

引用格式: XU Sizhi, XIA Ying, GAO Yubo, et al. Tunable Repetition-rate High Power Picosecond Green Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(9):0914002

徐思志,夏瀛,高瑜博,等. 重频可调高功率绿光皮秒激光器[J]. 光子学报, 2023, 52(9):0914002

## 重频可调高功率绿光皮秒激光器

徐思志<sup>1</sup>, 夏瀛<sup>1</sup>, 高瑜博<sup>1,2</sup>, 刘星<sup>1,2</sup>, 欧阳德钦<sup>1,2</sup>, 陈业旺<sup>1,2</sup>, 吴旭<sup>1,2</sup>,  
徐方华<sup>3</sup>, 郭丽<sup>3</sup>, 赵俊清<sup>1</sup>, 郭春雨<sup>4</sup>, 吕启涛<sup>1,2,3</sup>, 阮双琛<sup>1,2</sup>

(1 深圳技术大学 先进光学精密制造技术广东普通高校重点实验室, 深圳 518118)

(2 深圳技术大学 中德智能制造学院, 深圳 518118)

(3 大族激光科技产业集团股份有限公司, 深圳 518103)

(4 深圳大学 物理与光电工程学院 深圳市激光工程重点实验室, 深圳 518060)

**摘要:**采用多级串联的主振荡放大技术,将 SESAM 锁模的种子光通过多级串联端泵 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体放大,产生平均功率为 148.7 W、重复频率 500 kHz~4 MHz、脉冲宽度 8 ps 的 1 064 nm 基频光,同时开展了 LBO 晶体高效率二倍频的研究。通过优化相位匹配,实现了平均功率为 95 W 的 532 nm 皮秒激光输出,光-光转换效率达 65%,光束质量因子  $M_x^2=1.27/M_y^2=1.42$ ,6 h 功率抖动均方根低于 0.8%。该绿光皮秒激光系统具有平均功率高、转换效率高、光束质量好、稳定性高、重频可调等优点,可以被作为皮秒激光加工系统的光源,被应用于科学研究和工业加工领域。

**关键词:**绿光皮秒;皮秒激光器;二次谐波产生;固体放大器;LBO 晶体

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235209.0914002

## 0 引言

高功率超快激光具有脉冲宽度窄、峰值功率高、对材料热影响区域小等特点,被广泛应用于航空航天、生物医疗、交通设备、3C 元器件等领域<sup>[1-3]</sup>。与传统的连续和纳秒红外激光加工相比,超快激光加工具有加工精度高、热影响区小、材料适用性广等优点。此外,高功率绿光皮秒激光光子能量更高、热影响区域更小、加工分辨率更高以及更有利于多种工业材料的吸收,可以有效提高加工精度,特别在电池焊接以及硬脆材料切割等工业应用领域具有独特的优势<sup>[4-5]</sup>。同时,在深紫外激光产生、空间碎片激光测距和生物芯片封装等前沿领域应用前景极大<sup>[6-8]</sup>。基于非线性倍频晶体使得 1 μm 皮秒激光产生二次谐波(Second-harmonic Generation, SHG)是产生高功率绿光皮秒激光的主流方案,非线性倍频晶体在强激光的作用下产生二次非线性效应,使基频光转换为倍频激光输出<sup>[9-12]</sup>。

2011 年,中国科学院光电研究院的麻云凤等报道了基于三级功率放大系统的 LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>(LBO)倍频实验,最终实现平均功率 27.16 W、重复频率 80 MHz、脉冲宽度 10.45 ps 的 532 nm 绿光输出,倍频效率达到 50.58%<sup>[13]</sup>。2012 年,布鲁克海文实验室的 ZHI Z 等报道了 110 W、1.3 GHz 的亚皮秒光纤放大器倍频产生 65 W 绿光的实验<sup>[14]</sup>。2018 年,中科院半导体所的 QI Y 等报道了基于 96 W 非保偏掺镱光纤放大器二次谐波产生的 46 W 绿光皮秒激光<sup>[15]</sup>。2020 年,北京工业大学的陈檬等报道了基于改进迈克尔逊干涉仪的 100 ps、50 W、1 kHz 绿光脉冲串激光器,输出整体包络约 4 ns,该激光器参数适用于空间碎片激光测距领域<sup>[16]</sup>。2021 年,河北工业大学的陈晖等报道了基于光子晶体光纤放大器(Photonic Crystal Fiber Amplifier,

**基金项目:**国家重点研发计划(No. 2022YFB3605800),国家自然科学基金(No. 62275174, 62105225),深圳市高等院校稳定支持计划(No. 20220719104008001),深圳新引进高端人才财政补助科研启动项目(No. GDRC202106),深圳市技术攻关重点项目(Nos. JSGG20190819175801678, JSGG20191129105838333)

**第一作者:**徐思志, 2150416002@stumail.sztu.edu.cn;夏瀛, 1436691292@qq.com

**通讯作者:**刘星, liuxingstart123@163.com;阮双琛, scruan@sztu.edu.cn

**收稿日期:**2023-03-16; **录用日期:**2023-05-06

<http://www.photon.ac.cn>

PCFA)及LBO倍频的百瓦级515 nm皮秒激光器,其输出最高平均功率为103.1 W,重复频率为57 MHz<sup>[17]</sup>。2022年,捷克科学院ZBYNEK H等报道了基于碟片再生放大器的LBO腔外倍频实验,实现120 W、1 kHz的515 nm绿光皮秒激光输出,过高的基频光单脉冲能量导致倍频过程需要在真空腔中进行,且该装置存在调整要求和成本过高的缺点<sup>[18]</sup>。相较于PCFA及碟片再生放大技术,主振荡放大技术(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)是实现高功率皮秒激光更直接可靠的技术。在不需过于复杂光路的前提下,MOPA系统具有重复频率可调范围广、单脉冲能量适中、技术方案较为成熟等优势,更有利于实现高功率绿光皮秒激光器的高效稳定输出,也有利于超快激光设备加工工艺的开发,在工业加工领域具有更大的应用价值<sup>[19-21]</sup>。

本文采用大光斑尺寸基频光泵浦LBO晶体产生近百瓦级高功率绿光皮秒激光,基频光放大器包括光纤预放大器以及四级固体端泵放大器,实现500 kHz~4 MHz重频可调、平均功率148.7 W、脉冲宽度8 ps的1 064 nm激光输出。采用LBO晶体的温度相位匹配条件,获得了2 MHz、最高平均功率95 W的绿光皮秒激光稳定输出,倍频光-光转换效率高达65%,系统重复频率在500 kHz~4 MHz可调。

## 1 全固态皮秒激光放大器

高功率绿光皮秒激光的实验光路如图1,系统由种子光、光纤预放大器、串联四级的全固态皮秒激光放大器和倍频转换模块四个部分组成。其中种子光由中心波长1 064 nm、脉冲宽度7.8 ps和重复频率为20 MHz的全光纤SESAM锁模激光器产生,通过声光调制器(Acoustic Optical Modulator, AOM)调制成500 kHz~4 MHz脉冲序列。为得到足够高的平均功率和脉冲能量,先将毫瓦量级脉冲序列输入至第1级光纤预放大模块,而后进一步耦合到串联四级的固体端泵放大模块。其中第1级端泵放大为双通放大器,采用偏振分光棱镜(PBS)、波片(WP)和双色镜(DM1)的组合实现种子光两次通过增益介质,第2、3、4级端泵放大为单通放大器。

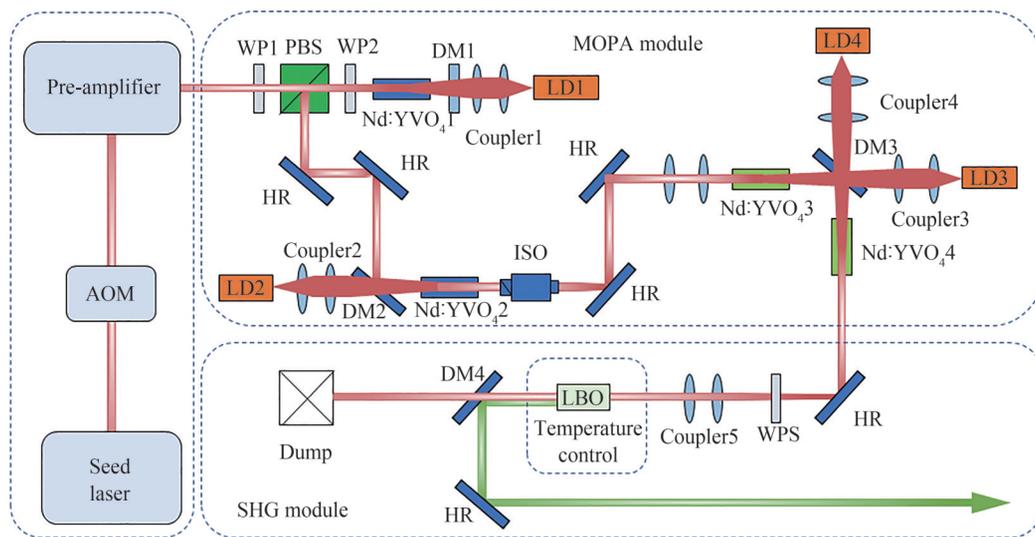


图1 皮秒绿光激光器

Fig.1 The picosecond green laser

端泵固体放大器的增益介质均采用4 mm×4 mm×15 mm的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,掺杂浓度为0.3%,晶体两端均镀878.6 nm和1 064 nm的高透膜。同时为实现更稳定、高效的皮秒激光输出,所有晶体均固定在水冷铜制热沉上进行散热。皮秒激光放大系统采用光纤耦合的半导体激光器(Laser Diode, LD)作为泵浦源,LD的中心波长为878.6 nm,输出光纤芯径为400 μm,数值孔径NA为0.22。其中第一级泵浦LD1最大输出功率为65 W,泵浦LD2、LD3、LD4最大功率均为115 W。经过实验研究,半导体激光器相应的耦合镜组倍率分别为1/2、1/2.5、1/2.5、1/2.5时,放大器转换效率最高。种子光经过第1、2级的固体放大模块,输出基频激光平均功率分别为13 W、54.5 W,相应的功率提取效率分别为19.9%、36.09%。继而通过3、4级端泵模块分别将基频光功率放大到117 W、148.5 W,相应的功率提取效率分别为54.35%、27.39%。使用自相关仪

(PulseCheck, APE)测量 2 MHz 时最大输出功率基频光的脉冲宽度,测量自相关曲线如图 2(a),经  $\text{sech}^2$  拟合测得脉冲宽度为 8.08 ps,该脉冲激光可以满足超快激光“冷加工”脉宽需求。同时,利用光谱仪(HR4000CG, Ocean Optics)测得基频光的中心波长为 1064.2 nm,如图 2(b)。此时,利用光束质量分析仪(Beamsquare SP90449, Ophir)测量基频光的光束质量因子  $M_x^2=1.72, M_y^2=2.18$ ,光束的空间分布情况如图 2(c),束腰半径约为 250  $\mu\text{m}$ 。图 2(d)为该激光器满功率运转 120 min 稳定性测试曲线,测试结果表明该激光器在 148 W 附近稳定工作,功率抖动均方根小于 0.7%,因此该激光器适用于后续二倍频实验。结果表明放大脉冲激光输出功率稳定,光束质量较好,对实现高功率皮秒倍频绿光输出具备良好的适用性。图 3 为基频光在不同重复频率下,最大平均功率和相应单脉冲能量的变化曲线。当重复频率为 0.5 MHz 时,单脉冲能量为 274  $\mu\text{J}$ ,相应的峰值功率为 33.415 MW;当重复频率升高至 4 MHz 时,单脉冲能量降低至 37.875  $\mu\text{J}$ ,相应的峰值功率为 4.618 MW。

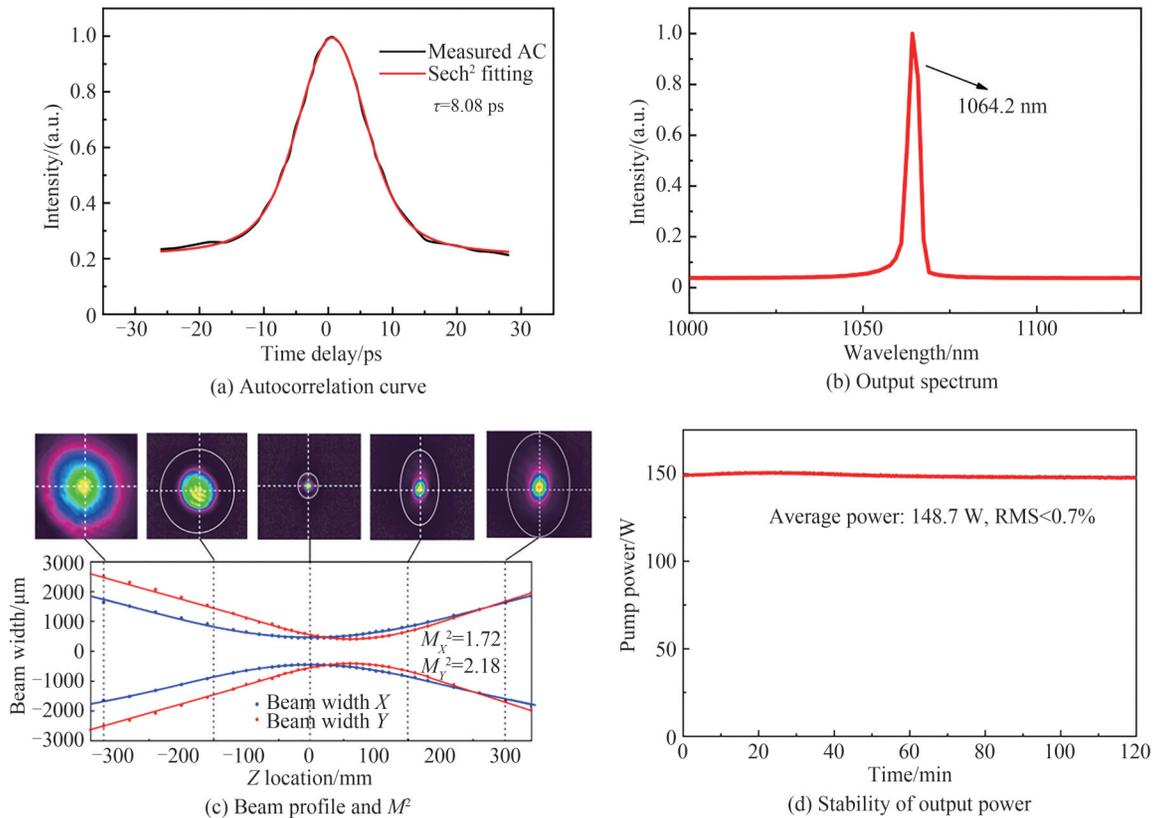


图 2 基频光光束特性(@2 MHz)

Fig.2 Beam characteristics of fundamental laser(@2 MHz)

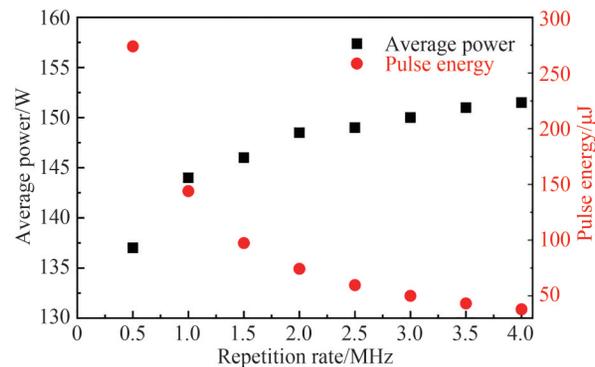


图 3 不同重复频率基频光平均功率和单脉冲能量

Fig.3 Average power and pulse energy of fundamental laser with different pulse repetition rates

## 2 高功率激光倍频实验

高功率倍频实验光路如图1中倍频模块所示,放大器输出的基频光通过倍率为2/1的透镜组 Coupler 5被耦合到倍频晶体中,其中 $\lambda/2$ 波片 WP3用于调节基频光的偏振方向,以提高倍频效率。经过扩束入射到晶体的基频光斑半径约为 $500\ \mu\text{m}$ ,采用较大基频光光斑入射的方式可以有效防止倍频晶体和表面膜层出现阈值损伤,有利于更高功率、高脉冲能量皮秒激光的频率转换,提高高功率绿光皮秒激光输出的稳定性。倍频晶体为 $6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}\times 14\ \text{mm}$ 的I类相位匹配(“ $o+o\rightarrow e$ ”)LBO,晶体切角为 $\theta=90^\circ$ , $\varphi=10.4^\circ$ ,两侧端面均镀有对 $1\ 064\ \text{nm}$ 以及 $532\ \text{nm}$ 的高透膜,以提高倍频效率。晶体通过铝箔包裹后夹持于温度 $42\ ^\circ\text{C}\sim 46\ ^\circ\text{C}$ 可调的恒温模块中,温度调节采用半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC),控温精度为 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ 。输出激光经过一对二色分光镜(HR@ $532\ \text{nm}$ , HT@ $1\ 064\ \text{nm}$ ),用于分离倍频光和残余的基频光。实验通过调节倍频晶体的工作温度以及基频光的重复频率,研究不同晶体温度和重复频率对该绿光皮秒激光器输出功率及转换效率的影响。

利用TEC进行温度调节,精确调控LBO晶体恒温模块温度,在温度 $43.7\ ^\circ\text{C}$ 时,输出倍频光功率达到最大功率 $95\ \text{W}$ 。基频光工作重频为 $2\ \text{MHz}$ 时,输出绿光功率随LBO晶体温度的变化曲线如图4(a),结果表明使用LBO晶体倍频时,温度对相位匹配的影响是极其敏感的。在 $(43.7\pm 0.3)\ ^\circ\text{C}$ 能实现较好的相位匹配,输出的倍频光平均功率均可达到 $90\ \text{W}$ 以上,该绿光激光器可以稳定工作。晶体温度在该稳定工作温度范围以外时,二次谐波过程相位失配,倍频效率快速降低。

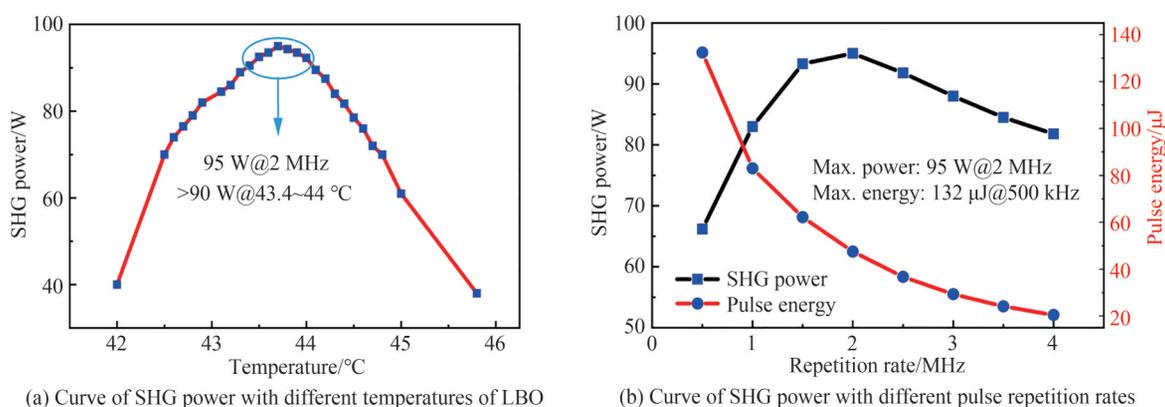


图4 倍频光功率的参数曲线  
Fig.4 Parametric curves of SHG power

图4(b)为绿光最大输出功率(黑色实线)及对应的单脉冲能量(红色实线)随基频光重复频率的变化曲线,结果显示:当输入基频光为 $500\ \text{kHz}\sim 4\ \text{MHz}$ 时均可以达到 $60\ \text{W}$ 以上的倍频激光输出,在 $800\ \text{kHz}\sim 4\ \text{MHz}$ 均可实现 $80\ \text{W}$ 以上绿光输出;在 $500\ \text{kHz}$ 时,激光器输出最高脉冲能量 $132\ \mu\text{J}$ ;最大功率随基频光重复频率增大呈先上升后下降的趋势,当基频光重复频率为 $2\ \text{MHz}$ 时,绿光最高输出功率达到 $95\ \text{W}$ 。一方面,不同重复频率会致使光路中未进行水冷的光学元件(如Coupler 5)产生不同的热透镜效应,进而使作用在倍频晶体上的光斑尺寸以及热效应存在差异。另一方面,重复频率上升会导致基频光单脉冲能量降低,倍频效率随之降低。实验中使用的耦合透镜组在 $2\ \text{MHz}$ 时平衡了这几点影响,实现最稳定、最高效率倍频激光输出。

图5(a)为 $2\ \text{MHz}$ 绿光输出功率(黑色曲线)和转化效率(红色曲线)与基频光功率的关系曲线。由图可以看出,倍频绿光输出功率及转化效率整体随基频光功率的升高而升高;在基频光为 $50\ \text{W}$ 时出现倍频效率下降, $110\ \text{W}$ 时出现倍频效率增长速率下降。主要原因是基频光通过不同放大级的光束质量和发散角存在差异而导致倍频晶体热效应不同。当基频激光为 $145\ \text{W}$ 时,绿光输出达到最高平均功率 $95\ \text{W}$ ,对应的峰值功率为 $7.4\ \text{MW}$ ,倍频转换效率达到 $65\%$ ,且倍频光转化效率仍有上升趋势。图5(b)为使用Ocean光谱仪(USB2000+, Ocean Optics)测量的绿光光谱,其中心波长为 $532.1\ \text{nm}$ 。

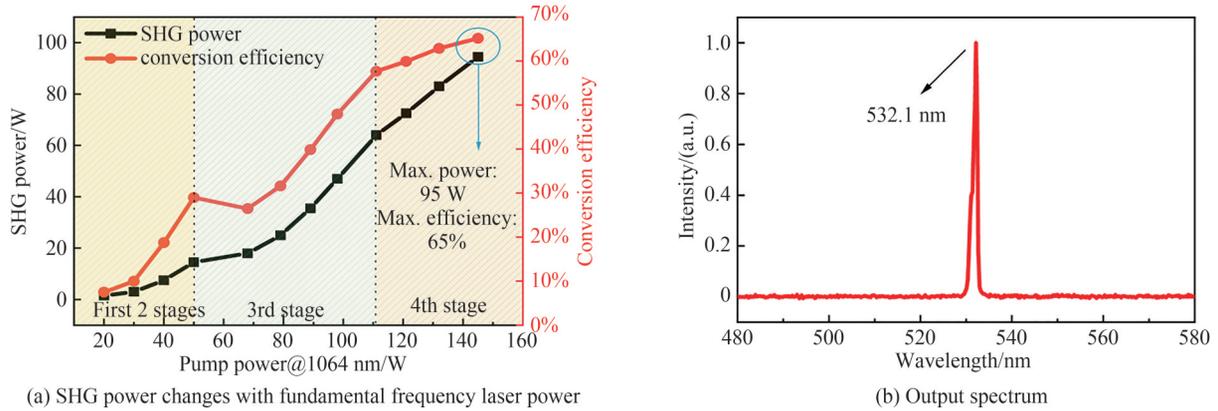


图5 倍频光的功率特性

Fig.5 Power characteristics of the SHG laser

图6(a)是95 W绿光输出功率下,使用光束质量分析仪测量的聚焦光斑形貌和空间分布趋势,光束质量因子为 $M_x^2=1.27$ , $M_y^2=1.42$ ,光束质量与基频光相比有所提升。图6(b)是95 W皮秒绿光输出的近场光斑形貌与尺寸,近场光斑的径向尺寸为1.85 mm以及1.32 mm。图6(c)为2 MHz绿光皮秒激光的自相关曲线,最终输出绿光的脉冲宽度为6.4 ps,与基频光相比,脉冲宽度有所压缩。测量倍频激光输出93.5 W连续工作6 h的稳定性情况如图6(d),功率抖动的均方根小于0.8%。可以看出在连续工作2 h左右时,输出功率出现小幅度下降( $<1.5$  W),在可接受范围内。其主要原因在于长时间工作情况下,系统热累积导致耦合透镜组和晶体温度微小波动,从而导致倍频效率降低。该绿光皮秒激光器的光束质量较好,有利于提升聚焦光斑质量及准直光束质量,在激光精密加工和空间探测等领域具有较大应用优势。

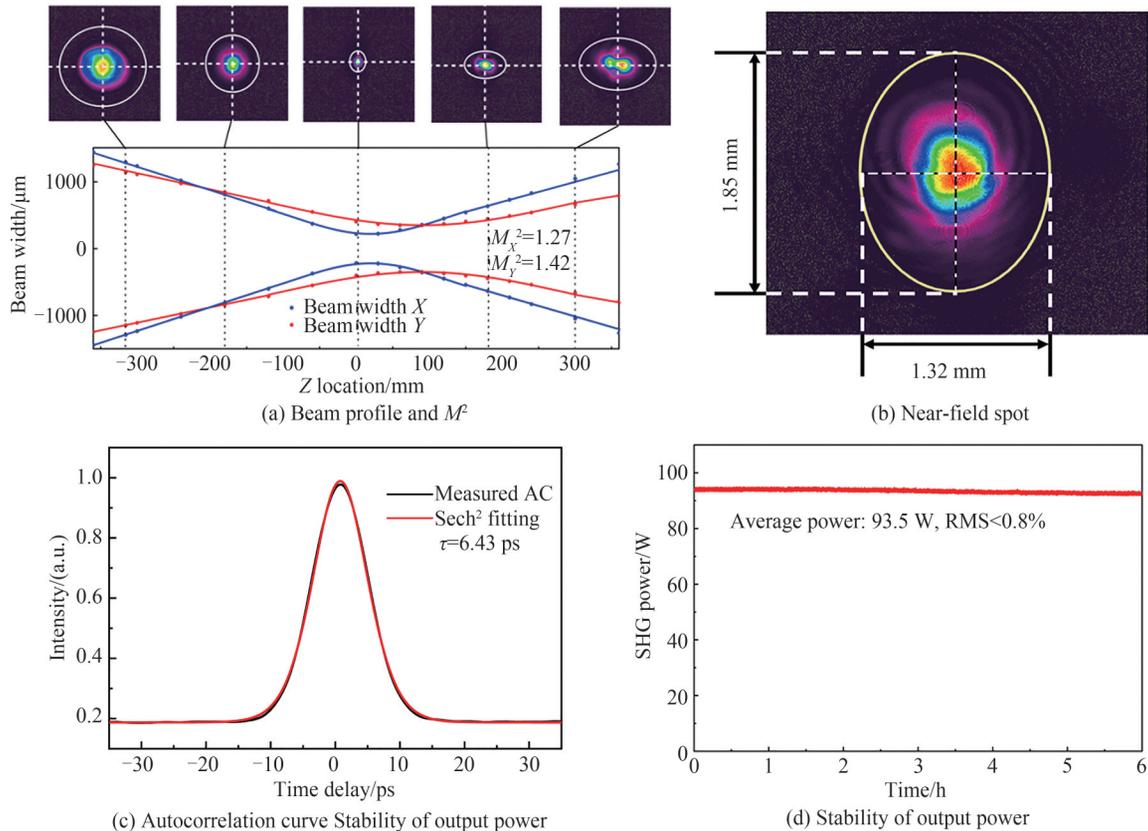


图6 倍频光的光束特性

Fig.6 Beam characteristics after SHG

### 3 结论

本文通过多级端泵 Nd:YVO<sub>4</sub> 的固体激光放大系统, 获得了平均功率 148.7 W、脉冲宽度 8 ps 的 1 064 nm 激光输出, 再以 1 mm 直径的光斑耦合至 LBO 晶体进行倍频, 最终输出重复频率 500 kHz~4 MHz 可调的 532 nm 皮秒激光。最高输出功率为 95 W@2 MHz, 对应最佳的二次谐波转化效率为 65%, 且转化效率有望随基频光功率进一步提升, 光束质量因子为  $M_x^2=1.27$ 、 $M_y^2=1.42$ , 光束质量较基频光得以优化。在输出平均功率为 93.5 W 的情况下, 系统稳定工作 6 h 以上, 功率抖动均方根低于 0.8%。此外, 研究了 LBO 晶体温度的精细调控对晶体最佳相位匹配条件的影响, 从而实现最高倍频转换效率。该激光系统具有光路简单、平均功率高、光束质量好、重复频率可调以及稳定性高等优点, 有望实现电池焊接、硬脆材料加工等重要加工领域更高效、优质的加工, 同时有望成为产生高功率紫外、深紫外激光的理想基频光源, 在工业加工和科学研究领域具有重要的应用价值。

#### 参考文献

- [1] MUHAMMAD N, WHITEHEAD D, BOOR A, et al. Picosecond laser micromachining of nitinol and platinum alloy for coronary stent applications [J]. Applied Physics A-Materials Science and Processing, 2012, 106(3): 607-617.
- [2] GAUTAM G D, PANDEY A K. Pulsed Nd:YAG laser beam drilling: a review[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 100:183-215.
- [3] WEN Qiuling, WEI Xinyu, WANG Hualu, et al. Characteristics and mechanism of CVD single crystal diamond processed by picosecond laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6): 0650113.  
温秋玲, 韦新宇, 王华禄, 等. 皮秒激光加工 CVD 单晶金刚石的特征和机理研究[J]. 光子学报, 2021, 50(6): 0650113.
- [4] OTTE F, STUTE U, OSTENDORF A. Micro welding of electronic components with 532 nm laser radiation [C]. Conference on Photon Processing in Microelectronics and Photonics, 2007, 6458:645804.
- [5] MATSUOKA Y. Processing quartz glass by using the second harmonic of picosecond pulse Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. Applied Physics A Materials Science and Processing, 2007, 89(2):457-460.
- [6] ZHANG Z P, ZHANG H F, LONG M L, et al. High precision space debris laser ranging with 4.2 W double-pulse picosecond laser at 1 kHz in 532 nm[J]. Optik, 2019, 179: 691-699.
- [7] LONG Mingliang, DENG Huanrong, ZHANG Haifeng, et al. Pulse burst picosecond laser technique and application in space debris ranging[J]. Electro-optics Technology Application, 2022, 37(6): 45-52.  
龙明亮, 邓华荣, 张海峰, 等. 脉冲串皮秒激光技术及其空间碎片激光测距[J]. 光电技术应用, 2022, 37(6): 45-52.
- [8] ZHANG J, XU S, DONG Y, et al. Microwelding of glass to silicon by green ultrafast laser pulses[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 120:105720.
- [9] CHENG Menyao, WANG Zhaohua, HE Huijun, et al. Efficient third harmonic generation of 355 nm picosecond laser pulse [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(12):124205.  
程梦尧, 王兆华, 何会军, 等. 高效率三倍频产生 355 nm 皮秒激光的实验研究[J]. 物理学报, 2019, 68(12):124205.
- [10] WANG Z, YANG F, XIE S, et al. Multiwavelength green-yellow laser based on a Nd:YAG laser with nonlinear frequency conversion in a LBO crystal[J]. Applied Optics, 2012, 51(18):4196-4200.
- [11] JIA F Q, QUAN Z, XUE Q H, et al. LD-pumped Nd:YAG/LBO 556nm yellow laser [J]. Optics and Laser Technology, 2006, 38(8):569-572.
- [12] CHANG C, KROGEN P, LIANG H, et al. Multi-mJ, kHz, ps deep-ultraviolet source[J]. Optics Letters, 2015, 44(4):665-668.
- [13] MA Yunfeng, YU Jin, NIU Gang, et al. 25 W high repetition rate picosecond green laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(12):1202010.  
麻云凤, 余锦, 牛岗, 等. 高重复频率 25 W 皮秒绿光激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(12):1202010.
- [14] ZHI Z, BERRY D, BRUCE M, et al. Generation of 110 W infrared and 65 W green power from a 1.3-GHz sub-picosecond fiber amplifier[J]. Optics Express, 2012, 20(5):4850-4855.
- [15] QI Y, YU H, ZHANG J, et al. Generation of 46 W green-light by frequency doubling of 96 W picosecond unpolarized Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 101:419-424.
- [16] MA N, CHEN M, YANG C, et al. High-efficiency 50 W burst-mode hundred picosecond green laser[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2020, 8(6):1-6.
- [17] CHEN Hui, BAI Zhenxu, WANG Jiancai, 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.  
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.
- [18] HUBKA Z, ANTIPENKOV R, BOGE R, et al. 120 mJ, 1 kHz, picosecond laser at 515 nm[J]. Optics Letters, 2021,

- 46(22):5655-5658.
- [19] OUYANG D, CHEN Y, LIU M, et al. 310 W picosecond laser based on Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG rod amplifiers[J]. Optics and Laser Technology, 2022:148.
- [20] WEI Xiaole, WEI Huai, SHENG Quan, et al. Picosecond pulsed all-fiber yb-doped laser with 1.2 GHz repetition rate [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 1148015.  
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.
- [21] SHENG L, JIA W, SONG Y, et al. High energy, high brightness picosecond master oscillator power amplifier with output power 65.5 W[J]. Optics Express, 2020, 28(6):8016-8026.

## Tunable Repetition-rate High Power Picosecond Green Laser

XU Sizhi<sup>1</sup>, XIA Ying<sup>1</sup>, GAO Yubo<sup>1,2</sup>, LIU Xing<sup>1,2</sup>, OUYANG Deqin<sup>1,2</sup>, CHEN Yewang<sup>1,2</sup>,  
WU Xu<sup>1,2</sup>, XU Fanghua<sup>3</sup>, GUO Li<sup>3</sup>, ZHAO Junqing<sup>1</sup>, GUO Chunyu<sup>4</sup>,  
LV Qitao<sup>1,2,3</sup>, RUAN Shuangchen<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Advanced Optical Precision Manufacturing Technology of Guangdong Higher Education Institutes, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China)

(2 Sino-german College of Intelligent Manufacturing, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China)

(3 Han's Laser Technology Industry Group Co. Ltd., Shenzhen 518103, China)

(4 Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** In this paper, an 1 064 nm, 148.7 W, 8 ps laser is obtained through a multi-stage end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> solid-state laser amplification system. Further a 1mm-diameter spot is coupled to a LBO crystal for frequency doubling, and a 95 W, 6.43 ps laser output is obtained at 532 nm, with a tunable Pulse Repetition Frequency (PRF) of 500 kHz~4 MHz. The Nd:YVO<sub>4</sub> Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) consists of a high-power oscillator stage, fiber pre-amplifier and four end-pump amplifier stages. The seed is an all-fiber laser mode-locked by SESAM with a pulse duration of 7.8 ps and PRF of 20 MHz. The Acoustic Optical Modulator (AOM) is used for reducing the PRF to realize a higher peak power. The end-pump power amplifier is a four-stage free-space bulk amplifier based on neodymium-doped yttrium vanadate (Nd:YVO<sub>4</sub>) crystals for high-efficiency frequency conversion. It has a high polarization-dependent gain spectrum due to the birefringence of the uni-axial YVO<sub>4</sub> crystal. Each amplifier is comprised of a 0.3% doped a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> crystal having dimensions of 4 mm×4 mm×15 mm and is mounted on a water-cooled heat sink. All amplifiers are end-pumped by a fiber-coupled 878.6 nm (400 μm core, NA=0.22) Laser Diode (LD), instead of conventional 808 nm LD, to reduce the degradation of the beam quality by thermal effects. The first amplifier stage is a double-pass configuration and increases the signal average power to 13 W for a 65 W pump light, while the second amplifier stage is a single-pass and scales up to 56 W of average power for a 115 W pump light. To match the amplified light with the pump light of the third stage, a lens of 80 mm focal length is added between the second stage and the third stage. Finally, 56 W, 2 MHz infrared (1 064 nm) 8.08 ps output with  $M^2 < 1.5$  is obtained. Then, the 56 W infrared picosecond laser is used as the source of the pre-amplification, and after shaping, it is focused to the third and fourth-stage amplifying module. This module uses two 115 W LD pumps with a center wavelength of 878.6 nm to pump two Nd:YVO<sub>4</sub> crystals. The seeding picosecond laser passes through the third crystal and is then deflected by a dichroic mirror (DM3) to the fourth crystal for further power amplification. An output power of 148.7 W is achieved, and the beam quality factor of the amplified pulses is  $M_x^2 = 1.72$  and  $M_y^2 = 2.18$ . along horizontal and vertical directions, respectively.

After shaping the output, a 1 mm-diameter spot is coupled to LBO crystal for frequency doubling. The highest output power is 95 W at 2 MHz PRF, corresponding to the best second harmonic conversion efficiency of 65%. The conversion efficiency is expected to be further improved with the fundamental frequency optical power, the beam quality factor is  $M_x^2 = 1.27$ ,  $M_y^2 = 1.42$ . At the highest average power output, the stability of the system is observed for more than 6 hours, and the power fluctuation RMS is lower than 0.8%. In addition to achieve the highest frequency-doubling conversion efficiency, the effect of

the fine regulation of the temperature of the LBO crystal on the optimal critical phase matching condition of the crystal is also studied. The laser system has the advantages of simple optical path, high average power, good beam quality, tunable repetition frequency and high stability. It is an ideal fundamental frequency light source for high-power ultraviolet and deep ultraviolet lasers, and has important applications in the fields of industrial processing and scientific research. It is expected to achieve more efficient and can be utilized for high-quality processing fields such as battery welding, and hard and brittle materials processing.

**Key words:** Picosecond green laser; Picosecond laser; Second-harmonic generation; Solid-state laser amplifier; LBO crystal

**OCIS Codes:** 140.3515; 140.3580; 140.7300

---

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3605800), National Natural Science Foundation of China (Nos. 62275174, 62105225), Shenzhen University Stability Support Project (No. 20220719104008001), Natural Science Foundation of Top Talent of Shenzhen Technology University (No. GDRC202106), Key Projects in Shenzhen (Nos. JSGG20190819175801678, JSGG20191129105838333)