

皮秒激光行波放大器研究

王建才¹,张一鸣¹,白振岄²,王伟然¹,苏现翠¹,张丙元¹

(1.聊城大学 物理科学与信息工程学院、山东省光通信科学与技术重点实验室,山东 聊城 252059;

2.中国科学院 空天信息创新研究院,北京 100094)

摘要 利用 SESAM 光纤锁模激光器作为种子源,设计了行波放大器,对皮秒脉冲的放大特性进行了研究。利用中心波长为 885 nm 的光纤耦合半导体激光器直接泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,有效降低了晶体中的热效应。通过两级行波放大,在泵浦功率为 222 W 时,获得了平均功率为 33.7 W,重复频率为 70.4 MHz,脉冲宽度为 9.4 ps 的脉冲输出。输出激光光束具有较好的圆度,光束质量因子 M^2 在 x 方向上为 1.15, y 方向上为 1.13。在 8 h 的连续运转下,激光器功率抖动性 $RMS < 1\%$ 。

关键词 锁模激光器;行波放大;Nd:YVO₄;激光技术

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research on Picosecond Laser Traveling Wave Amplifier

WANG Jiancai¹,ZHANG Yiming¹,BAI Zhenao²,WANG Yiran¹,
SU Xiancui¹,ZHANG Bingyuan¹

(1.School of Physics Science and Information Technology,Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology,Liaocheng University,Liaocheng 252059,China;2.Aerospace Information Research Institute,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100094,China)

Abstract In this paper,a traveling wave amplifier is designed using a SESAM fiber mode-locked laser as the seed source and the amplification performance of picosecond pulses is studied.The Nd:YVO₄ crystal is pumped directly by a fiber-coupled semiconductor laser with a central wavelength of 885 nm,and the thermal effect in the crystal is effectively reduced.By two-stage traveling wave amplification,the output pulses with average power of 33.7 W,reppetition frequency of 70.4 MHz and pulse width of 9.4 ps were obtained under the pump power of 222 W.The beam quality factor M^2 is 1.15 in x direction and 1.13 in y direction. The output power jitter RMS of the laser is less than 1% under 8 hours continuous operation.

Key words mode-locked laser;traveling wave amplification;Nd:YVO₄;laser technology

0 引言

具有高功率的超短脉冲激光器在工业加工、波导刻蚀等领域被广泛应用^[1-5]。相比于纳秒(10^{-9} s)脉冲激光,皮秒(10^{-12} s)脉冲激光峰值功率更高、热效应更小、加工精度更高和加工质量更好,在材料精细微加工方面具有较强的优势^[6-9]。利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)的被动锁模激光器^[10-14]具有结构简单、成本

收稿日期:2022-03-22

基金项目:国家自然科学基金项目(61905103,61905104,62105134);山东省自然科学基金项目(ZR2021Q F025)资助

通讯作者:张丙元,男,汉族,博士,教授,研究方向:全固态激光器等,E-mail:zhangbingyuan@lcu.edu.cn。

低和输出功率高等优点,是获得皮秒超短脉冲的主要技术。但在通常情况下,由于锁模激光器直接输出的激光脉冲单脉冲能量低、重复频率高,使其在一些领域的应用中受到限制^[15]。为了获得高功率高能量的激光脉冲,需要利用激光放大器对激光脉冲进行放大。放大器主要分为两类:再生放大器和行波放大器。再生放大器具有高脉冲能量、高增益的优点,但再生放大器系统设计比较复杂,成本较高,并且对平均功率的提升效果不明显^[16,17]。相比之下,行波放大器的系统结构更加的紧凑,含有更少的光学元件和更低的光学损耗。同时基于行波放大过程的高功率皮秒激光器具有较高的稳定性和更高的重复频率,更有利于高速精密加工等工业应用。

近年来,行波皮秒放大器备受国内外学者广泛关注。2012年,Xu等以Nd:YVO₄晶体为增益介质,采用行波放大结构,获得了平均功率为73 W、重复频率79 kHz、脉冲宽度15 ps的输出激光^[18]。2016年,Guo等采用行波放大器,以Nd:GdVO₄晶体为增益介质,成功实现了平均功率99 W、脉冲宽度12.4 ps的激光脉冲输出^[19]。2018年,Cheng等通过一级单通放大将平均功率为1.38 W、重复频率为3.24 GHz的种子光放大至11.34 W^[20]。2019年,Liu等通过行波放大结构获得了平均功率16.19 W、脉冲宽度17.6 ps、重复频率为500 kHz的激光脉冲输出,其光光转换效率达到了51.07%^[21]。同年,卢尚等通过两级放大系统,成功实现了平均功率为39.5 W、重复频率1 kHz和脉冲宽度11 ps的激光脉冲输出^[22]。2020年,Jia等利用行波单通放大结构实现平均功率35.7 W、脉冲宽度16.9 ps和脉冲能量71.4 μJ的激光输出^[23]。

本文采用SESAM光纤锁模激光器作为种子源设计了行波放大结构。利用光纤耦合输出的中心波长为885 nm的半导体激光器作为泵浦源,采用直接泵浦方式,以Nd:YVO₄晶体为增益介质,通过两级行波放大,获得了平均功率为33.7 W、重复频率为70.4 MHz、脉冲宽度9.4 ps的超短脉冲。

1 实验设计及装置

图1为皮秒激光放大器装置图,由一个皮秒激光种子源和两个双通放大器组成。装置中种子源为光纤锁模激光器,可以提供输出波长1 064 nm、重复频率70 MHz和脉冲宽度8.5 ps的种子光,其光束质量因子M²小于1.1。种子源输出功率为220 mW。经过测试,该光纤锁模激光器中心波长为1 064.86 nm,重复频率为69.7 MHz,脉冲宽度为8.468 ps。

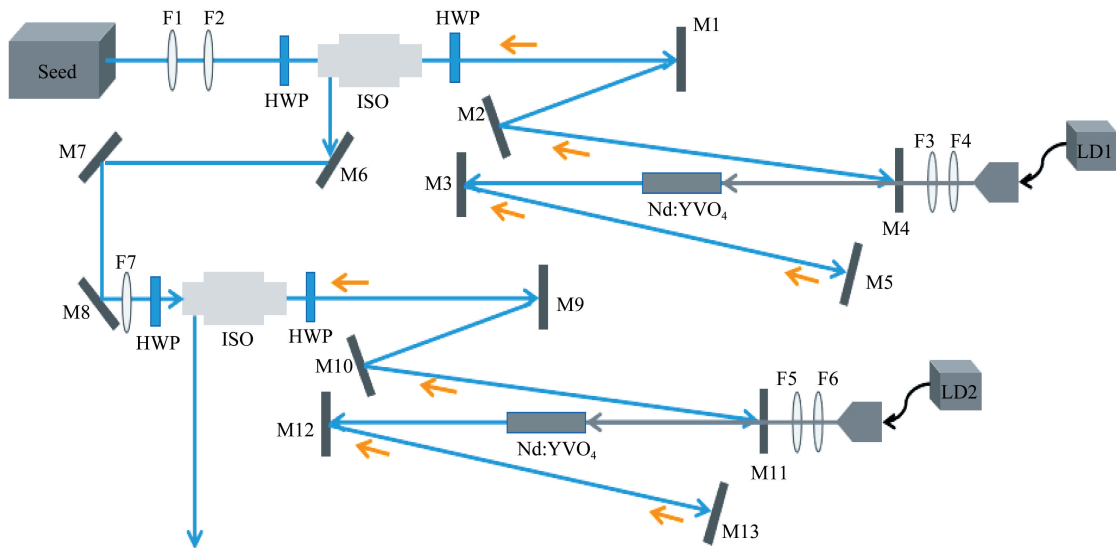


图1 皮秒激光放大装置图

种子光在通过透镜组准直和整形,然后通过隔离器进入第一级放大器(预放大器)进行功率放大,隔离器的作用可以防止被放大的光脉冲返回种子源,种子光到达增益介质被单次放大,光束被M5平面全反镜反射回去,再次通过增益介质被放大。种子光在经过双通放大后,经过隔离器进入第二级双通放大器再次进行功率放大。第二级放大器的结构与第一级相同。在两级放大结构中都以Nd:YVO₄晶体作为增益介质,掺杂浓度为0.5%,尺寸大小为4 mm×4 mm×30 mm,其晶体两端面镀885 nm和1 064 nm的增透膜,同时晶体被铜箔包裹放入水冷热沉中进行散热,水冷温度为25℃。Nd:YVO₄晶体对808 nm泵浦波长具有更高

的吸收效率,但是较低的量子效率使晶体对 808 nm 波长会产生较为严重的热效应,在高泵浦功率时会影响光束质量,产生光斑热畸变^[24]。利用 880 nm 泵浦可以有效提高量子效率,减少晶体中的热透镜效应。并且 Nd:YVO₄ 晶体在 880 nm 附近的吸收峰较宽,降低了晶体对泵浦波长的敏感性。基于以上分析本实验选取中心波长为 885 nm 的半导体激光器为泵浦源,采用直接泵浦方式进行放大。实验过程中通过调整两级中不同透镜组(F3 和 F4、F5 和 F6),使种子信号光的光束半径稍微大于泵浦光的半径,使两束激光达到最佳模式匹配,提升放大效率,进而获得功率高、光束质量好的皮秒激光脉冲。

2 实验结果分析

在两级放大系统中,首先调节种子光通过隔离器进入第一级双通放大,在两次通过 Nd:YVO₄ 晶体后,功率被放大至 9.5 W,此时泵浦源输出的功率约为 110 W。然后经过第二级双通放大后,当泵浦源功率为 112 W 时,放大器输出平均功率增加到 33.7 W。放大器光光转换效率为 15.2%。通过示波器(Tektronix)对输出脉冲进行了测量,结果如图 2 所示,由图可知经过两级放大后的激光输出频率为 70.4 MHz,激光脉冲波形非常的稳定。通过光谱仪(Yokogawa)测得的激光光谱如图 3 所示,其中心波长为 1 064.856 nm,光谱宽度为 0.28 nm。同时利用自相关仪(APE pulse check)对脉冲宽度进行了测量,结果如图 4 所示,输出激光脉冲宽度为 9.4 ps,对于脉宽的轻微展宽可以归因于在放大过程中出现的色散影响。

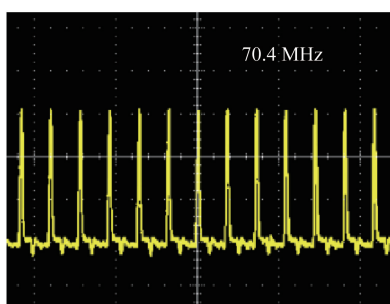


图 2 输出脉冲序列

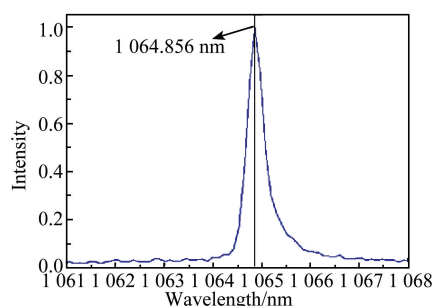


图 3 激光脉冲输出光谱

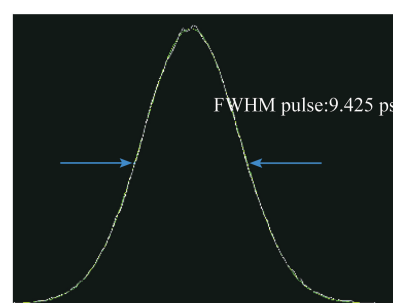


图 4 激光脉冲自相关曲线

采用光束质量分析仪对输出激光的光束质量进行了测量,其结果如图 5(a)所示,从图中可以看出,输出激光光斑具有较好的圆度。光束质量因子 M^2 在 x 方向上为 1.15, y 方向上为 1.13。较好的光束质量表明放大器中的热效应控制在了良好水平。结果表明采用 885 nm 光纤耦合半导体激光器直接泵浦 Nd:YVO₄ 晶体可以有效降低晶体中的热效应。实验中对激光器进行了功率稳定性测试,从图 5(b)可以看出,激光器连续工作 8 h,其输出平均功率为 33.7 W,功率抖动性 $RMS < 1\%$,具有极佳的功率稳定性。这些结果表明,通过两级放大装置,可以获得高重复频率、高平均功率和高稳定性的皮秒脉冲激光。

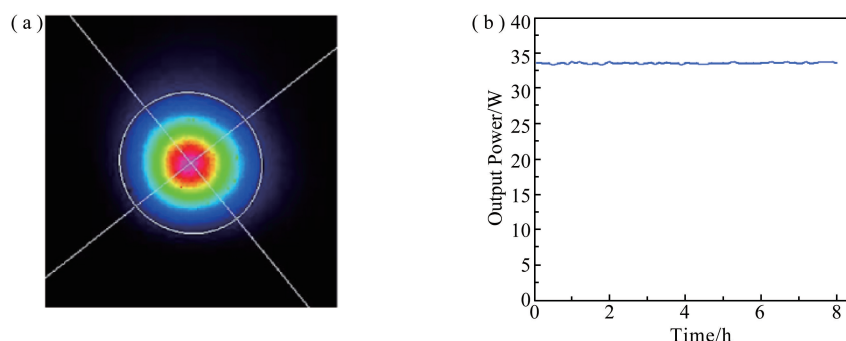


图 5 (a) 放大后的光束轮廓;(b) 长时间输出功率稳定性

3 结论

本文以脉冲宽度为 8.468 ps 的光纤锁模激光器作为种子源,利用中心波长为 885 nm 半导体激光器作为泵浦源,通过 Nd:YVO₄ 两级放大行波放大器,获得了重复频率为 70.4 MHz,脉冲宽度 9.4 ps 的激光脉冲。放大后的脉冲宽度略大于种子光脉冲宽度,归因于在放大过程中出现的色散影响。当一级泵浦功率为 110 W、二级泵浦功率为 112 W 时,放大器输出平均功率为 33.7 W,放大器光光转换效率为 15.2%,对种子

光的放大倍率约为 153。放大器采用直接泵浦的方式有效减少了晶体的热效应,其输出激光光斑具有较好的圆度,光束质量因子 M^2 在 x 方向上为 1.15, y 方向上为 1.13。同时在 8 h 的满功率连续运转下,表现出了极佳的功率稳定性。所研究的高功率皮秒激光器在精密激光加工和生物医学等领域有着广阔的应用前景。

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 & Processing*, 2012, 106(3): 607-617.
- [2] LU S, LÜ S Q, CHEN M, et al. Realization of single-pulse energy 3 mJ, repetition frequency 1 kHz picosecond super-Gaussian beam[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1005012.
- [3] DORMAN C, SCHULZE M. Picosecond micromachining update: unique fiber-based laser technology delivers high pulse energy and average power[J]. *Laser Technik Journal*, 2010, 5(4): 44-47.
- [4] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 219-225.
- [5] NEUENSCHWANDER B, BUCHER G F, NUSSBAUM C, et al. Processing of metals and dielectric material materials with ps-laser pulses: results, strategies, limitations and needs[J]. *Proc of SPIE*, 2010, 7584: 75840R.
- [6] WANG Z, FU W, ZHANG R. Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metal iron[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 74-78.
- [7] PENG H, YANG C, LU S, et al. All-solid-state picosecond radially polarized laser and its processing characteristics[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 105-110.
- [8] GAMALY E G, MADSEN N R, DUERING M, et al. Ablation of metals with picosecond laser pulses: Evidence of long-lived nonequilibrium conditions at the surface[J]. *Physical Review B*, 2005, 71: 174405.
- [9] BAI Z N, BAI Z 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] KELLER U, WEINGARTEN K J, KARTNER F X, et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *Journal of Selected Topic in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 435-453.
- [11] ZHANG B Y, LI G, CHEN M, et al. Passive mode locking of a diode-end-pumped Nd:GdVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(19): 1829-1831.
- [12] 李霄, 许晓军. 用半导体可饱和吸收镜实现侧面抽运 Nd:YAG 被动锁模固体激光器[J]. *中国激光*, 2008, 35(增刊): 1-4.
- [13] XIA P K, YU H J, YAN P, et al. Single output LD end-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser with semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(4): 044205.
- [14] HONNINGER C, ZHANG G, KELLER U, et al. Femtosecond Yb:YAG laser using semiconductor saturable absorbers[J]. *Optics letters*, 1995, 20(23): 2402-2404.
- [15] 张丙元, 王国菊, 何京良, 等. 自聚焦透镜耦合激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 锁模激光器的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 161-165.
- [16] KLEINBAUER J, KNAPPE R, WAIENSTEIN R. 13-W picosecond Nd:GdVO₄ regenerative amplifier with 200-kHz repetition rate[J]. *Applied Physics B, Lasers and Optics*, 2005, B81(2/3): 163-166.
- [17] AGNESI A, CARRA L, DALLOCCIO P, et al. 210-μJ picosecond pulses from a Quasi-CW Nd:YVO₄ Grazing-Incidence two-stage slab amplifier Package[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(10): 952-957.
- [18] XU L, ZHANG H, MAO Y, et al. High-average-power and high-beam-quality Innoslab picosecond laser amplifier[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6669-6672.
- [19] GUO J, LIN H, LI J, et al. High power TEM₀₀ picosecond output based on a Nd:GdVO₄ discrete path Innoslab amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2875-2878.
- [20] 程梦尧, 王兆华, 曹艳芳, 等. High power diode-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser at repetition rate of 3.2 GHz [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(5): 126-129.
- [21] LIU X S, HE H, SONG Y H, et al. 500-kHz level high energy double-pass Nd:YVO₄ picosecond amplifier with optic-optic efficiency of 51% [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(2): 219-225.
- [22] 卢尚. 高能量皮秒平定光束产生及放大特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- [23] LIU X S, JIA W Z, YANG S, et al. A high pulse energy single-pass picosecond master oscillator power amplifier system with output power 35.7 W[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 121: 105782.
- [24] 郑建奎, 崔索超, 石锐, 等. 端面泵浦皮秒再生放大器[J]. *光学与光电技术*, 2020, 18(2): 78-82.

(责任编辑: 刘庆松)