

文章编号: 0258-7025(2009)01-0160-06

用于高能短脉冲激光的光纤前端系统的 展宽与放大特性

张 锐 王建军 林宏奂 李明中 车雅良 卢振华 邓 颖

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 光纤技术为惯性约束聚变激光驱动器前端系统提供了许多便利,如便于分路、鲁棒性和稳定性。提出了一套全光纤前端的方案来适应未来高能拍瓦激光装置对种子源的需求。实验研究了这套用于产生高能短脉冲激光的光纤前端系统的啁啾脉冲展宽与放大特性。采用锁模振荡器的相位锁定信号作为系统的参考时钟,将各级光开关器件进行同步。系统采用波导幅度调制器来选取需要的信号重复频率,并用声光调制器(AOM)对放大器级间放大自发辐射(ASE)光进行抑制。通过大模场光纤放大器后系统输出啁啾脉冲峰值功率4.1 kW,脉宽760 ps,输出脉冲稳定。鲁棒性、高可靠性和使用便捷的优点使这套前端系统为高能拍瓦激光装置提供了一种可选择的种子脉冲产生方式。

关键词 光纤光学;激光前端;短脉冲激光;光纤激光器

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093601.0160

Broadening and Amplification Characteristics of Fiber Front End for High-Power Short Pulse Laser Facility

Zhang Rui Wang Jianjun Lin Honghuan Li Mingzhong

Che Yaliang Lu Zhenhua Deng Ying

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

Abstract The fiber technology provides many advantages for the front end of a laser driver, such as convenience to divide, robustness and stability. A fiber front end scheme is proposed to meet the requirements of next generation high-power petawatt laser facility. Experimental investigation has been done to focus on the broadening and amplification of the chirped pulse. Phase-locked signal of the mode-locked fiber laser is set as the reference clock for the system to synchronize the optical switches. Waveguide amplitude modulator is used to choose the needed frequency of signal. Acoustic optical modulators (AOM) are used to restrain the amplified spontaneous emission (ASE) between fiber amplifiers. Experimental results show that after passing through the large-mode-area ytterbium amplifier, chirped pulse with 4.1-kW peak power, 760-ps is obtained. High degree of robustness, reliability and ease of use make this fiber front end an optional seed pulse for high-power short pulse laser facilities.

Key words fiber optics; laser front end; short pulse laser; fiber laser

1 引 言

钼玻璃激光驱动器,如美国的国家点火装置、法国的兆焦耳装置和我国的神光系列装置等都是能在单束上产生数千焦耳脉冲能量的高能量激光装置^[1]。一般这类装置都运行在脉宽1~10 ns量级的“长脉冲”模式下,峰值功率在 10^{12} W量级。也可以让这类激光装置工作在啁啾脉冲放大模式下,压缩

后获得 10^{15} W量级的峰值功率。拥有该峰值功率的激光装置可对相对论光学领域的物理现象进行研究,也使得基于激光的X射线诊断和快点火等研究具备了条件^[2,3]。

2003年,劳伦斯·利弗莫尔实验室的研究人员提出了一套全光纤前端的概念来满足高能拍瓦激光装置的需求^[4]。在该系统中,脉冲从光纤锁模激光

收稿日期:2008-02-18;收到修改稿日期:2008-04-30

作者简介:张 锐(1981—),男,硕士,主要从事高功率固体激光装置光束控制研究。

E-mail: zrsnowmanzr@hotmail.com

器中产生,并被相位锁定到一个参考时钟。系统采用电光开关将脉冲序列的重复频率降低,然后让脉冲通过脉冲净化器,初步实验表明该净化器对连续光至少有20 dB的净化作用。之后通过啁啾光纤光栅(CFBG)将脉冲展宽到1~3 ns。传输光纤将采用基于光子晶体设计的偏振光纤,大模场或大平顶模光纤放大器^[5]负责把系统输出功率提升至300 μJ,然后注入钨玻璃主放大器。国内,2001年卢秀权等^[6]模拟计算了在910 nm激光抽运下掺镱光纤放大器的增益、饱和与噪声特性,分析表明,975 nm处反向传播的放大自发辐射(ASE)是抑制放大器小信号增益并影响其噪声性能的重要因素。2003年刘建国等^[7]研究了掺镱光纤放大器对中心波长为1053 nm啁啾脉冲的放大特性,发现针对高斯或超高斯脉冲,采用合适的带宽及入射光强能够使增益饱和和失谐放大相互削弱,从而得到一个良好的放大脉冲形状。2006年,姜永亮等^[8]在啁啾脉冲放大系统中通过补偿高阶相位畸变得到了近变换极限的超短脉冲。他们采用声光可编程色散滤波器(AOPDF)将光谱半峰全宽从30 nm扩展到了50 nm。该光纤前端系统的一个关键技术指标是高预脉冲对比度。对预脉冲的贡献主要来自四个方面^[9],它们是:ASE功率、实际的预脉冲、系统色散误差和自相位调制在啁啾脉冲上的积累。其中,低ASE功率要求采用高信噪比的锁模脉冲。实际的预脉冲主要由系统缺陷引起,在最终调试完成后将被剔除。系统色散可以分成三个关键问题:1) 光纤自身的,2) CFBG的,3) 脉冲色散调整器引入的。系统设计将重点集中在最优化这些参数上,并给出

了初步的联机实验结果。

2 系统设计

目前,采用钨玻璃作放大介质的激光驱动器对前端的典型要求是1053 nm中心波长,4 nm带宽(这与钨玻璃放大器的2.2 nm带宽相比仍然较大),控制色散从而最终产生1~10 ps脉宽(1 kJ级激光器的压缩池一般非常大且难以调整,因此调整更希望是在前端进行)和高输出能量。系统对前端还有两个特殊要求,一是要求预脉冲对比度大于10⁸量级。这是因为当光束聚焦到靶时高于该量级的ASE基底将在主脉冲到来之前电离靶,干扰正在进行的实验。二是要求非常高的能量和时间稳定性。能量稳定性之所以需要是因为系统可能工作在略低于元件的损伤阈值处,一个突然的强脉冲可能对昂贵的光学元件造成损伤。为了将短脉冲与其他各类脉冲同步起来,时间稳定性在许多物理实验中也是需要的。

图1给出了设计的用于产生高能短脉冲激光的前端系统示意图。脉冲在光纤锁模环形腔激光器中产生,产生的自相似锁模脉冲经光电转换后作为外时钟触发TEK DGT5274,相位锁定后作为参考时钟。波导脉冲选单器将脉冲序列的重复频率和平均功率降低。略带啁啾的锁模脉冲被宽带放大器放大,并在ASE脉冲净化器中被“净化”。脉冲净化器的原理是:强脉冲可引起非线性双折射,当脉冲通过光纤和检偏器时,其透射率与强度有关,所以可以利用非线性双折射来修正脉冲形状,提高脉冲信噪比。然后脉冲被传输到20 nm带宽CFBG中并被展宽到1~2 ns。可以插入色散调整器来调整脉冲序列的色

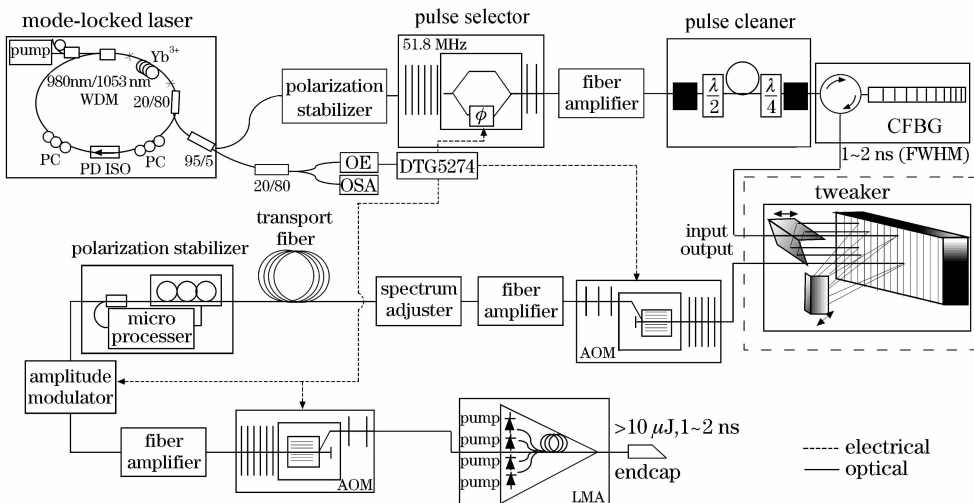


图1 用于产生高能短脉冲激光的前端系统示意图

Fig.1 Schematic of the planned fiber front end for high-power short pulse laser facility

散量,将脉宽调节到物理实验需要的 $1\sim 10$ ps,并清理系统剩余部分色散来补偿终端压缩器难以调节的问题。之后,根据系统需要,可通过声光调制器来对重复频率作进一步调整,并将光纤放大器级间 ASE 水平降低。脉冲光谱可通过光谱调整模块加以调整以改善后续放大器的增益窄化效应。传输光纤负责将信号传输到钽玻璃放大器所在的位置。在主放处偏振态被偏振控制器稳定到最大值附近。具有波形调节功能的幅度调制器将脉冲对比度进一步提高。大模场光纤放大器负责把系统输出脉冲能量提升至微焦量级,最后通过具有隔离功能的准直器注入钽玻璃放大器作进一步放大。

在 1053 nm 波段的光纤系统中,加入线性色散的最好办法是使用 CFBG,因为如果利用一段很长的单模光纤来进行色散,往往引入高阶色散和非线性作用,并且增加损耗。啁啾光纤光栅的特点是反射谱宽,可在很短的距离(数厘米)上产生很大的色散。

对于 10 nm 带宽的入射脉冲,实际应用中选择了带宽大于 20 nm的啁啾光纤光栅。为克服其损耗

大的弱点,在 CFBG 与负责导入和导出功能的光纤环形器之间加入了光纤放大器。得到的宽带啁啾光纤光栅具有如下特性:中心波长为 1056.43 nm,插入损耗为 -5.71 dB,反射带宽为 20.19 nm,反射率平坦度为 1.57 dB。采用光谱仪得到的测试结果如图 2 所示。

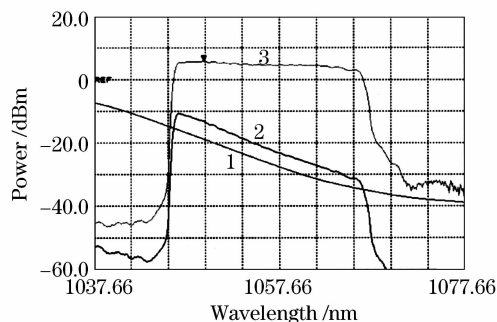


图 2 宽带啁啾光纤光栅的反射谱。1:入射光谱; 2:输出光谱;3:归一化光谱

Fig. 2 Reflected spectrum of the chirped fiber Bragg grating (CFBG). 1: spectrum of the input signal; 2: spectrum of the output signal; 3: spectrum of the normalized signal

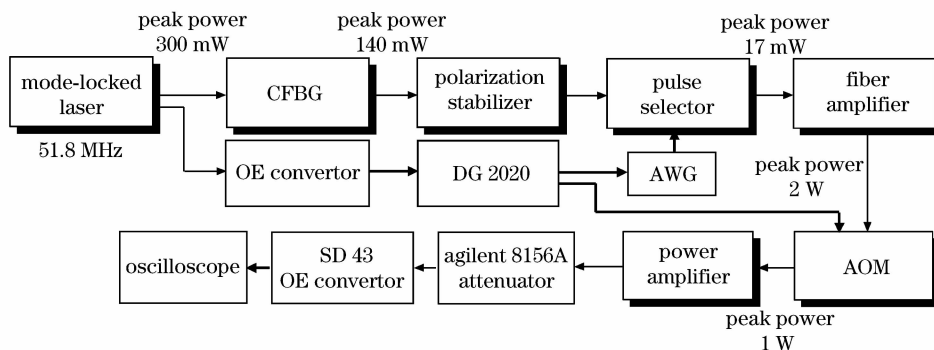


图 3 实验光路示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental setup

3 实验结果

图 3 给出了初步联机试验的光路示意图。被动锁模掺铒光纤激光器输出半峰全宽为 10 ps的单脉冲,这种单脉冲本身带有啁啾,光谱宽度达 10 nm,如图 4 所示。光谱采用 Agilent 86142B 测量,波长测量精度 0.02 nm,分辨率带宽 0.06 nm,动态范围 70 dB。脉冲波形采用 4 GHz的 Tektronix 示波器测量。

由图 4(a)可见,锁模脉冲的重复频率被严格控制到了 51.8 MHz,从而可以通过采用商用的锁相倍频电路来保证稳定的锁相和同步精度。由图 4(b)可见,锁模脉冲的光谱半峰全宽达到了 11.77 nm,这使得用 125 ps/nm啁啾量的 CFBG 展宽脉冲到

纳秒量级具备了基本的条件。

采用三级串联的方式获得了 125 ps/nm,带宽 20 nm的大展宽量 CFBG,为了补偿 CFBG 过大的损耗,在其中加入了掺铒光纤放大器,实现了 6 dB的净增益。由图 5 可知,CFBG 展宽脉冲的宽度达到 1.488 ns,从脉冲的余辉图可以看到,展宽脉冲可以保持稳定的输出波形。

选单器采用任意波形发生器驱动波导调制器的方式,可使输出脉冲间的幅度起伏控制在 1% 以内。图 6 给出了典型的选单输出脉冲和光谱,由图可知,选单输出脉冲与光谱间的对应关系仍然保持。

图 7 给出了调整注入光偏振态时,偏振相关的幅度调制器输出的几种脉冲波形,证实可通过控制

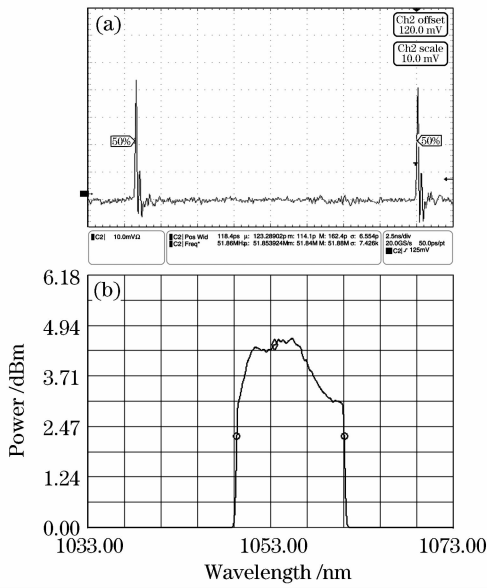


图 4 锁模脉冲序列(a)和线性坐标下的锁模脉冲光谱(b)

Fig. 4 Pulse sequence of the mode-locked fiber laser (a) and its spectrum in linear coordinate (b)

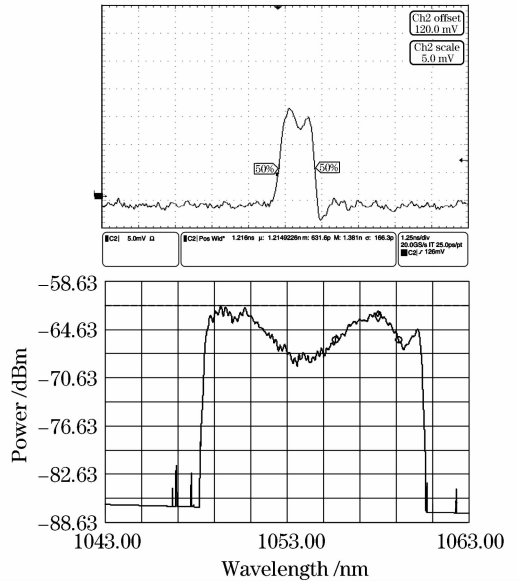


图 6 选单器输出的 1 Hz 啁啾脉冲(a)与光谱(b)
Fig. 6 1-Hz chirped pulse from the pulse selector (a) and its spectrum in logarithmic coordinate (b)

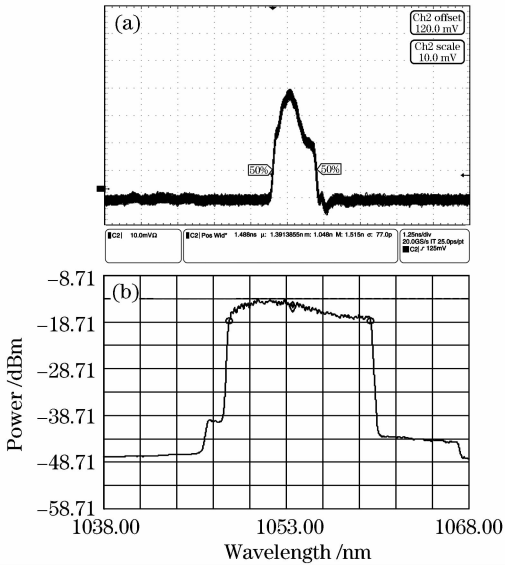


图 5 CFBG 的展宽脉冲与对数坐标下的光谱
Fig. 5 Stretched pulse from the CFBG (a) and its spectrum in logarithmic coordinate (b)

偏振态在一定范围内调整输出脉冲的波形。这是因为光波在光纤中传输,当输入偏振态固定时,其输出偏振态会随波长而相应变化^[10]。因此通过调节偏振控制器的旋柄来调节两个输出偏振态的群延时差,再通过相当于检偏器的偏振相关波导幅度调制器,就可以起到调整波形的作用。

对高能短脉冲系统而言,压缩后的噪声在相当大的程度上是缘于放大过程中的光谱畸变,因此降

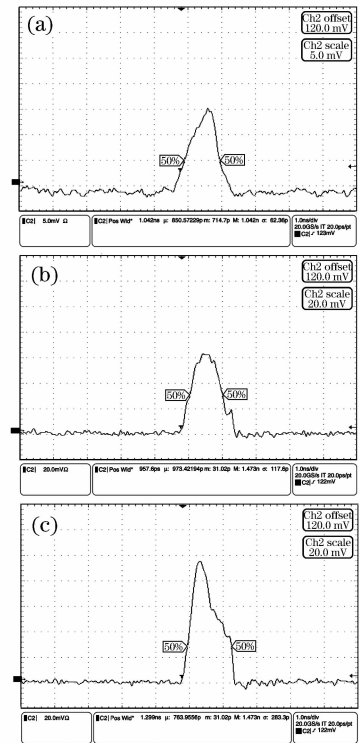


图 7 调整注入光偏振态对偏振相关幅度调制器输出脉冲波形的影响

Fig. 7 Influence of the input polarization on the output pulse of the amplitude modulator

低最大振幅点偏离中心位置的程度是提高信噪比的有效手段^[11]。由于脉冲展宽/压缩器的作用类似于傅里叶变换,光谱形状的偏离是与时间强度的偏离密切相关的。因此,放大过程中控制脉冲的形状对

提高压缩后的信噪比是很有利的。即需要控制注入脉冲使得最终的输出脉冲为最大振幅点在中心波长处的可压缩脉冲。同时,由于增益窄化效应会使得激光脉冲不能充分利用放大介质的增益带宽,不能有效地从放大介质中提取能量,而且啁啾脉冲变窄将增加光栅压缩后的超短脉冲宽度,限制脉冲功率的进一步提高,因此为了补偿增益窄化,需要在啁啾脉冲带宽内对中心频谱的衰减大于对边缘频谱的衰减,而使得光谱顶端变平甚至在光谱中心产生凹陷^[12]。

图 8 给出了啁啾脉冲在通过声光调制器后的输出波形。对单纵模连续光注入下声光开关输出信号的测试表明,声光开关输出光脉冲的脉宽为 100 ns,加电脉冲触发信号前后的消光比为 48 dB。因此 AOM 加入后虽然对脉冲前后沿的信噪比没有改善作用,但它可以显著降低前级放大器带来的 ASE,从而降低放大器注入信号的平均功率,提高后级放大器对信号的放大能力。

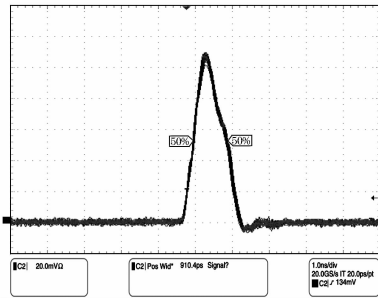


图 8 通过声光调制器后的输出波形
Fig. 8 Output pulse from the AOM

系统的另一个重要环节是功率光纤放大器,为了定量研究功率光纤放大器的放大特性,购买了 Nufern 提供的芯径 15 μm,数值孔径 0.087,包层直径 130 μm 的低折射率聚合体涂敷层掺镱光纤,包层数值孔径为 0.46,975 nm 处包层的吸收系数为 6.0 dB/m。同时购买了芯径 15 μm,数值孔径 0.087,包层直径 130 μm 的匹配光纤。采用的激光二极管抽运源是 975 nm 多模光源,输出连续功率 4.5 W,3 dB 光谱宽度 2 nm,可温度调谐,如图 9 所示。

采用单纵模连续激光注入,测试了注入信号光功率变化时功率光纤放大器增益随抽运功率变化的曲线,如图 10 所示。由图 10 可知,随着抽运功率的升高,输出功率增加,并逐渐由小信号放大过渡到增益饱和。抽运功率为零的条件下得到的增益数据表明,功率光纤放大器的静态损耗约为 -13 dB。分析表明,损耗过大是由掺镱光纤和匹配光纤的熔接损耗过大引起的。将匹配光纤去掉后测得功放的静态

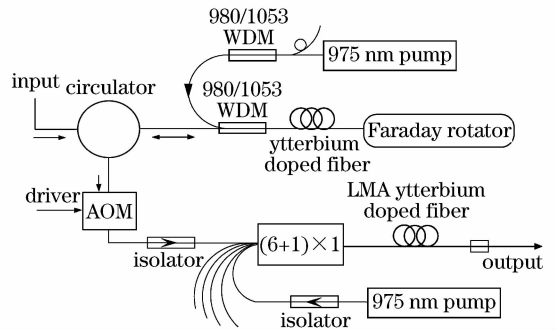


图 9 功率光纤放大器的结构

Fig. 9 Configuration of the fiber power amplifier

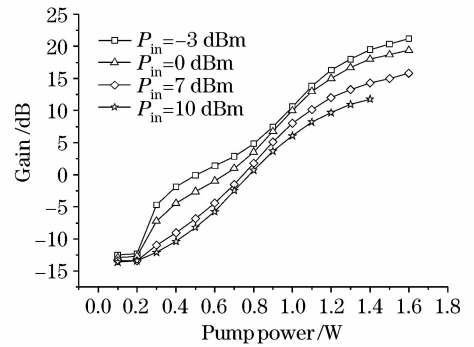


图 10 单纵模连续光注入时功率光纤放大器增益倍数随抽运功率的变化曲线

Fig. 10 Gain curves of the fiber power amplifier with narrowband continuous laser input

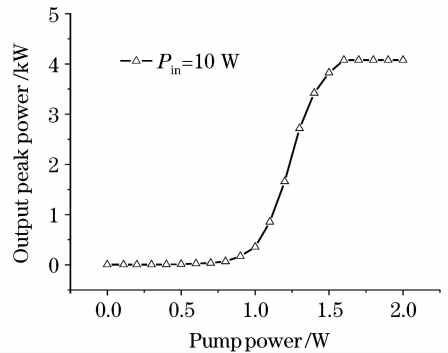


图 11 功率光纤放大器不同抽运功率下的输出脉冲峰值功率

Fig. 11 Output peak power of amplified broad-band pulse from fiber power amplifier with different pump power 静态损耗为 -5 dB。静态损耗采用 Newport 多功能功率计 1835-C 测量。

通过将功放前级输出的峰值功率 10 W 的 1 Hz 脉冲注入功率光纤放大器,在不同抽运功率下得到了输出峰值功率随抽运功率的变化曲线如图 11 所示。

图 12 给出了功率光纤放大器不加抽运和 2 W 抽运功率下的脉冲波形。由图 12(b) 的波形余辉图可知,功率光纤放大器输出脉冲稳定可靠。

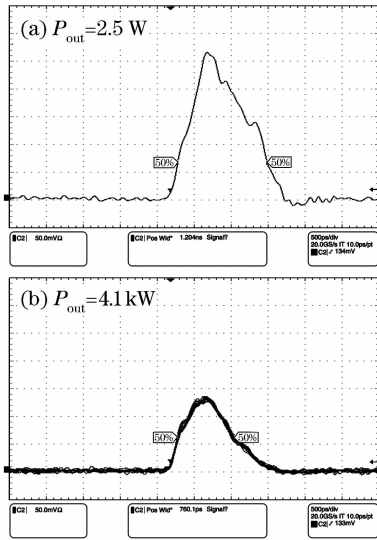


图 12 功率光纤放大器静态输出峰值功率 2.5 W(a)和动态输出峰值功率 4.1 kW(b)时的脉冲波形

Fig. 12 Static output of power amplifier with 2.5 W peak power (a) and dynamic output of 4.1 kW peak power (b)

4 结 论

设计了用于产生高能短脉冲激光的光纤前端系统,并进行了初步的联机试验,输出了峰值功率 4 kW 的稳定宽带啁啾脉冲。实验表明提高光纤放大器输出功率和脉冲能量可以通过增大光纤芯径和选择性地仅激发基模实现。希望通过这套原理样机的运行来对系统所有潜在的问题作进一步认识。下一步的工作重点是提高系统的脉冲信噪比。

参 考 文 献

- 1 G. H. Miller. The national ignition facility [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:1~12
- 2 J. W. Dawson, Z. Liao, S. Mitchell *et al.*. Fiber laser front ends for high-energy short pulse lasers [C]. *SPIE*, 2005,

- 5709**:37~44
- 3 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33** (6):721~729
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. 中国激光, 2006, **33**(6):721~729
- 4 J. W. Dawson, Z. M. Liao, I. Jovanovic *et al.*. All fiber technology for high-energy petawatt front end laser systems [R]. UCRL-JC-152561, September 5, 2003
- 5 J. W. Dawson, R. Beach, I. Jovanovic *et al.*. Large flattened mode optical fiber for reduction of non-linear effects in optical fiber lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5335**:132~139
- 6 Lu Xiuquan, Chen Shaohu. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3):209~214
卢秀权,陈绍和. Yb³⁺ 光纤放大器[J]. 中国激光, 2001, **A28** (3):209~214
- 7 Liu Jianguo, Yang Kuntao, Sui Zhan *et al.*. Chirped-pulse mismatching amplification of ytterbium doped fiber amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6):563~566
刘建国,杨坤涛,隋展等. 掺镱光纤放大器的啁啾脉冲失谐放大特性[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6):563~566
- 8 Yongliang Jiang, Bing Zhou, Yuxin Leng *et al.*. Generation of near transform-limited ultrashort laser pulses in kilohertz chirped-pulse amplification system by compensating high order phase distortions [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10):614~616
- 9 J. W. Dawson, S. Mitchell, R. J. Beach *et al.*. High energy, short pulse fiber laser front end for kilo-Joule class CPA systems [C]. *SPIE*, 2006, **6102**:610214
- 10 Xia Yuehui, Huang Yongqing, Chen Xue *et al.*. Research on the variation of output polarization from single-mode fiber with wavelength [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2001, **4**:10~11
夏月辉,黄永清,陈雪等. 单模光纤中输出偏振态随波长变化关系的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2001, **4**:10~11
- 11 Li Chuandong, Zhang Zhengquan, Xu Zhizhan. Effects of gain saturation in chirped-pulse amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3):299~304
李传东,张正泉,徐至展. 增益饱和在啁啾脉冲放大中的影响[J]. 光学学报, 1996, **16**(3):299~304
- 12 Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):272~274
郭爱林,杨庆伟,谢兴龙等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形[J]. 光学学报, 2007, **27**(2):272~274