

利用快速相位反馈控制输出变换极限飞秒激光脉冲

钱 程 王思佳 顾澄琳 张丽梦 刘博文* 庞冬青 胡明列 柴 路 王清月

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

摘要 报道了利用简化的频率分辨光学开关法快速测量飞秒激光脉冲, 并形成反馈, 控制液晶空间光调制器, 补偿非线性光纤飞秒激光放大器输出脉冲的啁啾, 获得了脉冲宽度 74 fs 的变换极限脉冲。

关键词 激光光学; 简化的频率分辨光学开关; 啁啾补偿; 液晶空间光调制器; 非线性光纤放大器; 飞秒激光

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1102003

Fast Close-Loop Phase Control to Output Transform-Limited Femtosecond Laser Pulses

Qian Cheng Wang Sijia Gu Chenglin Zhang Limeng Liu Bowen
Pang Dongqing Hu Minglie Chai Lu Wang Qingyue

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

Abstract A close-loop chirp compensation system which consists of a simplified frequency-resolved optical gating (FROG) device and liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) is demonstrated. Femtosecond laser pulses are measured by using simplified frequency-resolved optical gating. The phase feedback signals derived from the simplified FROG control the LC-SLM to compensate the chirp of pulses. As a result, 74-fs transform-limited pulses are obtained from nonlinear fiber femtosecond laser amplifier.

Key words laser optics; simplified frequency-resolved optical gating; chirp compensation; liquid crystal spatial light modulator; nonlinear fiber amplifier; femtosecond laser

OCIS codes 140.7090; 320.5520; 320.7100

1 引 言

超短激光脉冲因具有短脉宽、高峰值功率等特点, 被广泛应用于各个领域。光纤飞秒激光器克服了传统块状晶体飞秒激光器平均功率低的缺点, 输出平均功率高达十几瓦, 光纤飞秒激光放大器目前最高平均功率接近千瓦量级, 同时又具有结构紧凑、成本低、稳定性好的优点, 成为一种实用的飞秒激光源^[1~4]。为了获得更短的脉冲, 目前常用的高功率

光纤飞秒激光放大器为非线性放大, 放大过程中脉冲不但获得增益, 而且由于自相位调制的存在, 发生光谱展宽, 压缩后脉冲宽度更窄; 但是该放大过程还会引入非线性啁啾, 导致脉冲压缩后发生畸变。虽然通过被动啁啾补偿元件如光栅对、棱镜对、啁啾镜等^[5~7]可以补偿一定的非线性啁啾, 但由于结构固定, 补偿高阶啁啾能力有限, 不能实现任意相位的完全补偿。然而, 主动啁啾补偿元件可以由计算机编

收稿日期: 2012-06-26; 收到修改稿日期: 2012-07-20

基金项目: 国家 973 计划 (2010CB327604、2011CB808101)、国家自然科学基金 (60838004、61008015、60978022、61078028)、全国优秀博士学位论文作者专项资金 (2007B34)、新世纪优秀人才支持计划 (NCET-07-0597) 和教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (20100032120057) 资助课题。

作者简介: 钱 程 (1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光脉冲测量和脉冲整形方面的研究。

E-mail: qcsijin@tju.edu.cn

导师简介: 王清月 (1938—), 男, 教授, 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: bwliu@tju.edu.cn

程来补偿任意形状的啁啾,常见的有液晶空间光调制器(LC-SLM)^[8,9]、声光可编程色散滤波器、变形镜等。其中,空间光调制器因其所具有的光学调制特性好、空间分辨率高、功耗低、响应速度快、接口简易及可以并行实时处理等优点,被广泛应用于超短激光脉冲的形状和相位控制。对于闭环控制系统,不仅需要较高的控制精确度,而且需要有较高的测量精确度才能实现高效的补偿。目前,常见的超短脉冲测量技术有自相关法、频率分辨光学开关法(FROG)^[10~12]和光谱相位相干直接电场重建法(SPIDER)^[13]等。SPIDER方法一般在测量较窄脉冲(如10 fs)时具有较明显的优势,而FROG方法则较适合测量百飞秒的激光脉冲,光纤飞秒激光放大器输出脉冲宽度一般为几十飞秒,所以利用FROG方法测量比较合适。但是常规的FROG方法测量超短脉冲时需要不断调整延时,并利用光谱仪测量脉冲光谱,测量过程复杂且时间较长,而简化的频率分辨光学开关法则可以实现快速测量。本文报道了利用简化的FROG方法测量超短激光脉冲相位,通过计算机将相位信息反馈给液晶空间光调制器进而补偿脉冲啁啾,通过闭环反馈快速地补偿了脉冲的非线性啁啾,获得了变换极限脉冲,为进一步在光纤飞秒激光放大器中利用LC-SLM获得高质量的脉冲打下了基础。

2 实验装置

实验装置如图1所示,包括光子晶体光纤飞秒激光放大系统、脉冲压缩系统和测量系统。实验中光纤飞秒激光放大系统由振荡器和放大器组成,振荡器利用非线性偏振旋转锁模方式实现稳定的飞秒激光输出,重复频率为48 MHz,平均功率为60 mW,光谱宽度为10 nm。脉冲输出后由光栅对补偿啁啾,经隔离器耦合到光纤放大器中进行放大。放大器采用后向抽运方式,由于脉冲宽度较窄(200 fs左右),

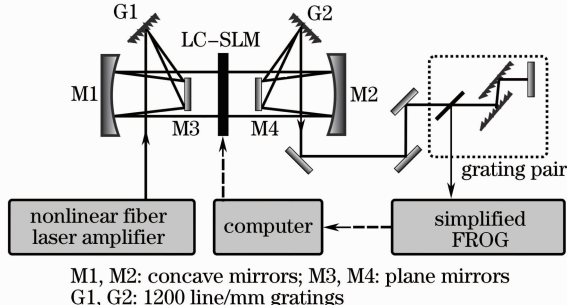


图1 实验装置图
Fig.1 Experimental setup

在放大过程中不但产生能量增益,而且自相位调制(SPM)效应展宽脉冲光谱,压缩后可得到更窄的脉冲。实验中优化放大过程中的非线性效应,避免引入过多的非线性啁啾而导致压缩后脉冲质量劣化。放大后输出的脉冲光谱宽度为21 nm,平均功率为5 W。

放大器输出的脉冲进入到压缩系统中,进行时域压缩。压缩系统分成两部分,如图1中所示,一部分是由LC-SLM、衍射光栅、凹面反射镜等组成常用的4f系统,用于补偿脉冲的高阶啁啾;一部分是光栅对压缩器,补偿脉冲的线性啁啾部分。4f系统中使用的LC-SLM为JENOPTIK公司生产的SLM-S640/12,像素数为640 pixel,每个向列像素的宽度为97 μm,向列间隙为3 μm,对1040 nm的激光可调节最大相位延迟为4π,每个像素的频率分辨率为0.2 nm。LC-SLM通过串口与计算机通信,接收计算机的控制指令。

为了测量脉冲的相位,提供控制LC-SLM所需要的反馈,实验中搭建了Trebino等^[14]提出的一种简化的FROG装置来测量脉冲,结构如图2所示。该装置利用菲涅耳双棱镜实现脉冲延时,无需传统FROG的延时调整,而且测量时不需要光谱仪,只需要一个CCD采集FROG迹即可。这样在准确地还原出超短激光脉冲强度信息和相位信息的同时,测量装置的体积和测量过程得以大大简化。计算机采集到FROG迹后计算并分析脉冲啁啾,形成反馈信号控制LC-SLM,通过改变施加在液晶分子上的电压来改变不同频率光场的相位,进而补偿脉冲的啁啾。

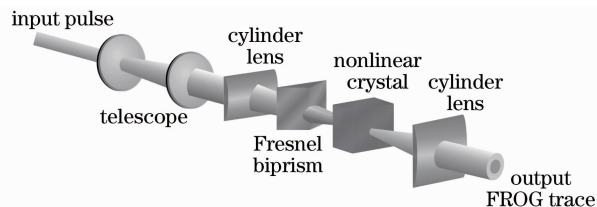


图2 简化的频率分辨光学开关装置图
Fig.2 Simplified frequency-resolved optical gating setup

3 实验结果

为了分析LC-SLM对脉冲非线性啁啾的补偿,进行了对比实验。首先在没有LC-SLM作用的情况下,仅利用光栅对压缩脉冲至最窄,脉冲宽度为76 fs,测量结果如图3(a)所示。右插图为测量得到的FROG迹,经变换得到光谱强度、光谱相位(左插图所示)和脉冲的时域形状(中插图所示)。从

图 3(a)可以看出,光谱相位在光谱的整体范围内接近线性。说明脉冲的线性啁啾部分已经得到了有效的补偿,但是从图中的脉冲时域形状看,仍有较大基底存在。作为对比,由光谱仪测量得到的光谱[如图 3(b)左插图所示]。设光谱相位为零,经过傅里叶变换得到变换极限脉冲[如图 3(b)中插图所示],从图中可以看出实际脉冲光谱的变换极限脉冲基底很小,但是仍有部分基底存在,这是由于光谱并不是

一个理想的高斯或者双曲正割形状,而是具有一定的调制,所以变换极限脉冲的时域形状必然出现基底。将实际测量得到的脉冲形状与傅里叶变换极限脉冲形状相比,实际脉冲基底较大。这是由于放大过程中的自相位调制引入了一定的非线性啁啾,而光栅对压缩过程中,并没有对此实现完全补偿,仍然有很大基底。

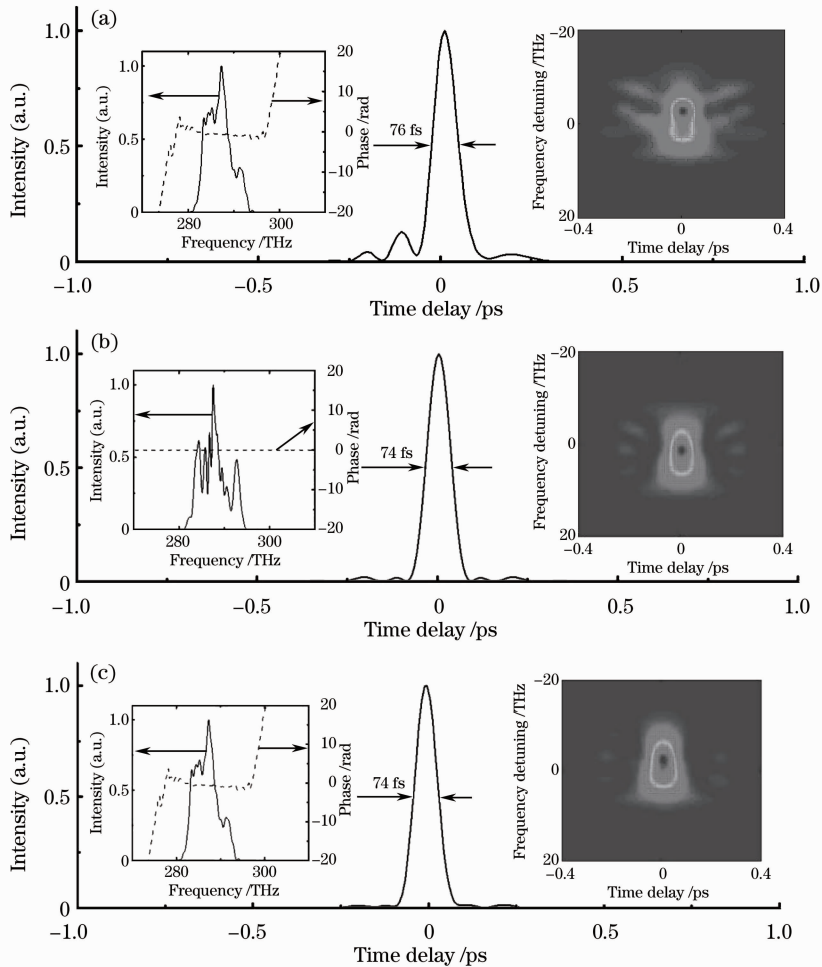


图 3 脉冲的光谱、光谱相位、时域形状和 FROG 迹。(a) 只经过光栅对压缩到最窄的脉冲;(b) 假设光谱相位为零,模拟得到的变换极限脉冲;(c) 经过光栅对和液晶空间光调制器补偿后的脉冲

Fig. 3 Pulse spectra, spectral phases, time domain shape and FROG traces. (a) Pulses only compensated by the grating pair; (b) simulation when the spectral phase is assumed as zero; (c) pulses compensated by the grating pair and LC-SLM

为了减小压缩后输出脉冲的基底,在光栅对压缩脉冲的同时,利用 LC-SLM 补偿脉冲的非线性啁啾。在补偿过程中,需要进行多次迭代反馈,实现 LC-SLM 对脉冲质量的优化。首先利用简化的 FROG 方法测量光栅对压缩得到的最窄脉冲,计算机采集到 FROG 迹后,利用主成分广义预测算法迭代还原出激光脉冲的强度信息和相位信息,再基于相位信息形成反馈信号,控制 LC-SLM 补偿相位;然后再次

测量脉冲相位,形成新的反馈信号。这样经过几次迭代后,脉冲相位不再发生变化,补偿优化结束。脉冲的测量结果如图 3(c)所示。从右插图可以看出,此时脉冲的 FROG 迹接近傅里叶变换极限脉冲,LC-SLM 将脉冲的非线性啁啾几乎完全补偿。还原后脉冲的时域宽度比没有 LC-SLM 补偿时更窄,为 74 fs,时间带宽积为 0.42,由于脉冲的光谱形状和时域形状并不是标准的高斯型,所以脉冲的时间带

宽积小于标准高斯脉冲的时间带宽积。脉冲时域形状的基底很小,与变换极限脉冲几乎完全相同。

在补偿优化的过程中,由于使用了简化的FROG,几乎实现了实时测量,又由于反馈信号生成的算法简单,使用普通计算机即可实现数据处理和反馈,单次反馈的时间仅为10 s,反馈次数一般为3次,所用优化时间很短,可以实现对放大系统变化的实时跟踪。图4为反馈控制前和每次反馈控制后的FROG迹对比,首次反馈的FROG迹质量就得到了很大的提高,随后两次逐渐收敛。

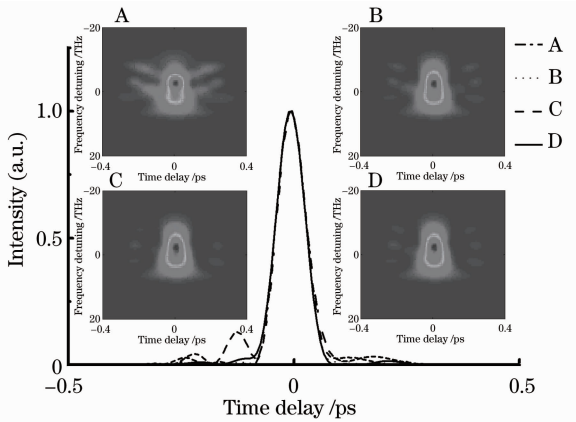


图4 反馈控制过程中的脉冲与原脉冲的时域形状对比,插图为各自对应的FROG迹。A为反馈前的脉冲形状,B、C、D分别为第一、二、三次反馈脉冲

Fig.4 Pulse temporal shapes of initial pulses and pulses in feedback process. The inserts are their FROG traces. The insert A is initial pulses; the insert B, C, D are pulses after the first, second and third time compensations, respectively

4 结 论

实验中,利用简化的FROG法和LC-SLM测量并控制相位,快速、准确地补偿了超短激光脉冲的非线性啁啾,有效地消除了脉冲畸变,获得了变换极限脉冲,脉冲半峰全宽为74 fs。反馈实验简单、快速、有效,对于进一步利用强度调制和相位调制共同作用控制脉冲形状,应用于光子晶体光纤飞秒激光

放大系统,获得高质量、高峰值功率脉冲提供了实验基础。

参 考 文 献

- 1 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月,胡明列,柴路.光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- 2 Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen *et al.*. Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1660~1670
胡明列,宋有建,刘博文等.光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1660~1670
- 3 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2415~2418
刘博文,胡明列,宋有建等.微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2415~2418
- 4 B. W. Liu, M. L. Hu, S. J. Wang *et al.*. All-photonic-crystal-fiber coherent black-light source[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(23): 3958~3960
- 5 R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon. Negative dispersion using pairs of prisms[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **QE-9**(5): 150~152
- 6 E. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **5**(9): 454~458
- 7 R. Szipöcs, K. Ferencz, C. Spielmann *et al.*. Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 201~203
- 8 A. M. Weiner. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(5): 1929~1960
- 9 A. M. Weiner. Ultrafast optical pulse shaping: a tutorial review [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(15): 3669~3692
- 10 K. W. de Long, D. N. Fittinghoff, R. Trebino. Practical issues in ultrashort-laser-pulse measurement using frequency-resolved optical gating[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(7): 1253~1264
- 11 K. W. de Long, R. Trebino. Improved ultrashort pulse-retrieval algorithm for frequency-resolved optical gating[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(9): 2429~2437
- 12 D. J. Kane. Recent progress toward real-time measurement of ultrashort laser pulses[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(4): 421~431
- 13 C. Iaconis, I. A. Walmsley. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(10): 792~794
- 14 P. O'Shea, M. Kimmel, X. Gu *et al.*. Highly simplified device for ultrashort-pulse measurement[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(12): 932~934

栏目编辑:宋梅梅