

文章编号: 0258-7025(2010)09-2415-04

# 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器

刘博文 胡明列\* 宋有建 李毅 刘华刚 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** 实验研究了基于掺  $\text{Yb}^{3+}$  单偏振大模场面积光子晶体光纤的高单脉冲能量光纤飞秒激光放大器。该放大器为非线性放大, 利用自相位调制实现非线性相移得到光谱展宽。由于压缩器提供适当的色散补偿, 并优化振荡-放大系统中的增益、非线性、高阶色散参数, 使得压缩后脉冲具有较高的峰值功率。同时利用声光调制器降低振荡级的重复频率到 1 MHz, 最后得到最短脉冲宽度 124 fs, 单脉冲能量 1.56  $\mu\text{J}$ , 对应峰值功率 12.6 MW 的激光输出。

**关键词** 光子晶体光纤; 大模场面积光纤; 飞秒激光; 光纤放大器

中图分类号 O437; TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2415

## Photonic Crystal Fiber Femtosecond Laser Amplifier with Millijoules and 100 fs Level Output

Liu Bowen Hu Minglie Song Youjian Li Yi Liu Huagang Chai Lu Wang Qingyue

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A high pulse energy femtosecond laser amplifier with  $\text{Yb}^{3+}$ -doped single polarization large-mode-area photonic crystal fibers (LMA-PCF) is demonstrated. Based on the nonlinear amplifying configuration, amplification of laser pulses in the LMA-PCF is accompanied by spectral broadening and nonlinear phase-shift accumulation due to the self-phase modulation. This configuration can often help to produce high-peak-power ultrashort laser pulses, since the self-phase modulation induced nonlinear phase shift can be compensated by an appropriate negative-dispersion component following the amplification stage. This strategy of ultrashort laser pulse generation requires, however, a precise balance between the gain, nonlinearity, and high-order dispersion in the oscillator-amplifier system. An acousto-optical modulator is applied to reduce the repetition rate to 1 MHz. Laser pulses with 124 fs duration (the shortest pulse) are generated with 1.56  $\mu\text{J}$  pulse energy, corresponding to 12.6 MW peak power.

**Key words** photonic crystal fibers; large-mode-area fiber; femtosecond laser; fiber amplifier

## 1 引言

飞秒激光器具有输出脉冲短、峰值功率高、光谱宽等其他激光器无法比拟的优势, 成为微纳加工、生物光子学、飞秒化学等学科领域里一个重要的工具<sup>[1]</sup>。钛宝石飞秒激光系统的出现和商用化, 提高了该种激光器的稳定性和可操作性, 降低了使用门

槛, 扩展了应用范围。但在不借助特殊冷却技术的前提下, 由于热效应的制约, 钛宝石激光器的输出平均功率最高只能达到瓦量级<sup>[2]</sup>, 无法满足参量放大、高次谐波、高功率超连续光谱产生等方面的要求; 而且其重复频率也只有千赫兹量级, 限制了飞秒激光微纳加工的效率。近年来, 以掺  $\text{Yb}^{3+}$  大模场面积

收稿日期: 2010-03-31; 收到修改稿日期: 2010-06-07

**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)、全国优秀博士学位论文作者专项资金 (2007B34)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-07-0597) 和天津市科技支撑计划 (08ZCKFJC28000) 资助课题。

**作者简介:** 刘博文 (1981—), 男, 讲师, 主要从事光子晶体光纤及飞秒激光放大器方面的研究。

E-mail: bwliu@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

(LMA)双包层光子晶体光纤(PCF)为增益光纤的飞秒激光器,不但继承了传统光纤激光器体积小、稳定性好的优点,而且输出平均功率高、单脉冲能量大<sup>[3~8]</sup>;尤其是光子晶体光纤飞秒激光放大器,输出的平均功率远远超过了钛宝石飞秒激光器,目前最高可达到 325 W,脉冲宽度近 400 fs<sup>[4]</sup>。

目前获得高单脉冲能量的光纤飞秒激光放大系统一般采用啁啾脉冲放大(CPA)技术。该方案虽能获得毫焦耳量级的单脉冲能量,但系统复杂,不利于小型化。不同于 CPA 方案,非线性脉冲放大技术无需展宽器,直接放大振荡级输出的信号光,在保证较高单脉冲能量的同时,简化了系统的结构,并且利用自相位调制效应(SPM)展宽了光谱,使压缩后的脉冲更窄,峰值功率进一步提高。Y. Zaouter 等<sup>[6]</sup>报道了该种类型的光纤放大系统已经得到脉冲宽度 49 fs,单脉冲能量 870 nJ,峰值功率 12 MW 的输出。文献[8]中实现了脉冲宽度 39 fs 的输出。但以上报道并没有实现在百飞秒脉冲宽度下,大于微焦耳量级的脉冲输出。本文在文献[8]的基础上,利用

声光调制器(AOM)降低振荡级输出信号光的重复频率至 1 MHz,以实现微焦耳量级、百飞秒激光脉冲的输出。

## 2 实验装置

放大系统由振荡级,AOM,放大级和压缩器组成,实验装置如图 1 所示。振荡级和放大级的增益光纤都为掺 Yb<sup>3+</sup> 偏振型大模场面积双包层光子晶体光纤(LMA-PCF),其端面扫描电镜图(SEM)如图 2 所示。纤芯模场直径为 29  $\mu\text{m}$ (对应模场面积 660  $\mu\text{m}^2$ ),数值孔径为 0.03,光纤内包层直径为 200  $\mu\text{m}$ ,通过在其中引入应力双折射材料构成保偏结构,确保光纤内只支持单一模式传输,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。外包层采用“空气包层”技术,具有很大的空气填充率,使内包层的数值孔径达 0.55,提高了抽运效率。为了保证长期稳定运转,实验中需要对该种光纤端面进行塌陷抛光处理,并形成 8°角,避免自激产生。

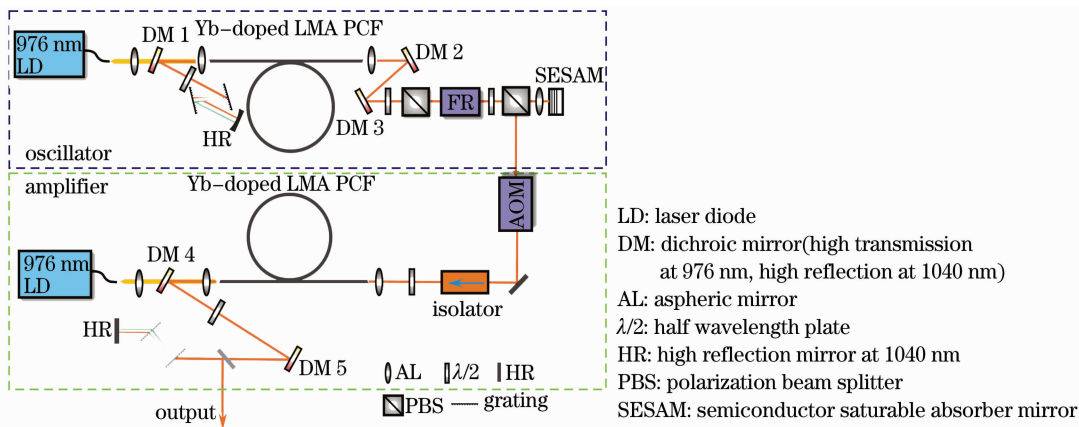


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

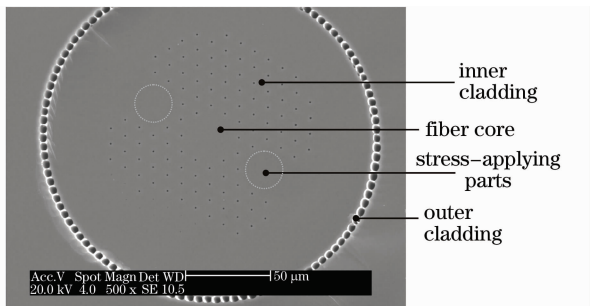


图 2 掺 Yb<sup>3+</sup> 偏振型大模场面积双包层光子晶体光纤端面 SEM 图

Fig. 2 SEM of cross section of Yb<sup>3+</sup> polarization maintain LMA-PCF

振荡级为线型腔,工作在孤子锁模区域。输出信号光经隔离器(隔离器透射率为 87%,隔离度为 38 dB)后,再由 AOM 进行脉冲选择,该 AOM 为 GaP 晶体,利用输入的射频信号转化为超声波,形成垂直于光传播方向的声光布拉格光栅,信号光通过光栅后产生衍射,+1 级衍射角为 3.6°,为效率最高的衍射级次,最大衍射效率为 56%(为了避免器件损伤,控制一定的射频信号功率,实际衍射效率为 28%),利用方波脉冲调制的射频信号形成光开关,在+1 级得到选择后的脉冲序列,实验中输出脉冲序列的重复频率降低到 1 MHz。脉冲选择后的信号光由非球面透镜耦合到放大级光纤中。放大级采

用后向抽运方式,放大级光纤长 2 m,沿光纤应力点连线的方向弯曲,弯曲直径为 30 cm,这种盘绕方式保证了光纤具有较好的偏振特性,并且抑制高阶模的出现。放大输出后由 1250 line/mm 的熔石英透射光栅对压缩,该光栅具有较高的破坏阈值,支持高单脉冲能量和高平均功率。利特罗(Littrow)角为  $41.7^\circ$ ,最大衍射效率为 92%。

### 3 实验结果

振荡级输出脉冲平均功率为 400 mW,重复频率为 50 MHz,单脉冲能量为 8 nJ,脉冲宽度为 550 fs,光谱宽度为 6 nm,能支持 190 fs 的傅里叶变换极限脉冲,如图 3 所示。信号光经隔离器后平均功率为 350 mW,再经过 AOM 进行脉冲选择,平均功率降为 2 mW,重复频率为 1 MHz,单脉冲能量为 2 nJ。耦合到放大级,进行放大。由于信号光脉冲的重复频率为兆赫兹量级,脉冲间隔为微秒量级小于  $\text{Yb}^{3+}$  的上能级寿命(毫秒量级),所以脉冲序列在放大过程中被视为连续光。这样,当脉冲的重复频率降低后,输出的单个脉冲增益增加,脉冲能量大于高重复频率时的输出。实验中,当抽运功率为 6.6 W 时,输出脉冲的平均功率为 415 mW,单脉冲能量为 415 nJ,增益为 23.2 dB;当抽运功率为 18.3 W 时,输出脉冲的平均功率为 4.4 W,单脉冲能量为  $4.4 \mu\text{J}$ ,增益为 33.4 dB。输出平均功率随抽运光功率变化曲线如图 4 所示。

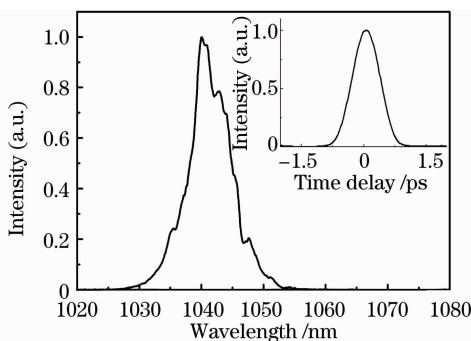


图 3 振荡级输出信号光脉冲光谱图,光谱宽度 6 nm,插图为脉冲自相关曲线,脉冲宽度 550 fs

Fig. 3 Spectrum of signal pulses from oscillator, width of spectrum is 6 nm, the insert is the auto-correlation curve of the pulses, which shows 550 fs pulses duration

由于放大器为非线性放大,光脉冲在得到增益的同时,伴随着非线性效应。在一定的单脉冲能量范围内,自相位调制起主导作用,产生非线性相移,展宽光谱,并且具有典型的多峰结构<sup>[9]</sup>,如图 5 所示。展宽

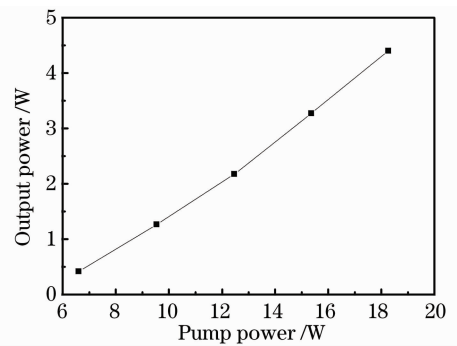


图 4 放大级输出光功率随抽运功率的变化曲线  
Fig. 4 Curve of the output power corresponding to pump power in amplifier

的光谱能够支持更窄的傅里叶变换极限脉冲,使压缩后的脉冲宽度比种子光更窄。但自相位调制与脉冲形状有很强的相关性,实验中信号光脉冲近似为高斯型,其脉冲中部和两翼的啁啾情况大不相同;脉冲中部更接近抛物线形状,形成线性啁啾,能够较好地被压缩器补偿;而脉冲两翼明显地背离了抛物线,形成非线性啁啾,经光栅压缩后产生基底或旁瓣。所以即使脉冲光谱展宽得再宽,脉冲可压缩得更窄,但非线性啁啾的引入也会降低脉冲质量,减小有效能量,导致脉冲峰值功率下降。因此,在放大过程中不能无限地增加抽运光功率,提高增益,而应将输出脉冲的能量控制在一个适当范围内,在保证一定脉冲质量的前提下,得到较高的单脉冲能量<sup>[10]</sup>。实验中发现,随着抽运光功率的增加,压缩后脉冲宽度先变窄,然后逐渐增加,同时脉冲基底变大,质量变差,如图 6 所示。当抽运光功率为 6.6 W 时,压缩后脉冲宽度为 158 fs,单脉冲能量为 298 nJ,峰值功率为 1.9 MW;抽运光功率提高到 12.5 W 后,压缩后脉冲宽度为 124 fs,此时脉冲宽度最窄,单脉冲能量为  $1.56 \mu\text{J}$ ,峰值功率 12.6 MW;此后,继续增加抽运光功率,压缩后的脉冲宽度开始增大,当抽运光功率为 18.3 W 时,脉冲宽度为 187 fs,且具有较大的基底,脉冲质量进一步恶化。

对于光纤放大器而言,整体的增益带宽小于增益系数带宽,并且随着增益的增加而减小,而增益带宽的减小严重限制了输出脉冲的光谱宽度。本文中,放大器具有很高的增益,都在 20 dB 以上,增益带宽的限制非常明显。在非线性放大过程中,虽然随着抽运功率的增加,输出脉冲的单脉冲能量增加,自相位调制引入的光谱展宽量增加,但是放大器增益的提高带来了增益带宽的减小,限制并抵消了非线性效应的光谱展宽,如图 5 所示。抽运功率为

6.6 W时,放大器直接输出的脉冲宽度为1.6 ps,峰值功率为260 kW,光谱宽度为24 nm;当抽运功率增加到18.3 W时,直接输出的脉冲宽度增加到2.1 ps,峰值功率为2.1 MW,提高了8倍,但光谱宽度仅展宽到29 nm;这说明增益窄化起了明显的作用,限制了脉冲光谱的展宽。在图5中还发现,当抽运功率大于6.6 W时,光谱的长波部分开始抬起,说明由于放大过程中的单脉冲能量较大,峰值功率比较高,引入了一定的受激拉曼效应,虽然这部分能量不大,但是还会对脉冲质量起到一定的影响。

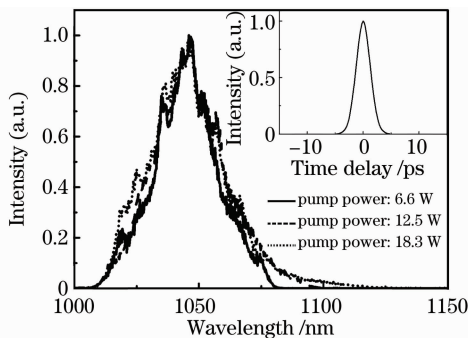


图5 放大器输出光谱曲线,插图为抽运光功率为18.3 W时的放大后直接输出的脉冲自相关曲线,脉冲宽度为2.1 ps

Fig. 5 Output spectrum of the amplifier. The auto-correlation curve of 2.1 ps pulses directly output from amplifier when the pump power is 18.3 W is shown in insert

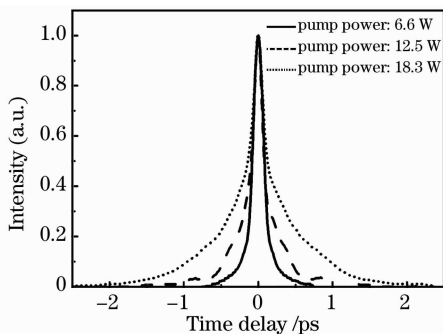


图6 压缩后脉冲的自相关曲线

Fig. 6 Auto-correlation curves of the pulses after compression

## 4 结 论

实验研究了光子晶体光纤飞秒激光放大器,使用声光调制器降低了脉冲的重复频率,提高了单脉冲增益,输出的单脉冲能量达到了微焦耳量级,并且利用放大过程中的非线性效应展宽了光谱,使得输出脉冲压缩后的宽度比信号光脉冲更窄,压缩脉冲

宽度最短可达到124 fs;而且该种放大器结构简单,便于维护,可广泛应用于飞秒激光加工<sup>[11]</sup>和太赫兹波产生<sup>[12]</sup>等领域。但是由于自相位调制引入的非线性啁啾无法在压缩过程中得到有效补偿,压缩后脉冲两翼抬起,脉冲质量下降,影响了后续应用。所以对于非线性放大,应优化抽运光功率和压缩器参数,得到具有较好质量和高单脉冲能量的窄脉冲输出。

## 参 考 文 献

- 1 M. E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha. Ultrafast Lasers: Technology and Applications[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. 323~765
- 2 H. Wang, S. Backus, Z. Chang *et al.*. Generation of 10-W average-power, 40-TW peak-power, 24-fs pulses from a Ti:sapphire amplifier system[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1999, **16**(10): 1790~1794
- 3 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
- 4 T. Eidam, S. Hädrich, F. Röser *et al.*. A 325-W-average-power fiber CPA system delivering sub-400 fs pulses[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 187~190
- 5 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
- 6 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
- 7 Wang Qingyue, 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
- 8 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
- 9 P. G. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. San Diego: Academic Press, 2001. 97~103
- 10 A. Chong, L. Kuznetsova, F. W. Wise. Theoretical optimization of nonlinear chirped-pulse fiber amplifiers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2007, **24**(8): 1815~1823
- 11 B. W. Liu, M. L. Hu, X. H. Fang. *et al.*. High-power wavelength-tunable photonic-crystal-fiber based oscillator-amplifier-frequency-shifter femtosecond laser system and its applications for material microprocessing[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(1): 44~48
- 12 Liu Feng, Song Youjian, Xing Qirong *et al.*. 150  $\mu$ W compact ultrashort terahertz pulses radiation source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1967  
刘丰, 宋有建, 邢歧荣等. 150  $\mu$ W 小型化超短脉冲太赫兹辐射源[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1967