laser by intracavity frequency doubling of blue laser diode pumped PrYLF[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1395-1399. doi: 10.37188/CO.2021-0077

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021-0077

第 14 卷　第 6 期
2021 年 11 月

中国光学
Chinese Optics

Vol. 14　No. 6
Nov. 2021

文章编号　2095-1531(2021)06-1395-05

蓝光二极管抽运 Pr∶YLF 腔内倍频连续深紫外激光器

牛　娜[1]，窦　微[1]，浦双双[1]，刘天虹[1,2]，魏程亮[1]，宋海龙[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：为了探究波长 200~280 nm 内连续深紫外激光输出，本文采用输出功率为 1.4 W、中心波长为 444 nm 和输出功率为 1.5 W、中心波长为 469 nm 的两个蓝光激光二极管(LD)合光作为泵浦源，端面泵浦长度为 5 mm 的国产 Pr∶YLF 晶体，再利用长度为 7 mm 的偏硼酸钡(BBO)作为倍频晶体进行腔内倍频，通过优化腔镜膜系设计和加入全波片配合波长选择，实现了 Pr∶YLF 晶体的弱谱线倍频输出，最终成功获得了最大输出功率为 8.37 mW、中心波长为 268.89 nm 的连续深紫外激光。

关　键　词：激光器；连续深紫外激光器；掺镨氟化钇锂晶体；蓝光激光二极管
中图分类号：TN248.1　　　**文献标志码：**A　　　**doi：**10.37188/CO.2021-0077

Continuous deep ultraviolet laser by intracavity frequency doubling of blue laser diode pumped Pr∶YLF

NIU Na[1], DOU Wei[1], PU Shuang-shuang[1], LIU Tian-hong[1,2], WEI Cheng-liang[1],
SONG Hai-long[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 Science*,
Changchun 130033, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *zhengquan@cnilaser.com*

Abstract: In order to explore the continuous deep ultraviolet laser output within the wavelength of 200~280 nm, a 5 mm long domestic Pr∶YLF crystal was pumped by the combine of 1.4 W blue laser diode at 444 nm and 1.5 W blue laser diode at 469 nm, and the BBO with a length of 7 mm was used as the frequency doubling crystal. By optimizing the resonator mirror coating and inserting a full wave plate for wavelength competition, it makes the output of weak spectra of Pr∶YLF possible. At last, the continuous deep ultraviolet laser with a maximum power of 8.37 mW and center wavelength of 268.89 nm was achieved.

Key words: laser; continuous deep UV laser; Pr∶YLF crystal; blue laser diode

收稿日期：2021-04-13；**修订日期：**2021-05-11
基金项目：吉林省科技攻关计划 (No. 20170203013GX)
Supported by Science and Technology Program of Jilin Province (No. 20170203013GX)

1 引 言

与传统的红外、可见波段激光器相比，紫外激光具有光子能量高、波长短、冷处理、聚焦性能好等显著特点[1-4]，尤其是 200~280 nm 波段的紫外激光器在非接触式高精密光学加工、精微材料与器件制造、特殊材料处理、光谱检测、光化学/生化学、医疗等行业颇具吸引力[5-6]。与其他传统的紫外激光器，如 He-Cd 气体激光器、等离子体紫外激光器相比，二极管泵浦的全固态紫外激光器在工作效率、维护成本、系统体积等方面有更大的优势[7]。

一般而言，全固态紫外激光器获得 200~280 nm 紫外波长的途径有以下几种形式：以氮化镓铝为发光层的激光二极管可直接输出紫外波长激光；用非线性晶体对输出近红外波长的激光二极管进行非线性频率转换获得紫外波长激光；二极管泵浦的掺铈激光器可输出紫外波段的可调谐激光；非线性晶体倍频绿光泵浦的掺钛蓝宝石激光器可获得紫外激光输出；激光二极管泵浦掺 Nd^{3+}离子晶体获得红外波段激光器，再用非线性晶体四倍频/五倍频获得紫外激光[8]。由于前几种获得紫外激光的方式对激光二极管性能要求很高，成本也相对较高，所以目前应用并不广泛。其中，利用非线性晶体四倍频激光二极管泵浦的 Nd^{3+}:YAG 晶体激光器获得 266 nm 紫外光是目前研究最成熟、应用最广泛的全固态紫外激光器方案。但是这种获得紫外光的方式需要经过两次频率转换，大幅降低了光-光转换效率，并增加了结构的复杂性。除了上述几种获得紫外输出的途径之外，近几年来，随着一种可以直接下转换实现可见光输出的稀土元素 Pr^{3+}的研究发展[9-12]，利用非线性晶体一次倍频二极管泵浦的掺 Pr^{3+}晶体激光器获得紫外激光输出的方法也逐渐成为研究热点。

2007 年，德国 Vasily Ostoumov 等人采用 V-tpye 结构，在 522 nm 处输出功率达 2.5 W，倍频后获得 620 mW 的 261 nm 紫外输出，整体光光转换效率约 12.4%[13]。2008 年，Vasily Ostoumov 等人采用 Z 型腔结构，利用两个 5.3 W 的 OPS 泵浦 Pr:YLF 晶体，成功使 261 nm 处的最高输出功率达 1 W[14]，这也是迄今为止，Pr:YLF 晶体中在 261 nm 处所能达到的最高指标。此后，随着蓝光二极管的发展，2011 年，Teoman 等人采用两个功率为 1 W 的 InGaN 蓝光二极管作为泵浦源，泵浦长度为 2.9 mm 的 Pr:YLF 晶体，最终获得了输出功率为 481 mW 的 261.3 nm 紫外光，泵浦光到紫外光的转换效率可达 26.1%[15]。2020 年，陈晴等人采用 V 型折叠腔结构，利用两支不同波长的蓝光激光二极管合光后作为抽运源泵浦 Pr:YLF 晶体，在抽运光功率为 2.8 W 时获得了最大输出功率为 245 mW 的连续紫外 261.37 nm激光器[16]。对于 Pr:YLF 腔内倍频的 200~280 nm连续紫外光的报道主要围绕在 261 nm，相关研究较为成熟，功率和效率不断被提升，而 200~280 nm范围内的其他连续紫外波长暂无报道。本文从 Pr:YLF 晶体荧光谱线出发，研究了 Pr:YLF 晶体的其他弱谱线，旨在丰富 200~280 nm 连续紫外光源的波长研究，为一些生物医学、科学研究等领域奠定实验基础，这是关于腔内倍频 Pr:YLF晶体的弱谱线 537 nm 输出连续深紫外 268 nm 激光的首次报道。

2 实验研究

2.1 实验装置

2018 年，文献 [17] 曾报道过蓝光二极管抽运 Pr:YLF 晶体腔内倍频 348.9 nm 紫外激光器。本文在原有的两个不同 LD 合光泵浦结构基础上，研究了 Pr:YLF 晶体荧光谱线特性，通过优化膜系设计和加入全波片配合波长选择，利用非线性晶体倍频 Pr:YLF 的弱谱线 537 nm 基频光，最终获得了 268 nm 的连续深紫外波长，实验装置如图 1 所示。

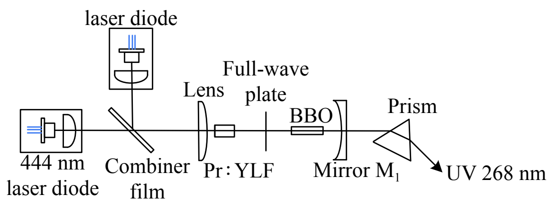

图 1 蓝光二极管泵浦的 Pr:YLF 激光器装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blue laser diode pumped Pr:YLF laser

根据 Pr:YLF 晶体在 444 nm、469 nm 以及

479 nm 位置的吸收谱线特性[18], 选择日益成熟的蓝光二极管作为泵浦源, 为了提高泵浦功率和吸收效率, 本文采用德国 OSRAM 公司生产的两个不同波长的蓝光二极管以保留偏振特性再合光后作为泵浦源, 一个蓝光二极管的功率为 1.4 W、波长为 444 nm, 另一个的功率为 1.5 W、波长为 469 nm, 两个 LD 分别用 f=4.2 mm 的单透镜准直, 然后再利用 45°合光片合光后作为泵浦源, 45°合光片表面镀有 444 nm 的增透膜和 469 nm 的高反膜, 合束后的泵浦光配合直腔结构, 通过焦距 f=10 mm 的聚焦镜汇聚到激光工作物质 Pr∶YLF 晶体上。

激光工作物质的尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm, Pr 离子掺杂浓度为 0.5%, 晶体左侧表面镀 444~469 nm 的增透膜和 537 nm 的高反膜作为一个腔镜使用, 另一侧表面镀 444~469 nm 和 537 nm 的增透膜。作为倍频基频光的非线性晶体选择非线性系数较高的频率转换晶体 BBO, 晶体切割角度为 47.1°, 晶体尺寸为 2 mm×2 mm×7 mm, BBO 晶体双面抛光未镀膜。Pr∶YLF 和 BBO 晶体分别固定在铜制机械件中热传导散热并通过热电制冷器精确控温。

谐振腔采用简单直腔结构, 输出镜 M_1 曲率半径为 200 mm, 表面镀有 537 nm 高反膜和 268 nm 增透膜、522 nm 和 607 nm 部分透过膜。输出镜 M_1 对 268 nm 增透膜的透过率约为 60%, 对 522 nm 透过膜的透过率约为 15%, 对 607 nm 透过膜的透过率约为 65%。输出镜 M_1 距 Pr∶YLF 晶体端面约 40 mm, 系统输出后利用三角棱镜进行分光滤除杂散光。谐振腔内全波片为厚度约 0.351 mm 的石英片。

2.2　实验结果及分析

实验中首先使用海洋光学光纤光谱仪 HR4000 测试了 Pr∶YLF 晶体在 400~580 nm 的荧光谱线, 如图 2 所示, 除了已经获得的较强谱线 522 nm 外, 还有两条弱谱线, 分别为 537 nm 和谱线较宽的 546~549 nm, 为获得荧光谱线线宽较小的 537 nm 的倍频光, 根据晶体的荧光谱线特性分析和多次的镀膜实验后, 对实验系统和谐振腔镜片 M_1 进行了改进设计。系统采用了最简单的直腔结构, 主要是由于实验采用腔内倍频产生深紫外光的形式与可见光激光器不同, 谐振腔内的镜片需含有深紫外波段的反射或透射膜, 而镜片的镀膜材料在深紫外波段都有较大的吸收, 含有深紫外膜的镜片对镀膜工艺要求很高而且透过率很难达到理想值。采用折叠腔等结构虽然可通过优化倍频晶体处的光斑大小提高倍频效率, 但是折叠腔需额外增加腔镜, 由此引起的紫外损耗会远大于通过结构优化晶体处光斑大小带来的增益, 所以采用最简单的直腔结构可以减少谐振腔所需镜片, 从而可以很大程度降低镜片表面的紫外损耗, 降低激光器阈值。

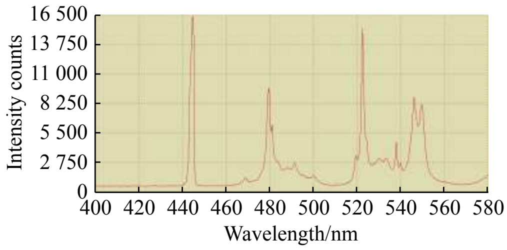

图 2　Pr∶YLF 晶体的荧光谱线

Fig. 2　Emission spectra of Pr∶YLF crystal

输出镜 M_1 表面镀有基频光 537 nm 高反膜和倍频光 268 nm 增透膜, 受镀膜材料和工艺限制, 268 nm 增透膜的透过率大约可以做到 60%。除此之外, 为了抑制附近其他谱线的竞争, 输出镜 M_1 表面还镀有 522 nm 和 607 nm 的部分透过膜, 由于 522 nm 和 537 nm 波长较接近, 在保证 537 nm 高反膜反射率的情况下, 522 nm 部分透过膜的透过率约为 15%, 607 nm 部分透过膜的透过率约为 65%。实验中首先利用 537 nm 输出镜替代输出镜 M_1 观察效果, 在泵浦功率最大时调试光路, 调试时使用光谱仪测试输出光谱, 可以观察到, 537 nm 谱线不稳定, 与 546 nm谱线存在竞争关系, 谱线交替跳动。光谱测试图如图 3 所示。

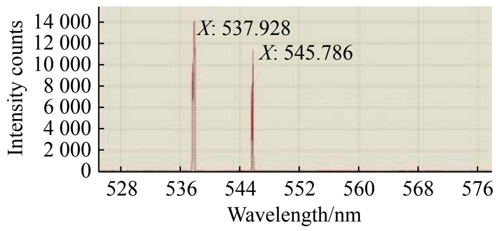

图 3　基频光光谱测试图

Fig. 3　Spectrogram of fundamental laser

由于 537 nm 和 546~549 nm 谱线接近, 很难通过膜系透过率的差别抑制 546~549 nm 的谱线产生。将 537 nm 输出镜更换为紫外输出镜 M_1

重新调制光路，加入倍频晶体 BBO 进行腔内倍频，同时在谐振腔内插入一个起相位延迟作用的 537 nm 全波片，全波片的厚度按波长 537.9 nm 设计，对波长 537.9 nm 的光偏振无影响，但是对其他波长的光会产生相位延迟。由于倍频晶体 BBO 在谐振腔内倍频时需要偏振选择，它与全波片配合在一起会增加 546~549 nm 波段在谐振腔内的损耗，从而抑制 546~549 nm 波段光谱的产生。最终通过仔细调节波片角度获得了单一波长的连续深紫外光输出，用功率计测试最大输出功率约 8.37 mW，用光谱仪测得紫外光的中心波长为 268.89 nm，测试结果如图 4 所示。

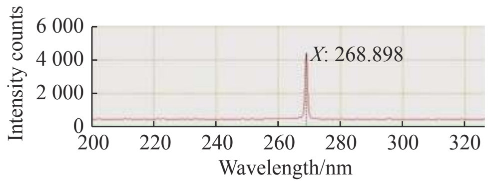

图 4 连续紫外光光谱测试图

Fig. 4 Spectrogram of continuous ultraviolet laser

本文获得了比较弱的 268 nm 深紫外连续光谱，一方面是由于腔镜镀膜工艺的限制，腔镜对紫外光的损耗较大；另一方面，由于腔镜损耗问题限制了谐振腔型的选择，也部分降低了基频光的倍频效率，间接影响了深紫外连续光的输出。此外，为了抑制 546~549 nm 波段激光、获得单一波长的 268 nm 连续深紫外输出，加入了 537 nm 的全波片，也对紫外光有一定的损耗，但是波片的加入理论上对线宽也有一定的压缩作用，也可以为日后窄线宽的连续深紫外激光器提供实验基础。本文只是获得 268.89 nm 的连续深紫外光谱，功率较低，还有很大改进空间，相信日后通过紫外镜片镀膜材料和技术的提升，可以大幅度降低连续深紫外激光的损耗，配合谐振腔的结构优化和泵浦功率的提高，可以进一步实现更高的连续深紫外光的功率输出。

3 结 论

本文采用简单直腔结构，研究了双蓝光二极管合光泵浦 Pr∶YLF 晶体腔内倍频的全固态连续深紫外激光器。通过优化腔镜的膜系设计，加入 537 nm 全波片配合波长选择，利用非线性晶体 BBO 倍频 Pr∶YLF 的弱谱线 537 nm，最终首次成功获得了连续深紫外激光，利用光谱仪测试深紫外连续光谱的中心波长为 268.89 nm，最大输出功率为 8.37 mW。该波长的首次获得为 Pr∶YLF 晶体弱谱线倍频的进一步研究奠定了基础，丰富了 Pr∶YLF 晶体在 200~280 nm 连续紫外光源的波长。

参考文献：

[1] 刘学胜，杨松，司汉英，等. 1 J高光束质量免水冷脉冲Nd∶YAG激光器[J]. 发光学报，2019，40(12)：1523-1530.
LIU X SH, YANG S, SI H Y, *et al*.. High beam quality water-free pulsed Nd∶YAG laser with output energy 1 J[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(12): 1523-1530. (in Chinese)

[2] 刘宇乾，张贺，金亮，等. 紧凑型准连续泵浦调*Q* Nd∶YAG激光器[J]. 中国光学，2019，12(2)：413-424.
LIU Y Q, ZHANG H, JIN L, *et al*.. Compact quasi continuous pumped Nd∶YAG *Q*-switched solid laser[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 413-424. (in Chinese)

[3] 崔建丰，岱钦，邬小娇，等. LD侧面泵浦Nd∶YVO_4高重频紫外激光器[J]. 发光学报，2019，40(8)：1011-1014.
CUI J F, DAI Q, WU X J, *et al*.. LD-side pumping Nd∶YVO_4 high repetition rate UV laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(8): 1011-1014. (in Chinese)

[4] 王晓洋，刘丽娟. 深紫外非线性光学晶体及全固态深紫外相干光源研究进展[J]. 中国光学，2020，13(3)：427-441.
WANG X Y, LIU L J. Research progress of deep-UV nonlinear optical crystals and all-solid-state deep-UV coherent light sources[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 427-441. (in Chinese)

[5] 苏畅，马宇航，丁可可，等. 紫外激光器应用进展[J]. 光电子，2021，11(1)：26-34.
SU CH, MA Y H, DING K K *et al*.. Application progress of ultraviolet laser[J]. *Optoelectronics*, 2021, 11(1): 26-34. (in Chinese)

[6] 王芳. 高能深紫外激光的产生及应用技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2020: 1-2.
WANG F. Study on generation and application of high energy DUV lasers[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2020: 1-2. (in Chinese)

[7] 李林, 李正佳, 何艳艳. 全固态紫外激光器研究进展[J]. 激光杂志, 2005, 26(6): 1-3.
LI L, LI ZH J, HE Y Y. Progress of search on all solid-state ultraviolet laser[J]. *Laser Journal*, 2005, 26(6): 1-3. (in Chinese)

[8] 郝大伟. 微电子加工用266 nm紫外DPL[D]. 长春: 长春理工大学, 2010: 4-5.
HAO D W. 266 nm ultraviolet DPL for microelectronics processing[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010: 4-5. (in Chinese)

[9] 霍晓伟, 齐瑶瑶, 李宇琪, 等. LD泵浦掺Pr^{3+}的可见光固体激光器研究进展[J]. 光电技术应用, 2019, 34(5): 7-15.
HUO X W, QI Y Y, LI Y Q, *et al*.. Research progress of LD-pumped Pr^{3+}-doped solid-state laser in visible wavelength[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2019, 34(5): 7-15. (in Chinese)

[10] 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.

[11] RICHTER A, HEUMANN E, HUBER G, *et al*.. Power scaling of semiconductor laser pumped Praseodymium-lasers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5172-5178.

[12] 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.

[13] 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.

[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[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6871: 68711K.

[15] GÜN T, METZ P, HUBER G. Efficient continuous wave deep ultraviolet Pr^{3+}∶$LiYF_4$ laser at 261.3 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(18): 181103.

[16] 陈晴, 浦双双, 牛娜, 等. 双波长蓝光LD抽运Pr∶YLF晶体倍频261 nm紫外激光器[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S1): 20200090.
CHEN Q, PU SH SH, NIU N, *et al*.. 261 nm frequency-doubling UV laser in bi-wavelength blue laser diode pumped Pr∶YLF crystal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S1): 20200090. (in Chinese)

[17] 牛娜, 曲大鹏, 窦微, 等. 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[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201003.
NIU N, QU D P, DOU W, *et al*.. 348.9 nm intra-cavity frequency-doubling ultraviolet laser in blue laser diode pumped Pr∶YLF crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1201003. (in Chinese)

[18] HUBER G, RICHTER A, HEUMANN E. Continuous wave Praseodymium solid-state lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6451: 645102.

作者简介:

牛　娜(1986—), 女, 吉林四平人, 激光工程师, 2012 年于长春理工大学获得光学硕士学位, 现任职于长春新产业光电技术有限公司, 主要从事固体激光器技术与应用方面的研究。Email: niuna@cnilaser.com

郑　权 (1973—), 男, 黑龙江甘南人, 2002 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事高性能及大功率固体激光器方向的研究。Email: zhengquan@cnilaser.com