

全光纤高峰值功率脉冲激光系统

林宏奂 王建军 邓颖 张锐 许党朋 朱娜 李晶 黄志华

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 报道了一种基于大模场光纤级联放大的全光纤高峰值功率纳秒脉冲产生系统。将单模光纤前端系统输出的 10 ns、100 nJ 任意整形脉冲输入由芯径 15、30、140 μm 的掺镱大模场光纤级联构成的光纤放大器放大, 获得了能量 3.2 mJ、峰值功率 0.3 MW 的整形纳秒脉冲。研究了该光纤系统极限输出能力, 在高斯脉冲注入的情况下实现了光纤系统 10 ns/7.2 mJ/0.7 MW 高能量和 1.16 ns/3.7 mJ/3.2 MW 高峰值功率输出。

关键词 激光器; 高功率光纤激光器; 大模场光纤放大器; 脉冲整形

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1202002

All Fiber High-Peak-Power Pulsed Laser

Lin Honghuan Wang Jianjun Deng Ying Zhang Rui Xu Dangpeng

Zhu Na Li Jing Huang Zhihua

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract An all fiber high peak power nanosecond pulsed source based on large mode area (LMA) fiber cascade amplification configuration is presented. 10 ns/100 nJ arbitrarily shaped pulses generated from a single mode fiber (SMF) front end are injected into a LMA fiber cascade amplifier. The amplifier is composed of LMA Yb doped fibers with core diameters of 15, 30 and 140 μm . By cascade amplification, shaped nanosecond pulse with 3.2 mJ pulse energy and 0.3 MW peak-power is obtained. The maximum output capacity of the fiber system is further studied. By injecting Gaussian pulse into the fiber amplifier, high energy of 10 ns/7.2 mJ/0.7 MW output and high-peak-power of 1.16 ns/3.7 mJ/3.2 MW output are obtained.

Key words lasers; high power fiber laser; large mode area fiber amplifier; pulse shaping

OCIS codes 140.3510; 060.2320; 060.3510; 140.3538

1 引 言

光纤脉冲产生系统具有技术先进、可编程控制、分束可靠、光纤传输灵活稳定、系统稳定可靠的特点,因此在激光驱动的惯性约束聚变中有很好的应用前景。特别是在惯性约束聚变的大型激光装置中,全光纤前端系统作为种子光源,已经发挥了巨大的作用^[1~3]。目前,全光纤光脉冲产生系统(即光纤前端系统)一般采用单模光纤(SMF)构建。而受限于单模光纤的芯径,光纤前端系统输出功率和能量水平有限,一般在几十瓦和几十纳焦水平,如美国国家点火装置(NIF)、我国的神光 III 原型装置和法国 LMJ 激光装置的全光纤系统等^[1~3]。必须采用固体高增益放大器提供 $10^6 \sim 10^8$ 的增益将脉冲放大至毫焦量级注入预放系统。由于固体高增益放大系

统的复杂性,要稳定、可靠、高增益地放大这样的脉冲,固体高增益放大器的研发难度和成本较大^[1,4]。

随着光纤技术的发展,特别是大模场光纤技术的发展,单束光纤输出脉冲峰值功率水平不断提高,研制输出峰值功率达兆瓦的光纤脉冲激光光源成为可能,输出最大脉冲能量已达 82 mJ^[5]。2008 年, Labaune 等^[6]提出了光纤放大器网络(FAN)的概念,采用全光纤放大器构成的网路将整形脉冲分束放大,单路脉冲输出能量约 10 mJ,共 10^7 路脉冲聚焦作用到靶丸上产生惯性约束聚变能(IFE),体现了高峰值功率脉冲光纤系统在直接驱动的 IFE 驱动器中的潜在应用价值。

然而,目前国内外高功率脉冲光纤系统采用桌面光学系统方式搭建,即增益介质采用光纤而包括

收稿日期: 2011-07-25; 收到修改稿日期: 2011-09-18

作者简介: 林宏奂(1978—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: Happylin2003@yeah.net

抽运耦合、信号输入、输出等却采用桌面光路系统,系统输出的稳定性、可靠性不能得到保障,制约了其应用潜力^[7~9]。

根据大型激光装置对光脉冲产生系统的需要,在大模场光纤放大器的研究基础上^[10],本文提出了一种基于大模场光纤级联放大的全光纤高功率纳秒脉冲产生系统。将单模光纤前端系统输出的 10 ns、100 nJ 脉冲输入由 15、30、140 μm 掺镱大模场光纤级联构成的放大器放大,获得了能量 3.2 mJ、峰值功率 0.3 MW 的整形纳秒脉冲。在高峰脉冲注入的情况下实现了 10 ns/7.2 mJ/0.7 MW 高能量和 1.16 ns/3.7 mJ/3.2 MW 高功率的输出,得

到了全纤化、无界面化的高能量高功率纳秒脉冲输出。由于单模光纤前端系统采用任意波形发生器获得任意整形脉冲输出,因此系统输出的高功率光脉冲具有可编程整形的能力,可进一步应用于大型激光装置和 IFE 驱动器。

2 实验装置

全光纤高功率脉冲激光光源的实验装置如图 1 所示。系统由单模光纤种子光源和功率光纤放大模块两部分组成。前者为系统提供任意整形的具有一定脉宽和带宽的种子脉冲激光,后者通过芯径逐级增大的放大器将输入的种子脉冲放大至数毫焦水平。

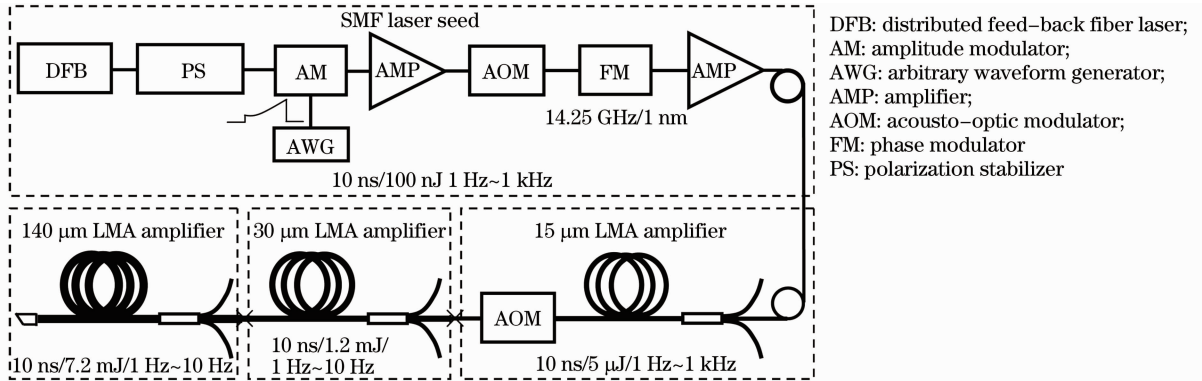


图 1 全光纤高功率激光光源结构

Fig. 1 Setup of the all fiber high power laser

单模光纤种子光源中,分布反馈(DFB)单纵模光纤激光器输出中心波长为 1053 nm、平均功率为 10 mW 的连续激光经过稳偏器(PS)输入幅度调制器(AM)。任意波形发生器(AWG)输出 10 ns 的任意整形电脉冲(整形精度为 200 ps)加到幅度调制器上削波产生任意整形的 10 ns 光脉冲。整形脉冲通过一级单模光纤放大器(AMP)(带宽为 3 nm,中心波长为 1053 nm)放大,经过声光调制器(AOM)(开关时间为 100 ns)抑制连续放大自发辐射(ASE)噪声后输入调制频率 14.25 GHz 的相位调制器(FM)展宽带宽至 1 nm,最后经过末级单模光纤放大器放大至 10 W/100 nJ。

功率光纤放大模块由芯径 15、30、140 μm 的大模场光纤放大器级联构成。其基本结构由 $(2+1) \times 1$ 抽运集束器、掺镱大模场光纤组成。抽运集束器抽运端为两根 105 μm /125 μm 的多模 975 nm 抽运光纤,与 975 nm 抽运光源的输出尾纤熔接;信号端为与前级放大器掺镱光纤芯径和内包层匹配的非掺杂光纤。15 μm 放大器掺镱光纤芯径 15 μm [数值孔径(NA)为 0.06],内包层芯径 130 μm (对角线

长),为八边形(NA 为 0.46),构成对 975 nm 抽运光的传输波导,光纤对 975 nm 抽运光的吸收为 6.5 dB/m,共 4 m 长。30 μm 放大器掺镱光纤芯径 30 μm (NA 为 0.06),内包层芯径 250 μm (对角线长),为八边形(NA 为 0.46),光纤对 975 nm 抽运光的吸收为 7.5 dB/m,共 4 m 长。140 μm 放大器掺镱光纤也为双包层结构,芯径 140 μm (NA 为 0.06),内包层芯径 400 μm ,为 D 形(NA 为 0.46),光纤对 975 nm 抽运光的吸收为 8 dB/m,共 3.5 m 长。为进一步抑制 ASE 噪声,15 μm 放大器输出与声光开关连接。声光开关由一对尾纤为 15 μm 匹配光纤的准直器和声光晶体构成。声光晶体置于一对准直器中间,在脉冲驱动下完成开关。其插入损耗为 2 dB,开关时间 145 ns,上升沿 45 ns。15 μm 、30 μm 放大器输出与下一级放大器的输入光纤匹配熔接,140 μm 放大器输出与一段直径 400 μm 的纯石英棒熔接,纯石英光棒端面切割成 8° 构成 End-cap,防止高功率脉冲对输出端面的损伤。

2.1 系统抽运方式的选择

目前高功率光纤系统大多采用连续抽运方式。

但对于采用全光纤无界面化的系统,连续抽运方式存在以下不足:大功率连续抽运光产生大量废热,系统在高功率脉冲运行时热管理难度增大,特别是抽运集束器对热敏感较易造成损伤。为避免上述问题,采用脉冲抽运的方式^[11],即采用与信号脉冲同步的 975 nm 数百微米宽的脉冲抽运。信号脉冲在抽运脉冲结束前被放大。这样连续抽运变成重复频率 1 Hz 到数千赫兹的抽运,显著降低了废热的积累,提高了系统的可靠性。目前系统采用 950 μs 宽的脉冲抽运掺杂光纤,140、30、15 μm 放大器采用的 975 nm 激光二极管(LD)输出的最高抽运峰值功率分别为 50、40、4 W。

2.2 系统输出光束质量的控制

系统末级光纤放大器芯径为 140 μm , NA 为 0.06,因此输出为多模,必然降低系统的输出光束质量。由于存在较多的高阶简并模式,其弯曲损耗差异不大,目前传统的弯曲损耗选模方式效果不理想。为了提高系统输出光束质量,采用光纤中心掺杂的方式进行模式选择,控制输出光束质量。

芯径 140 μm 掺铒光纤的整个纤芯区域并不像其他有源光纤那样全部掺杂,而是中心部分掺杂,掺杂区域为 90 μm ,约占芯径的 64%。这样脉冲在光纤中放大时,由于中心部分的掺杂,集中于纤芯中心的低阶模式获得增益远大于距离中心部分较远区域的高阶模式,距离中心部分较远区域的高阶模式传输时在损耗的作用下强度进一步降低,这样保证了光纤只存在中心区域的少数低阶模式,从而改善光纤输出的光束质量。

2.3 受激拉曼散射的抑制

受激拉曼散射(SBS)阈值功率可以表示为

$$P_{\text{cr}}^{\text{SBS}} \approx \frac{21K \cdot A_{\text{eff}}}{g_{\text{B}} L_{\text{eff}}} \cdot \frac{\Delta\nu_{\text{B}} + \Delta\nu_{\text{p}}}{\Delta\nu_{\text{B}}}, \quad (1)$$

式中 K 为偏振参量,对线偏振 $K=1$,对随机偏振 $K=2$,对其他情况, K 取 1 和 2 之间的值; A_{eff} 为有效模场面积; L_{eff} 为有效光纤长度; $g_{\text{B}}=5 \times 10^{-11}$ m/W 为 SBS 峰值增益系数; $\Delta\nu_{\text{B}}$ 为 SBS 增益带宽,取为 50 MHz; $\Delta\nu_{\text{p}}$ 为 SBS 过程的抽运光(即放大器中的信号光)带宽。对最后一级放大器,取光纤长度为 $L=3.5$ m,增益为 $G=8$,有效长度为 $L_{\text{eff}}=L(G-1)/\ln G \approx 11.8$ m。对随机偏振单频抽运光(即 $\Delta\nu_{\text{p}}=0$),SBS 的阈值功率约为 1100 W。SBS 反向传播脉冲被光纤多次放大而造成系统损伤,因此 SBS 是系统输出能量和功率受限的主要因素。

为提高 SBS 阈值,采用 14.25 GHz 相位调制器

将种子信号光谱展宽至 1 nm。根据(1)式,末级的 SBS 阈值约为 600 MW,因此采用相位展宽后 SBS 阈值大大提高,避免了 SBS 反向信号多次放大造成的系统损伤问题。

3 实验结果

3.1 整形脉冲输出结果

通过调节任意波形发生器使 15 μm 光纤放大器输出指数上升形状的激光脉冲波形,输入到后级 30 μm 和 140 μm 放大器放大,输出的波形如图 2 所示。由于增益饱和效应,整形脉冲前沿增益高于后沿,因此 30 μm 和 140 μm 放大器输出波形较输入波形发生加大的畸变。此时 15、30、140 μm 放大器输出能量分别为 2.2 μJ 、800 μJ 、3.2 mJ。

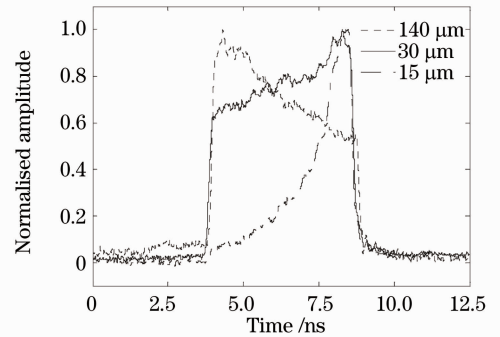


图 2 不同芯径光纤放大级输出波形

Fig. 2 Waveform measured from amplifiers with different core diameters

根据 Frantz-Nodvick 模型,激光器输出能量通量为

$$J_{\text{out}} = J_{\text{sat}} \log\{G_0 [\exp(J_{\text{in}}/J_{\text{sat}}) - 1] + 1\}, \quad (2)$$

输出对应的饱和通量为

$$J_{\text{sat}} = h\nu_s / [(\sigma_{\text{es}} + \sigma_{\text{as}})\Gamma_s], \quad (3)$$

式中 J_{in} 输入放大器的脉冲通量, G_0 为放大器的小信号增益, σ_{as} 、 σ_{es} 为增益介质的吸收、发射截面, Γ_s 为填充因子,一般取 0.85。由(3)式可知,15、30、140 μm 光纤放大器对应的饱和能量约为 77.9 μJ 、0.32 mJ、6.8 mJ。对比这 3 种放大器的输出能量,15 μm 和 140 μm 光纤放大器输出还没有达到饱和,30 μm 放大器输出则远超过饱和能量,其输出波形增益饱和和较为严重,是波形畸变的主要原因。

3.2 系统极限输出水平

改变 AWG 输出电脉冲形状为高斯脉冲,分别将脉宽 1、2、5、10 ns 的高斯形种子脉冲注入光纤系统得到系统不同脉宽注入下末级功率光纤放大器输出能量,如图 3 所示。其中 1、2、5、10 ns 宽高斯脉冲注入

情况下 30 μm 光纤放大器输出脉冲能量分别对应 0.6、0.7、1.0、1.2 mJ, 抽运峰值功率为 35 W。

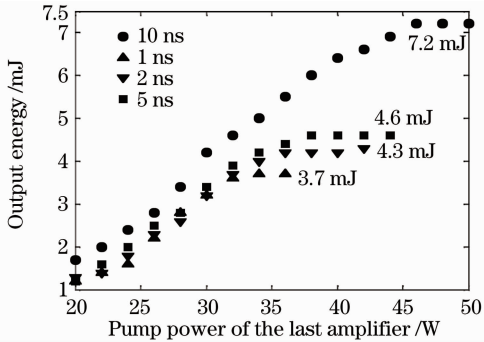


图 3 不同脉宽注入下末级功率光纤放大器的输出能量
Fig. 3 Output energy of the last amplifier at different input pulse durations

可以看出,随着末级 140 μm 光纤放大器抽运脉冲功率的提高,输出脉冲能量逐步提高,并在一定抽运功率后输出达到饱和。其中 1 ns 脉冲在抽

运功率 34 W 时达到饱和;2 ns 脉冲在抽运功率 37 W 时达到饱和;5 ns 脉冲在抽运功率 38 W 时达到饱和;10 ns 脉冲在抽运功率 46 W 时达到饱和。

测量得到的 1 ns 和 10 ns 注入下末级光纤放大器输出脉冲波形如图 4 所示。脉冲放大后在增益饱和和作用下发生一定程度的展宽,并且前沿变陡。由于高斯脉冲的抗增益饱和畸变能力较好,脉冲波形变化不剧烈。图 4 中,1 ns 和 10 ns 脉冲种子注入情况下,输出的波形略有差异。主要表现为:10 ns 脉冲后沿较 1 ns 脉冲的后沿抬升更为剧烈,因此整体展宽的趋势更为明显。这是因为 10 ns 脉冲放大时,能量提取更多,工作通量更大。脉冲前沿在增益饱和的作用下变陡,已经不能被继续放大,脉冲后沿部分由于峰值功率较低开始被放大。而 1 ns 脉冲由于输出脉宽和能量的限制,脉冲后沿增益没有 10 ns 脉冲的大,因此抬升不明显。

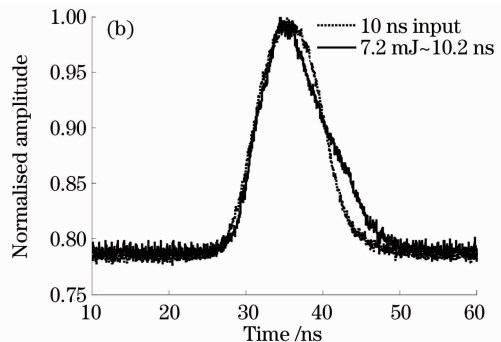
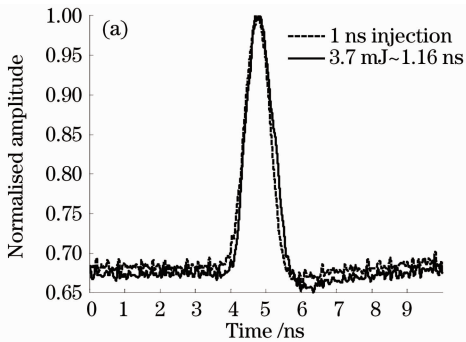


图 4 140 μm 光纤放大器输出脉冲波形

Fig. 4 Output waveform of the amplifier with 140 μm core diameter

在系统 30 μm 和 140 μm 光纤放大器的掺杂光纤缠绕半径均大于 30 cm, 弯曲造成的损耗可以忽略的情况下测量了系统输出的光束质量。图 5 为采用 M^2 因子分析仪测得的全光纤系统输出的光束近场, 分析给出了其 M^2 因子为 $M_x^2 = 5.34$, $M_y^2 =$

4.83。在 140 μm 光纤放大器不加抽运脉冲时, 测量没有横向增益选择系统输出的光束质量得到的 M_x^2 和 M_y^2 因子均大于 11, 可见采用中心掺杂的方式取得了较好的光束质量控制结果。

4 结 论

提出了一种基于大模场光纤级联放大的全光纤无界面化高功率纳秒脉冲产生系统。将单模光纤前端系统输出的 10 ns、100 nJ 整形脉冲输入由 15、30、140 μm 掺镱大模场光纤级联构成的放大器放大, 获得了能量 3.2 mJ、峰值功率 0.3 MW 的整形纳秒脉冲。研究了不同脉宽下该系统的极限输出能力。在高斯脉冲注入的情况下实现了 10 ns/7.2 mJ/0.7 MW 高能量和 1.16 ns/3.7 mJ/3.2 MW 高功率的输出, 得到了全纤化、无界面化的高功率纳秒脉冲输出。注入系统的单模光纤前端系统采

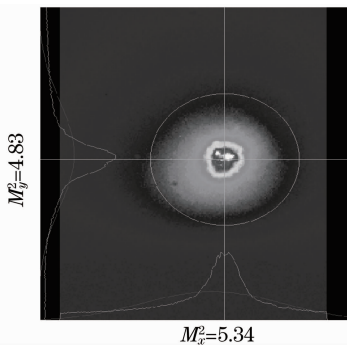


图 5 系统输出 M^2 因子

Fig. 5 M^2 factor of the laser system

用任意波形发生器获得任意整形脉冲输出,系统输出的高功率光脉冲具有可编程整形的能力,可进一步应用于大型激光装置。

参 考 文 献

- 1 Mark Bowers, Scott Burkhart, Simon Cohen *et al.*. The injection laser system on the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 2007, **6451**: 64511M
- 2 Lin Honghuan, Wang Jianjun, Sui Zhan *et al.*. Integrated all fiber optical pulse generation system for laser fusion driver[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1771~1777
林宏奐, 王建军, 隋展等. 用于激光聚变驱动器的全光纤、全固化光脉冲产生系统[J]. *物理学报*, 2008, **57**(3): 1771~1777
- 3 Alain Jolly, Jean-Francois Gleyze, Denis Penninckx *et al.*. Fiber lasers integration for LMJ[J]. *C. R. Physique*, 2006, **7**(2): 198~212
- 4 Luo Yiming, Li Mingzhong, Tang Jun *et al.*. Diode-pumped high-gain amplifier system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(S1): 47~50
罗亦明, 李明中, 唐军等. 用于ICF驱动器的全LD泵浦高增益放大系统研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(S1): 47~50
- 5 Mingyuan Cheng, Yuchung Chang, Almantas Galvanauskas. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200- μm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4): 358~360
- 6 C. Labaune, D. Hulin, G. A. Mourou *et al.*. On the feasibility of a fiber-based inertial fusion laser driver[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(15-16): 4075~4080
- 7 Liu Xia, Du Songtao, Xue Yuhao *et al.*. High repetition rate nanosecond pulse fiber amplifier based on China-made large-mode-area fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1876~1879
刘侠, 杜松涛, 薛宇豪等. 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[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1876~1879
- 8 F. Röser, D. Schimpf, C. Schmidt *et al.*. 90 W average power 100 μJ energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2230~2232
- 9 S. Hödrich, J. Rothhardt, T. Eidam *et al.*. High energy ultrashort pulses via hollow fiber compression of a fiber chirped pulse amplification system[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3919~3922
- 10 Xu Dangpeng, Wang Jianjun, Lin Honghuan *et al.*. High peak power large mode area all fiber pulse amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 589~592
许党朋, 王建军, 林宏奐等. 高峰值功率大模场全光纤脉冲放大器[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 589~592
- 11 Zhao Xiaojun, Wu Bo, Yang Zehou *et al.*. Theoretical research of pulse pumped Yb-doped pulse fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2225~2231
赵晓军, 伍波, 杨泽后等. 脉冲抽运掺镱脉冲光纤放大器理论研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2225~2231

栏目编辑：殷建芳