

文章编号: 0258-7025(2010)08-1939-04

基于空心光纤技术产生高能量周期量级脉冲压缩

李冬雪 王 丁 陈晓伟 冷雨欣

(中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

摘要 系统研究了利用充惰性气体的 250 μm 内径的空心光纤(HCF)展宽光谱和啁啾镜补偿色散的高能量周期量级脉冲压缩技术。基于此技术,研究了入射激光脉冲能量和腔内惰性气体气压对于压缩后脉冲宽度和输出能量的影响。将钛宝石激光器输出的脉冲宽度 40 fs,单脉冲能量 2.7 mJ,重复频率 1 kHz,中心波长在 800 nm 的激光脉冲输入压缩系统,获得了脉冲宽度 7 fs,单脉冲能量大于 1 mJ,中心波长为 750 nm 的稳定周期量级激光脉冲。

关键词 超快光学;脉冲压缩;空心光纤;周期量级脉冲

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.1939

Generation of High-Energy Few-Cycle Pulses Compression through a Hollow-Core Fiber

Li Dongxue Wang Ding Chen Xiaowei Leng Yuxin

(State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The intense few-cycle pulse compression technique based on 250- μm -inner-diameter single fused-silica hollow-core fiber (HCF) and subsequent negative dispersive compression stage by chirped mirrors is researched systemically. Using the system, we study the influence of parameters like input pulse energy and gas pressure to the final duration and output energy of the compressed pulse. On this basis, 7 fs compressed pulses with energy of more than 1 mJ and centre wavelength of 750 nm are obtained through this Ne-filled HCF system, and the driving source is from a 1-kHz Ti:sapphire laser generating 2.7 mJ driving pulses centered at 800 nm with 40 fs duration.

Key words ultrafast optics; pulse compression; hollow-core fiber; few-cycle pulse

1 引 言

超短超强激光脉冲是人类研究强场物理超快非线性过程的强有力的工具之一^[1],其高峰值功率密度可以使光与物质的相互作用进入极端非线性领域,而短至几个光振荡周期的激光脉冲在作为超快探针研究更短时间尺度上的物理现象方面发挥着重要的作用^[2,3]。由于直接输出的脉冲宽度在 20 fs 以上的钛宝石啁啾脉冲放大激光系统^[4]不能满足目前阿秒科学对于激光驱动光源能量更高、脉冲更短、更稳定的要求,使通过腔外压缩技术获得高能量周期量级超短激光脉冲变得十分重要。目前,成丝技

术^[5-7]和空心光纤压缩技术^[8,9]是两种主要的腔外压缩技术。然而,相对于成丝技术中强电离对出射光束稳定性和光斑模式的严重影响,基于空心光纤的腔外激光脉冲压缩技术以其空心光纤对光束的整形稳定效应,至今为止仍是产生周期量级超短超强激光脉冲的重要技术被广泛用于阿秒科学等领域中。

空心光纤光谱展宽再压缩技术自 1996 年 Nisoli 等^[8]首次公布之后,经历了飞速的发展。2003 年, Schenke 等^[10]利用 500 μm 和 300 μm 内径的级联空心光纤将激光脉冲压缩到了 3.8 fs, 15 μJ ; 2007 年, Cavalieri 小组^[11]在 23 fs 入射脉冲下,利用

收稿日期: 2009-10-19; 收到修改稿日期: 2009-12-24

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806001)、国家自然科学基金(60908008)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX-YW-417-2)和上海市科委项目(07JC14055)资助课题。

作者简介: 李冬雪(1984—),女,硕士研究生,主要从事周期量级光线压缩方面的研究。E-mail: dongxue@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 冷雨欣(1975—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事超短超强激光物理与技术、非线性光学等方面的研究。E-mail: lengyuxin@mail.siom.ac.cn

250 μm 空心光纤系统,将指标推进到了脉冲宽度小于4 fs,单脉冲能量400 μJ 。同年,Mashiko等^[12]用400 μm 内径光纤代替250 μm 内径的光纤,成功获得了能量高达1.2 mJ的5.6 fs输出脉冲。然而,相对于250 μm 内径,400 μm 内径的光纤压缩系统在提高输出功率的同时,却由于光纤内耦合模式的增多而降低出射光束的光斑质量和稳定性。

本文利用自行搭建的基于充惰性气体的250 μm 内径的空心光纤和啁啾镜补偿负群速色散系统,系统研究了不同气压和入射激光脉冲能量对于出射激光脉冲参数的影响,通过优化各种参数,最终获得了7 fs(750 nm中心波长,2.8个光周期),大于1 mJ的高能量短脉宽的周期量级激光脉冲。

2 实验装置

实验中使用的激光脉冲光源来自于一台频率为1 kHz的钛宝石激光器系统^[13]。这台激光器由商业再生放大器和自己搭建的多通放大器组成,出射激光中心波长为800 nm,脉宽为40 fs,稳定输出最高

能量为3 mJ^[12]。图1为实验中使用的自行搭建的空心光纤压缩装置示意图。激光器出射的脉冲由焦距为1 m的凸透镜会聚,耦合到充满惰性气体的空心光纤中。强激光在沿光纤传输过程中与非线性气体作用产生自相位调制效应,能够使入射脉冲得到新的频率分量,光谱也被相应展宽。本次实验中,使用的是内径为250 μm ,长为100 cm的空心光纤。光纤被固定在铝制V形槽内,密闭于充满Ne气的圆形金属腔内。选择Ne气作为气体介质,是因为Ne气比Ar气和Ke气拥有更高的电离阈值和更大的非线性系数,适用于获得大能量的压缩脉冲。经过光谱展宽阶段,从空心光纤出射的光略微发散,经过一个焦距为75 cm的凹面银镜反射会聚准直后送入啁啾镜组^[14]进行色散补偿。使用的啁啾镜谱带宽度为520~1040 nm,完全能够支持由光纤展宽的光谱范围。通过改变啁啾镜组反射光的程数,或者更换不同啁啾量的啁啾镜,使入射啁啾镜组的激光脉冲获得最佳的色散补偿,得到最短的压缩激光脉冲。利用二阶自相关仪测量压缩后的脉冲宽度。

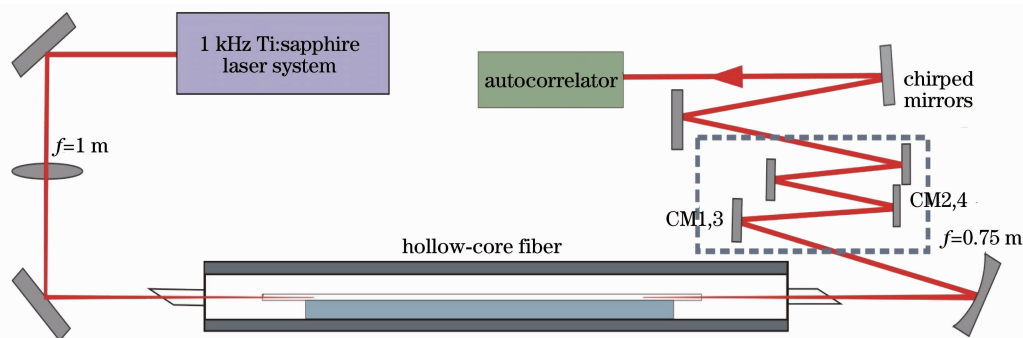


图1 充满惰性气体的空心光纤产生周期量级飞秒脉冲的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for few-cycle pulses generation by noble-filled hollow fiber

3 实验分析与结果

耦合入光纤的入射脉冲能量和光纤内惰性气体的气压是影响输出脉冲能量的主要因素。通过调节钛宝石激光器输出脉冲能量,发现出射光纤的激光脉冲能量并不随入射能量的提高而无限提高,而是会被限制在某一个最高能量阈值之下。在确定气压的条件下,当耦合入空心光纤的激光能量较低时,出射脉冲能量基本上随入射能量的变化而线性地变化。然而,随着入射激光脉冲的能量进一步增加,渐渐强烈的自聚焦和多光子电离效应会改变脉冲焦斑的位置和大小,出射脉冲能量不再被提高,光束能量耦合效率不断降低。空心光纤内充入的惰性气体是与激光脉冲相互作用产生各种非线性效应的重要媒

质,气体压强对出射能量的大小也有明显的影响。随着压强的升高,激光在气体中的自相位调制效应增强,光谱展宽越来越强烈,但是同时,自聚焦和多光子电离效应加剧,出射空心光纤的脉冲能量随之降低。于是,在同样的入射脉冲能量下,光谱随气压的升高而展宽,能量耦合效率则随气压的升高而降低。由此可见,光谱的展宽是以能量损耗的增加为代价的。不仅如此,气压的升高还会降低光纤的最高出射阈值能量。以Ne气为例,真空下的空心光纤输出端可以得到最高耦合能量为1.3 mJ;当气压为 7.9×10^4 Pa时,空心光纤输出端的激光脉冲最高能量下降至1.1 mJ。

在实验过程中,还发现另一个比较有趣的现象。

并不是出射空心光纤的光谱越宽,就能够被压缩得到越窄的脉冲宽度。当气压过高或入射能量过大时或者二者兼有时,强烈的电离等效应可能会造成输出光谱的不稳定,引入大量的无法补偿的高阶色散。此时,虽然可以获得更宽的光谱,但是这种光谱却由于具有大量高阶色散和低稳定度,无法得到更短的激光脉冲。

综合平衡各种因素,并优化脉冲能量和惰性气体的气压,最终将2.7 mJ的入射脉冲耦合进空心光纤。光纤内的气压被设定在 7.9×10^4 Pa附近。实验中多次证明,当2.7 mJ激光脉冲入射空心光纤时,出射脉冲能量已经达到最高阈值;入射空心光纤的激光脉冲能量高于此值,不但光纤出射端的脉冲能量不再相应提高,而且光谱展宽的质量变差,反而增加了最终可压缩到的最短脉冲宽度。而在这种高能量入射时,气压低于 7.9×10^4 Pa,光谱展宽不足,若是高于 7.9×10^4 Pa,阈值出射能量的下降将直接影响到压缩脉冲的最终能量。所以2.7 mJ入射, 7.9×10^4 Pa的气压值是综合考虑压缩能量和脉冲宽度的最优值。此时,在光纤的出射端,得到了能量为1.1 mJ的激光脉冲,耦合效率大约为40%。图2所示是用光纤光谱仪(Ocean Optics USB4000)测量的光谱展宽前和光谱展宽后的光谱强度。光谱的半峰全宽(FWHM)由780~820 nm展宽到了600~900 nm。由于光纤内的自陡峭效应,新的频率分量集中在短波长区域。相比于入射脉冲的光谱,出射脉冲的光谱在700 nm波长位置上出现一个新的峰

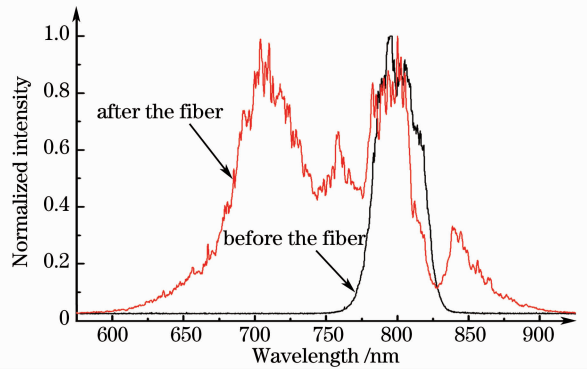


图2 实验测量的输入空心光纤激光脉冲的光谱和从空心光纤输出脉冲的光谱

Fig. 2 Experimentally measured spectra of the input pulses and the output pulses after the hollow fiber

值。脉冲的中心波长也从展宽前的790 nm向短波方向移动到了750 nm。

脉冲光谱的稳定性对于获得稳定的超短脉冲十分重要。一般来讲,镜架振动、空气的流动、金属腔内激光聚焦造成的强电离等都会在一定程度上降低脉冲的稳定性。图3所示的是在单脉冲入射能量2.7 mJ,空心光纤中为 7.9×10^4 Pa的Ne气下,在40 min内100次连续测量得到的入射空心光纤的激光脉冲光谱稳定图和出射空心光纤的激光脉冲光谱稳定图。由图3可知,在本次实验中,虽然压缩后的光谱抖动稍微比入射脉冲明显,但还是能够保持足够的稳定,因此也保证了压缩后周期量级激光脉冲宽度的稳定性。

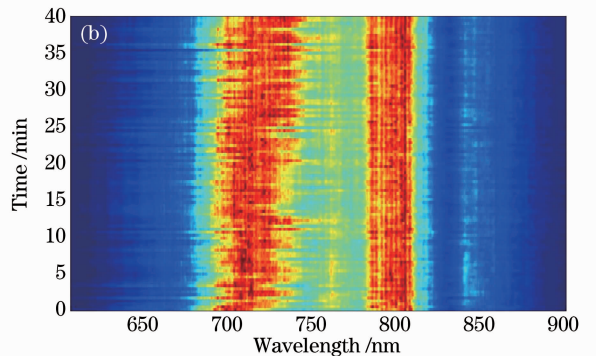
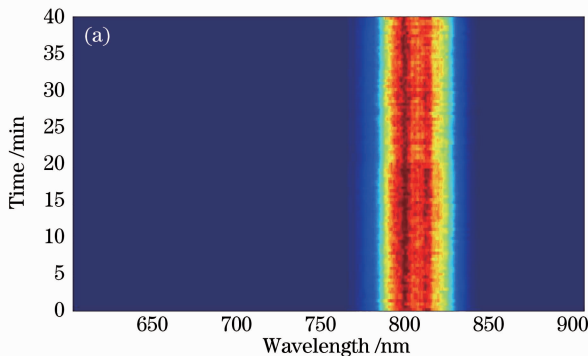


图3 入射空心光纤(a)和出射空心光纤(b)的脉冲光谱稳定图

Fig. 3 Spectrum stability of the light into the fiber (a) and after the fiber (b)

实验中,在啁啾镜组的总色散为-280 fs²时得到压缩脉冲宽度为最短,接近傅里叶转换极限。激光在啁啾镜间反射的过程中,由于啁啾镜反射率等的损耗,能量损失小于0.1 mJ。通过啁啾镜压缩后,最终得到了大于1 mJ的周期量级单脉冲能量输出。

使用二阶自相关仪(Femtolasers Produktions GmbH)测量得到的周期量级脉冲宽度,其自相关曲线如图4所示。为了准确得到脉冲宽度的值,将自相关信号和理论计算得到的脉冲自相关曲线进行拟合比较,实验结果与理论的7 fs高斯型脉冲吻合,证

明压缩后得到的周期量级激光脉冲宽度为7 fs。

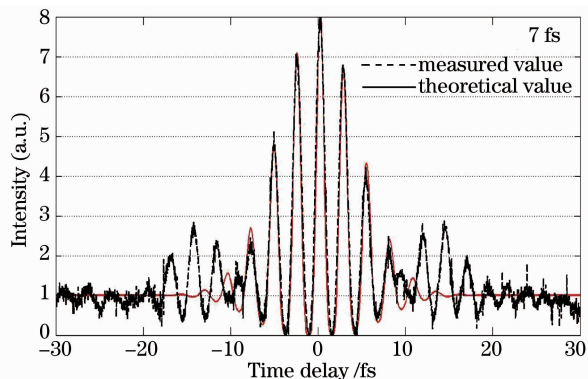


图4 测量得到的压缩脉冲的自相关曲线图和理论计算得到的中心波长750 nm,7 fs,相当于2.8个光周期的高斯脉冲自相关曲线

Fig.4 Measured autocorrelation trace of the final compressed pulses and the simulated autocorrelation trace of 7 fs pulse centered near 750 nm corresponding to 2.8 optical cycles

4 结 论

使用自行搭建的250 μm 空心光纤压缩系统,在入射脉冲2.7 mJ/40 fs的条件下,获得了能量高于1 mJ,脉冲短至7 fs(对于750 nm的激光波长,相当于2.8个光周期),重复频率为1 kHz,中心波长在750 nm的高能量稳定的超短脉冲输出,为周期量级超短超强激光脉冲与惰性气体相互作用产生高次谐波,进而驱动产生单个阿秒脉冲提供了较好的实验基础。这一结果基本上达到了250 μm 空心光纤压缩系统的极限。

参 考 文 献

1 Thomas Brabec, Ferenc Krausz. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2000, **72** (2):545~591

2 A. Baltuska, T. Udem, M. Uiberacker *et al.*. Attosecond control of electronic processes by intense light fields [J]. *Nature*, 2003, **421**(6928):611~615

3 R. Kienberger, E. Goulielmakis, M. Uiberacker *et al.*. Atomic transient recorder [J]. *Nature*, 2004, **427** (6977): 817~821

4 Zhu Yi, Chen Xiaowei, Leng Yuxin *et al.*. An extracavity femtosecond high intensity laser pulse compression by bulk media [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1614~1618
朱毅,陈晓伟,冷雨欣等.利用块状介质进行飞秒强激光脉冲的腔外压缩[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12):1614~1618

5 C. P. Hauri, W. Kornelis, F. W. Helbing *et al.*. Generation of intense, carrier-envelope phase-locked few-cycle laser pulses through filamentation [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79** (6): 673~677

6 E. Mevel, O. Tcherbakoff, E. Salin *et al.*. Extracavity compression technique for high-energy femtosecond pulses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(1):105~108

7 Feng Xu, Jiansheng Liu, Ruxin Li *et al.*. Pulse compression and supercontinuum at different powers of femtosecond pulses in water [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8):490~492

8 M. Nisoli, S. de Silvestri, O. Svelto. Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(20):2793~2795

9 S. Sartania, Z. Cheng, M. Lenzner *et al.*. Generation of 0.1-TW 5-fs optical pulses at a 1-kHz repetition rate [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20):1562~1564

10 B. I. Schenke, J. Biegert, U. Keller *et al.*. Generation of 3.8-fs pulses from adaptive compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20):1987~1989

11 A. L. Cavalieri, E. Goulielmakis, B. Horvath *et al.*. Intense 1.5-cycle near infrared laser waveforms and their use for the generation of ultra-broadband soft-x-ray harmonic continua [J]. *New J. Phys.*, 2007, **9**(1):242

12 H. Mashiko, C. M. Nakamura, C. Q. Li *et al.*. Carrier-envelope phase stabilized 5.6 fs, 1.2 mJ pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(16):161114

13 Liu Jun, Li Xiaofang, Chen Xiaowei *et al.*. 1 kHz-0.1 TW high efficiency Ti:sapphire laser amplifier [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **56**(3):1375~1378
刘军,李小芳,陈晓伟等.1 kHz-0.1 TW高效率钛宝石激光放大器[J]. *物理学报*, 2006, **56**(3):1375~1378

14 Wang Xi, Chen Lingling, Yang Weijian *et al.*. New design of chirped mirrors for femtosecond pulse compression [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1):89~91
王希,陈玲玲,杨晔健等.飞秒激光脉冲压缩用啁啾镜新设计方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1):89~91