

文章编号: 0258-7025(2009)02-0281-04

百瓦级高重复频率窄脉宽光纤激光器实验研究

李尧 朱辰 王雄飞 林佶翔 赵鸿

(固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015)

摘要 报道了一种基于主振荡-功率放大(MOPA)方式工作的脉冲光纤激光器。为了获得高重复频率、高峰值功率、高光束质量的激光输出,以自行研制的小型激光二极管(LD)抽运声光 Q 开关 Nd:GdVO₄ 固体激光器作为种子源,采用两级掺 Yb 双包层光纤串联结构(光纤纤芯直径分别为 20 μm 和 80 μm),对注入功率为 2 W 的种子激光信号进行放大。最终获得了平均功率 103 W 的脉冲激光输出,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 12.7 ns,峰值功率达 162 kW,光束质量 $M^2 = 4.3$ 。

关键词 激光器;光纤激光器;高重复频率;窄脉宽;主振荡-功率放大

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0281

Experimental Study on Hundred-Watt Output Power High Repetition Rate Narrow Pulse Duration Fiber Lasers

Li Yao Zhu Chen Wang Xiongfei Lin Jixiang Zhao Hong

(National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100015, China)

Abstract A pulsed fiber laser based on master-oscillator power amplifier(MOPA) architecture is reported. In order to get a high repetition rate, high peak power, and high beam quality laser, a laser diode(LD) pumped acoustic-optic Q-switched Nd:GdVO₄ solid-state laser is used as a seed source. The seed laser with output power of 2 W is amplified by Yb-doped double-cladding fibers in two stages whose core diameters are 20 μm and 80 μm. At repetition rate of 50 kHz, average output power of 103 W is generated. The highest peak power is up to 162 kW, pulse duration is 12.7 ns, and M^2 value is 4.3.

Key words lasers; fiber laser; high repetition rates, narrow pulse duration; master-oscillator power amplifier

1 引言

光纤激光器是指用纤芯中掺入稀土元素的光纤作为激光增益介质,通过激光二极管(LD)抽运实现激光输出的全固态激光器。光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、工作寿命长、热管理简单、结构设计灵活等诸多优点,因此成为目前国内外固体激光技术研究的热点之一。

相对于连续光纤激光器而言,脉宽为纳秒级的高重复频率脉冲光纤激光器在工业加工、医疗卫生、生化检测、科学研究、军事国防等许多领域都有广阔的应用前景^[1,2]。2002年,Limpert等^[3]以调Q Nd:YAG 固体激光器作为种子源,利用芯径 30 μm 的掺 Yb 大模场光纤进行放大,获得了平均功率 100

W,光束质量近衍射极限的脉冲激光输出,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 90 ns;2007年,美国 IPG Photonics 公司报道了平均功率达 500 W,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 200~1000 ns 的 YLP-HP 系列脉冲光纤激光器产品^[4];2005年,Kong等^[5]通过芯径 43 μm 的高掺杂浓度掺 Yb 双包层光纤对调 Q 脉冲激光器种子源进行放大,在重复频率为 100 kHz 时,获得了平均功率达 133.8 W 的激光输出,脉冲宽度 400 ns。

在许多实际应用中,要求激光光源在具有高重复频率和高光束质量的同时,还要有很高的峰值功率。压窄脉宽是获得高重复频率的一种行之有效的技术。但是由于非线性效应、放大自发辐射及光纤

收稿日期:2008-06-19;收到修改稿日期:2008-07-11

作者简介:李尧(1977—),女,北京人,工程师,硕士,研究方向为大功率光纤激光器和光纤放大器。

E-mail: nkliyao@yahoo.com.cn

端面激光损伤等因素的影响,采用光纤激光器实现窄脉宽高功率激光输出难度较高。尽管脉冲光纤激光器的输出功率已可达到百瓦量级,但脉宽普遍较宽,因此峰值功率难以进一步提高。

本文采用一种基于主振荡—功率放大(MOPA)方式工作的光纤激光放大结构,通过两级串联的双包层光纤,对注入功率为 2 W 的种子激光

信号进行放大,获得了较为满意的结果。

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(AOM 为声光调制器,ISO 为隔离器)。

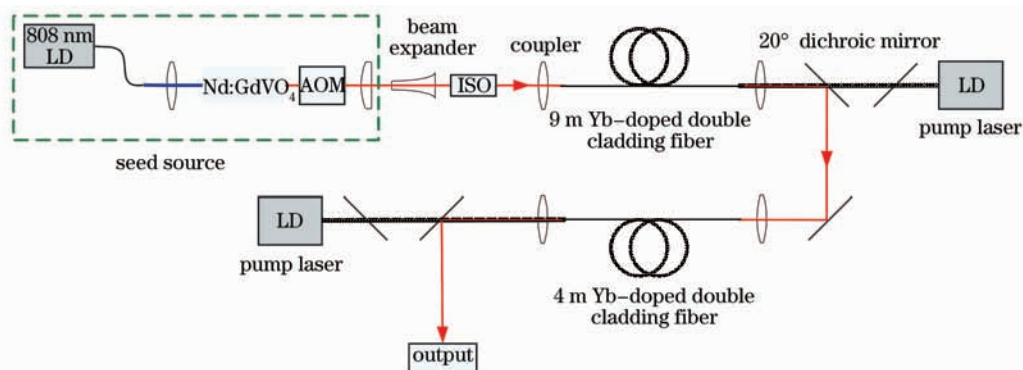


图 1 脉冲光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of pulsed fiber laser

实验中种子源为自行研制的小型激光二极管抽运声光 Q 开关 Nd:GdVO₄ 固体激光器。采用 CW20 W 光纤耦合激光二极管抽运 Nd:GdVO₄ 晶体,利用声光 Q 开关腔内调制实现高重复频率脉冲激光输出。为了获得较窄的脉冲宽度和较高的光束质量,采用了压缩腔长和小孔选模措施。当抽运功率为 12 W 时,种子源激光器实现波长 1063.2 nm,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 14.5 ns,平均功率为 2 W 的脉冲激光输出,光束质量 M^2 为 1.6。

两级光纤放大均采用后向抽运方式,即信号光与抽运光分别从双包层光纤两端耦合进光纤,这种结构有利于光纤放大器获得较高的放大倍数和输出功率。

一级放大系统用于对种子源弱信号光的预放。为了在对信号光进行有效放大的同时保证激光的光束质量,一级放大系统中采用的增益光纤为纤芯直径 20 μm 的掺 Yb 双包层光纤。由于光纤纤芯直径较小,无需采取特殊措施即可获得较好的光束质量。增益光纤的其他参数为:纤芯数值孔径 0.06,包层对 975 nm 抽运光的吸收系数为 1.7 dB/m;内包层形状为八角形,直径 400 μm ,数值孔径 0.46。实验中一级增益放大光纤的长度为 9 m。

二级放大系统的主要目的是获得高功率激光输出。由于较细的纤芯直径(如 20 μm)和较长的光纤长度(如 10 m)容易在高峰值功率激光放大时

引起诸如受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)等非线性效应^[6,7]和光纤端面激光损伤,从而限制脉冲光纤激光器输出功率的进一步提高。增大纤芯直径、减少增益光纤长度是解决上述问题的有效方法,因此为了获得高峰值功率激光输出,二级放大系统中采用了大纤芯直径、高掺杂浓度的短光纤作为增益光纤。光纤的纤芯直径达 80 μm ,纤芯数值孔径 0.06,吸收系数约 6 dB/m@920 nm;内包层直径 400 μm ,数值孔径 0.46。二级增益光纤的长度为 4 m。

为获得高峰值功率激光输出,二级放大系统中采用了大纤芯直径的高掺杂浓度双包层光纤。虽然减弱了非线性效应,但是同时使光纤激光器的光束质量下降。光纤激光器的光束质量因子 M^2 可表示为

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \cdot d_0 \cdot \theta, \quad (1)$$

式中 d_0 为物方空间光束束腰直径, θ 为光束发散角, λ 为光波波长。根据(1)式,考虑到衍射效应,经二级增益光纤放大后,输出激光的 M^2 将大于 7。为了抑制大芯径光纤的高阶模输出,采用盘绕二级增益光纤的弯曲损耗滤波技术^[8]来抑制高阶模式。

实验中一级放大抽运源工作波长为 975 nm,二级放大抽运源工作波长为 940 nm。两级抽运源的最大抽运功率均为 250 W,通过光学抽运耦合系统

将抽运光耦合进双包层光纤的内包层。20°双色镜对 975 nm 高透,对 1060 nm 高反。为了防止光纤端面 4% 的菲涅耳反射引起自激振荡,双包层光纤的端面需抛磨成大角度斜角。

实验中利用光功率计(EPM1000)测量光纤激光器的平均功率,用光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6317C)和数字示波器(Tektronics TDS3054B)来监测输出激光的光谱特性及脉冲波形。

3 实验结果

种子源输出的信号光平均功率为 2 W,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 14.5 ns。将信号光耦合进一级增益光纤中进行放大。为了使信号光在一级放大后获得较好的输出性能,将一级放大抽运源的抽运功率增加至 23 W,此时经一级放大后脉冲激光输出功率达 10.8 W,脉冲宽度 14.7 ns,重复频率 50 kHz,中心波长与信号光波长相同,为 1063.2 nm。由于增益光纤纤芯直径较小,为 20 μm,因此无需采取特殊措施输出激光就可获得较好的光束质量。利用 Spiricon 公司生产的 M²-200 软件进行测试,输出激光光束质量因子 M² = 1.5,如图 2 所示。

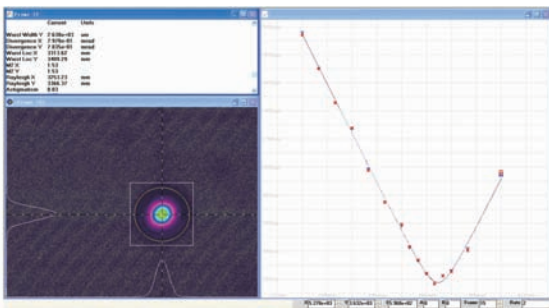


图 2 一级放大后输出激光的光束质量
Fig. 2 Beam quality of output laser after 1st stage amplification

将一级放大激光耦合入二级增益光纤。为了获得较好的光束质量,将二级增益光纤盘绕成直径为 140 mm 的圆环。逐渐增大二级抽运功率,当抽运功率为 224 W 时,最终获得了平均功率为 103 W 的脉冲激光输出,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 12.7 ns,斜率效率为 43.4%。二级放大系统激光输出功率随抽运功率的变化如图 3 所示,没有出现输出激光的增益饱和现象,因此若增加二级放大系统的抽运功率,将有可能实现更高功率的激光输出。

利用 M²-200 软件进行测试,输出激光的光束质量 M_x² = 4.61, M_y² = 4.12,平均值 M² 为 4.3,如图 4 所示。

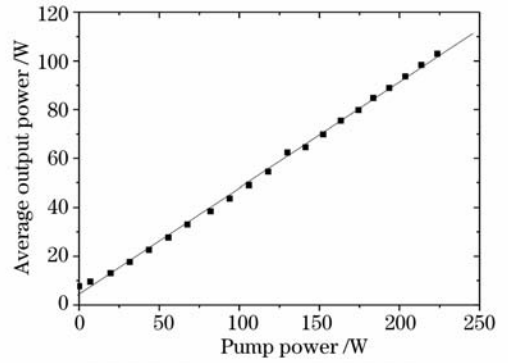


图 3 输出功率与二级抽运功率的关系曲线
Fig. 3 Average output power as a function of 2nd pump power

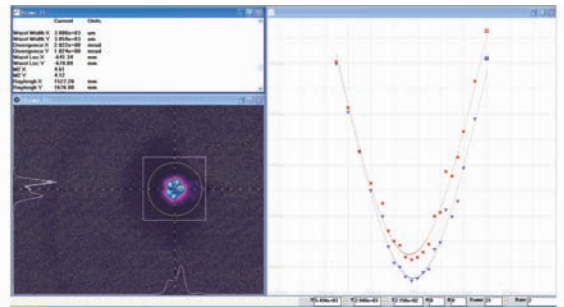


图 4 二级放大后输出激光的光束质量
Fig. 4 Beam quality of output laser after 2nd stage amplification

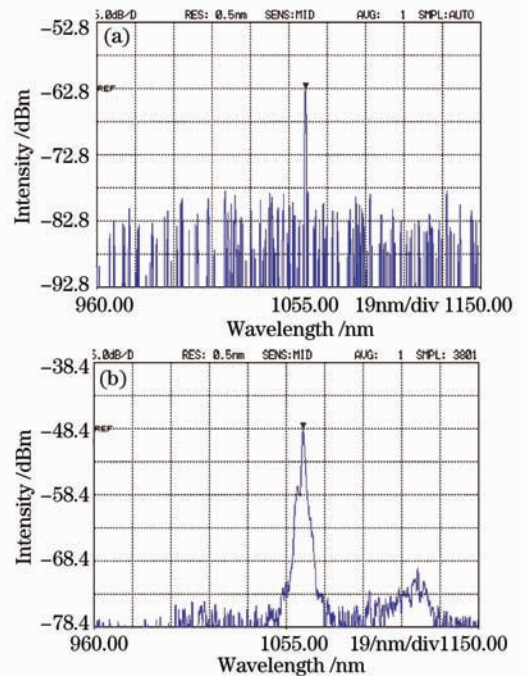


图 5 放大前后的激光光谱
(a) 种子源信号光输出光谱;(b) 放大激光输出光谱
Fig. 5 Emitted spectra before and after amplification
(a) seed source;(b) output laser

图 5 为种子源输出的信号光光谱和经两级放大后输出激光的光谱。激光的中心波长为 1063.2 nm。经过两级放大后,激光光谱发生展宽,这是由自相位调制引起的。同时,激光光谱中 1130 nm 处出现了一个发射峰,由 SRS 引起。这是因为石英光纤中拉曼增益峰对应的频移为 13 THz^[9],经过计算,该频移对应的发射峰正好位于 1113 nm。但是该发射峰较微弱,与输出激光的强度相差 20 dB 以上。没有发现明显的后向传输的信号光,因此可以排除 SBS。

光纤端面损伤是限制光纤激光器功率提高的另一个重要因素。实验中,对光纤端面进行了精密抛光处理,在系统实现百瓦量级输出时,光纤端面未发生损伤。此时光纤端面承受的单脉冲能量为 2 mJ,峰值功率密度达到 3 GW/cm²。

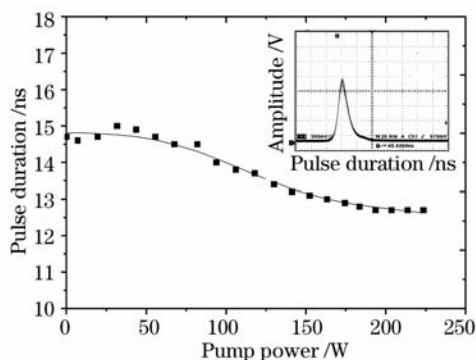


图 6 输出激光脉冲宽度随抽运功率的变化
(插图为输出激光脉冲波形)

Fig. 6 Pulse duration of laser as a function of pump power. inset: pulse waveform of laser

使用 PIN 管探测器和数字示波器监控输出激光的脉冲波形,图 6 为激光脉冲宽度随抽运功率的变化曲线。随着抽运功率的增加,脉宽有轻微的压窄现象。

4 结 论

通过 MOPA 结构,对 2 W 信号光进行两级放

大,最终获得了重复频率 50 kHz,脉冲宽度 12.7 ns,平均功率为 103 W 的脉冲激光输出,峰值功率达 162 kW,激光光束质量 $M^2 = 4.3$ 。下一步的工作重点是研究采取更为有效的技术手段和方法,在保证高重复频率、高峰值功率激光输出的前提下,进一步提高激光器的光束质量。

参 考 文 献

- 1 J. Swiderski, A. Zajac, M. Skorczakowski. Pulsed ytterbium-doped large mode area double-clad fiber amplifier in MOFPA configuration[J]. *Opto-Electronics Review*, 2007, **15**(2): 98~101
- 2 Lou Qihong, Zhou Jun, Kong Lingfeng *et al.*. Recent progress of high power pulsed double cladding fiber lasers[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(4): 511~515
楼祺洪,周 军,孔令峰等.高功率脉冲双包层光纤激光器的新进展[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(4): 511~515
- 3 J. Limpert, S. Hofer, A. Liem *et al.*. 100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**: 477~479
- 4 IPG photonics announces major expansion of ytterbium pulsed fiber laser offerings[R]. www.ipgphotonics.com
- 5 Kong Lingfeng, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. 133 W pulsed fiber amplifier with large mode area fiber[J]. *Opt. Eng. Lett.*, 2006, **45**(1): 010502
- 6 Hu Shuling, Zhang Chunxi, Gao Chunqing *et al.*. Stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering effects in ytterbium doped double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 6~10
胡姝玲,张春熹,高春清等.包层抽运掺镱光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 6~10
- 7 Chen Jixin, Sui Zhan, Chen Fushen *et al.*. Stimulated Raman scattering in high power double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 298~302
陈吉欣,隋 展,陈福深等.高功率双包层光纤激光器的受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 298~302
- 8 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Influence of bending diameter on the output capability of multimode fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 323~326
李立波,楼祺洪,周 军等.弯曲直径对多模光纤激光器输出性能的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 323~326
- 9 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 2nd ed.. San Diego, CA: Academic, 1995. 187~191