

文章编号: 0258-7025(2009)03-0620-05

基于中空光子带隙光纤的飞秒激光脉冲压缩

刘博文 王清月 徐博 李毅 宋有建 张弛 胡明列* 柴路

(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 利用中空光子带隙光纤(HC-PBGF)对光子晶体光纤飞秒激光器输出的激光脉冲进行腔外再压缩。激光器输出的脉冲中心波长为1040 nm, 脉冲宽度为475 fs, 平均功率为400 mW, 单脉冲能量为8 nJ。通过白光干涉法测量了中空光子带隙光纤的色散参数为 $-48 \text{ ps}^2/\text{km}$, 并利用截断实验得到了所用光纤的最优化长度, 压缩后获得的最短脉冲宽度为108 fs, 接近变换极限, 传输效率为89%。由于该光纤纤芯的非线性系数较低, 脉冲在其中传输无非线性效应, 压缩后输出光谱保持不变。

关键词 非线性光学; 中空光子带隙光纤; 脉冲压缩; 飞秒激光; 光子晶体光纤激光器

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0620

Femtosecond Pulse Compression through Hollow-Core Photonic Bandgap Fibers

Liu Bowen Wang Qingyue Xu Bo Li Yi Song Youjian

Zhang Chi Hu Minglie Chai Lu

*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 The pulse compression for the femtosecond photonic crystal fiber laser is obtained by hollow core photonic bandgap fibers (HC-PBGF). The fiber laser directly outputs 475 fs pulses at a central wavelength of 1040 nm with an average power of 400 mW, corresponding to a pulse energy of 8 nJ. The dispersion of the HC-PBGF is measured with a white light interferometry method, which shows that the fiber has an abnormal dispersion of about $-48 \text{ ps}^2/\text{km}$ and can be applied to compensate the positive chirp of femtosecond pulses from the fiber laser. After compression from the fiber with an optimized length, the pulses are compressed to 108 fs, which is close to Fourier transmission limitation. The transmission efficiency is about 89%, which is much better than a grating pair. The spectrum keeps the same as that of the input pulse after passing through the fiber, due to the low nonlinearity and bandgap properties of the HC-PBGF.

Key words nonlinear optics; hollow-core photonic bandgap fiber; pulse compression; femtosecond laser; photonic crystal fiber laser

1 引言

飞秒激光脉冲具有脉冲宽度窄、峰值功率高等

特点, 广泛应用于非线性光学、精密加工、医疗等科学技术领域, 而飞秒激光技术的研究也一直是科研

收稿日期: 2008-09-10; 收到修改稿日期: 2008-10-28

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806002)、国家 863 计划(2007AA03Z447)、国家自然科学基金(60678012, 60838004)、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助项目(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: 刘博文(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤及飞秒激光器的实验研究。

E-mail: bwliu@tju.edu.cn

导师简介: 王清月(1938-), 男, 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

工作者关注的热点之一^[1]。在飞秒激光的产生、放大和传输技术中,脉冲压缩是其中重要环节,目前常用棱镜对^[2]、光栅对^[3]等元件提供负色散,对脉冲进行压缩。而上述两种分立元件不但调整困难容易失配,而且占据空间较大,妨碍了激光系统的进一步集成,尤其是光纤激光器和放大器中的脉冲压缩分立元件阻碍了全光纤化的实现。而中空光子带隙光纤的出现为这一问题的解决提供了一种方案。中空光子带隙光纤是一种利用光子带隙导光的光子晶体光纤^[4]。由于特殊的导光机制,其只对特定波长范围内的光低损耗传输;并且传输窗口内的色散特性也不同于传统光纤,短波长处具有正色散特性,长波长处具有负色散特性,零色散点介于其中^[5];而且光被局限在空气纤芯中传输,降低了脉冲光在其传输过程中的非线性作用^[6]。以上种种新奇的特性使得该种光纤一出现就被广泛应用于短脉冲传输和压缩方面。2004年 Göbel 等^[7]利用该种光纤实现了中心波长812 nm单脉冲能量4.6 nJ飞秒脉冲的无畸变传输。2003年 Matos 等^[8]利用中空光子带隙光纤作为放大系统压缩器件,得到脉冲宽度1.1 ps,单脉冲能量0.11 nJ的输出。本课题组在实验中利用中空带隙光子晶体光纤压缩光子晶体光纤飞秒激光器输出的啁啾脉冲,得到接近变换极限的脉冲宽度108 fs,单脉冲能量5 nJ的输出,为光子晶体光纤飞秒激光系统进一步集成打下基础。

2 中空光子带隙光纤特性的测量

实验中使用的中空光子带隙光纤其端面结构如

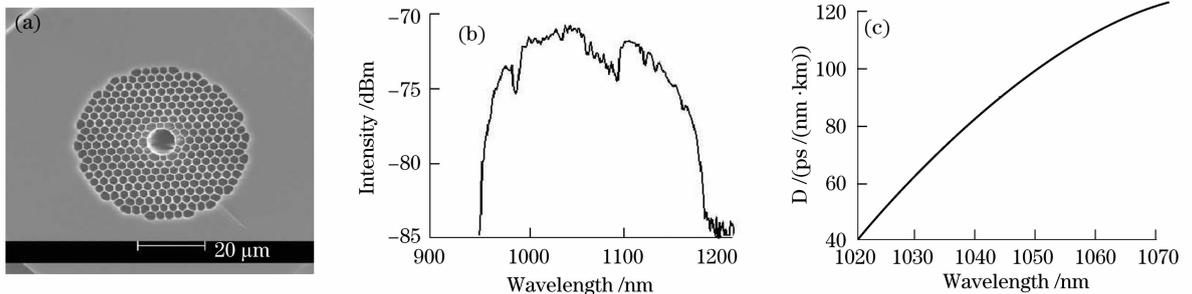


图1 (a) 光纤截面的 SEM 照片; (b) 光纤的透射光谱; (c) 中空光子带隙光纤的色散曲线

Fig. 1 The SEM image of the cross section of the fiber (a), the transmission spectrum (b), and measured dispersion curve of the hollow core photonic bandgap fiber(c)

3 实验结果

实验中振荡级为光子晶体光纤飞秒激光器,工作在孤子锁模状态^[11,12]。输出平均功率为400 mW,重复频率为50 MHz,对应单脉冲能量为

图1(a)所示,包层空气孔直径为 $2.4\ \mu\text{m}$,孔间距为 $2.6\ \mu\text{m}$,纤芯空气孔直径为 $8.3\ \mu\text{m}$ 。脉冲压缩实验前,分别测量了该光纤的透射谱和色散参数。首先,利用白光源测量该光纤的透射窗口,将光源出射的白光耦合到光纤中,利用光谱仪(ANDO, AQ-6315A)测量光纤出射光谱,和原始光谱相减后得到透射谱,透射窗口中心波长为1060 nm,窗口宽度166 nm左右,其透射谱不平坦有一定调制,如图1(b)所示。接着,利用白光干涉法测量该光纤的色散^[9]。实验装置如图2所示,其中AL为非球面镜, $\lambda/2$ 为半波片,PBS为偏振分光棱镜,HR为高反镜,Delay为延迟线,BS为1:1分束片,OSA为光谱仪。由高非线性光子晶体光纤展宽工作波长在1040 nm飞秒激光器^[10]的出射脉冲,形成宽度100 nm左右的连续谱,以此为光源,将其出射光分为两路,其中一路光耦合到被测光纤中,另外一路光在自由空间中传输,两路光合束后耦合到光谱仪中,在两路光中都加入半波片用以调整偏振态,保证两路光合束后偏振态一致。在相干长度范围内,由于光纤中的色散作用,两路光在传输过程中产生相位差,而不同波长的光相位差不同,当某一波长的光相位差为 2π 整数倍时,相干相长,相位差为 π 的奇数倍时,相干相消,这样使得两路光合束后的光谱产生调制,从光谱中提取出相位信息,并最终得到色散曲线。由于光源带宽的限制,测量得到了1020~1070 nm的色散曲线,如图1(c)所示,在激光器的工作波长1040 nm处色散系数 D 为 $83\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,对应 $-48\ \text{ps}^2/\text{km}$ 的二阶色散(GVD),三阶色散(TOD)为 $0.8\ \text{ps}^3/\text{km}$ 。

8 nJ,脉冲宽度为475 fs,光谱宽度为10 nm,中心波长在1040 nm,如图3所示。假设脉冲形状为双曲正割,则10 nm的带宽可以支持112 fs的脉冲,小于实际输出的脉冲宽度,说明激光输出脉冲带有正啁

啾,通过压缩,可以得到更窄的脉冲。输出脉冲经过隔离器,平均功率衰减到280 mW,由非球面镜耦合到中空光子带隙光纤中。由于光纤数值孔径较小,这里选用了焦距较长的非球面镜,脉冲经压缩后再由非球面镜耦合输出,由自相关器测量出射脉冲的强度自相关和相干自相关曲线。由于光纤长度较短,传输损耗几乎忽略不计,主要是输入和输出损耗。光纤出射功率为249 mW,损耗仅为11%。实验中通过截断法确定压缩所需光纤的最佳长度,获得了压缩后脉冲从负啾啾到正啾啾的一系列演化过程。图3(a)中曲线b,c,d分别是当光纤为23 cm,46 cm和39 cm长时的压缩结果,得到了负啾啾,接

近变换极限,正啾啾三种时域状态的脉冲。当光纤长46 cm时,提供的负色散量过大,产生了过压缩,得到的脉冲具有负啾啾,脉冲宽度为137 fs;当光纤长23 cm时,提供的负色散量不够,脉冲仍为正啾啾,脉冲宽度为245 fs;通过截断法找到当光纤长39 cm时,脉冲可以压缩到变换极限,脉冲宽度为108 fs。对比三种状态下的相干自相关曲线发现当脉冲为正啾啾(图4(c)) and 负啾啾(图4(d))时,相干自相关曲线两翼都相对抬起,证明啾啾的存在,而当光纤长度为23 cm时,具有的啾啾量更大,脉冲宽度更宽,相干自相关曲线两翼抬起更明显。

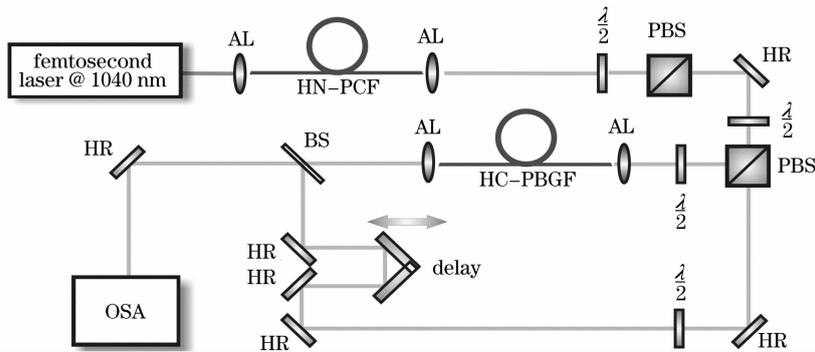


图2 色散测量装置

Fig. 2 Setup of dispersion measurement

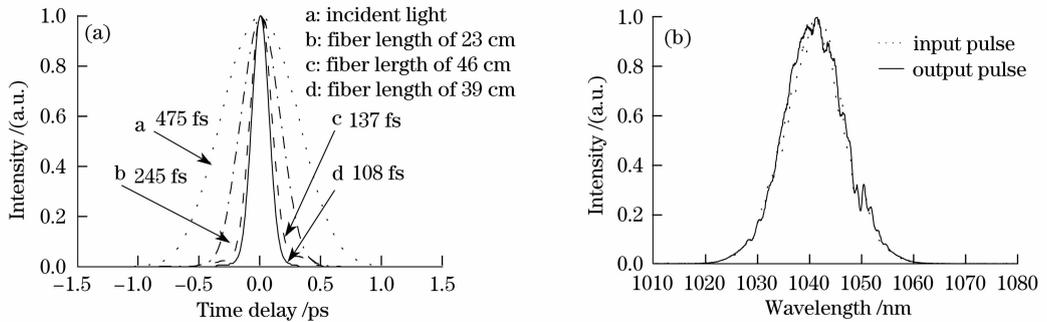


图3 (a) 强度自相关曲线；(b) 入射前后的脉冲光谱

Fig. 3 Intensity autocorrelation trace (a) and the spectra of the input and output pulses (b)

由于中空光子带隙光纤具有很低的非线性系数,所以脉冲在其中传输的过程中没有明显的非线性现象,输入和输出光谱宽度基本保持不变,如图3(b)所示。输出光谱形状略有调制,主要是因为中空光子带隙光纤的透射窗口曲线并不平坦(如图1(b)所示)。但是由于该调制较小,没有对脉冲造成明显的影响。

作为对比,实验中使用600 line/mm闪耀光栅对激光器输出脉冲进行压缩。光栅表面镀金,衍射效率对偏振敏感,调整入射光的偏振态使光栅衍射效率最高,接近于利特罗角入射时,对波长1040 nm的

激光衍射效率在90%左右,两次通过光栅对后能量损失40%左右,远大于中空光子带隙光纤的11%。在振荡级工作于同样的状态下,通过调整光栅对之间的距离得到不同的负色散量,优化后压缩得到接近变换极限的脉冲,脉冲宽度为112 fs,和利用中空光子带隙光纤压缩后得到的108 fs几乎一样。图4(a)和(b)为两种压缩方式得到的接近变换极限脉冲的相干自相关曲线,其都为典型的8:1曲线,但是两者在两翼处还是略有不同。主要是因为中空光子带隙光纤和光栅对具有一定的三阶色散,而两者提供三阶色散量有所不同;脉冲压缩到变换极限时,

三阶色散对脉冲形状的影响开始明显,使脉冲前沿陡峭而后沿有拖尾,不同的三阶色散造成的脉冲形状不同,这样脉冲的相干自相关曲线也不同^[13]。光栅压缩脉冲实验中,光束入射角为 20° ,计算得到该参数下光栅的等效二阶色散为 $-1.6217 \text{ ps}^2/\text{m}$,等效三阶色散为 $3.2 \times 10^{-3} \text{ ps}^3/\text{m}$,改变光栅对之间的距离使光栅和中空光子带隙光纤具有相同的二阶色散时,光纤的三阶色散是光栅的9倍。脉冲通过该光纤压缩后将具有一定的畸变,并不压缩到标准的变换极限脉冲,对比图4(a)和(b)可以看出,相对于

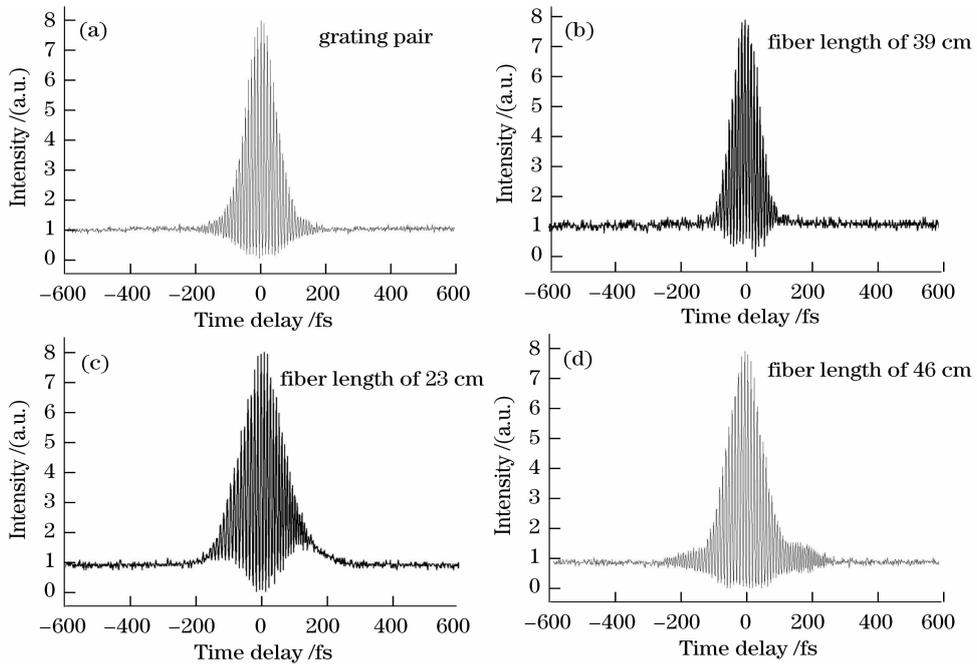


图4 (a) 光栅压缩后的脉冲相干自相关曲线;(b),(c)和(d)分别是脉冲经过中空光子带隙光纤带隙压缩后脉冲的相干自相关曲线

Fig. 4 Interferometric autocorrelation trace of the pulses after compression with the grating pairs (a); (b), (c) and (d) are the interferometric autocorrelation traces of pulses after compression through the hollow core photonic bandgap fiber

4 结 论

实验研究了利用中空光子带隙光纤对光子晶体光纤飞秒激光器输出脉冲进行压缩。利用截断实验确定了39 cm长的光子带隙光纤用于实验并将脉冲压缩到脉冲宽度108 fs的变换极限脉冲,同时与光栅压缩脉冲进行对比,分析了两种压缩方法的不同,中空光子带隙光纤表现出明显的两个优点:1) 中空光子带隙光纤损耗相对较小,能够提高输出效率;2) 作为光纤,其具有分立元件不可比拟的独特优势,更利于集成化,特别是提供脉冲压缩功能集成到光纤激光器中。今后可将该中空光子带隙光纤应用到光子晶体光纤飞秒激光放大系统^[14]中,得到全光

光栅压缩得到的相干自相关曲线,中空光子带隙光纤压缩得到的曲线存在一定的基底,这就是光纤引入过多的三阶色散造成的。在今后的空心光子带隙光纤的设计中,可以考虑通过在所需波长范围内使色散曲线平坦,减小三阶色散值,从而减小该光纤压缩脉冲后引入的脉冲畸变。从图4(b)中还可以看出该相干自相关曲线存在一定的噪声,这是由于光纤输入输出端因环境和聚焦光束带来的光压而产生了抖动,造成脉冲时域测量的稳定性较差,从而引入了一定的噪声。

子晶体光纤的啁啾脉冲放大系统。

参 考 文 献

- 1 M. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha. *Ultrafast Lasers: Technology and Applications*[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. 89~92
- 2 R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon. Negative dispersion using pairs of prisms [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(5): 150~152
- 3 E. B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**(9): 454~458
- 4 R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, **285**(5433):1537~1539
- 5 J. C. Knight. Photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2003, **424**:

- 847~851
- 6 D. G. Ouzounov, F. R. Ahmad, D. Müller, Generation of megawatt optical solitons in hollow-core photonic band-gap fibers [J]. *Science*, 2003, **301**(5640):1702~1704
- 7 W. Göbel, A. Nimmerjahn, F. Helmchen. Distortion-free delivery of nanojoule femtosecond pulses from a Ti:sapphire laser through a hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11):1285~1287
- 8 C. J. S. de Matos, J. R. Taylor, T. P. Hansen *et al.*. All-fiber chirped pulse amplification using highly-dispersive air-core photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(22):2832~2837
- 9 P. Hlubina. White-light spectral interferometry to measure intermodal dispersion in two-mode elliptical-core optical fibres [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **218**(4~6):283~289
- 10 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
- 11 Song Youjian, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. A mode-locked Yb³⁺-doped double-clad large-mode-area fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica.*, 2008, **57**(8):5045~5048
- 宋有建,胡明列,刘博文等. 掺 Yb³⁺ 双层大模场面积光纤锁模激光器 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(8):5045~5048
- 12 Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. Stretched-pulse femtosecond photonic crystal fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):830~834
- 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, **35**(6):830~834
- 13 P. G. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. San Diego: CA, Academic Press, 2001. 76~86
- 14 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