

文章编号: 0258-7025(2009)07-1876-04

基于国产大模场面积双包层光纤的高重复频率纳秒脉冲光纤放大器

刘 侠^{1,2} 杜松涛¹ 薛宇豪^{1,2} 周 军^{1*} 何 兵¹
楼祺洪¹ 董景星¹ 魏运荣¹ 宁 鼎³ 潘 蓉³

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039; ³ 中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

摘要 以单模 1064 nm 激光二极管(LD)光纤级联放大构成的全光纤化模块为种子光源,以国产大模场面积(LMA)双包层掺镱光纤为放大器,构成了高重复频率纳秒脉冲主振荡功率放大(MOPA)系统。实现了平均功率为 59 W 的脉冲放大激光输出,中心波长 1064 nm,脉冲宽度 22.7 ns(重复频率 50 kHz 时),重复频率 50~150 kHz 连续可调。实验研究了激光脉冲的时域和光谱特性,分析了光纤功率放大对激光脉冲波形的影响。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 大模场面积光纤; 主振荡放大; 高重复频率

中图分类号 TN253; TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1876

High Repetition Rate Nanosecond Pulse Fiber Amplifier Based on China-Made Large-Mode-Area Fiber

Liu Xia^{1,2} Du Songtao¹ Xue Yuhao^{1,2} Zhou Jun^{1*} He Bing¹
Lou Qihong¹ Dong Jingxing¹ Wei Yunrong¹ Ning Ding³ Pan Rong³

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

³ The 46th Research Institute, China Electronic Technology Group Company, Tianjin 300220, China

Abstract A pulse master oscillator power amplifier (MOPA) system, which can provide high repetition rate and nanosecond pulse laser, was constructed by China-made large-mode-area(LMA) fiber and single mode 1064 nm laser-diode(LD) with fiber cascaded amplification system used as seed laser. The system generates up to 59 W average power of amplified radiation at a wavelength of 1064 nm with pulse duration of 22.7 ns(at 50 kHz repetition rate) and adjustable repetition frequency of 50~150 kHz. Some basic characteristics of this system, including the pulse temporal characteristics as well as the emission spectrum characteristics are investigated experimentally, and the impacts of the power amplification of the fiber to the pulse duration are analyzed.

Key words laser technique; fiber laser; large-mode-area fiber; master oscillator power amplifier; high repetition rate

1 引 言

近年来,随着半导体激光抽运技术和双包层光

纤制作工艺的发展,高功率双包层光纤激光器及放大器发展迅速,已成为当今激光领域关注的热点之

收稿日期: 2009-03-09; 收到修改稿日期: 2009-03-25

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03Z405)资助课题

作者简介: 刘 侠(1982—),男,博士研究生,主要从事光纤激光倍频技术及光纤激光放大技术等方面的研究。

E-mail: liuxiamail@gmail.com

导师简介: 楼祺洪(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器及固体激光器等方面的研究。

E-mail: qhlou@mail.shenc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn

一。其中,脉冲光纤激光与连续激光相比具有更高的峰值功率,更有利于实际应用,同时保持了光纤激光在效率、体积、光束质量等方面的优势,正广泛应用于医疗、激光加工、激光雷达、太空通信等领域^[1-2],尤其是高平均功率、高重复频率的脉冲光纤激光在精密激光加工等领域中有着重要应用。由于光纤激光器的介质是细长的光纤,较难通过调 Q 等方式实现高平均功率的脉冲输出,而基于主振荡功率放大(MOPA)技术的脉冲光纤放大器则具有斜率效率高、输出脉冲特性可通过种子光源控制等优点,因而成为当前获得高平均功率、高重复频率脉冲激光输出的主要方式。

基于 MOPA 结构的高平均功率、高重复频率纳秒脉冲光纤激光器,国内外已经有文献报道。2002 年,德国 Limpert 等^[3]获得了重复频率 50 kHz(脉冲能量 2 mJ),脉冲宽度 80 ns 和平均功率高达 100 W 的 1064 nm 脉冲光纤激光。2005 年,Cheng 等^[4]获得了可实现脉冲宽度分别为 500 ns(脉冲能量为 82 mJ),50 ns(脉冲能量为 27 mJ)或 4 ns(峰值功率为 2.4 MW)的高能量、高峰值功率纳秒光纤激光放大系统。中国科学院上海光学精密机械研究所和中国电子科技集团公司第 46 研究所等也展开了相应的研究^[5-7]。

本文基于 MOPA 技术,采用国产大模场面积(LMA)掺镱双包层光纤为放大器,获得了高平均功率、高重复频率的纳秒脉冲激光输出。其中,种子光源采用单模光纤级联放大的技术方案获得,其脉冲宽度约为 20 ns,重复频率 50~200 kHz 连续可调、

平均功率 0~2.5 W 连续可调。在种子光源输出平均功率为 2 W 时,经大模场面积双包层光纤功率放大后获得平均功率 59 W,脉冲宽度 22.7 ns(重复频率 50 kHz 时)和重复频率 50~150 kHz 连续可调的 1064 nm 脉冲激光输出。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。种子光源是采用单模 1064 nm LD 光纤级联放大的技术方案获得的脉冲宽度约为 20 ns,重复频率 50~200 kHz 连续可调和平均功率 0~2.5 W 连续可调的脉冲光纤激光模块(如图 1 中虚线框所示)。该种子光源中所有光学元件均通过光纤熔接技术连接,实现了种子光源的全光纤化。其中,LD Seed 是采用连续可调纳秒脉冲驱动电源^[8]驱动的单模带尾纤输出的半导体激光模块,由 LD Seed 产生的初始信号光经过 2 级单包层光纤 SM Yb-fiber 1 和 SM Yb-fiber 2 和 1 级双包层光纤 YDCF 的放大后获得准直输出的种子激光。为了避免背向散射等反向传输光放大对种子光源的影响,在 LD Seed 与单包层光纤第 1 级放大间以及单包层光纤第 2 级放大与双包层光纤放大级之间分别置有光隔离器 ISO1 和 ISO2,而前 2 级单包层光纤放大级之间只需置入滤除抽运光的 filter 即可。不同放大级的抽运光分别由半导体激光模块 LD1, LD2, LD3 产生,并分别由 WDM1, WDM2, combiner 耦合进有源光纤内。最后,经双包层有源光纤放大的信号光通过透镜 lens 准直后直接输出。

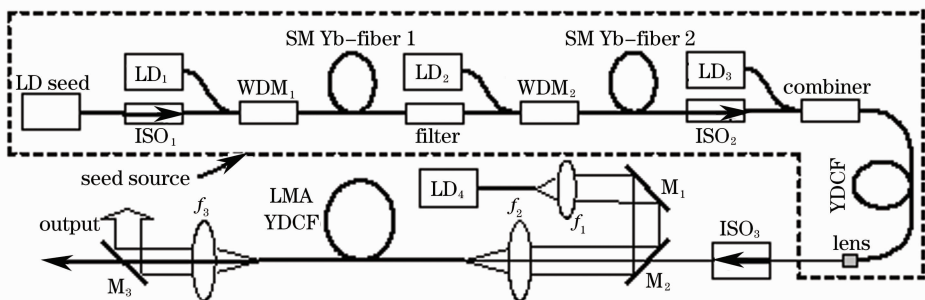


图 1 高重复频率纳秒脉冲光纤放大器的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of fiber amplifier of high repetition nanosecond pulse laser

从前述种子光源准直输出的种子激光通过非球面透镜 f_2 以空间耦合的方式进入功率放大级的国产大模场面积掺镱双包层光纤 LMA-YDCF 的纤芯。该大模场面积掺镱双包层光纤由中国电子科技集团公司第 46 研究所提供,光纤长度约为 4.5 m,纤芯直径为 95 μm ,数值孔径为 0.06,内包层为

560 μm /630 μm 的 D 形结构,数值孔径为 0.46。同样,为了避免背向散射等反向传输光放大对种子光源的影响,在功率放大级与种子光输出端之间放置高功率光隔离器 ISO₃。功率放大级的抽运光由尾纤输出的高功率半导体激光器 LD₄ 提供,其尾纤芯径 800 μm ,数值孔径为 0.22,抽运光经透镜 f_1 准直

后通过反射镜 M_1 (HR @ 975 nm) 和双色镜 M_2 (HT@1064 nm&HR@975 nm) 的调节使其与种子光共轴,并通过非球面透镜 f_2 耦合进有源光纤 LMA YDCF 的内包层。非球面透镜 f_2 起到将种子光高效耦合入纤芯,将抽运光耦合入内包层的作用,因此,其 2 个表面均镀有对 1064 nm 和 975 nm 光双增透的介质膜。为了抑制光纤端面的菲涅耳反射和放大自发辐射(ASE)光的自生振荡,掺镱双包层光纤 LMA YDCF 输出端处理为斜角,其后置有一透镜 f_3 对放大后的激光进行准直,该准直光束通过双色镜 M_3 (HT@1064 nm&HR@975 nm) 将剩余抽运光滤去,从而获得放大的中心波长为 1064 nm 的高重复频率、窄脉宽脉冲激光输出。

3 实验结果

3.1 种子光源的脉冲输出特性

在 MOPA 结构的脉冲激光放大器中,种子光的光束质量、光谱特性、重复频率、脉宽、峰值功率等性能直接影响放大后的输出激光的相关特性。因此,选择合适的种子光源至关重要。基于单模 LD 光纤

级联放大技术的种子光源由于其中的初始信号光是由电调制的单模 LD 提供,因此具有效率高、功耗小、结构紧凑等优点。尤其是基于该技术获得的种子光源往往具有高重复频率,脉宽、峰值功率可调的特点,特别有利于后续光纤功率放大的进行。因此,实验中采用基于该技术方案的种子光源。图 2 给出种子光源在重复频率为 50 kHz [图 2(a)] 和 150 kHz [图 2(b)] 时输出激光的单脉冲波形和脉冲序列。由于种子 LD 的脉冲特性由电路直接控制,在实验中,重复频率从 50~100 kHz 连续改变时,保持了种子光的平均功率为 2 W,脉冲宽度约为 20 ns。由图 2 可知,在不同的重复频率下,输出激光的脉宽基本没有变化,且均保持了下降沿较陡、上升沿较缓的不对称脉冲形状。这种信号光脉冲波形的不对称,是为了在经过后续高功率放大后获得对称脉冲波形而设计的。高功率抽运时光纤中的粒子数反转,当脉冲的前沿到达时易获得较高的增益,同时消耗部分上能级粒子数,这将使脉冲后沿到达时增益变小,脉冲前沿和后沿增益的不均衡将使得脉冲波形发生变化。

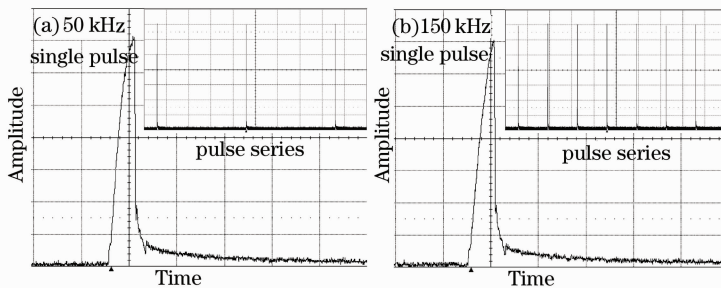


图 2 种子激光在不同的重复频率时的时域特性

Fig. 2 Temporal characteristics of seed pulse at different repetition rate

3.2 光纤功率放大器的输出特性

在实验中,保持种子光源的输出功率为 2 W 不变进行功率放大实验,在重复频率分别为 50 kHz, 100 kHz 和 150 kHz 时,测量功率放大后输出脉冲激光的平均功率随抽运功率的变化,实验结果如图 3 所示。由图 3 可知,在同一抽运功率下,3 种重复频率对应的输出脉冲激光平均功率基本一致,表明在这种高重复频率下,输出激光平均功率基本不随重复频率的变化而变化。实验测得,在抽运功率为 162 W 时,3 种重复频率下输出激光平均功率均约为 59 W,相应的斜率效率为 41%,同以往报道的其他文献相比,转换效率稍偏低。分析掺镱石英光纤的吸收特性可知,其在 975 nm 附近的吸收峰非常窄,抽运波长偏离 975 nm 将导致光纤的吸收效率

降低^[9]。实验中测量了输出功率为 162 W 时的抽运波长特性,发现抽运源工作在该输出功率时抽运光中心波长约为 967 nm,这将导致增益光纤对抽运光

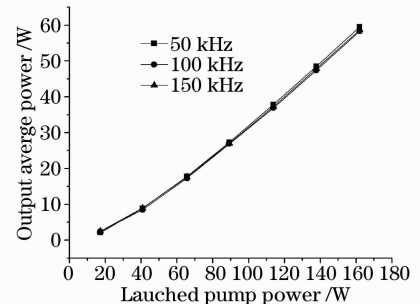


图 3 放大激光输出平均功率随抽运功率的变化关系

Fig. 3 Output average power of the fiber power amplifier versus launched pump power

的吸收效率大为降低,从而有大量抽运光未被吸收。因此若通过调节抽运源温度等措施,使抽运光中心波长接近 975 nm,转换效率将会得到很大提高。

实验中,采用国产的大模场面积、高掺杂双包层光纤,并配以光纤端斜面处理等工艺,很好地抑制了放大自发辐射、自激振荡等效应,获得了高平均功率的信号光放大输出。图 4(a)是重复频率为 100 kHz 时种子光和平均功率最高(59 W)时放大激光的光谱。放大激光的中心波长为 1064 nm,光谱带宽(FWHM)为 1.73 nm,种子光的光谱带宽为 1.54 nm,放大激光光谱与种子激光光谱基本一致,未见明显展宽。因此,通过增大抽运功率或改变抽运波长,该放

大器的输出平均功率还可以进一步提升。

实验中,保持种子光源脉冲宽度约为 20 ns,改变其重复频率,发现放大激光具有基本一致的脉冲宽度。图 4(b)给出 50 kHz 时通过示波器测得的种子光和平均功率最高(59 W)时的放大激光的脉冲特性曲线。由图 4(b)可知,经光纤功率放大后,激光脉冲的上升沿和下降沿变得较为对称。但脉冲宽度略有展宽,种子光的脉冲宽度为 19 ns,输出平均功率为 59 W 时脉冲宽度为 22.7 ns。是由于种子激光的脉冲形状不对称、上升沿时间较长所致,功率放大后的脉冲波形达到了设计要求。

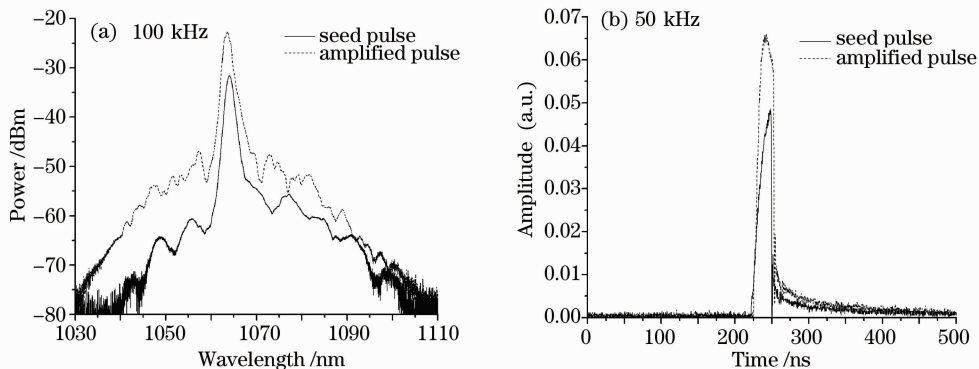


图 4 种子激光与放大激光的光谱(a)和时域特性(b)

Fig. 4(a) Spectrum (a) and temporal characteristics (b) of seed pulse and output pulse

4 结 论

采用基于单模 1064 nm LD 光纤级联放大技术获得的种子光源和国产大模场面积掺镱双包层光纤,通过 MOPA 技术,获得了平均功率为 59 W,脉冲宽度为 22.7 ns(重复频率 50 kHz 时)和重复频率为 50~150 kHz 连续可调的 1064 nm 脉冲激光输出。在该功率稳定运转时,未观察到光纤端面损伤、功率饱和等现象,而通过比较种子光和放大激光光谱也未发现 ASE 和自激振荡等现象。因此通过增大抽运功率或改变抽运波长,基于上述技术的国产大模场面积双包层光纤放大器有望获得更高平均功率的高重复频率脉冲激光输出。

参 考 文 献

- 1 M. W. Wright, G. C. Valley. Yb-doped fiber amplifier for deep-space optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1369~1374
- 2 V. Philippov, C. Codemard, Y. Jeong. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar application [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2590~2592

- 3 J. Limpert, S. Hofer, A. Liem *et al.*. 100-W average-power, high energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(4): 477~479
- 4 M. Y. Cheng, Y. C. Chang, A. Galvanauskas *et al.*. High-energy and high-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200-mm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers, [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4), 358~360.
- 5 L. Kong, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. 133-W pulsed fiber amplifier with large mode area fiber [J]. *Opt. Eng. Lett.*, 2006, **45**(1), 010502
- 6 Duan Yunfeng, Huang Bangcai, Zhang Peng *et al.*. All-fiber laser pulse amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1379~1382
- 段云锋,黄榜才,张 鹏等.全光纤结构的脉冲光纤放大器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1379~1382
- 7 S. Du, J. Zhou, F. Zhang *et al.*. 20-W average power, high repetition rate, nanosecond pulse with diffraction limit from an all-fiber MOPA system [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, **50**(10): 2546~2549
- 8 Zhang shouqi, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Design of drive circuit for continuously adjustable ns pulse LD [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 396~398
- 张寿祺,楼祺洪,周 军等.连续可调纳秒脉冲 LD 驱动电源的研制[J]. *激光技术*, 2008, **32**(4): 396~398
- 9 R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7): 1049~1056