

高功率小型光纤飞秒激光放大系统

周锋全, 袁帅*, 郭政儒, 郝强, 徐晖, 曾和平

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 介绍一种新的高功率、便携式光纤飞秒激光系统。该系统以半导体可饱和吸收锁模光纤激光器作为种子源,通过光纤布拉格光栅对波长进行选择。振荡器输出的种子光经过两级单模掺镱光纤、一级双包层掺镱光纤预放大后,进入主放大系统。主放大系统采用大模场掺镱光子晶体光纤放大,并通过控制放大过程中产生的非线性积累,有效降低非线性效应对脉冲的影响。加入声光调制器,使输出重复频率可调,并通过透射式光栅对,对输出的脉冲进行压缩,最终获得平均功率为 1.34 W、重复频率为 300 kHz、工作波长为 1030 nm、脉冲宽度为 202 fs 的激光输出,对应单脉冲能量为 4.5 μ J,峰值功率为 22 MW。整套激光系统便携、稳定、成本较低,可以进行广泛的生产应用。

关键词 超快光学; 光纤光学; 激光器; 飞秒激光; 光子晶体光纤

中图分类号 O437; TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.103201

High Power Compact Fiber Femtosecond Laser Amplification System

Zhou Fengquan, Yuan Shuai*, Guo Zhengru, Hao Qiang, Xu Hui, Zeng Heping

*School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China*

Abstract A high power portable femtosecond fiber laser system is demonstrated. This system uses semiconductor saturable absorb mode-locked fiber laser as the seed source and selects the wavelength through the fiber Bragg grating. The seed light output by the oscillator enters the main amplifier system after being pre-amplified by two-stage single-mode ytterbium-doped fiber and first-order double-clad ytterbium-doped fiber. The main amplifier uses a large mode field of ytterbium-doped photonic crystal fiber to amplifier, and effectively reduces the effect of nonlinear effect on the pulse by controlling the nonlinear accumulation in the amplification process. An acousto-optic modulator is added to make the output repetition frequency adjustable, and the output pulse is compressed through the transmission grating to obtain the laser output. The final output has an average power of 1.34 W, a repetition rate of 300 kHz, a working wavelength of 1030 nm and a pulse duration of 202 fs, and the corresponding single pulse energy is 4.5 μ J, peak power is 22 MW. The complete laser system is portable, stable, and cost-effective, and can be widely used in production.

Key words ultrafast optics; fiber optics; laser; femtosecond laser; photonic crystal fiber

OCIS codes 320.2250; 320.5520; 320.5550

1 引言

飞秒激光具有窄脉宽、高峰值功率等特点,在科学和工业等领域具有诸多应用,如微纳加工^[1]、太赫兹产生^[2]、非线性光学探索^[3]、三维(3D)打印^[4]等。通过飞秒激光对材料表面进行处理,可以改变材料表面的宽带光学吸收特性,使材料获得超疏水性/亲

水性等特殊性能。一般而言,在微纳加工过程中,高能量飞秒激光更容易在材料表面得到结构可控的微观结构^[5]。因此,高能量飞秒激光近年来成为国内外研究的热点。

高能量飞秒激光在光纤内的传播过程中不可避免地引入非线性效应,导致脉冲畸变^[6]。使用光子晶体光纤(PCF)代替传统的光纤,可以有效防止脉

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-05-22; 录用日期: 2018-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61505106)、上海市晨光计划(15CG51)

* E-mail: ye_zoom@126.com

保偏双包层掺镱光纤(DCF10/125)作为增益介质。如图1所示,在第二级与第三级预放大系统之间,加入声光调制器(AOM),将原来重复频率为25 MHz的激光脉冲序列降至300 kHz。降频后的激光经过第三级双包层掺镱光纤放大,通过光学耦合系统,导入主放大系统所在的掺镱光子晶体光纤(PCF40/200)中。主放部分使用的掺镱光子晶体光纤纤芯直径为40 μm ,包层为200 μm ,对应模场面积为1260 μm^2 ,长度为1 m,通过一台半导体激光器(LD)反向抽运,该LD的最大输出功率为21 W。输出光纤端面切成8°斜角,避免自激辐射。主放大系统输出的皮秒脉冲经石英透射式光栅对(1250 line/mm)实现色散补偿,最终获得飞秒激光输出。

3 实验结果

实验中所搭建的振荡器产生的输出激光中心波长为1030 nm、单脉冲能量为0.18 nJ、脉冲宽度约为4 ps、重复频率为25 MHz、光谱宽度为1 nm。振荡器输出光经过隔离器(ISO)后进入三级预放大系统。在前两级预放大系统中,经过掺镱光纤放大,输出单脉冲能量为8.9 nJ。同时,激光在掺镱光纤中传输时,由于自相位调制作用,光谱展宽至2 nm。在系统搭建中,考虑到小型化需求,同时为降低成本,将经前两级放大后的激光导入带尾纤的AOM中,激光重复频率降至300 kHz。输出的激光进一步导入第三级预放大系统。当第三级预放大系统对应的抽运光功率为3 W时,整个预放大系统输出单脉冲能量为350 nJ、光谱宽度为7.43 nm、脉冲宽度为11.6 ps的激光。光谱如图2所示。上述每一步都尽可能采用最短的光纤长度,以减小高阶色散累积。

预放大器系统输出的激光脉冲,经空间隔离器,

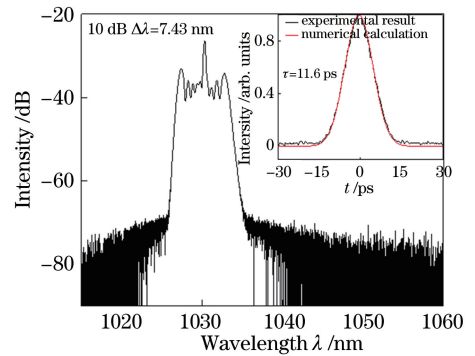
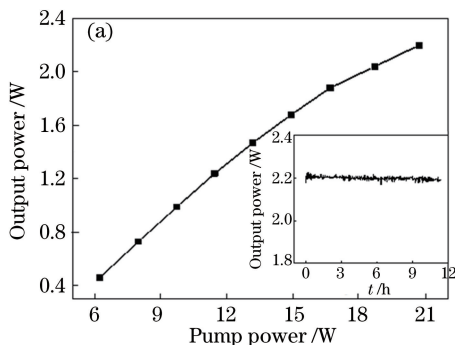


图2 预放输出光谱,光谱宽度为7.43 nm (插图是脉冲自相关曲线,脉宽为11.6 ps)

Fig. 2 Output spectrum after pre-amplifier, spectral width is 7.43 nm (insert is pulse auto-correlation curve, pulse width is 11.6 ps)

通过聚焦透镜耦合导入主放大系统所在的PCF中。在调节过程中采用CCD在光纤尾端收集能量并观察,调节信号光的入射角度使其全部集中在纤芯中。同时,主放大器部分采用后向抽运方法,如图3(a)所示,在抽运功率为21 W的情况下,主放系统的输出功率为2.2 W、脉宽为7.2 ps、对应单脉冲能量为7.3 μJ 、增益为13.2 dB。此时,主放系统输出光谱如图3(b)所示,对应带宽为18.7 nm,可以支持脉宽为84 fs的傅里叶变换极限脉冲。实验过程中,调制主放大系统中的增益光纤长度,在保证高功率输出的前提下,优化输出脉冲宽度。当主放大系统增益光纤长度为1 m时,获得脉宽为7.2 ps的激光。值得注意的是,主放大系统输出脉宽(7.2 ps)小于进入主放大系统的脉宽(11.6 ps)。这说明在主放大过程中,自相似放大占主导作用。高能量激光脉冲在纤芯为40 μm 的PCF中传输时,在自相位调制作用下光谱获得对称展宽,相对应地在时间尺度上获得进一步压缩。

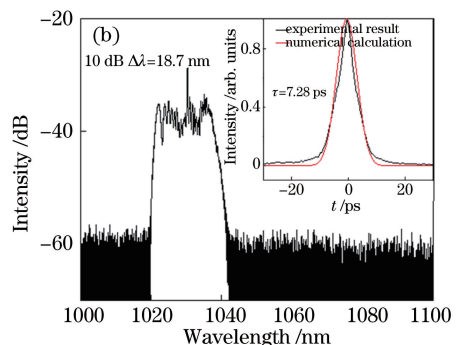
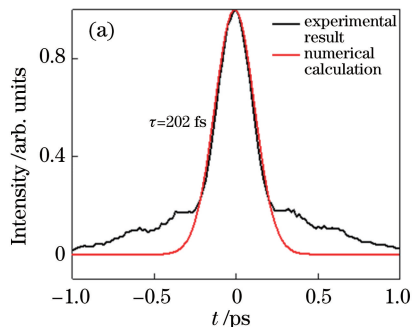


图3 (a)主放系统的输出功率曲线(插图是功率稳定性曲线);(b)主放系统的输出光谱,输出功率为2.2 W(插图是脉冲自相关曲线,脉宽为7.2 ps)

Fig. 3 (a) Output power curve of main amplifier (insert is power stability curve); (b) output spectrum of main amplifier, output power is 2.2 W (insert is pulse auto-correlation curve, pulse width is 7.2 ps)

主放大器输出的激光通过1250 line/mm的光栅对,对脉冲进行压缩,光栅对的压缩效率为61%。如图4所示,当抽运光功率为21 W时,压缩输出功率为1.34 W,对应单脉冲能量为4.5 μ J,输出脉宽为



202 fs。最后在输出端采用 CCD 测量光束质量曲线,如图5(a)所示。最终对激光放大系统进行集成,整体大小可控,如图5(b)所示。

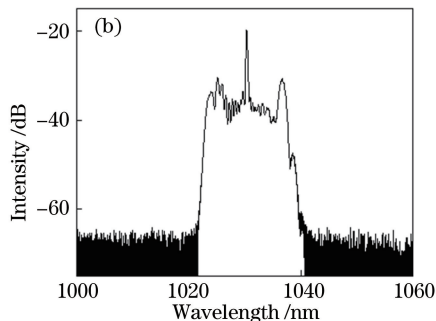


图4 输出功率为1.34 W时的(a)自相关曲线和(b)光谱

Fig. 4 (a) Auto-correlation curve and (b) output spectrum when output power is 1.34 W

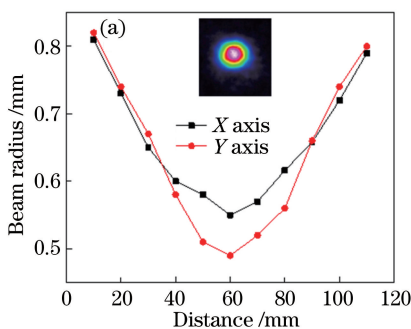


图5 (a)主放大级光束质量测试图;(b)系统实物集成图

Fig. 5 (a) Beam quality test of main amplifier; (b) system physical integration

4 结 论

通过四级掺镱光纤放大,利用 PCF 控制放大过程中的非线性效应,用声光调制器降低重复频率,最终获得了单脉冲能量为4.5 μ J、脉冲宽度为202 fs、峰值功率为22 MW的飞秒激光输出。实验中,受抽运光最大输出功率的限制,不能继续增大抽运光功率,如果更换更高功率的LD,预计可获得更高的能量输出。这套激光系统成本较低、集成度高,系统整体大小可以控制在60 cm \times 60 cm \times 40 cm以内,激光系统可以稳定运行150 h以上,所达到的峰值功率可以应用到诸多加工领域。

参 考 文 献

- [1] Zhu J F, Wei Z Y. Femtosecond laser micro-nano fabrication[J]. *Physics*, 2006, 35(8): 679-683.
朱江峰, 魏志义. 飞秒激光精密微纳加工的研究进展[J]. *物理*, 2006, 35(8): 679-683.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J].

Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.

- [3] Hu C Z, Chen T, Jiang P P, *et al.* Broadband high-power mid-IR femtosecond pulse generation from an ytterbium-doped fiber laser pumped optical parametric amplifier [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5774-5777.
- [4] Liu M N, Li M T, Sun H B. 3D femtosecond laser nanoprinting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011410.
刘墨南, 李木天, 孙洪波. 3D飞秒激光纳米打印[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011410.
- [5] Peng E, Bell R, Zuhlke C A, *et al.* Growth mechanisms of multiscale, mound-like surface structures on titanium by femtosecond laser processing [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(13): 133108.
- [6] Li F, Yang Z, Zhao W, *et al.* Hundred micro-joules level femtosecond fiber laser amplification system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1202005.
李峰, 杨直, 赵卫, 等. 百微焦级飞秒光纤激光放大系统[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1202005.

- [7] Wang Q Y, Hu M L, Chai L. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(1): 57-66.
王清月, 胡明列, 柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. 中国激光, 2006, 33(1): 57-66.
- [8] Hao Q, Li W X, Zeng H P. High-power Yb-doped fiber amplification synchronized with a few-cycle Ti:sapphire laser [J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5815-5821.
- [9] Agrawal G P. Optical pulse propagation in doped fiber amplifiers [J]. Physical Review A, 1991, 44(11): 7493-7501.
- [10] Röser F, Eidam T, Rothhardt J, *et al.* Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. Optics Letters, 2007, 32(24): 3495-3497.
- [11] Eidam T, Rothhardt J, Stutzki F, *et al.* Fiber chirped-pulse amplification system emitting 38 GW peak power [J]. Optics Express, 2010, 19(1): 255-260.
- [12] Fang X H, Hu M L, Liu B W, *et al.* Hundreds of megawatts peak power multi-core photonic crystal fiber laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2366-2370.
方晓惠, 胡明列, 刘博文, 等. 百兆瓦峰值功率的多芯光子晶体光纤飞秒激光放大系统 [J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2366-2370.
- [13] Wen L, Liu B W, Song H Y, *et al.* All polarization-maintaining fiber amplification system to generate high-power and high-quality femtosecond laser pulses [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201011.
文亮, 刘博文, 宋寰宇, 等. 高功率、高质量全保偏光纤飞秒激光放大系统 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201001.
- [14] Hao J Y, Liu B W, Song H Y, *et al.* Femtosecond fiber amplification system based on third-order dispersion compensation technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051404.
郝静宇, 刘博文, 宋寰宇, 等. 基于三阶色散补偿的光纤飞秒激光放大系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051404.
- [15] Sun R Y, Tan F Z, Jin D C, *et al.* 1 μm femtosecond fiber chirped pulse amplification system based on dispersion wave [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101001.
孙若愚, 谭方舟, 金东臣, 等. 基于色散波的 1 μm 飞秒光纤啁啾脉冲放大系统 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101001.
- [16] Zaouter Y, Papadopoulos D N, Hanna M, *et al.* Stretcher-free high energy nonlinear amplification of femtosecond pulses in rod-type fibers [J]. Optics Letters, 2008, 33(2): 107-109.
- [17] Liu Y, Li W X, Luo D P, *et al.* Generation of 33 fs 935 W average power pulses from a third-order dispersion managed self-similar fiber amplifier [J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10939-10945.