

文章编号 2097-1842(2023)06-1318-06

## 5.2 W 高重频 257 nm 深紫外皮秒激光器

范灏然<sup>1</sup>, 陈曦<sup>1\*</sup>, 郑磊<sup>1</sup>, 谢文侠<sup>1</sup>, 季鑫<sup>1</sup>, 郑权<sup>1,2</sup>

(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:** 为了提高半导体检测用深紫外激光器的检测效率, 需要搭建高功率、高重频 257 nm 深紫外皮秒激光器实验平台。本文以光子晶体光纤放大器和腔外四倍频结构为基础, 进行了 257 nm 深紫外激光器的实验研究。种子源采用中心波长为 1030 nm、脉冲宽度为 50 ps 的光纤激光器, 输出功率为 20 mW, 重复频率为 19.8 MHz。通过两级掺镱双包层 (65 μm/275 μm) 光子晶体光纤棒放大结构, 获得了 1030 nm 高功率基频光。利用二倍频晶体 LBO、四倍频晶体 BBO, 采用腔外倍频方式获得了 257 nm 深紫外激光。种子源通过两级光子晶体光纤放大器输出的 1030 nm 基频光, 输出功率为 86 W, 经过激光聚焦系统后, 倍频得到二次谐波 515 nm 激光输出功率为 47.5 W, 四次谐波 257 nm 深紫外激光输出功率为 5.2 W, 四次谐波转换效率为 6.05%。实验结果表明, 该结构可获得高功率 257 nm 深紫外激光输出, 为提高半导体检测用激光器的检测效率提供了新思路。

**关键词:** 深紫外皮秒激光器; 高重频; 光子晶体光纤放大器; 四次谐波产生

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0026

## High repetition frequency 257 nm deep ultraviolet picosecond laser with 5.2 W output power

FAN Hao-ran<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1\*</sup>, ZHENG Lei<sup>1</sup>, XIE Wen-xia<sup>1</sup>, JI Xin<sup>1</sup>, ZHENG Quan<sup>1,2</sup>

(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)

\* Corresponding author, E-mail: chenxi@cnilaser.com

**Abstract:** To improve the detection efficiency of deep ultraviolet laser for semiconductor detection, it is necessary to develop 257 nm deep ultraviolet picosecond laser with high power and high repetition frequency. In this study, a 257 nm deep ultraviolet laser was experimentally investigated based on photonic fiber amplifier and extra-cavity frequency quadrupling. The seed source uses a fiber laser with a central wavelength of 1030 nm and a pulse width of 50 ps, delivering a power output of 20 mW and a repetition frequency of 19.8 MHz. High power 1030 nm fundamental frequency light was obtained through a two-stage ytterbium-doped double cladding (65 μm/275 μm) photonic crystal fiber rod amplification structure, and

收稿日期: 2023-02-11; 修订日期: 2023-03-13

基金项目: 长春市科技发展计划重点研发专项 (No. 21ZGG15)

Supported by the Key R & D Projects of Changchun Science and Technology Development Plan (No. 21ZGG15)

257 nm deep ultraviolet laser was generated using double frequency crystal LBO and quadruple frequency crystal BBO. The seed source uses a two-stage photonic crystal fiber amplifier to get a 1030 nm laser with output power of 86 W. After the laser focusing system and frequency doubling, a second harmonic output power of 47.5 W at 515 nm and a fourth harmonic output power of 5.2 W at 257 nm were obtained. The fourth harmonic conversion efficiency was 6.05%. The experimental results show that this structure can obtain high power 257 nm deep ultraviolet laser output, providing a novel approach to improve the detection efficiency of the lasers for semiconductor detection.

**Key words:** deep ultraviolet picosecond laser; high repetition frequency; photonic crystal fiber amplifier; fourth harmonic generation

## 1 引言

高重频深紫外皮秒激光器, 因具有分辨率高、加工速率快、热损伤低等特性, 被广泛应用于半导体检测、光刻以及精密材料加工等工业领域<sup>[1-6]</sup>。相较于传统激光器所采用的纳秒脉冲, 皮秒脉冲的峰值功率高, 同时热影响区域更小。此外, 由于其脉宽更窄, 大大减少了加工过程中与器件的作用时间, 可更快地破坏物质分子结构, 降低热效应的影响。这种低热损伤的烧蚀加工, 更有利于提高加工精度, 在加工质量方面实现了光学“冷加工”<sup>[7-11]</sup>。而深紫外激光相较于可见光与红外波段, 其波长更短、单光子能量高、能量密度更加集中、成像分辨率相对更高, 加工过程中也会降低热效应的影响。而对于半导体检测而言, 其使用的光源波长越短, 检测灵敏度越高。因此, 采用深紫外波段的激光器可有效提高检测灵敏度<sup>[12-17]</sup>。由此可知, 深紫外皮秒激光器在工业加工及半导体检测方面具有较高的应用价值。

257 nm 深紫外激光可通过 940 nm 激光二极管抽运全固态工作物质 Yb:YAG 形成 1030 nm 激光, 之后再通过四倍频方式直接获得。但因其属于准三能级结构, 不可避免地会受到由低转化效率引起的废热的影响, 由此会引发热透镜效应以及热致双折射等, 会极大地影响此类激光器的输出功率和光束质量, 并对后期的倍频产生较大影响。相较于传统晶体介质放大的方式, 光纤放大器具有高增益、单模输出等优势, 但受限于光纤中的非线性效应及损伤阈值, 采用光纤放大器难以提高皮秒脉冲的峰值功率<sup>[18]</sup>。而由于掺镱双包层光子晶体光纤放大器的模场面积较大, 在功率提升方面极具优势, 并且能保证单模输出。

2021 年, 河北工业大学的陈晖等人利用两级大模场面积的光子晶体光纤放大器, 获得了输出功率为 190 W 的 1030 nm 基频光, 倍频后得到输出功率为 103.1 W 的 515 nm 绿光<sup>[19]</sup>。2022 年, 深圳大学的 He H J 等人利用端面泵浦 Yb:YAG 晶体再生放大结构, 在 10 Hz 重复频率下, 经腔外倍频得到的 257 nm 紫外激光输出的单脉冲能量为 120  $\mu$ J, 脉宽为 2.4 ps<sup>[20]</sup>。2022 年, 美国 Advalue Photonics 公司采用全光纤放大结构获得了 14.5 W、257 nm 深紫外激光<sup>[21]</sup>, 目前处于商品化 257 nm 紫外激光器世界领先水平。

本文利用掺镱双包层光子晶体光纤放大器 (Photonic Crystal Fiber Amplifier, PCFA), 为输出功率为 20 mW, 重频为 19.8 MHz, 脉冲宽度为 50 ps 的光纤激光器作为种子源, 通过一级光子晶体光纤棒作为预放大器, 得到输出功率为 6.1 W 的 1030 nm 激光。再通过一级光子晶体光纤棒作为主放大器, 获得平均功率为 86 W 的 1030 nm 基频光输出, 经过 I 类相位匹配三硼酸锂 (LBO) 晶体倍频后得到输出功率为 20.7 W 的 515 nm 倍频光, 再经过 I 类相位匹配偏硼酸钡 (BBO) 晶体倍频后, 得到输出功率为 5.2 W 的 257 nm 深紫外激光, 相较于基频光的转换效率为 6.05%。

## 2 实验装置

### 2.1 光路结构

高功率、高光束质量、高峰值功率的 1030 nm 基频光是获得 257 nm 倍频光的基础。本实验采用 PCFA 以及光纤种子源获得高性能的 1030 nm 基频光, 再经过二倍频晶体 LBO 和四倍频晶体 BBO 进行非线性频率变换, 最终获得 257 nm 紫外激光输出, 具体光路结构如图 1 所示。

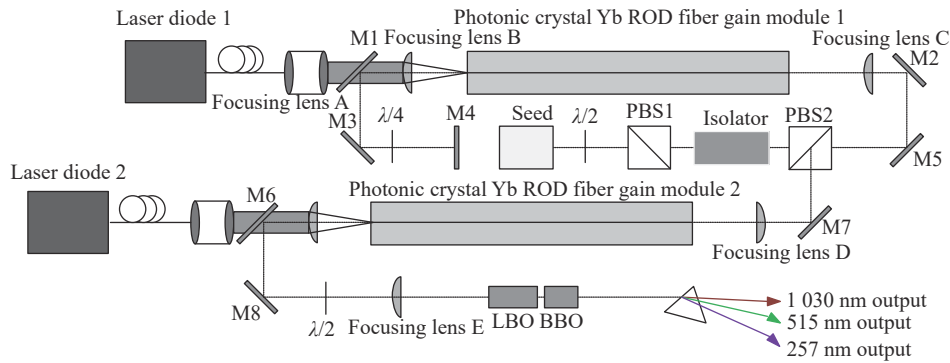


图 1 257 nm 深紫外皮秒激光器实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system of 257 nm deep ultraviolet picosecond laser

## 2.2 实验器件

实验装置选用了中心波长为 $(1030\pm 0.15)$  nm, 光谱宽度小于 0.2 nm, 重复频率为 19.8 MHz, 脉冲宽度为 50 ps, 偏振消光比大于 20 dB, 平均功率为 20 mW 的光纤种子源(Seed)。使用 NKT 公司型号为 aeroGAIN-ROD module 的掺镱双包层光子晶体光纤棒作为放大器, 吸收峰为 976 nm。该光子晶体光纤为双包层(65  $\mu\text{m}$ /275  $\mu\text{m}$ )结构, 纤芯直径为 85  $\mu\text{m}$ , 内层截面为正六边形, 长度为 800 mm, 在 976 nm 处的吸收系数为 15 dB 左右, 光子晶体光纤棒两端镀有 1030 nm 抗反膜( $R@1030\text{ nm}\leq 0.2\%$ )和 976 nm 抗反膜( $R@976\text{ nm}\leq 0.3\%$ )。两级双包层光子晶体光纤棒经中心波长为 976 nm $\pm 0.5$  nm 的波长锁定( $\Delta\lambda/\Delta T\approx 0.02$ )半导体激光模块进行泵浦(Laser Diode 1&2)。预放部分的半导体泵浦模块(Laser Diode 1)输出功率为 67 W, 主放部分的半导体泵浦模块(Laser Diode 2)输出功率为 210 W。泵浦光经泵浦准直 Laser lens A( $f=35$  mm,  $R@976\text{ nm}\leq 0.5\%$ ), 双色片 M1 和 M6( $R@976\text{ nm}\leq 0.3\%$ ,  $R@1030\text{ nm}\geq 99.6\%$ ), 泵浦耦合镜 Laser lens B( $f=45$  mm,  $R@976\text{ nm}\leq 0.3\%$ ;  $R@1030\text{ nm}\leq 0.2\%$ )入射掺镱双包层光子晶体光纤棒放大器。皮秒种子源经 1030  $\lambda/2$  波片、PBS1、法拉第旋转器、PBS2、45°全反镜 M5 和 M2( $R@1030\text{ nm}\geq 99.6\%$ )、种子耦合镜 Laser lens C( $f=67$  mm,  $R@1030\text{ nm}\leq 0.2\%$ )进入预放掺镱光子晶体光纤棒放大器(Photonic crystal Yb ROD fiber gain module 1)中进行放大, 并通过双色片 M1、45°全反镜 M3 ( $R@1030\text{ nm}\geq 99.6\%$ )、1030  $\lambda/4$  波片、0°全反镜 M4( $R@1030\text{ nm}\geq 99.6\%$ )后按原路返回。最终在 PBS2 处向下经 45°全反镜 M7( $R@1030\text{ nm}\geq 99.6\%$ )、主放级激光耦合镜 Laser lens D( $f=60$  mm,  $R@1030\text{ nm}$

$\leq 0.2\%$ )进入主放级掺镱双包层光子晶体光纤放大器(Photonic crystal Yb ROD fiber gain module 2)中进行放大, 并通过双色片 M6、45°全反镜 M8 ( $R@1030\text{ nm}\geq 99.6\%$ )和 1030  $\lambda/2$  波片进入倍频光路。倍频光路由倍频聚焦镜 Laser lens E、二倍频晶体 LBO( $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=12.8^\circ$ )和四倍频晶体 BBO( $\theta=49^\circ$ ,  $\varphi=0^\circ$ )组成。最终通过三角棱镜分光, 获得 257 nm 紫外激光输出。该装置中, 两级掺镱双包层光子晶体光纤棒经过去离子水冷却, 水温设置为 25  $^\circ\text{C}$ , LBO 和 BBO 置于由 TEC 精确控温的热沉上, 温度设置为 50  $^\circ\text{C}$ 。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 基频光实验结果

在预放大阶段, 为了给主放大器提供足够功率, 采用双程放大结构, 即种子光两次通过由功率为 67 W 的 976 nm 半导体模块泵浦的掺镱双包层光子晶体光纤棒放大器, 当种子光输出为 20 mW 时, 单次通过预放光纤棒可获得 1.2 W 的稳定输出, 两次经过预放光纤棒后得到的 1030 nm 放大激光输出功率 6.1 W, 双程预放结构对种子光的总放大倍率达 300 倍左右, 光束质量因子  $M^2<1.2$ 。通过以上测量结果可知, 经过预放的皮秒信号光功率和光束质量满足进入二级主放掺镱双包层光子晶体光纤棒的要求。信号光经过主放级激光耦合镜进入主放级掺镱双包层光子晶体光纤放大器中再次放大, 在波长锁定 976 nm 半导体泵浦模块抽运功率为 210 W 时, 实现 1030 nm 86 W 的激光输出功率。

在本装置中, 双包层光子晶体光纤棒的掺杂浓度为 0.15 mol%, 纤芯直径为 85  $\mu\text{m}$ , 包层直径



为 275  $\mu\text{m}$ , 光纤棒放大器长度为 800 mm, 信号光的中心波长为 1030 nm, 平均功率为 6.1 W。泵浦光使用反向抽运方式, 主放大器在 210 W 泵浦的情况下可得到最佳放大效果。此时, 在两级放大系统总泵浦功率为 277 W 时, 最终实现 1030 nm 放大激光 86 W 输出功率。图 2(彩图见期刊电子版) 为 CCD 相机测试经两级放大后, 1030 nm 基频光光斑的能量分布图。

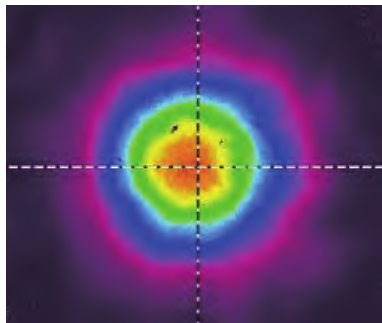


图 2 1030 nm 基频光光斑能量分布

Fig. 2 Spot energy distribution of 1030 nm fundamental frequency laser

### 3.2 紫外激光实验结果及分析

放大系统输出的 1030 nm 基频光经聚焦后, 入射到 LBO 和 BBO 倍频晶体中, 得到 515 nm 绿光和 257 nm 紫外激光, 四次谐波测量光谱如图 3 所示, 中心波长为 256.93 nm。为了得到较高的倍频效率和较好的输出光斑分布, 倍频聚焦镜分别采用  $f$  为 60、80、100、120 mm 共 4 种规格的平凸聚焦镜进行聚焦, 与之对应, 将分别获得 4.8 W、5.4 W、5.2 W、4.7 W 的 257 nm 紫外激光。需要说明的是: 虽然使用  $f=100$  mm 聚焦镜时, 功率相较于使用  $f=80$  mm 聚焦镜时略低, 但其输出激光的发散角较小, 且光斑椭圆度相对高一些, 因此采用  $f=100$  mm 的聚焦镜更合适。此时, 二倍频得到输出功率为 47.5 W 的 515 nm 绿光, 倍频转换效率为 55.2%, 四倍频得到输出功率为 5.2 W 的 257 nm 紫外激光, 其四倍频转换效率约为 6.05%。

基频光和紫外光输出功率随总泵浦功率的变

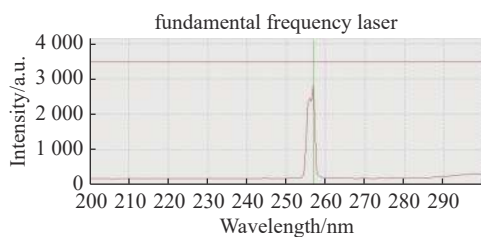


图 3 257 nm 紫外激光测量光谱图

Fig. 3 Measurement spectrum of 257 nm ultraviolet laser

化关系如图 4 所示。用 CCD 相机测量四倍频 257 nm 深紫外激光输出光斑能量分布如图 5(彩图见期刊电子版) 所示。图 6(彩图见期刊电子版) 为 Thorlabs 公司狭缝式光束质量分析仪测试 257 nm 紫外激光光束质量因子  $M^2$  分布图, 其中,  $M_x^2=1.31, M_y^2=1.69$ 。

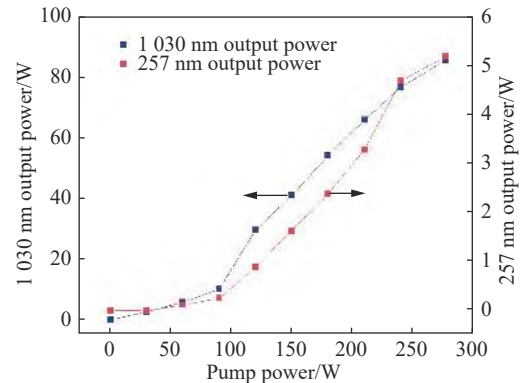


图 4 1030 nm 基频光输出功率和 257 nm 紫外光输出功率随总泵浦功率的变化关系

Fig. 4 Laser output powers of 1030 nm fundamental frequency light and 257 nm ultraviolet light as a function of total pump power

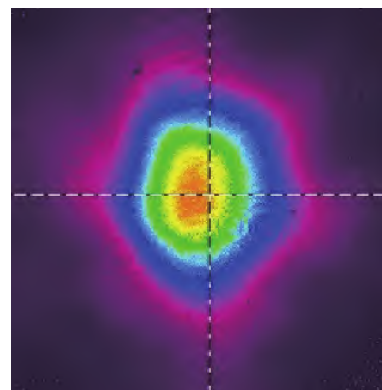


图 5 四次谐波 257 nm 输出光斑能量分布图

Fig. 5 Output spot energy distribution of the fourth harmonic at 257 nm

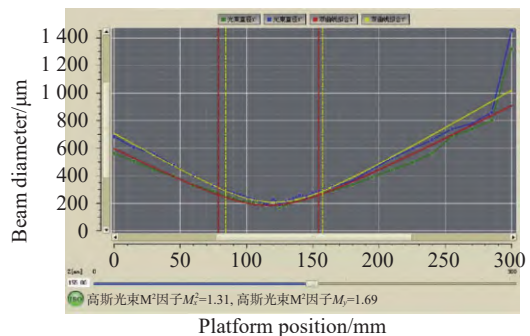


图 6 257 nm 紫外激光光束质量因子  $M^2$  测量图

Fig. 6 Measurement chart of quality factor  $M^2$  for 257 nm UV laser beam

使用 APE 公司, 型号为 SM150 的自相关仪测得脉冲宽度如图 7 所示,  $\tau=50.241$  ps(Gaussian)。图 8 为使用示波器测得的输出光频率测量图, 可知, 其重复频率为 19.8 MHz。

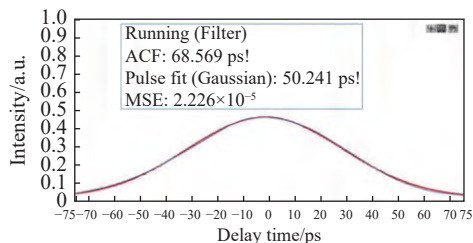


图 7 自相关仪测得的脉冲宽度

Fig. 7 Measurement of pulse width by autocorrelator

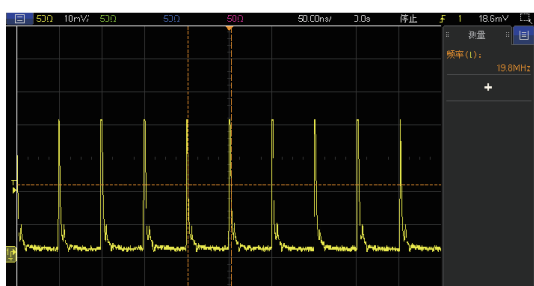


图 8 257 nm 紫外激光频率测量图

Fig. 8 257 nm UV laser frequency measurement chart

## 4 结 论

本文应用非线性频率变换的方式, 利用 I 类相位匹配 LBO 晶体作为二倍频晶体和 I 类相位匹配 BBO 晶体作为四倍频晶体, 将 976 nm 波长锁定半导体激光二极管作为泵浦源, 抽运掺镱双包层光子晶体光纤放大器, 产生 1030 nm 基频光, 再通过腔外四倍频结构将其转化为 257 nm 深紫外激光。以光纤锁模激光器为种子源, 通过一级放大器双程放大作为预放和二级放大器作为主放的结构, 合理设计信号光和泵浦光的耦合系统, 在 976 nm 波长输出总泵浦功率为 277 W 下时, 得到 1030 nm 基频光输出功率为 86 W, 腔外倍频后得到二次谐波 515 nm 绿光功率 47.5 W, 四次谐波 257 nm 深紫外激光 5.2 W, 四次谐波倍频转换效率为 6.05%, 脉冲宽度为 50.241 ps, 重复频率为 19.8 MHz。通过这种方式获得的深紫外激光光束质量好、系统稳定性高、结构简单、易于产品化, 有较高的市场应用价值。

## 参考文献:

- [1] 郑佳琪, 丛振华, 刘兆军, 等. 高重复频率超短激光脉冲产生及频率变换技术发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1201008.  
ZHENG J Q, CONG ZH H, LIU ZH J, *et al.*. Recent trend of high repetition rate ultrashort laser pulse generation and frequency conversion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1201008. (in Chinese)
- [2] 牛娜, 窦微, 浦双双, 等. 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.  
NIU N, DOU W, PU SH SH, *et al.*. Continuous deep ultraviolet laser by intracavity frequency doubling of blue laser diode pumped Pr: YLF[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1395-1399. (in Chinese)
- [3] 梁延杰, 刘景伟, 闫劭, 等. 蓝光 LED 激发深紫外上转换发光材料的光学定位与追踪应用[J]. *发光学报*, 2022, 43(9): 1436-1445.  
LIANG Y J, LIU J W, YAN SH, *et al.*. Blue LED-excitable deep ultraviolet upconversion phosphor for optical locating and tracking application[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(9): 1436-1445. (in Chinese)
- [4] XU H, LU H, LI ZH L, *et al.*. Deep-ultraviolet femtosecond laser source at 243nm for hydrogen spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 17398-17404.
- [5] WU H Y, ZHANG ZH Q, CHEN S, *et al.*. Development of a deep-ultraviolet pulse laser source operating at 234 nm for direct cooling of Al<sup>+</sup> ion clocks[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11468-11478.
- [6] SADRAEIAN M, ZHANG L, AAVANI F *et al.*. Viral inactivation by light[J]. *elight*, 2022, 18(2).
- [7] KAWANO Y, HIKITA M, MATSUGAKI N, *et al.*. A crystal-processing machine using a deep-ultraviolet laser: application to long-wavelength native SAD experiments[J]. *Acta Crystallographica Section F: Structural Biology Communications*, 2022, 78(2): 88-95.
- [8] 潘永刚, 林兆文, 王奔, 等. 深紫外大口径非球面反射膜的均匀性研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2022, 15(4): 740-746.  
PAN Y G, LIN ZH W, WANG B, *et al.*. Film Thickness uniformity of deep ultraviolet large aperture aspheric mirror[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 740-746. (in Chinese)

- [9] BAI ZH N, BAI ZH X, SUN X L, *et al.*. A 33.2 W high beam quality chirped-pulse amplification-based femtosecond laser for industrial processing[J]. *Materials*, 2020, 13(12): 2841.
- [10] 王佳敏, 季艳慧, 梁志勇, 等. 532 nm皮秒脉冲激光对单晶硅的损伤特性研究[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 242-250.  
WANG J M, JI Y H, LIANG ZH Y, *et al.*. Damage characteristics of a 532 nm picosecond pulse laser on monocrystalline silicon[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 242-250. (in Chinese)
- [11] MÜLLER M, KLENKE A, GOTTSCHALL T, *et al.*. High-average-power femtosecond laser at 258 nm[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2826-2829.
- [12] TURCICOVA H, NOVAK O, ROSKOT L, *et al.*. New observations on DUV radiation at 257 nm and 206 nm produced by a picosecond diode pumped thin-disk laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24286-24299.
- [13] DÉLEN X, DEYRA L, BENOIT A, *et al.*. Hybrid master oscillator power amplifier high-power narrow-linewidth nanosecond laser source at 257 nm[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 995-997.
- [14] 彭洋, 陈明祥, 罗小兵. 深紫外LED封装技术现状与展望[J]. *发光学报*, 2021, 42(4): 542-559.  
PENG Y, LUO M X, LUO X B. Status and perspectives of deep ultraviolet LED packaging technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(4): 542-559. (in Chinese)
- [15] WANG L L, XU P F, ZHOU D CH. 1.5 $\mu$ m laser properties of large mode field Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped microstructured fiber cone[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(4): 509-517.
- [16] GOLDBERG L, COLE B, MCINTOSH C, *et al.*. Narrow-band 1 W source at 257 nm using frequency quadrupled passively Q-switched Yb: YAG laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 17397-17405.
- [17] KOHNO K, ORII Y, SAWADA H, *et al.*. High-power DUV picosecond pulse laser with a gain-switched-LD-seeded MOPA and large CLBO crystal[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2351-2354.
- [18] LEI Z, HUIRU Z, NIT, *et al.*. 'plug and-play' plasmonic metafibers for ultrafast fiber lasers[J]. *Light: Advanced Manufacturing*. doi: 10.37188/lam.2022.045.
- [19] 陈晖, 白振旭, 王建才, 等. 百瓦级PCFA/LBO倍频绿光皮秒激光器[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 20200522.  
CHEN H, BAI ZH X, WANG J C, *et al.*. Hundred-watt green picosecond laser based on LBO frequency-doubled photonic crystal fiber amplifier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20200522. (in Chinese)
- [20] HE H J, YU J, ZHU W T, *et al.*. A deep-UV picosecond laser for photocathode electron gun[J]. *Optics Communications*, 2022, 512: 128059.
- [21] PAN L, GENG J H, JIANG SH B. High power picosecond green and deep ultraviolet generations with an all-fiberized MOPA[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(19): 5140-5143.

#### 作者简介:



范灏然(1991—), 男, 吉林长春人, 光学工程师, 2018年于长春理工大学获得电子科学与技术专业硕士学位, 现任职于长春新产业光电技术有限公司, 主要从事全固态超快激光方面的研究。E-mail: fanhr@cnilaser.com



陈曦(1985—), 女, 吉林长春人, 高级光学工程师, 2012年于长春理工大学获得光学专业硕士学位, 现任职于长春新产业光电技术有限公司, 主要从事中红外固体激光方面研究。E-mail: chenxi@cnilaser.com