

100 W, 2.6 mJ 衍射极限输出的全光纤主振荡功率放大脉冲激光器

史 尘 王小林* 陶汝茂 周 朴 侯 静 支 冬

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 研究了一台基于主振荡功率放大(MOPA)结构的全光纤结构脉冲激光器。利用声光调 Q, 获得了平均功率约为 500 mW 的脉冲种子源, 采用一级预放大器使输出脉冲放大到 10 W; 主放大器利用一台中心波长为 976 nm 的带尾纤的半导体激光器对掺 Yb³⁺ 双包层光纤抽运。最终在 40 kHz 的重复频率下实现了中心波长为 1064 nm、脉宽为 2.4 μ s、平均功率大于 100 W、脉冲能量达到 2.63 mJ、输出光束的 M^2 因子为 1.2 的激光脉冲输出。

关键词 光纤激光器; 脉冲激光; 主振荡功率放大; 掺镱光纤

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0917001

100 W, 2.6 mJ Diffraction Limit Output All-Fiber Master Oscillator Power Amplification Pulse Laser

Shi Chen Wang Xiaolin Tao Rumao Zhou Pu Hou Jing Zhi Dong

(College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract An all-fiber pulse laser based on master oscillator power amplification (MOPA) configuration is reported. Using the acousto-optic Q switch, the pulse laser seed with average power of about 500 mW is obtained. A pre-amplifier amplifies the seed power up to 10 W. The main amplifier is based on the Yb-doped double clad fiber pumped by a pigtailed laser diode with a center wavelength of 976 nm. In the experiment, pulse laser with repetition rate of 40 kHz at the center wavelength of 1064 nm is realized. The pulse width is 2.4 μ s, the average power is greater than 100 W, and the corresponding pulse energy is 2.63 mJ. The M^2 factor of output beam is 1.2.

Key words lasers; fiber lasers; pulse laser; master oscillator power amplification; Yb-doped fiber

OCIS codes 140.3280; 140.3510; 140.3538; 140.3540

1 引 言

全光纤结构激光器具备光束质量高、体积小、重量轻、散热效果好、功率转换效率高和使用寿命长等优点^[1-2], 在工业领域得到了广泛的关注。随着大模场面积双包层掺杂光纤和大功率半导体激光器(LD)技术的成熟, 单根光纤中的连续激光输出功率已经达到 10 kW。相比于连续激光, 脉冲激光具有

更高的峰值功率, 因而可以高效地与物质进行相互作用, 有利于在激光加工、光通信、激光医疗、激光雷达、激光测距、非线性频率转换等诸多实际应用中发挥作用^[1,3], 因而稳定、可靠性高的光纤脉冲激光器的研究已经成为了重点。

主振荡功率放大结构通过将高品质、低功率的种子源激光进行放大而获得高光束质量、高功率的

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-03-11

作者简介: 史 尘(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: bigbryant@nudt.edu.cn

导师简介: 侯 静(1975—), 女, 博士, 研究员, 主要从事光纤激光、超连续谱等方面的研究。

E-mail: houjing25@sina.com

* 通信联系人。E-mail: chinawxllin@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

脉冲激光输出^[4],调整种子激光的特性可以控制激光的输出参数,是获得高功率脉冲激光的主要手段。

基于空间耦合结构,德国耶拿大学的 Limpert 等^[5]、固体激光技术国家级重点实验室的李尧等^[6]分别实现了百瓦级平均功率、毫焦级单脉冲能量的主振荡功率放大(MOPA)脉冲激光器。由于采用空间耦合,使得整个系统的紧凑型、稳定性和维护性能下降,相比而言,全光纤结构具有热管理容易、功率转换效率高、光束质量好等诸多优点。基于全光纤结构,国防科技大学的 Zhang 等^[7]、天津大学的 Fang 等^[8]、上海光学与精密机械研究所的周翠芸等^[9]分别实现了单脉冲能量 6.2、11.5、5.97 mJ 的激光输出。为了获得高能量的脉冲,这些报道均采用了大芯径的掺杂光纤,但通常输出光束的质量较差。固体激光技术国家级重点实验室的冯宇彤等^[10]、国防科技大学的 Wang 等^[11]分别报道了采用全光纤结构获得平均功率达到 102.5 W 和 280 W 的脉冲激光,所获得的单脉冲能量仅为 2.05 mJ 和 28 μ J。

本文采用了全光纤结构,获得了结构紧凑、稳定

性好的脉冲激光器。通过声光调 Q 获得低功率脉冲种子光源,通过两级双包层光纤放大器进行功率放大,放大器均采用前向抽运,在 40 kHz 的重复频率下,获得了平均功率为 105 W、脉冲宽度为 2.4 μ s 的脉冲输出,并且在输出衍射极限光束质量(M^2 因子为 1.2)的情况下,获得了 2.63 mJ 的高脉冲能量。

2 实验装置

图 1 为基于 MOPA 方式工作的脉冲光纤激光器结构示意图。采用的种子激光器是自行搭建的脉冲光纤激光器,利用两个光纤布拉格光栅(FBG)作为谐振腔镜,增益介质使用纤芯直径为 10 μ m、内包层直径为 125 μ m 的掺 Yb³⁺ 双包层光纤(YDDCF),光纤长度为 3 m。利用输出功率为 9 W、中心波长为 976 nm 的光纤耦合多模激光二极管(LD)进行抽运。在谐振腔内插入光纤耦合声光调制器(AOM)作为声光 Q 开关实现高重复频率脉冲的输出,声光调制器利用信号发生器的射频信号进行驱动。由种子光获得的脉冲激光平均功率约为 500 mW。

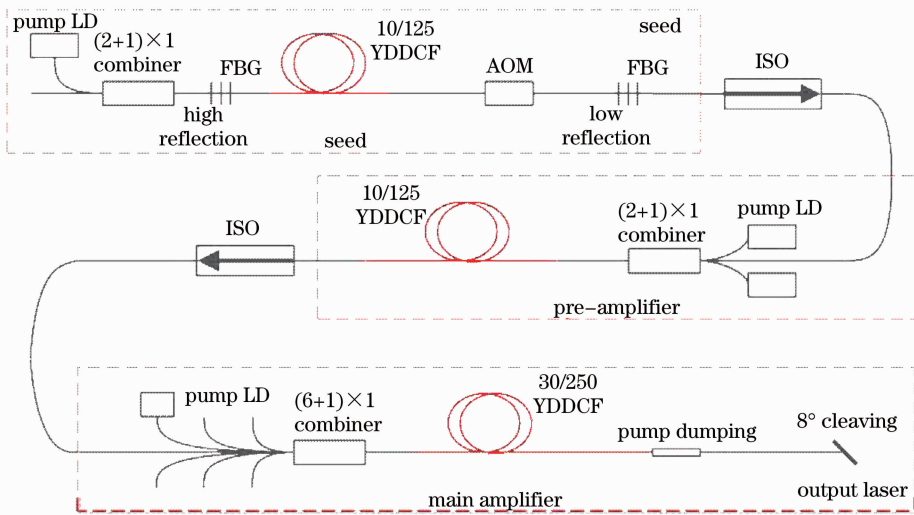


图 1 基于 MOPA 全光纤结构掺 Yb³⁺ 激光器结构图

Fig. 1 Experimental setup of all-fiber Yb-doped laser based on MOPA structure

第一级预放大器的作用是对种子激光器的小功率信号进行预放大。预放大器的抽运源是两个中心波长为 976 nm、最大输出功率为 9 W 的激光二极管,它们通过一个(2+1)×1 的合束器耦合进增益光纤中,增益光纤的输出端加入一个光隔离器(ISO)保护前级。预放大器的增益光纤为纤芯直径和內包层直径分别为 10 μ m 和 125 μ m 的掺 Yb³⁺ 双包层光纤,其內包层数值孔径为 0.46,纤芯数值孔径为 0.075,光纤长度为 4 m。预放大器将种子光

信号放大到 10 W。

第二级放大器为主放大器。其中增益光纤为纤芯直径 30 μ m、內包层直径 250 μ m 的双包层掺 Yb³⁺ 光纤,其內包层数值孔径为 0.46,纤芯数值孔径为 0.07,光纤长度为 2 m。抽运源为一个中心波长为 976 nm、最大输出功率为 240 W 的多模尾输出激光二极管。抽运光和信号光通过一个(6+1)×1 合束器耦合进增益光纤。为了泄漏掉没有完全吸收的抽运光,在增益光纤的输出之前做了包层光滤

除处理。最后的光纤输出端切 8° 斜角以避免端面反射引起的自激振荡。

3 实验结果与分析

当重复频率为 40 kHz 时,种子光的输出功率约为 500 mW,脉冲宽度为 1.2 μ s,中心波长为 1064 nm。将信号光耦合进预放大器中进行放大,得到预放大器的输出功率为 10 W,脉冲宽度为 2 μ m,中心波长为 1064 nm。预放大器输出的波形经过工作波长为 1064 nm 的隔离器之后输入主放大器,最终得到高能量的脉冲激光输出。

在种子激光器和预放大器开启并稳定工作的条件下,运行主放大器。通过调节抽运 LD 的驱动电流,达到调节抽运功率的目的,并且由此得到放大器输出平均功率随抽运功率的变化曲线,如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着抽运功率的提升,放大器的斜率效率逐渐上升,并且当抽运功率超过 170 W 之后,输出激光平均功率随抽运光功率变化曲线的线性增加,并且在更高功率条件下并没有发生饱和的趋势。其中当输出平均功率为 100 W 时,放大器的斜率效率约为 41%。

用 Yokogawa 公司生产的 AQ6370C 型光谱仪对输出光进行光谱测试,测量得到的主放大器直接输出的光谱如图 3 所示。图线为预放大器输出光谱(蓝线)与主放大器输出光谱(红线)的对比图。可以看到,在输出平均功率为 105 W 时,在 1040~1060 nm 范围内可以观察到比较明显的自发放大辐射(ASE),其与信号光峰值强度相差约 25 dB。而受激拉曼散射或受激布里渊散射等非线性效应或者由抽运光引入的其他频谱分量未在光谱上观察到。

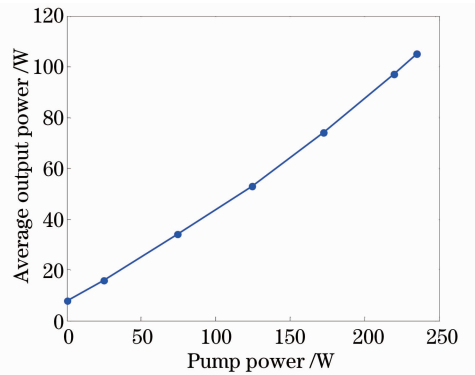


图 2 输出平均功率随抽运光功率变化

Fig. 2 Average output power versus pump power

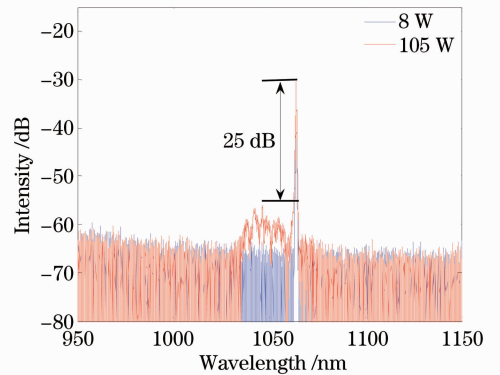


图 3 输出激光的光谱

Fig. 3 Spectrum of output laser

图 4(a)为在不同的输出平均功率下,利用 Tektronix 公司生产的 DPO4104B 型示波器测试的放大器输出的单脉冲形状波形图。从图 4 可以看出,对比不同输出功率时候的波形可以看到在抽运功率提升的过程中,单脉冲形状并没有发生畸变,由于种子激光器产生的并不是单一波长的种子激光,故存在群速度色散效应,进而使得脉冲在放大过程中发生了展宽。主放大器的输出脉冲波形序列如

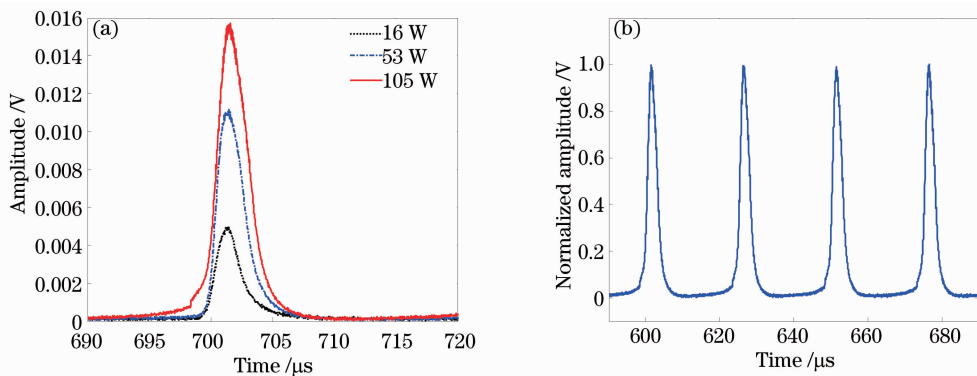


图 4 (a)不同输出功率下的单脉冲波形; (b)主放大器输出 105 W 时域波形

Fig. 4 (a) Pulse shapes of main amplifier under different output average powers; (b) time domain waveform under output average power of 105 W

图 4(b)所示。其中主放大器输出脉冲的重复频率为 40 kHz,输出脉冲激光信号的脉宽为 2.4 μs ,平均功率达到 105 W,峰值功率约为 1.1 kW,脉冲能量达到 2.63 mJ。

当输出功率为 105 W 时,对输出激光的光斑和

光束质量进行了测量。图 5(a)是使用光束质量测量仪测得的光束质量三维(3D)图样,内嵌的小图是使用 CCD 拍摄的输出光斑形态,光斑图样由 BeamGage 软件生成。可以看到输出光斑形态较好,没有出现旁瓣。输出激光的 M^2 因子为 1.2。

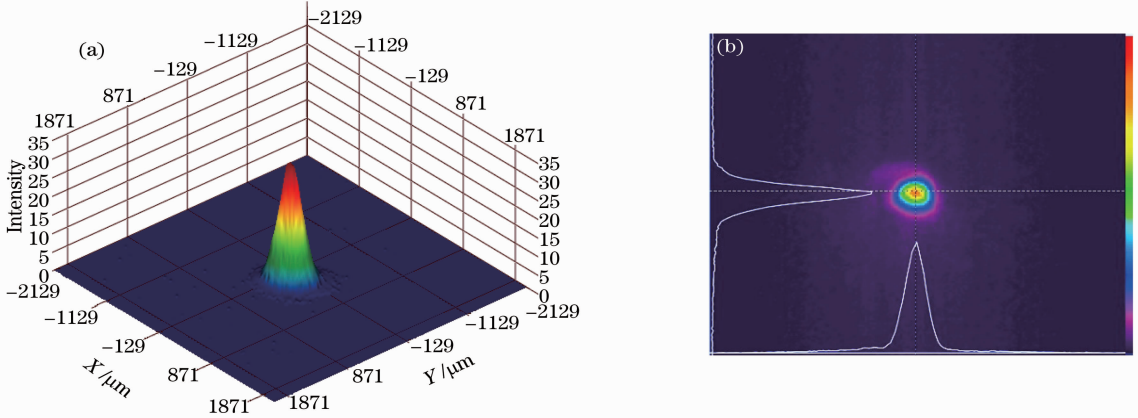


图 5 (a)输出光束质量测量与(b)输出光斑图样

Fig. 5 (a) Output beam quality and (b) output beam pattern

4 结 论

通过光纤型声光调制器和光纤光栅搭建了脉冲种子激光器,采用预放大器与主放大器两级放大产生高能脉冲激光。获得了平均功率为 105 W、重复频率为 40 kHz、脉宽约为 2.4 μs 、脉冲能量达到 2.63 mJ 的高能脉冲激光输出。在不断增加抽运功率的过程中,输出脉冲的脉宽有一定程度的展宽。没有在输出光谱上观察到非线性效应和抽运光,而在 1040~1060 nm 区域观察到明显的放大自发辐射。获得的脉冲能量接近了主放大器增益光纤的最大可提取能量,可以尝试改变种子光源的特性或者更换光纤来实现平均功率和脉冲能量的进一步提升。最终的输出光斑形态较好,测量的 M^2 因子为 1.2。

参 考 文 献

- 1 D J Richardson, J Nilsson, W A Clarkson. High power fiber lasers; current status and future perspectives [J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- 2 Duan Yunfeng, Huang Bangcai, Zhang Peng, *et al.*. The research and application of pulse fiber laser with high-energy output [J]. Optical Communication Technology, 2006, 30(8): 55-57.
- 3 段云锋, 黄榜才, 张 鹏 等. 高能脉冲光纤激光器的研究进展及其应用[J]. 光通信技术, 2006, 30(8): 55-57.
- 3 Zhao Xin. High-power pulsed laser technology and its application in the field of industrial [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013, (4): 141-143.
- 4 赵 鑫. 高功率脉冲激光技术及其在工业领域的应用[J]. 装备

制造技术, 2013, (4): 141-143.

- 4 Su Rongtao, Zhou Pu, Xiao Hu, *et al.*. MOPA structured single-frequency nanosecond pulsed laser in all fiber format [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102011.
- 栗荣涛, 周 朴, 肖 虎, 等. MOPA 结构的单频纳秒脉冲全光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102011.
- 5 J Limpert, S Höfer, A Liem, *et al.*. 100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. Appl Phys B, 2002, 75(4-5): 477-479.
- 6 Li Yao, Zhu Chen, Wang Xiongfei, *et al.*. Experimental study on hundred-watt output power high repetition rate narrow pulse duration fiber lasers [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 281-284.
- 李 尧, 朱 辰, 王雄飞, 等. 百瓦级高重复频率窄脉宽光纤激光器实验研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 281-284.
- 7 Zhang Hanwei, Wang Xiaolin, Zhou Pu, *et al.*. 6 mJ, high-average-power, all-fiberized Q-switched fiber master oscillator power amplifier with low repetition rate [J]. Appl Opt, 2012, 51(29): 6933-6936.
- 8 Fang Qiang, Qin Yuguo, Wang Bo, *et al.*. 11 mJ all-fiber-based actively Q-switched fiber master oscillator power amplifier [J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(11): 115103.
- 9 Zhou Cuiyun, Liu Yuan, Zhu Ren, *et al.*. High-energy nanosecond all-fiber Yb-doped amplifier [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(8): 081403.
- 10 Feng Yutong, Wang Xiongfei, Zhu Chen, *et al.*. Experiment research of 100 W, all-fiber acousto-optic Q-switched fiber laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1444-1448.
- 冯宇彤, 王雄飞, 朱 辰, 等. 100 W 全光纤声光调 Q 光纤激光器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1444-1448.
- 11 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Su Rongtao, *et al.*. A 280 W high average power, single-frequency all-fiber nanosecond pulsed laser [J]. Laser Phys, 2013, 23(1): 015101.