

文章编号: 0258-7025(2008)06-0811-04

# 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光系统

刘博文 胡明列\* 宋有建 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** 实验研究了高平均功率输出的光子晶体光纤飞秒激光系统。系统中振荡器和放大器均使用保偏型掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF)为增益介质, 具有极低非线性系数、很高的增益系数, 并能保证很好的环境稳定性。系统研究了种子光功率、脉冲宽度、脉冲啁啾和放大器抽运光功率等参数对系统输出飞秒激光脉冲宽度的影响。在输入种子光平均功率为 180 mW, 放大器抽运功率为 40 W 时, 获得平均功率 16 W 输出(对应单脉冲能量 320 nJ), 脉冲宽度压缩到 39 fs。

**关键词** 激光器; 光子晶体光纤; 飞秒激光; 光纤放大器

**中图分类号** O 437 **文献标识码** A

## 39 fs, 16 W All Photonic Crystal Fiber Laser System

Liu Bowen Hu Minglie Song Youjian Chai Lu Wang Qingyue

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

**Abstract** A femtosecond fiber laser system with high average power and short pulse duration is demonstrated, whose oscillator and amplifier are based on an Yb-doped single-polarization large-mode-area photonic crystal fiber (LMA-PCF) with low nonlinearity, high gain and nice environmentally stability. The dependence of the output pulse duration on the pulse energy, duration and chirp of seed light from oscillator and the pump power of amplifier is studied. The fiber laser amplifier generates 16 W average power, corresponding to 320 nJ pulse energy, at 40 W pump power, when the seed light is fixed at 180 mW average power, and the pulse duration is compressed to 39 fs after gratings.

**Key words** lasers; photonic crystal fiber; femtosecond laser; fiber amplifier

## 1 引言

超短脉冲激光技术一个重要方向就是研究基于光纤的新一代飞秒激光系统。光纤激光器具有良好的散热特性和环境稳定性, 结构紧凑; 输出模式接近衍射极限, 并且可以由商用激光二极管(LD)直接抽运, 降低了成本<sup>[1]</sup>。但是以传统双包层光纤为增益介质的锁模激光器, 由于纤芯面积小, 飞秒激光脉冲

在传输过程中积累非线性相移, 造成脉冲畸变, 而且纤芯无法承受高功率密度。因此长期以来, 飞秒光纤激光器输出的单脉冲能量和脉冲宽度等参数无法与传统固体激光器相比。而光子晶体光纤的出现为这一问题提供了一种解决方案。光子晶体光纤的无截止单模特性能够提供大模场面积, 降低了非线性效应; 利用空气包层结构(Air Cladding)可以极大地

收稿日期: 2008-05-04; 收到修改稿日期: 2008-05-13

**基金项目:** 国家 973 计划(2003CB314904, 2006CB806002), 国家 863 计划(2007AA03Z447), 国家自然科学基金(60678012), 高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083, 20070056073), 教育部科学技术研究重点项目(108032)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:** 刘博文(1981—), 男, 天津人, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤及光纤放大器的实验研究。

E-mail: bwliu@tju.edu.cn

**导师简介:** 王清月(1938—), 男, 河北人, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为光子晶体光纤及超短脉冲激光技术。

E-mail: chywang@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

增加内包层的数值孔径,提高抽运光的耦合效率。这两种优势的结合作使双包层大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF)开始应用于超短脉冲光纤激光器的研究<sup>[2]</sup>。2005年F. Röser等<sup>[3]</sup>利用以双包层掺镱大模场面积光子晶体光纤作为增益介质的啁啾脉冲放大系统,得到平均功率131 W,脉冲宽度220 fs,重复频率73 MHz的飞秒激光输出。2007年该小组通过降低种子光的重复频率又进一步得到了单脉冲能量1.45 mJ,脉冲宽度800 fs的输出,第一次在飞秒光纤脉冲激光器中得到毫焦耳量级的单脉冲能量<sup>[4]</sup>。2008年Y. Zaouter等<sup>[5]</sup>利用光脉冲在放大器增益光纤中的非线性光谱展宽,得到了脉冲宽度49 fs的飞秒脉冲,但输出平均功率只有8.7 W。以上放大系统中的振荡级均为固体或普通光纤激光器。文献<sup>[6]</sup>全部采用光子晶体光纤为增益介质,获得平均功率16 W,脉冲宽度85 fs的脉冲输出。本文进一步对全光子晶体光纤激光放大系统各参数之间的关系进行了系统的实验研究,获得了39 fs的脉冲宽度,16 W平均功率的输出。

## 2 实验装置

光子晶体光纤飞秒激光系统装置如图1所示,框图为振荡级部分。输出种子光的振荡级采用孤子锁模方式,最高能够输出平均功率900 mW,重复频率50 MHz,脉冲宽度554 fs,光谱宽度4 nm,能够被压缩到216 fs的傅里叶变换极限脉冲宽度如图2所示。放大级采用后向抽运方式,使用波长为976 nm的大功率激光二极管(LD)作为抽运源,抽运光通过纤芯直径为200  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为0.22的尾纤输出,

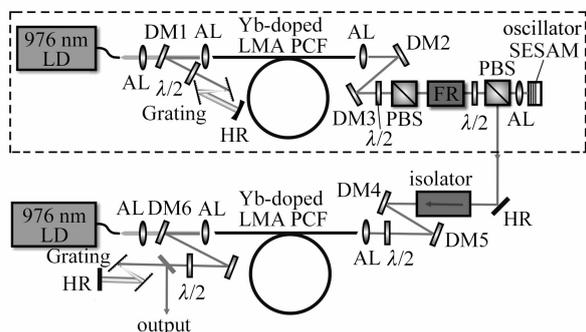


图1 实验装置图。HR:全反镜;PBS:偏振分束器;SESAM:半导体可饱和吸收镜

Fig.1 Experimental setup. AL.: aspheric len; DM: dichroic mirror; HR: high reflection mirror; PBS: polarization beam splitter; SESAM: semiconductor saturable absorber mirror

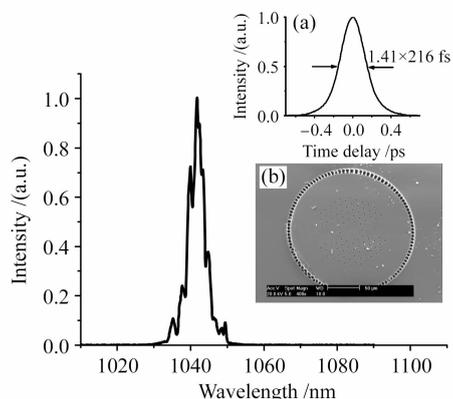


图2 振荡级输出种子脉冲光谱曲线。(a) 输出脉冲时域自相关曲线;(b) 大模场面积光子晶体光纤端面图  
Fig.2 Spectrum of the seed pulse. (a) intensity autocorrelation trace of seed pulse; (b) cross section of LMA-PCF

经非球面镜(AL)耦合到增益光纤中。振荡级的种子光经过隔离器和双色镜DM4,DM5进入放大级,隔离器(透过率60%)和双色镜都起隔离作用,隔离器防止种子光反馈进入振荡级,破坏锁模;双色镜对976 nm波长的光高透,1040 nm波长的光高反,隔离残余抽运光。增益光纤具有保偏结构,所以在种子光通过非球面镜之前需经过半波片,用以调整入射光的偏振态,使之和增益光纤偏振轴一致。增益光纤较长,为3.5 m,使种子光在放大的同时,光谱通过非线性效应得到展宽,并利用光纤中的三阶色散(TOD)补偿自相位调制(SPM)效应产生的非线性相移。抽运光透过双色镜DM6,经非球面镜耦合进入增益光纤,DM6对976 nm波长的光高透,1040 nm波长的光高反,起到隔离的效果,防止输出光进入抽运源损害二极管激光器,该出射端的非球面镜既要提高抽运效率又要满足增益光纤输出的数值孔径匹配。输出的放大光由双色镜DM6反射,经过光栅对压缩后输出,光栅为600 line/mm的闪耀光栅,接近于利特罗角入射时,对波长1040 nm激光的衍射效率大于90%。光栅的衍射效率对偏振敏感,需通过调整半波片使入射光的偏振态与光栅衍射效率最高的偏振方向一致。

实验中使用掺镱保偏双包层大模场面积光子晶体光纤作为放大增益介质,其结构如图2(b)所示。最外环绕着一层“空气包层”作为外包层,该层中相邻空气孔之间支撑臂厚度为亚微米量级,使内包层获得高达0.55的数值孔径,这种抽运结构使得增益光纤具有9 dB/m的抽运光吸收系数。内包层直径200  $\mu\text{m}$ ,分布六角型周期性排布的空气孔。空气孔

中心区域为激光传输纤芯, 模场直径  $29 \mu\text{m}$  (模场面积  $660 \mu\text{m}^2$ ), 数值孔径 0.03。通过在光纤内包层中引入应力双折射材料构成保偏结构, 产生双折射并使其中一个偏振态的折射率低于内包层等效折射率, 不满足光纤内传输的弱导条件而被损耗掉, 从而将基模的两个简并的正交偏振态分离, 确保光纤仅支持单一偏振模式传输<sup>[7]</sup>。实验中选用光纤的偏振消光比大于 10 dB, 波长 1060 nm 附近的单偏振带宽大于 100 nm。光纤两端都进行塌陷并打磨成  $8^\circ$  角, 以防止自激振荡激光的产生<sup>[8,9]</sup>。

### 3 实验结果

振荡级采用孤子锁模方式<sup>[10,11]</sup>, 其输出脉冲的非线性啁啾较小, 作为种子光可以减小在放大过程中的非线性相移积累。而其较窄的脉冲宽度, 提高了峰值功率, 增大了放大过程中基于自相位调制带来的光谱展宽, 更容易在放大级后得到窄脉冲。从振荡器输出的种子光通过隔离器之后功率为 180 mW, 由非球面镜耦合到放大级的增益光纤中, 当抽运光功率为 40 W 时, 输出功率为 16 W, 增益为 19.6 dB, 抽运效率为 40%, 如图 3 曲线 a 所示。种子光在放大的同时由于自相位调制效应展宽光谱, 能够支持更窄的脉冲。输出光谱呈振荡的多峰结构, 为典型的 SPM 效应。随着输出功率的增大, 光谱峰数目增加, 外侧峰强度不断增大, 光谱随之展宽<sup>[12]</sup>, 如图 4 所示。由于增益光纤为大模场面积光纤<sup>[13]</sup>, 具有很低的非线性系数, 而且 SPM 效应的阈值低于受激拉曼效应, 因此在当前功率水平运转时, 除 SPM 效应外其他非线性过程相对较弱。脉冲形

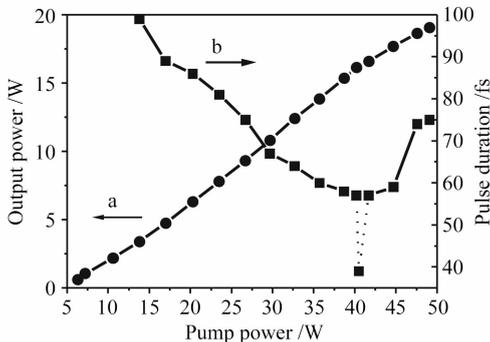


图 3 曲线 a 为放大级输出平均功率随抽运功率变化曲线, 曲线 b 输出光经压缩后脉冲宽度随抽运功率变化曲线

Fig. 3 Line a is the output efficiency corresponding to pump power; Line b is the dependence of the output pulse duration on pump power

状近似为高斯型, SPM 效应展宽光谱并在脉冲中部产生线性相移, 脉冲输出后由光栅压缩, 能够获得比种子光更短的脉冲宽度。随着光谱不断展宽, 出射脉冲的压缩率提高, 脉冲压缩得更窄, 如图 3 曲线 b 所示。当抽运功率在 40 W 附近时, 光谱宽度展宽到 47 nm, 直接输出的脉冲宽度为 2.1 ps, 压缩后为 39 fs, 对应的相干自相关曲线如图 5 所示, 其中 (b)

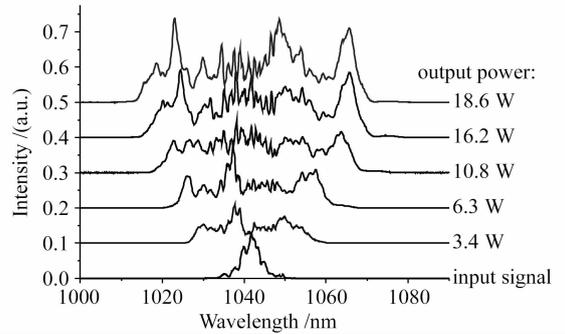


图 4 放大级输出光谱随功率变化

Fig. 4 Evolution of the spectra on the output power

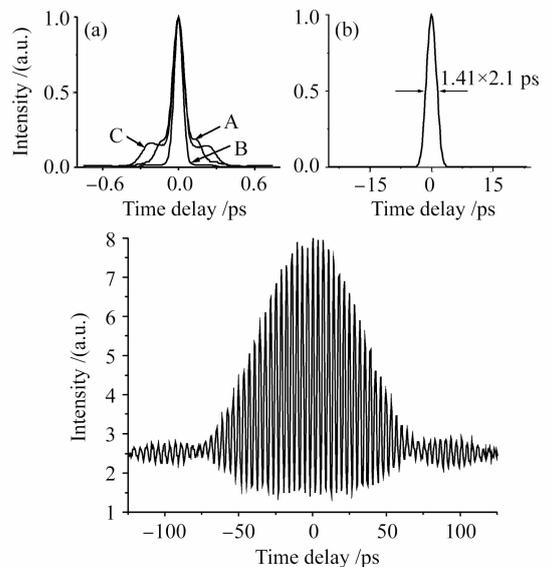


图 5 输出功率 16 W 附近获得的最短 39 fs 脉冲的相干自相关曲线。(a) 曲线 A, B, C 输出功率分别为 7.8 W, 16 W 和 18.6 W 下输出脉冲的自相关曲线, 压缩后脉冲宽度分别为 81 fs, 57 fs, 74 fs; (b) 39 fs 脉冲对应的压缩前自相关曲线

Fig. 5 Measured interferometric autocorrelation trace of the shortest 39 fs pulse duration in the vicinity of 16 W output power. (a) line A, B, C is the intensity autocorrelation trace at 7.8 W, 16 W, 18.6 W output power, corresponding to the 81 fs, 57 fs, 74 fs pulse duration after compression; (b) intensity autocorrelation trace of directly output pulse for the 39 fs pulse

为脉冲压缩前的强度自相关曲线。

虽然光谱展宽后,脉冲中部的线性相移可使脉冲被压缩得更窄,但 SPM 效应使脉冲的两侧产生非线性相移,并在光纤中不断积累,而该非线性相移无法在光栅对压缩过程中补偿,不能将脉冲压缩到变换极限。同时脉冲压缩后有较大的基底,该基底随着输出功率的增大而增加。但是,脉冲在光纤中传输展宽光谱的同时会受到色散的影响,其中三阶色散使脉冲产生非线性啁啾,啁啾和 SPM 效应产生的非线性相移相互抵消,能够进一步压缩脉冲,同时减小脉冲压缩后的基底<sup>[1,14]</sup>。实验中,振荡级和放大级光纤总共 5 m,因此光纤本身所具有补偿 SPM 效应带来非线性啁啾的三阶色散量为确定量,这样就存在一个最优化抽运功率,在该功率下获得最佳补偿,脉冲压缩后的宽度最窄,基底最小。而随着的抽运功率的增加和减小,宽度和基底都增大。在图 5(a)中,曲线 A, B, C 分别对应输出功率 7.8 W, 16 W, 18.6 W 时的强度自相关曲线;输出功率为 16 W, 脉冲宽度为 57 fs, 基底相对最小;当输出功率为 7.8 W 和 18.6 W 时, 脉冲宽度都有所增加分别为 81 fs 和 74 fs, 而且基底也相对抬高。进一步在输出功率为 16 W 附近, 通过微调种子光脉冲功率、抽运光功率和光栅对间距, 获得了最短的 39 fs 的脉冲输出。

## 4 结 论

利用掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤作为增益介质, 构建了全光子晶体光纤飞秒激光放大系统, 获得了平均功率 16 W, 重复频率 50 MHz, 单脉冲能量 320 nJ 的脉冲输出, 脉冲宽度最窄可达 39 fs。系统中振荡级和放大级基于同一种掺镱保偏大模场面积光子晶体光纤, 能够提高种子光到放大系统的耦合效率, 并可以进一步集成。大模场面积光子晶体光纤的无截止单模特性使输出激光的光束质量接近衍射极限, 而且还具有高重复频率、结构紧凑、无需水冷等优点, 是固体激光放大器无法比拟的。该种全光子晶体光纤飞秒激光放大器已经开始应用于飞秒激光微纳加工、太赫兹波产生<sup>[15,16]</sup>、基于参量过程的纠缠光子对产生等诸多领域。

## 参 考 文 献

- M. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha. Ultrafast Lasers: Technology and Applications [M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. 89~92
- J. Limpert, F. Röser, T. Schreiber *et al.*. High-power ultrafast fiber laser systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(2):233~244
- F. Röser, J. Rothhard, B. Ortac *et al.*. 131 W 220 fs fiber laser system [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20):2754~2756
- F. Röser, T. Eidam, J. Rothhard *et al.*. Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(24):3495~3497
- 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**(1):107~109
- Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Sub-100 fs high power Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser amplifier [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008 (to be published)  
刘博文, 胡明列, 宋有建等. 亚百飞秒高功率掺镱大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大器的实验研究[J]. *物理学报*, 2008 (待发表)
- T. Schreiber, F. Röser, O. Schmidt *et al.*. Stress-induced single-polarization single-transverse mode photonic crystal fiber with low nonlinearity [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19):7621~7630
- Wang Chingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1603~1606  
王清月, 胡明列, 宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1603~1606
- Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Experiment research on a femtosecond laser amplifier based on a large-mode-area photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):479~480  
刘博文, 胡明列, 宋有建等. 高功率掺镱大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大器的实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):479~480
- Song You Jian, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. A high energy soliton mode-locking fiber laser based on Yb<sup>3+</sup> doped single-polarization large-mode-area photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008 (to be published)  
宋有建, 胡明列, 刘博文等. 高能量掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤孤子锁模飞秒激光器[J]. *物理学报*, 2008(待发表)
- Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. Stretched-pulse femtosecond photonic crystal fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008 (to be published)  
宋有建, 胡明列, 张弛等. 呼吸脉冲锁模的光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2008(待发表)
- P. G. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. San Diego, CA, Academic Press, 2001. 97~103
- W. Chen, J. Li, S. Li *et al.*. Study on single-mode photonic crystal fibers in wide wavelength range [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **7**(5):383~385
- S. Zhou, L. Kuznetsova, A. Chong *et al.*. Compensation of nonlinear phase shifts with third-order dispersion in short-pulse fiber amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(13):4869~4877
- Tian Zhen, Wang Changlei, Li Yanfeng *et al.*. Compact THz-TDS based on photonic crystal fibers femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):477  
田震, 王昌雷, 栗岩峰等. 基于光子晶体光纤飞秒激光器的紧凑型太赫兹时域光谱仪[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):477
- Song Y. J., Hu M. L., Wang C. L. *et al.*. High pulse energy environmentally stable Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber laser works in soliton-like regime [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008 (to be published)