

皮秒光纤-固体混合放大紫外激光器

苏鑫, 姚吉, 王禹凝, 杨祥辉, 郑权

引用本文:

苏鑫, 姚吉, 王禹凝, 等. 皮秒光纤-固体混合放大紫外激光器[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2122-2128.

SU Xin, YAO Ji, WANG Yu-ning, et al. Ultra-violet picosecond fiber-solid hybrid amplification laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2122-2128.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2122>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全固态210 nm准连续深紫外激光器

All-solid-state 210 nm quasi-continuous deep ultraviolet laser

光学精密工程. 2016, 24(10s): 212-215 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0212>

可调谐锁模光纤激光器泵浦的超连续谱光源

Tunable mode-locked fiber laser pumped supercontinuum source

光学精密工程. 2018, 26(1): 25-30 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182601.0025>

基于LCP径向偏振光输出的掺镱MOPA脉冲光纤激光器

Yb-doped fiber MOPA system with radially polarized output beam based on LCP vortex retarder

光学精密工程. 2020, 28(5): 997-1004 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.0997>

基于Yb:YAG/Cr4+:YAG/YAG键合晶体的被动调Q激光器

Passively Q-switched laser with a Yb:YAG/Cr4+:YAG/YAG composite crystal

光学精密工程. 2018, 26(1): 55-61 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182601.0055>

高功率窄线宽微秒脉冲1064 nm环形腔激光

High-power narrow linewidth microsecond pulse 1064 nm ring laser

光学精密工程. 2016, 24(10s): 35-40 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0035>

文章编号 1004-924X(2020)10-2122-07

皮秒光纤-固体混合放大紫外激光器

苏鑫^{1*}, 姚吉^{2,3}, 王禹凝¹, 杨祥辉¹, 郑权^{1,3}

(1. 长春新产业光电技术有限公司, 吉林 长春 130103;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 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: 脉冲宽度为皮秒级的紫外激光, 拥有极窄的脉冲宽度, 可在短时间内破坏物质的分子键, 缩短了与物质相互作用的时间, 同时具有较强的时间分辨率。为了获得皮秒级脉冲宽度的短波紫外激光, 本文设计了一种皮秒光纤-固体混合放大 213 nm 激光器。采用重复频率为 5 MHz、脉冲宽度为 52 ps、平均功率为 2.5 W 的 1 064 nm 光纤激光器作为种子源, 经过两级端面泵浦的 Nd:YVO₄ 晶体组成的放大器对种子光进行放大, 得到了平均功率为 10.5 W 的 1 064 nm 基频光输出。再将混合放大后得到的基频光及其四倍频后获得的 266 nm 激光在 BBO 晶体内进行和频, 最终输出 213 nm 紫外激光。混合放大后获得的基频光经过多级非线性转换, 最终输出脉冲宽度为 690 ps、平均功率为 61 mW 的 213 nm 紫外激光, 非线性转换效率达到 0.58%。

关键词: 紫外激光; 皮秒激光器; 混合放大技术; 五倍频技术

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202810.2122

Ultra-violet picosecond fiber-solid hybrid amplification laser

SU Xin^{1*}, YAO Ji^{2,3}, WANG Yu-ning¹, YANG Xiang-hui¹, ZHENG Quan^{1,3}

(1. Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd, Changchun 130103, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: suxin@cnlaser.com

Abstract: Ultraviolet lasers with picosecond pulse widths can quickly break the molecular bonds of materials, reducing interaction time. At the same time, they have high temporal resolution. In order to obtain an ultraviolet laser with a picosecond pulse width, a solid fiber, hybrid-amplified 213 nm laser was designed. First, a 1 064 nm fiber laser with a repetition rate of 5 MHz, pulse width of 52 ps, and average power of 2.5 W was used as a seed source. After two stages of end pumped Nd:YVO₄ crystal amplification, a 1 064 nm laser with an average power of 10.5 W was obtained. This 1 064 nm laser and a 266 nm laser were then combined in a BBO crystal to produce a 213 nm UV laser. The final output is a 213 nm UV laser with a pulse width of 690 ps and an average power of 61 mW. The non-

收稿日期: 2020-06-08; 修订日期: 2020-07-10.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20170203013GX)

linear conversion efficiency is 0.58%.

Key words: UV laser; picoseconds laser; hybrid amplification technology; fifth harmonic technology

1 引 言

紫外激光具有波长短、光子能量高、可聚焦性能好的特点^[1]。而脉冲宽度为皮秒级的紫外激光,与纳秒激光相比,凭借极窄的脉冲宽度,缩短了激光与物质相互作用的时间,可在短时间内破坏物质的分子键,不会对加工材料造成热破坏,被称为“冷加工”,同时具有较强的时间分辨率^[2-3],广泛应用于 TCSPC、高精度激光测距、精细材料加工等方向^[4-8]。

紫外波段激光输出的实现方法常利用晶体材料的非线性效应通过变频的方法来产生,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^[8-9]。通过频率变换技术实现 213 nm 深紫外激光器的研究有过一些报道。2004 年,SAKUMA 等人使用 CLBO 晶体,利用 LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 产生的 1.064 μm 激光进行五倍频,实现平均功率为 100 mW 的 213 nm 连续紫外激光输出^[9]。2006 年,国内苏艳丽等人利用 BBO 晶体对 LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 产生的 1.064 μm 激光进行五倍频,获得重复频率为 20 kHz,平均功率为 3 mW 的 213 nm 准连续紫外激光输出,激光脉冲宽度为 7.5 ns^[11]。2016 年,岱钦等人利用脉冲 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 晶体,电光调 Q 的方式,输出 1.064 μm 激光,在腔外使用 BBO 晶体实现五倍频,输出重复频率为 1 kHz,脉冲宽度为 10 ns,平均功率为 151 mW 的 213 nm 激光^[12]。这些研究涉及的 213 nm 激光多为较低重复频率,脉冲宽度为纳秒级或连续激光输出。在 TCSPC、高精度激光测距等方面,激光的脉冲宽度决定了测量系统的最小时间分辨率,更窄的脉冲宽则拥有更高的测量精度;而在精细激光加工方面,纳秒激光加工往往伴随着热影响区、再铸层、微裂纹等热损伤;利用超短脉冲激光可在理论上实现冷加工,避免热损伤^[13]。同时,更高的重复频率则意味着可以实现更高的采样速率和加工速率。因此,对脉冲宽度为皮秒级

的高重频 213 nm 深紫外激光的研制尤为重要。

为了实现皮秒级脉冲宽度、高重频、高转换效率的紫外激光输出,本文设计了一种光纤-固体混合放大激光器。本文使用脉冲宽度为皮秒级的 1 064 nm 光纤激光器作为种子源,经过两级端面泵浦的 Nd:YVO₄ 放大后输出平均功率为 10.5 W 的 1 064 nm 基频光;再利用放大后的 1 064 nm 基频光及其四倍频后得到的 266 nm 激光进行和频,得到脉冲宽度 690 ps、重复频率 5 MHz、平均功率约 61 mW 的 213 nm 紫外激光输出。利用紫外激光器作为光源应用在不同的生产加工和实验研究中时,对激光的重复频率、脉冲宽度等光学指标会有不同的需求。而本文使用的光纤种子源为自制的光纤激光器^[14],可通过调制改变输出激光的脉冲宽度和重复频率,配合固体放大级和非线性频率变换技术具有较大的拓展空间。

2 技术路线

获得皮秒脉冲激光比较常用的方法有短腔法和锁模法。其中,短腔法获得的脉冲宽度约为百皮秒量级,要想获得更短的脉冲宽度,则需要采用锁模法。采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模输出的脉冲宽度在几皮秒到几十皮秒之间^[2,13,15]。为了实现稳定锁模和高重复频率,皮秒级高功率输出往往要求复杂的腔体结构,有些技术甚至采用了被动锁模与附加相位锁模相结合的手段。这些方法虽然能够提高激光器的输出脉冲质量,但却减弱了器件的稳定性^[16]。本文采用的光纤激光器是通过增益开关的方式输出皮秒级脉冲宽度的种子光。这种技术是采用电流脉冲或高频正弦电路直接调制光纤激光器中的半导体种子源,同时具有重复频率连续可调、结构紧凑、性能可靠等优势。光纤激光器的种子源输出的激光再通过主振荡功率放大(MOPA)的方式提高激光的平均输出功率。超短脉冲具有脉宽窄、峰值功率高的特点。在放大过程中,具有较高峰值功率的脉冲激光在光纤中传输时容易产生自相位调

制(SPM)、受激拉曼散射(SRS)以及四波混频效应(FWH)等非线性效应,从而影响脉冲质量,限制了平均功率的进一步放大^[17]。为了避免高峰值功率激光在光纤中传输时遇到的诸多弊端,本文采用光纤-固体混合放大的方式,采用两级半导体端面泵浦的 Nd:YVO₄ 晶体作为放大级,对光纤激光器输出的种子光再次进行放大。

Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 是最常见的激光工作物质,可选择作为放大级的工作物质。与各向同性的 Nd:YAG 晶体相比,Nd:YVO₄ 有几种光谱特征特别适合于激光二极管泵浦,而且吸收系数高、受激发射截面大,比 Nd:YAG 晶体大 5 倍。Nd:YVO₄ 晶体是自然双折射晶体,除了具有很强的偏振吸收特征外,还具有很强的偏振辐射特征,激光输出沿着特殊的 π 方向,呈线性偏振。偏振输出有一个显著优点,即避免了多余的热致双折射。Nd:YVO₄ 晶体在 1 064.3 nm 处有一较高的荧光峰,荧光谱线宽度为 0.9 nm 峰值波长与种子源的激光波长相吻合^[18]。在本装置连续泵浦的情况下,选择 Nd:YVO₄ 作为两放大级的工作物质。考虑到过高的掺杂浓度会引起较大的热透镜效应,放大级工作物质的掺杂浓度选择为 0.3%。采用半导体激光二极管作为泵浦源,可实现泵浦光谱线与增益介质吸收谱线较好的匹配,具有能量转换效率高、废热产生率低的特点,可通过半导体制冷即可导出热量,大大提高了系统的可靠性、环境适应性及使用寿命^[19]。

213 nm 紫外激光最常见的获得方式是采用基频光 1 064 nm 及其四倍频后得到的 266 nm 光束在和频晶体中进行和频^[10-12],并采用 I 类相位匹配的方式 1 064 nm(o)+266 nm(o)→213 nm(e)实现。

KTP 是一种综合性能最为优秀的非线性晶体材料之一,在光参量振荡、和频、差频尤其是倍频中得到了广泛的应用^[20]。在 II 类相位匹配方式时,非线性系数较大,因此,可选择 KTP 作为二倍频晶体。

CLBO 和 BBO 晶体是广泛用于紫外波段优良的非线性晶体,广泛应用于 Nd:YAG 激光的

四次、五次谐波的产生。CLBO 晶体的优点是拥有较大的允许角和较小的走离角,而 BBO 晶体在 213 nm 的和频过程中则拥有更高的非线性系数^[10-12]。因此,本文选择 BBO 作为本装置中四倍频及和频部分的非线性晶体。由于 BBO 晶体具有较小的允许角和较大的走离角度,因此激光光束质量控制特别重要,不应该采用很强的聚焦。同时为了提高倍频效率,通过使用长焦透镜将 1 064 nm 基频光进行聚焦,增强非线性晶体上激光的能量密度。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示,种子源输出的波长为 1 064.3 nm、重复频率为 5 MHz、脉冲宽度约为 52 ps、平均功率为 2.5 W。为了避免放大级返回光损伤光纤种子源,在种子源与第一放大级之间放置光隔离器 Optoisolator 1。输出的种子光偏振方向调整为 s 波,与 Nd:YVO₄ 晶体中 π 偏振吸收方向一致,Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm,双端面镀有 1 064,808 nm 双波长增透膜。两放大级的泵浦光波长均为 808 nm,其中第一级的泵浦功率为 14.8 W,第二级泵浦功率为 28 W,通过光纤传输,光纤芯径为 400 μ m。为了保证放大级的提取效率,使用平凸聚焦透镜 M1 将种子光聚焦,聚焦后与泵浦光在晶体中的焦点重合。经过模拟,第一级工作物质处泵浦光的聚焦光斑尺寸均为 600 μ m。其中,M1 平凸聚焦镜的曲率半径为 103 mm,镀有 1 064 nm 增透膜;M9,M11 为泵浦光的聚焦透镜,M9 焦距为 30 mm,M11 的焦距为 40 mm,镀有 808 nm 增透膜;M10,M12 为泵浦光的准直透镜,焦距为 20 mm,镀有 808 nm 增透膜。在两放大级之间放有光隔离器 Optoisolator 2。透镜 M3 为双凹透镜,透镜 M2 为平凸透镜,M2,M3 两透镜构成准直系统,用于调整放大后的 1 064 nm 基频光发散角度。M5,M6 镀有 45°的 808 nm 增透膜和 1 064 nm 全反射膜;M7,M8 镀有 45°的 1 064 nm 全反射膜,实现光路的折叠。

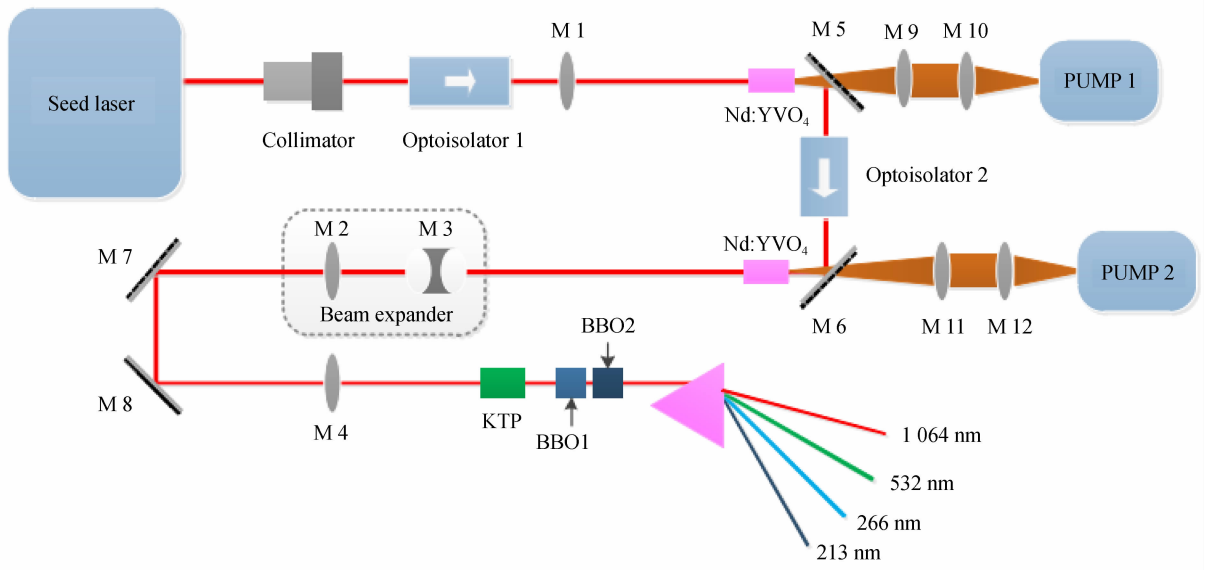


图 1 混合放大 213 nm 激光器实验装置

Fig. 1 Experimental device of hybrid amplification 213 nm laser

平凸透镜 M4 为放大后基频光的聚焦透镜, 镀有 1 064 nm 增透膜, 曲率半径为 103 mm, 焦点位于四倍频晶体 BBO1 与和频晶体 BBO2 之间。选择切割角度 $\theta=90^\circ, \Phi=24^\circ$ 的 KTP 作为二倍频晶体, 匹配方式为 II 类相位匹配, 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×7 mm, 双端面镀有 1 064, 532 nm 双波长增透膜; 采用切割角度为 $\theta=47^\circ, \Phi=0^\circ$ 的 BBO 作为四倍频晶体, 匹配方式为 I 类相位匹配, 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×8 mm, 双端面镀有 1 064, 532, 266 nm 三波长增透膜; 切割角度为 $\theta=51^\circ, \Phi=0^\circ$ 的 BBO 作为和频晶体, 匹配方式为 I 类相位匹配, 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×8 mm, 进光端面镀有 1 064, 532, 266 nm 三波长增透膜, 出光端面镀有 1 064, 532, 266, 213 nm 四波长增透膜, 实现最终的 213 nm 激光输出。最后, 通过石英分光棱镜 Prism 将四波长的激光分离开。

可达到 10.5 W。使用自相关仪 (A. P. E Pulse Check) 对放大后的 1 064 nm 激光进行测量, 脉冲宽度实测为 46 ps, 见图 2。

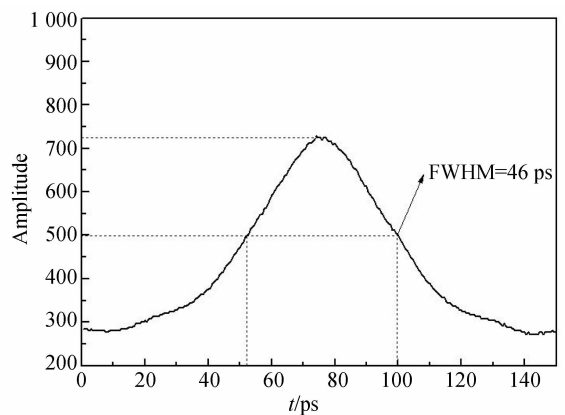


图 2 混合放大后 1 064 nm 脉冲宽度

Fig. 2 Pulse width of 1 064 nm laser after mixed amplification

4 测量实验与结果

经过第一级 Nd : YVO₄ 晶体放大后, 平均功率为 2.5 W 的种子光可放大至 5.2 W。在第二级放大模式匹配中, 泵浦光的聚焦尺寸约为 800 μm, 较大的聚焦尺寸可防止泵浦光功率过于集中, 带来严重且不规则的热透镜效应。通过第二级 Nd : YVO₄ 晶体放大后, 输出的 1 064 nm 激光

1 064 nm 基频光经过衰减片衰减后, 使用 CCD 相机 (Thorlabs BC106N-VIS) 探测基频光经过聚焦镜 M4 后不同位置处的光斑直径, 见图 3。纵坐标为此处的光斑直径, 横坐标为距 M4 透镜的距离, 其中曲线单侧斜率为 -0.015 3, 光束质量 $M^2 = 1.24$ 。其中, 焦点位于 M4 透镜后 246 mm 处 B 点, 焦点处的光斑直径约为 110 μm。KTP 晶体受限于较低的损伤阈值, 将 KTP 晶体

放置在 200 mm 处 A 点, 此处的光斑直径约为 $590 \mu\text{m}$; BBO 晶体拥有较高的损伤阈值, 同时为了提升晶体处的激光功率密度, 进而提升非线性转换效率, 将四倍频、和频晶体紧密放置在焦点 B 两侧。在非线形匹配过程中, 通过单透镜聚焦的方式提升非线性晶体处的功率密度, 从而提高非线性转化效率。考虑到不同波长的激光折射率不同, 再次经过光学透镜会聚焦于不同位置, 反而影响和频的转换效率, 本装置中并未在二倍频或四倍频后再次进行准直聚焦。

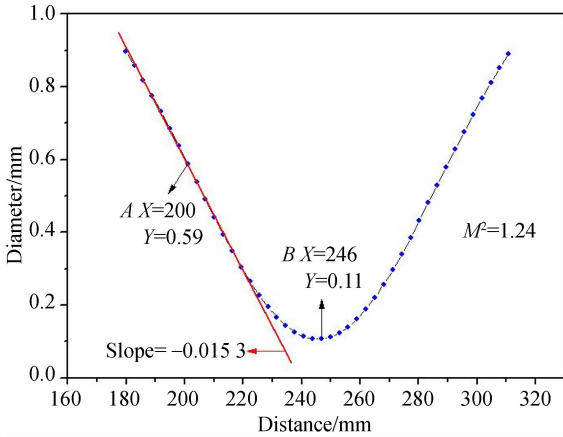


图 3 经聚焦镜 M4 后的光束直径及 M^2 测量曲线
Fig. 3 Beam diameter and M^2 measurement curve after M4 focusing mirror

经过二倍频后, 输出 532 nm 激光的功率为 3.6 W, 二倍频效率约为 34.2%; 经过四倍频后, 得到约为 710 mW 的 266 nm 激光输出, 四倍频效率为 1 064 nm 的 6.76%; 将剩余约 6.9 W 的 1 064 nm 基频光与 710 mW 的 266 nm 激光进行和频, 最终得到 61 mW 的 213 nm 激光输出, 和频效率约为 1 064 nm 基频光的 0.58%。由于使用普通的光电探头很难响应到深紫外的光脉冲信号, 为了测量最终获得的 213 nm 激光脉冲宽度, 采用间接测量的方式, 使用荧光光谱仪 (Pico Quant) 捕获输出的 213 nm 光子, 并以时间为横坐标记录下 213 nm 激光的脉冲宽度, 见图 4, 半高宽为 690 ps。由于所用的荧光光谱仪有一定的响应时间, 实际激光脉冲宽度会小于测量值。图 5 为测量 213 nm 激光的功率-时间曲线, 输出功率的标准偏差为 2.54 mW。图 6 为使用光谱仪 (镭科 Aurora4000)^[14] 记录的 213 nm 激光光谱。

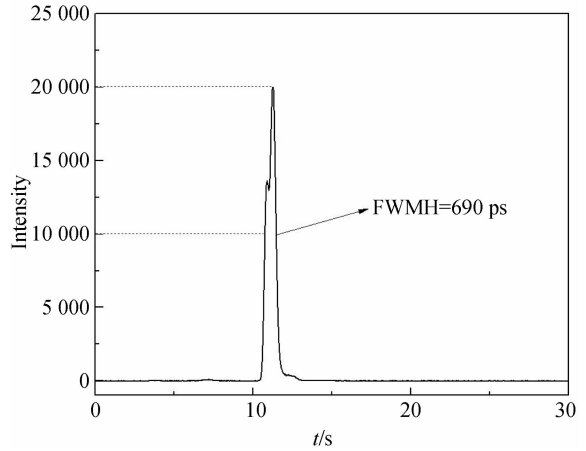


图 4 213 nm 激光脉宽
Fig. 4 Pulse width of 213 nm laser

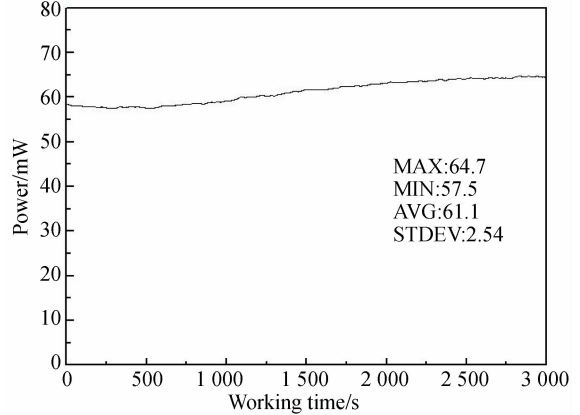


图 5 213 nm 激光的功率稳定性曲线
Fig. 5 Power stability curve of 213 nm laser

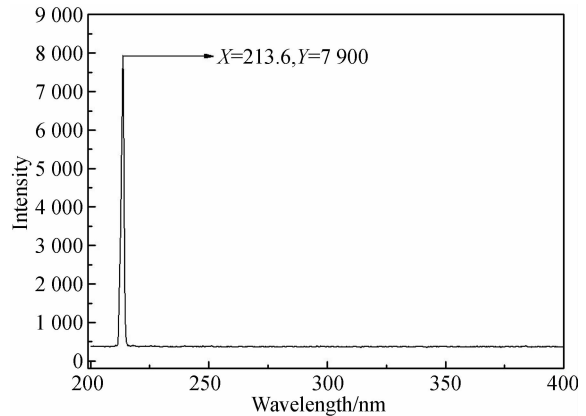


图 6 213 nm 激光中心波长
Fig. 6 Central wavelength of 213 nm laser

5 结 论

本文采用脉冲宽为皮秒级的光纤激光器作为种子源,通过两级泵浦功率为 14.8,28 W,泵浦波长为 808 nm 泵浦的 Nd:YVO₄ 放大模块后,输出约 10.5 W 的 1 064 nm 基频光。经过光束整

形后,使用 KTP 晶体进行二倍频,BBO 晶体实现四倍频、五倍频的频率变换。最终得到 61 mW 的 213 nm 激光输出,脉冲宽度为 690 ps,基频光到五倍频的非线性转换效率达到 0.58%。213 nm 激光相比与脉冲宽度为纳秒级的激光器,在激光精细加工、TCSPC、高精度激光测距等领域的使用光源上有了更好的选择。

参考文献:

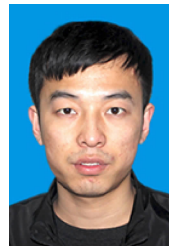
- [1] 申高,檀慧明,刘飞. 全固态 355nm 连续紫外激光器的优化设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 731-735.
SHEN G, TAN H M, LIU F. Optimization design for all-solid-state 355 nm continuous-wave ultraviolet laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 731-735. (in Chinese)
- [2] 毛小洁. 高功率皮秒紫外激光器新进展[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 182-190.
MAO X J. New progress in high-power picosecond ultraviolet laser[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8(2): 182-190. (in Chinese)
- [3] 冯国旭,黄来玉,秘国江,等. 紧凑型高功率高光束质量百皮秒激光器技术[J]. 激光与红外, 2019, 49(12): 1421-1424.
FENG G X, HUANG L Y, BI G J, et al.. Compact high peak power and high beam quality laser with hundreds picoseconds pulse width[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(12): 1421-1424. (in Chinese)
- [4] 张永生,郑国鑫. 500 fs 紫外激光系统及其在闪烁体荧光特性测试中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 475-481.
ZHANG Y SH, ZHENG G X. 500 fs UV laser system and its application to fluorescence test of thin film scintillators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 475-481. (in Chinese)
- [5] ORTMANN U, DERTINGER T, WAHL M, et al.. Compact TCSPC upgrade package for laser scanning microscopes based on 375- to 470-nm picosecond diode lasers [C]. *Biomedical Optics 2004. Proc SPIE 5325, Optical Diagnostics and Sensing IV, San Jose, CA, USA*. 2004, 5325: 179-186.
- [6] 李平雪,辛承聪,高健,等. 皮秒激光加工研究进展与展望[J]. 激光与红外, 2018, 48(10): 1195-1203.
LI P X, XIN CH C, GAO J, et al.. Research progress and development of picosecond laser processing[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(10): 1195-1203. (in Chinese)
- [7] YAN X L, CHEN R J, WANG M, et al.. Characterization of a double Time-Of-Flight detector system for accurate velocity measurement in a storage ring using laser beams [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 931: 52-59.
- [8] 骆公序,荆超,汪于涛,等. 紫外皮秒激光刻蚀硅工艺研究[J]. 应用激光, 2019, 39(6): 1002-1005.
LUO G X, JING CH, WANG Y T, et al.. UV picosecond laser direct etching on bulk silicon[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(6): 1002-1005. (in Chinese)
- [9] 牛娜,曲大鹏,郑权,等. 蓝光二极管泵浦 Pr:YLF 腔内倍频 348.9nm 紫外激光器[J]. 中国激光, 2018,45(12):1201003.
NIU N, QU D P, ZHENG Q, et al.. Ultraviolet Laser by Intracavity Frequency Doubling of Blue Laser Diode Pumped Pr:YLF at 348.9nm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1201003. (in Chinese)
- [10] SAKUMA J, ASAKAWA Y, IMAHOKO T, et al.. Generation of all-solid-state, high-power continuous-wave 213-nm light based on sum-frequency mixing in CsLiB₆O₁₀ [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1096-1098.
- [11] 苏艳丽,姜其畅. 全固化 213 nm 深紫外激光技术研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2009, 26(1): 82-84.
SU Y L, JIANG Q C. Study of All-solid-state Deep-ultraviolet Laser Technology at 213 nm[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2009, 26(1): 82-84. (in Chinese)
- [12] 岱钦,史瑞新,崔建丰,等. 脉冲 LD 泵浦电光调 Q 深紫外激光器[J]. 发光学报, 2016, 37(4):

- 463-466.
- DAI Q, SHI R X, CUI J F, *et al.*. Pulse LD pumped EO-Q switched DUV laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(4): 463-466. (in Chinese)
- [13] 朱浩, 张朝阳, 徐坤, 等. 硬脆材料皮秒激光加工试验研究[J]. *电加工与模具*, 2020(1): 43-46.
- ZHU H, ZHANG ZH Y, XU K, *et al.*. The experimental study of micro-machining of hard-brittle materials using ultra-short picosecond laser[J]. *Electromachining & Mould*, 2020(1): 43-46. (in Chinese)
- [14] 长春新产业光电技术有限公司[EB/OL]. <http://www.cnilaser.com>.
- Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd. [EB/OL]. <http://www.cnilaser.com>. (in Chinese)
- [15] 况庆强, 桑明煌, 聂义友, 等. 被动锁模掺铒光纤激光器中的有理数谐波锁模[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2719-2723.
- KUANG Q Q, SANG M H, NIE Y Y, *et al.*. Rational harmonic mode-locking of passively mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2719-2723. (in Chinese)
- [16] 张小菲, 黄楚云, 李根. 基于 SESAM 镜的全光纤皮秒激光器腔内脉冲传输特性研究[J]. *激光杂志*, 2015, 36(8): 24-27.
- ZHANG X F, HUANG CH Y, LI G. Research on the transmission characteristics of the pulse in the cavity of all-fiber picosecond lasers based on SESAM[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(8): 24-27. (in Chinese)
- [17] 韦小乐, 魏淮, 盛泉, 等. 重复频率 1.2 GHz 皮秒脉冲全光纤掺镱激光器[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148015.
- WEI X L, WEI H, SHENG Q, *et al.*. Picosecond pulsed all-fiber Yb-doped laser with 1.2 GHz repetition rate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148015. (in Chinese)
- [18] 姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- YAO J Q, XU D G. *All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology* [M]. Beijing: Science Publishing & Media Ltd., 2007. (in Chinese)
- [19] 谢仕永, 王久旺, 孙勇, 等. 垂直腔面发射激光端面泵浦的高能量调 Q Nd: YAG 激光[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 558-564.
- XIE SH Y, WANG J W, SUN Y, *et al.*. VCSEL end-pumped high-energy Q-switched Nd: YAG laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(3): 558-564. (in Chinese)
- [20] 高志红, 张文喜, 郭晓丽, 等. 基于楔形 Nd: YVO₄/KTP 双折射滤波的单频绿光激光器[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 93-99.
- GAO ZH H, ZHANG W X, GUO X L, *et al.*. Single-frequency green laser based on birefringent filter comprising a wedge nd: YVO₄/KTP[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 93-99. (in Chinese)

作者简介:



苏鑫(1991—),男,吉林长春人,学士,助理工程师,2014年于长春理工大学获得学士学位,主要从事皮秒激光技术、非线性频率变换技术、全固态大能量脉冲激光器的研究。E-mail: suxin@cnilaser.com



姚吉(1991—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事固体激光及变频技术的研究。E-mail: yaoji6152938@163.com