

文章编号: 0258-7025(2010)09-2366-05

百兆瓦峰值功率的多芯光子晶体光纤 飞秒激光放大系统

方晓惠 胡明列* 刘博文 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 实验研究了掺镱大模场面积光子晶体光纤(LMA PCF)飞秒激光二级放大系统。振荡级和预放基于双包层保偏大模场面积光子晶体光纤,主放大级基于 7 芯大模场面积光子晶体光纤。7 个纤芯六角排布,总的模场面积高达 $5000 \mu\text{m}^2$,有效降低了光纤中的非线性。而且各个纤芯之间离散分布,热应力等问题也得到了缓解。当抽运功率较小时,输出的模式为多个超模的叠加。在高功率抽运下,获得了平坦的同相位超模输出,对应远场具有很好的高斯分布。获得了重复频率 1 MHz,平均功率 24 W 的激光放大输出。经光栅对压缩后,脉冲宽度为 110 fs,对应的峰值功率达到 150 MW。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 飞秒激光; 光纤放大器; 多芯

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103709.2366

Hundreds of Megawatts Peak Power Multi-Core Photonic Crystal Fiber Laser Amplifier

Fang Xiaohui Hu Minglie Liu Bowen Chai Lu Wang Qingyue

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A ytterbium-doped large mode area photonic crystal fiber (LMA PCF) femtosecond laser dual-stage amplifier is experimentally studied. Single polarization LMA PCFs are used in the oscillator and pre-amplifier, while a 7-core LMA PCF is used in the main-amplifier. The seven cores are arranged in array type with a mode field area up to $5000 \mu\text{m}^2$ which effectively suppress the nonlinearity in the fiber. In addition, the heat and stress induced beam distortions are reduced because the cores are discrete distributed. At low pump power, the output features a complex beam profile resulting from a superposition of several supermodes. Flat in-phase supermode and Gaussian-shaped far-field distribution are realized under high pump power. Average power of 24 W laser pulses at a repetition rate of 1 MHz are obtained. The pulses duration can be compressed to 110 fs with peak power up to 150 MW.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; femtosecond laser; fiber amplifier; multi-core

1 引 言

光纤激光器相对于传统固体激光器,具有良好的环境稳定性、极好的散热效果和接近衍射极限的光束质量。但是较小的纤芯和较长的传输距离也使得光纤

激光器输出的单脉冲能量和峰值功率等参数无法与传统固体激光器相比。直接而有效的解决方法是增大光纤纤芯直径。光子晶体光纤(PCF)提供了一种解决方案,它能在保持单模的同时提供很大的模场面积。目

收稿日期: 2010-04-07; 收到修改稿日期: 2010-06-01

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806002, 2010CB327604)、国家 863 计划(2007AA03Z447)、国家自然科学基金(60838004, 60978022)、教育部科学技术研究重点项目(108032)、强场激光物理国家重点实验室开放基金、全国优秀博士学位论文作者专项资金(2007B34)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

作者简介: 方晓惠(1984—),女,博士研究生,主要从事多芯光子晶体光纤特性方面的研究。E-mail: fangxh@tju.edu.cn

导师简介: 王清月(1938—),男,教授,博士生导师,主要从事超快激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: chywang@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

前利用大模场面积光子晶体光纤(LMA PCF)并结合啁啾脉冲放大技术,Y. Zaouter 等^[1]得到了 340 MW 峰值功率,F. Röser等^[2]得到了 131 W 平均功率的输出。另一种有效的方法是利用非线性放大技术^[3],它不同于前面的方法尽量避免非线性效应,而是利用非线性展宽光谱得到高峰值功率超短脉冲,省略了啁啾脉冲放大技术中的展宽器和压缩器,大大简化了系统,并且由于非线性展宽了光谱,放大后输出的脉冲经压缩后可以比种子光脉冲更窄。Y. Zaoute 等^[4]得到了脉冲宽度 49 fs,峰值功率 12 MW 的超短脉冲高峰值功率输出。C. D. Brooks 等^[5]利用自相似放大得到了脉冲宽度 240 fs,峰值功率 5 MW 的输出。

多芯光子晶体光纤是最近提出的一种新的解决方案。它不仅能进一步提高有效模场面积,而且各个纤芯之间离散分布,热应力等问题也得到了缓解,从而在高功率光纤激光器的应用中能进一步降低非线性效应的影响,提高脉冲峰值功率。目前基于多芯光子晶体光纤的研究还主要局限在相位锁定等方面^[6, 7]。P. K. Cheo 等^[8]首次利用 7 芯光纤进行了放大的实验研究,并在 10 W 抽运时实现了相位的自锁定。L. Michaille 等^[9]利用 6 芯光子晶体光纤搭建了调 Q 激光器,获得的单脉冲能量 2.2 mJ,脉冲宽度 26 ns。而基于多芯光子晶体光纤飞秒激光方面的研究目前还鲜见报道。本文利用二级光子晶体光纤放大系统并将 7 芯光子晶体光纤作为主放大器增益介质,实现了百兆瓦量级的高峰值功率脉冲输出。

2 实验装置

光子晶体光纤飞秒激光二级放大系统装置如图 1 所示。采用波长为 976 nm 的大功率激光二极管(LD)作为抽运源,抽运光通过数值孔径为 0.22 的尾纤输出,经非球面镜耦合到增益光纤中。实验中,振荡级^[10]和预放^[11]采用的增益光纤为掺镱保偏大模场面积光子晶

体光纤,长度分别为 1.5 m 和 3.5 m,光纤端面的扫描电镜(SEM)图如图 2(a)所示。通过在光纤内包层中引入应力双折射材料构成保偏结构,产生双折射,增加环境稳定性。内包层直径 200 μm ,周期性排布六角形的空气孔。激光传输纤芯区域模场直径为 29 μm ,数值孔径为 0.03。主放大器采用的增益光纤为掺镱 7 芯大模场面积光子晶体光纤,长度为 1 m,光纤端面 SEM 图如图 2(b)所示。内包层直径为 650 μm 。空气孔大小为 2 μm ,空气孔间距为 10 μm 。7 个芯六角排布,每个芯由缺失 7 个空气孔形成。每个纤芯直径为 38 μm ,总的模场面积高达 5000 μm^2 。光纤两端都进行塌陷并研磨成 8°角,以防止自激振荡激光的产生。预放和主放大级都采用后向抽运方式,以减小非线性作用长度。

振荡级的信号光通过偏振分光棱镜输出,为防止信号光的反馈,振荡级输出的信号光经过隔离器进入声光调制器,重复频率由 50 MHz 降为 1 MHz。预放的光纤具有保偏结构,所以信号光在进入第一级放大器之前通过半波片调整入射光的偏振方向,使之和增益光纤偏振轴一致。信号光经第一级放大器放大后,经隔离器耦合进入 7 芯光子晶体光纤。主放大器输出的放大信号由双色镜反射,经过光栅对压缩后输出,光栅对为 1200 line/mm 的透射式光栅,接近利特罗角入射,4 次通过光栅对的效率为 74%。

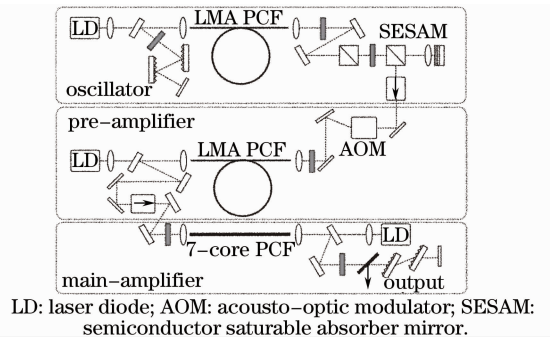


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

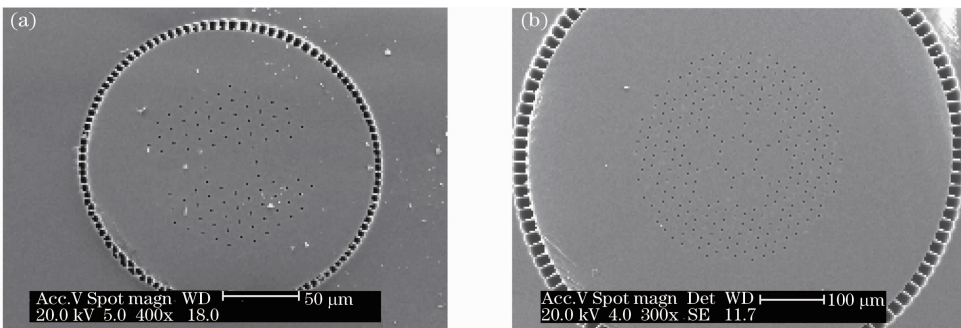


图 2 光纤端面结构的扫描电镜显微图。(a) 保偏大模场面积光子晶体光纤;(b) 7 芯大模场面积光子晶体光纤

Fig. 2 SEM micrographs of the PCF. (a) single-polarization LMA PCF, (b) 7-core PCF

3 实验结果

振荡级采用孤子锁模方式,输出飞秒激光重复频率 50 MHz,平均功率 400 mW,脉冲宽度 570 fs,光谱宽度 6 nm,如图 3(a)所示。信号光透过隔离器并经过声光调制器(AOM)后,重复频率为 1 MHz,

平均功率为 2 mW,由非球面镜耦合入第一级放大器中。为了保证信号光具有较好的脉冲质量以及进入主放大器后具有较低的非线性,预放输出平均功率为 700 mW,脉冲宽度为 1.88 ps,如图 3(b)所示。

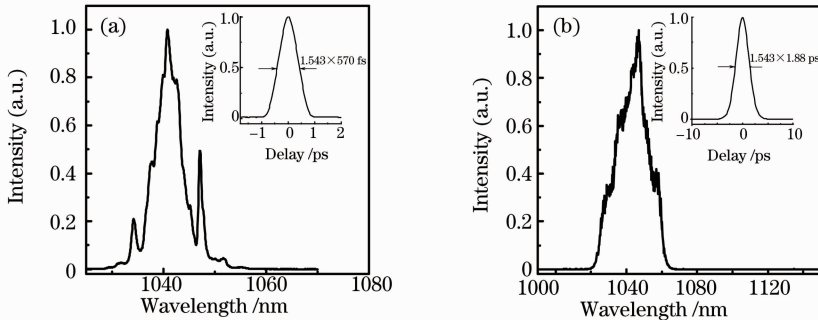


图 3 输出脉冲光谱曲线(插图为输出脉冲时域自相关曲线)。(a) 振荡级输出, (b) 预放级输出

Fig. 3 Measured spectra of the output pulses (inset shows the autocorrelation trace) from (a) the oscillator and from, (b) the pre-amplifier

从预放级输出的信号光,经透镜耦合到主放大级的 7 芯增益光纤中。由于各个超模之间有效折射率差较小,且反相位模式具有更大的小信号增益系数,当抽运功率较小时,输出的模式为多个超模的叠加,且它们之间相互竞争。其典型的近场和远场分布如图 4(a)和(b)所示。远场分布具有很大的基底。此时对应的自相关和光谱图分别如图 5(a)和(b)所示。自相关曲线的多峰结构和光谱的调制都说明此时具有多个超模存在^[12]。

继续增加抽运功率至 25 W 左右,输出的近场和远场逐渐演变为如图 4(c)和(d)所示。继续增加抽运功率,模式保持不变。可以看到,此时每个纤芯的强度几乎相同,对应远场具有很好的高斯分布。这种 7 个纤芯强度相同的分布并不是这种光纤的本征模式,它区别于同相位超模的高斯型分布^[13]。这是因为增益介质的存在,增益选模作用改变了光纤的模场分布^[14]。从抽运功率增加过程也可以看出,随着抽运功率的增加,图 4(a)中最强的纤芯强度也

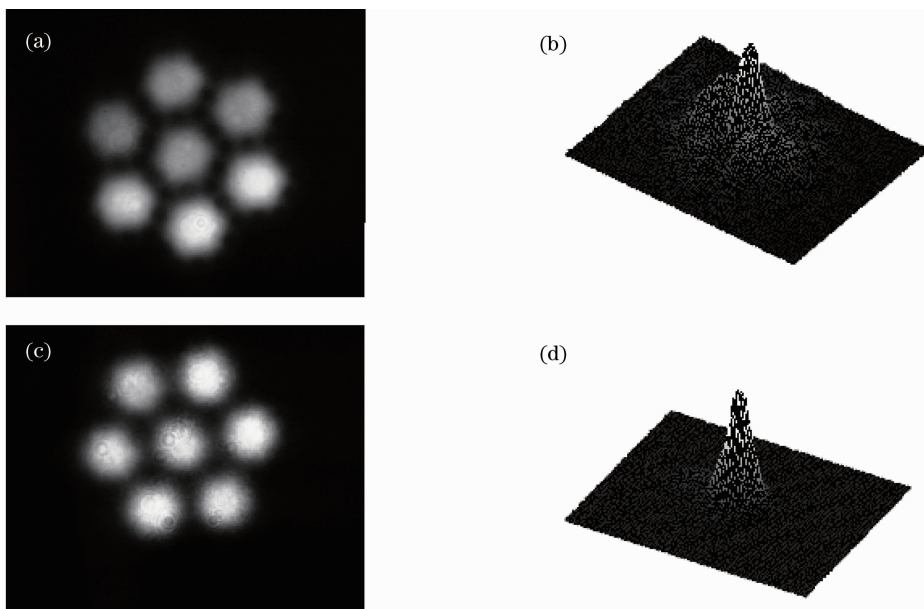


图 4 7 芯光纤输出模式分布。低功率抽运时, (a) 近场分布和 (b) 远场分布; 高功率抽运时, (c) 近场分布和 (d) 远场分布

Fig. 4 Mode distribution of the 7-core PCF. (a) near-field and (b) far-field mode distribution under low pump power; (c) near-field and (d) far-field mode distribution under high pump power

增长得更快,到一定程度后继续增加抽运功率,此纤芯强度增强减缓,而次强的纤芯强度很快增长,依次类推,直至所有纤芯的强度达到一致。在此过程中,刚开始各个纤芯的小信号增益系数相同,具有较强种子光的纤芯功率增长得较快,但是由于抽运功率的限制,很快达到增益饱和,增益系数下降,其他纤芯仍具有较高的增益系数,强度很快增长。当抽运功率增长到一定值时,所有纤芯都能得到有效的放

大,得到各个纤芯强度相同的平坦分布。这种分布与高斯型同相位本征模相比,具有更大的有效模面积,从而能承受更高的峰值功率,具有更小的非线性。在强抽运情况下,对应的自相关和光谱曲线如图 5(c)和(d)所示。对比图 5(a)和(b),自相关的多峰结构和光谱的调制消失,因此可以判断此时确实只有单一的同相位超模存在。

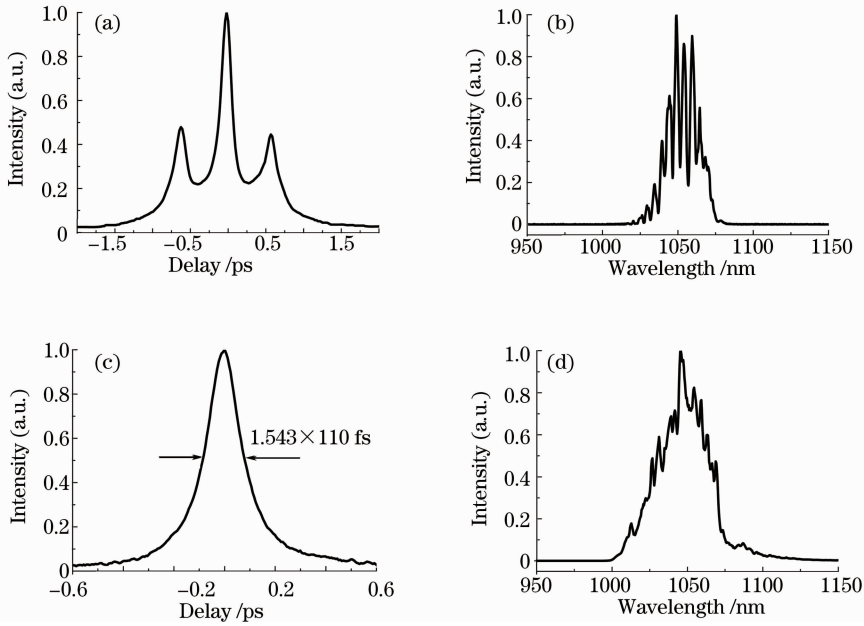


图 5 主放大器输出的自相关和光谱曲线。低功率抽运时的(a)自相关和(b)光谱曲线, 高功率抽运时的(c)自相关和(d)光谱曲线

Fig. 5 Output characteristics from the main amplifier. (a) autocorrelation trace and (b) spectrum under low pump power, (c) autocorrelation trace and (d) spectrum under high pump power

图 6 为放大器输出平均功率随抽运功率的变化曲线。当抽运光功率为 61 W 时,输出功率为 24 W,抽运斜率效率约为 60%。继续增加抽运功率,其他非线性效应,尤其是受激拉曼散射作用增强,导致脉冲畸变。但是此光纤超大的模场面积,而且各个纤

芯离散分布,热应力问题得到大大缓解,当抽运功率达到所用抽运源最高功率 100 W 时,光纤端面仍完好无损。在 24 W 输出时,输出的脉冲光经光栅对压缩后输出为 17.1 W,得到的自相关曲线和光谱如图 5(c)和(d)所示。脉冲宽度为 110 fs,是变换极限的 2.9 倍,通过合理补偿非线性啁啾可以进一步压缩脉冲。此脉冲宽度对应 1 MHz 的重复频率,脉冲峰值功率为 150 MW。

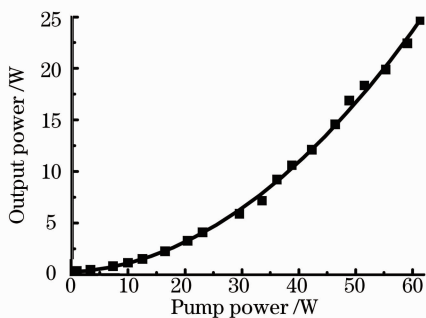


图 6 放大器输出的平均功率随抽运功率的变化曲线
Fig. 6 Pump power versus amplifier output power

4 结 论

利用掺镱保偏大模场面积光子晶体光纤和 7 芯光子晶体光纤,搭建了飞秒激光二级放大系统,获得了平均功率 24 W,重复频率 1 MHz,经光栅对压缩后脉冲宽度 110 fs,脉冲峰值功率 150 MW 的脉冲输出。利用增益饱和特性,获得了各个纤芯平坦分布的单一同相位超模输出,其远场具有很好的高斯

分布。并且由于 7 芯光子晶体光纤的超大模场面积和各个纤芯间隔分布,热应力问题得到了大大缓解。

参 考 文 献

- 1 Y. Zaouter, J. Bouillet, E. Mottay *et al.*. Transform-limited 100 μJ , 340 MW pulses from a nonlinear-fiber chirped-pulse amplifier using a mismatched grating stretcher-compressor [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(13): 1527~1529
- 2 F. Röser, J. Rothhard, B. Ortac *et al.*. 131 W 220 fs fiber laser system [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20): 2754~2756
- 3 M. E. Fermann, V. I. Kruglov, B. C. Thomsen *et al.*. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(26): 6010~6013
- 4 Y. Zaouter, D. N. Papadopoulos, M. Hanna *et al.*. Stretcher-free high energy nonlinear amplification of femtosecond pulses in rod-type fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(2): 107~109
- 5 C. D. Brooks, F. Di Teodoro. Multimegawatt peak-power, single-transverse-mode operation of a 100 μm core diameter, Yb-doped rodlike photonic crystal fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(11): 111119
- 6 M. Wragé, P. Glas, M. Leitner. Combined phase locking and beam shaping of a multicore fiber laser by structured mirrors [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(13): 980~982
- 7 L. Li, A. Schulzgen, H. Li *et al.*. Phase-locked multicore all-fiber lasers: modeling and experimental investigation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2007, **24**(8): 1721~1728
- 8 P. K. Cheo, A. Liu, G. G. King. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 439~441
- 9 L. Michaille, D. M. Taylor, C. R. Bennett *et al.*. Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1): 71~73
- 10 Y. J. Song, M. L. Hu, C. L. Wang *et al.*. Environmentally stable, high pulse energy Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber laser operating in the soliton-like regime [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(13-16): 1088~1090
- 11 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. 39 fs, 16 W all photonic crystal fiber laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 811~814
刘博文, 胡明列, 宋有建等. 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光系统 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 811~814
- 12 X. H. Fang, M. L. Hu, Y. F. Li *et al.*. Numerical analysis of mode locking in multi-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2010, **55**(3): 1~6
- 13 Fang Xiaohui, Hu Minglie, Li Yanfeng *et al.*. Numerical analysis for structure optimization of seven-core photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2495~2500
方晓惠, 胡明列, 栗岩锋等. 七芯光子晶体光纤结构优化的数值分析 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2495~2500
- 14 A. P. Napartovich, N. N. Elkin, V. N. Troshchieva *et al.*. Numerical modeling of the multicore fiber amplifier [C]. *SPIE*, 2007, **6346**: 634623