

doi: 10.3788/gzxb20184705.0514005

# 连续线性温度梯度场对啾啾脉冲放大系统中 啾啾光纤光栅的色散调节效应

唐书奎<sup>1,2</sup>, 杨直<sup>1</sup>, 李峰<sup>1,2</sup>, 李强龙<sup>1</sup>, 魏玉凤<sup>1</sup>, 杨小君<sup>1</sup>, 王屹山<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**利用啾啾光纤光栅的温度可调谐效应,提出了一种新型的色散补偿方法.该方法使啾啾光纤光栅处于一个连续的线性温度梯度场中,通过调节啾啾光纤光栅两端的温度差,改变其色散量,实现在以啾啾光纤光栅为展宽器和以体光栅为压缩器的超快激光系统中对输出脉宽的连续精密调节,并通过实验验证这一方法的可行性.实验结果表明:沿着啾啾光纤光栅应用连续的温度梯度场,当温差从 0℃ 到 50℃ 变化时,可以连续地调节啾啾光纤光栅的色散参数.展宽器和压缩器之间的色散失配可以通过调节线性温度场的温度梯度得到补偿,避免了繁琐的脉宽优化步骤.本文是以啾啾体光栅为压缩器的光纤啾啾脉冲放大系统中通过调节施加在展宽器上的连续线性温度场的梯度,实现对啾啾脉冲系统中的色散失配进行精密调制的技术方案.

**关键词:**光纤激光器;啾啾光纤光栅;超短脉冲;连续温度场;色散补偿

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)05-0514005-7

## Dispersion Adjustment Effect of the Chirped Fiber Gratings in Chirped Pulse Amplification System by Continuous Linear Temperature Gradient Field

TANG Shu-kui<sup>1,2</sup>, YANG Zhi<sup>1</sup>, LI Feng<sup>1,2</sup>, LI Qiang-long<sup>1</sup>, WEI Yu-feng<sup>1</sup>,  
YANG Xiao-jun<sup>1</sup>, WANG Yi-shan<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** According to the temperature tunability of chirped fiber grating, a new kind of dispersion compensation method was proposed, which make chirp fiber grating in a continuous linear temperature gradient field. The dispersion of chirped fiber Bragg grating is fine-tuned by adjusting temperature difference between the ends of the fiber Bragg grating. The dispersion mismatch in chirped pulse amplification system, which is based on the chirped fiber Bragg grating as pulse stretcher and chirped volume Bragg grating as pulse compressor, can be continuously compensated, and the feasibility of this method is verified by experiment. The experimental results show that the application fields, when the temperature difference of the continuous temperature gradient along the chirped fiber Bragg grating continuously changes from 0℃ to 50℃, the dispersion mismatch between the stretcher and compressor can be continuously adjusted, thereby eliminating the tedious pulse width optimization steps. The gradient of the continuous linear temperature field is reported for the first time to fine-tune the dispersion

基金项目:国防基础科研项目(No.Y71Z741B0A)资助

第一作者:唐书奎(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为超快激光器.Email:tangshukui2015@opt.cn

通讯作者:杨直(1979-),男,副研究员,博士,主要研究方向为超快激光器.Email:yangzhi@opt.ac.cn

导 师:杨小君(1978-),男,特聘研究员,博士,主要研究方向为超快激光微加工.Email:yxj@opt.ac.cn

收稿日期:2017-11-17;录用日期:2018-02-27

<http://www.photon.ac.cn>

mismatch in chirped pulse amplification system that uses the chirped fiber Bragg grating as pulse stretcher and chirped volume Bragg grating as pulse compressor.

**Key words:** Optical fiber laser; Chirped fiber grating; Ultrashort pulse; Continuous temperature field; The dispersion compensation

**OCIS Codes:** 050.1590; 050.2770; 140.3510

## 0 引言

飞秒激光由于其超快时间特性和超高峰值功率特性,在与物质的相互作用中与传统的长脉冲激光相比,它能快速、准确地将能量作用在特定的区域内,对材料产生的热冲击小,因此气化产生的等离子体不会把能量传递给相邻的物质,减少了加工过程中热损伤的影响从而可以获得极高的分辨率和加工精度<sup>[1]</sup>.由于飞秒激光加工具有超高的精度、超低的能耗等优点,在微加工领域有着广泛的应用前景,因此研究飞秒激光具有重要意义.

光纤结构的飞秒激光系统,由于光纤本身的结构特性,高能量的超短脉冲被限制在极小的光纤纤芯中,高峰值功率将不可避免地引起许多非线性效应,导致脉冲波形畸变<sup>[2]</sup>.因此为了在光纤啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA)系统中获得高峰值功率飞秒脉冲,必须合理地控制系统的非线性效应以及进行有效的色散管理<sup>[3]</sup>.传统的高峰值功率 CPA 系统通常包括脉冲展宽器、压缩器和大模场稀土掺杂光纤放大器,如光子晶体光纤和 Chirally-Coupled Core (CCC) 光纤等<sup>[4-5]</sup>.为了获得优质的飞秒激光脉冲,调节展宽器和压缩器之间的色散失配成为光纤飞秒激光系统中的关键.传统的 CPA 系统中通常采用光栅对作为脉冲压缩器<sup>[6]</sup>,但这种结构由于光栅对之间存在一个很长的压缩光路,从而导致飞秒激光器的体积庞大,结构复杂,且最终输出的飞秒激光的指向性对环境温度很敏感.另外,由光栅大的刻线密度所引入的高阶色散不能够得到有效的补偿最终导致压缩脉冲带有多余的底座<sup>[7]</sup>.

本实验采用一种特殊的光纤 CPA 系统,使用大孔径的啁啾体光栅(Chirped Volume Bragg Grating, CVBG)作为压缩器.相对于光栅对来说,体光栅作为压缩器具有结构紧凑、压缩效率高、对环境不敏感等优势.但是体光栅的色散量是固定不变且很难进行调节的,因此 FCPA 系统中需要加入数百米的展宽光纤来粗略地补偿展宽器和压缩器之间的色散失配,为了获得最优化的飞秒激光脉冲,需要通过繁琐地裁剪展宽光纤来优化飞秒脉冲<sup>[8]</sup>,因为不能够确定展宽光纤的精确长度所以这种方法只能得到近似最优化的激光脉冲.目前所报道实现啁啾光纤光栅(Chirped Fiber Bragg Grating, CFBG)的色散调节的方法主要是从两个方面进行.第一种是利用啁啾光纤光栅的弹光效应实现对啁啾光纤光栅色散量进行精密调制.采用设计的悬臂梁调节机构,实现了对光纤光栅的中心波长和啁啾同时进行线性调谐,调谐后的光纤光栅取得了良好的色散补偿效果<sup>[9]</sup>.将线性啁啾光纤光栅粘贴在磁致伸缩棒上,利用棒的磁致伸缩棒效应,通过外加的磁场的变化调谐加在线性啁啾光纤光栅上的应力,调谐啁啾光纤光栅的色散特性<sup>[10]</sup>.第二种是利用啁啾光纤光栅的热光效应对啁啾光纤光栅色散量实现精密的调制.利用半导体致冷器(Thermo Electric Cooler, TEC)板对 CFBG 整体进行温控,通过调节温度来精密的补偿系统中的色散失配,从而在一定程度上对输出的飞秒脉冲宽度进行了优化,实现了 3 fs/°C 的调节精度<sup>[11]</sup>.温度调节具有结构简单、成本低、精度高以及线性度高等优点.

由于实验采用的啁啾光纤光栅和啁啾体光栅都是线性的,所以本文在沿着 CFBG 施加一个连续的线性温度梯度场,通过调节连续温度梯度场的梯度从而实现对在以体光栅为压缩器的啁啾脉冲放大系统中的色散失配进行连续精密的补偿功能,避免了传统的繁琐且不连续的色散补偿步骤,获得了最优化的飞秒脉冲输出.

## 1 理论分析

光纤 Bragg 光栅的光场会发生耦合,当入射波长满足 Bragg 反射条件时,将有部分正向传输的光被耦合为反向传输模式,并沿原光路返回.啁啾光纤光栅的栅格周期不是常数,而是沿轴向变化,最常见的啁啾光纤光栅是线性啁啾光纤光栅,这种光栅的周期沿轴向呈线性单调变化.其折射率调制方程为

$$\delta n_{\text{eff}} = \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \Phi(z) \right] \right\} \quad (1)$$

式中  $\delta n_{\text{eff}}$  是光纤光栅纤芯有效折射率变化在每一个光栅周期内的平均值,这里称它为直流分量,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  表示纤芯有效折射率变化的交流分量的幅度,  $\Lambda$  表示光栅周期,  $\Phi(z)$  描述了光栅的啁啾特性.图1为啁啾光纤光栅的折射率调制波形图.

由于不同的栅格周期对应不同的反射波长,因此线性啁啾光纤光栅能形成很大的反射带宽和稳定的色散,因而被广泛应用于超快 CPA 系统中.啁啾光纤光栅的折射率非周期性变化从而形成一个带宽滤波器,当信号光通过啁啾光纤光栅时,不同的波长在啁啾光纤光栅的不同位置发生衍射,从而产生不同的时延. Bragg 方程表示 CFBG 的不同位置对应于一个不同的 Bragg 反射波长

$$\lambda = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  是反射波长,  $n_{\text{eff}}$  是纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  是啁啾光纤光栅的周期. 本实验中采用的是线性啁啾光纤光栅,其时延是波长的函数,表示为

$$\tau(\lambda) = \frac{2 n_{\text{eff}} (\lambda_1 - \lambda)}{c C_{\text{chirp}}} \quad (3)$$

式中,  $c$  是光在真空中的波长,  $C_{\text{chirp}}$  是光栅的啁啾系数,表示布喇格波长沿光栅长度的变化率.对于线性啁啾光纤光栅,啁啾系数是一个常数为

$$C_{\text{chirp}} = \frac{\Delta \lambda_G}{L} \quad (4)$$

$\Delta \lambda_G$  是 CFBG 的反射谱宽,  $L$  是 CFBG 的刻线长度.由式(2)可以看出,线性啁啾光纤光栅的时延特性是与波长呈线性关系的直线,则时延斜率(啁啾率、色散斜率)为

$$\delta = -\frac{2 n_{\text{eff}}}{c C_{\text{chirp}}} \quad (5)$$

啁啾光纤光栅的色散定义为

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} = -\frac{2 n_{\text{eff}}}{c \Delta \lambda_G} \quad (6)$$

由此可见,线性啁啾光纤光栅的时延斜率决定其色散量.由于材料的热光学效应,CFBG 的有效折射率随温度变化而发生改变<sup>[12]</sup>,可表示为

$$n_{\text{eff}}(T) = n_{\text{eff}}(1 + a_n) \Delta T \quad (7)$$

式中,  $T$  为环境温度,  $\Delta T$  为环境温度变化量,  $a_n$  是热光系数,反映了温度对有效折射率的调制.由此可知,当温度发生变化时,啁啾光纤光栅的有效折射率和特定反射波长的时延将会以系数  $A$  线性变化.因此,设置  $\text{TEC}_1$  的温度为  $T_1$ ,  $\text{TEC}_2$  的温度为  $T_2$ ,从而使啁啾光纤光栅处在一个温度梯度为  $\frac{T_1 - T_2}{\Delta \lambda_G}$  的线性温度梯度

场中.此时线性啁啾光纤光栅的时延仍然是条直线,但此时斜率为  $A \frac{T_1 - T_2}{\Delta \lambda_G} - \frac{2 n_{\text{eff}}}{c C_{\text{chirp}}}$ .由式(5)可知,啁啾光纤光栅处于线性温度梯度场后其色散为

$$D_T = \frac{1}{L} \left( A \frac{T_1 - T_2}{\Delta \lambda_G} - \frac{2 n_{\text{eff}}}{c C_{\text{chirp}}} \right) \quad (8)$$

所以啁啾光纤光栅的色散量可以通过调节连续温度梯度场的梯度大小实现精密的调谐.

## 2 实验装置与结果分析

图2为本实验所述的啁啾光纤光栅连续线性温度场调节装置图.如图2所示,用导热硅脂把 CFBG 安装在导热板上.啁啾光纤光栅的起始波长  $\lambda_1$  在导热板的 A 处被反射,截止波长  $\lambda_2$  在导热板的 B 处被反射,然后把两块 TEC 板分别安装在导热板的 A, B 处,通过调节两块 TEC 板的温度差,从而使啁啾光纤光栅处于一个连续的线性温度梯度场中.

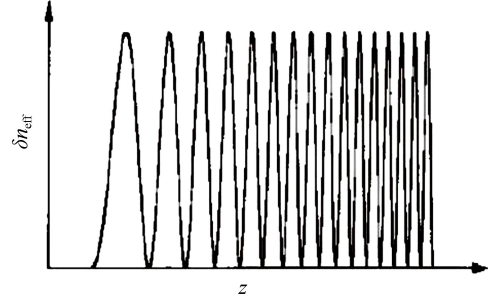


图1 啁啾光纤光栅折射率调制波形  
Fig.1 Modulation waveform of CFBG refractive index

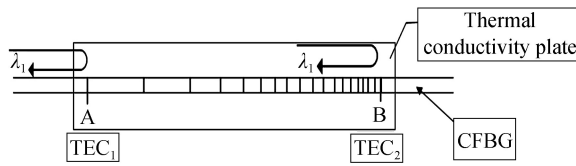


图 2 啁啾光纤光栅温控调节装置图  
Fig.2 Chirp fiber grating temperature control device

图 3(a)为导热板两端加 60℃ 的温度差时的温度仿真图,图 3(b)为导热板上沿着啁啾光纤光栅纵向位置温度的分布曲线.由图可知由于导热板形状的不规则,沿着啁啾光纤光栅的纵向(Z 轴)温度分布不是绝对的线性关系,但是非常接近线性分布.由此可以认为,当导热板两端加一定的温度差值时,会在导热板上形成一个连续的线性温度梯度场,因此可以通过调节 CFBG 两端的温度差值,从而调节 CFBG 所处的线性温度梯度场的梯度大小.

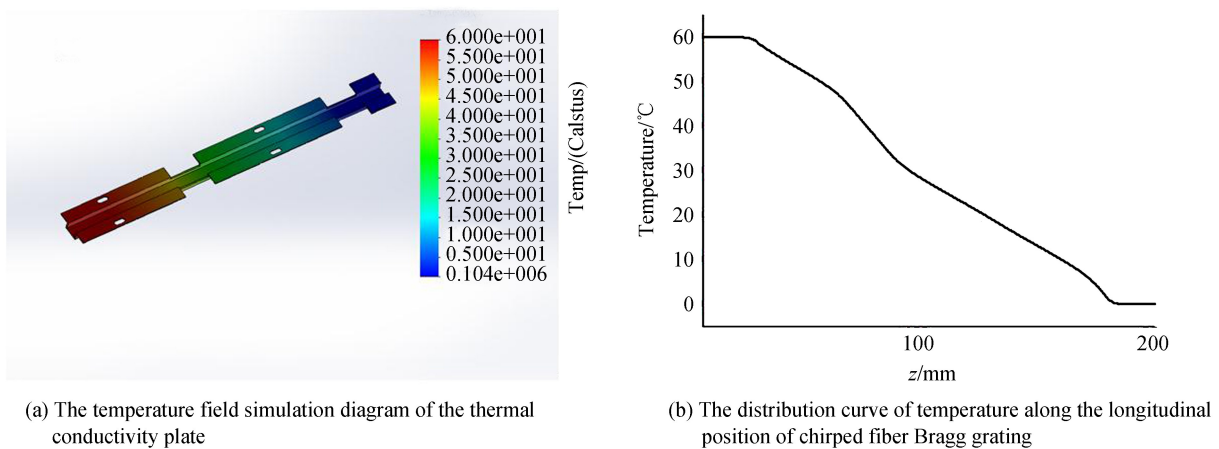


图 3 沿着啁啾光纤光栅径向的温度分布规律

Fig.3 The law of temperature distribution along the longitudinal position of chirped fiber Bragg grating

图 4 为本实验方案的整个啁啾脉冲放大光学系统结构图,采用脉宽约 5 ps,重复频率为 30 MHz 的锁模光纤激光器作为种子源.种子源的中心波长和谱宽分别为 1 032 nm 和 14 nm.通过采用环形器和光纤光栅组成脉冲展宽器对种子脉冲展宽,将脉冲展宽到数百皮秒.由于所采用的线性啁啾光纤光栅的反射谱宽只有 10 nm,中心波长为 1 030 nm,所以展宽后的谱宽只有 9 nm,中心波长变为 1 030 nm 附近.

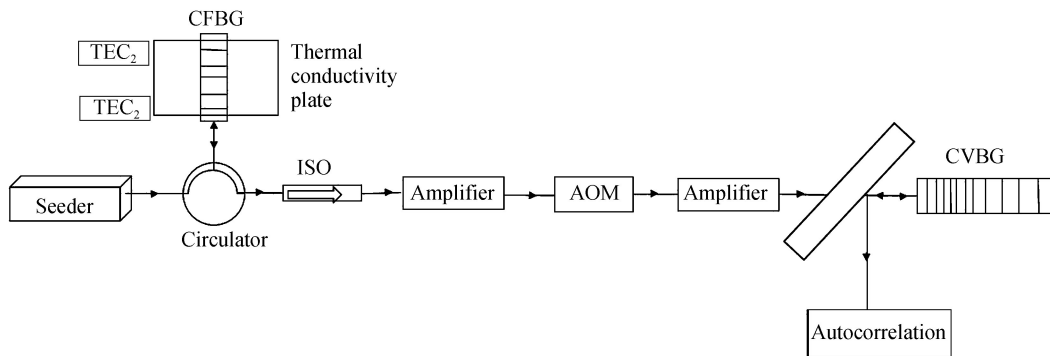


图 4 啁啾脉冲放大系统图  
Fig.4 Layout of femtosecond fiber CPA system

系统中加入的普通石英光纤被用来粗略地补偿系统中展宽器和压缩器之间的色散失配.初步放大后的激光通过光纤耦合声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)进行降频,将激光的重复频率由 30 MHz 降低到 250 kHz,以便在后继放大过程中提高单脉冲能量.降频后的激光脉冲再经过一级放大器,最终放大后的激光通过隔离器输出之后采用透镜空间耦合进入啁啾体光栅(CVBG)压缩器.同时对最终放大后输出的光斑以及压缩后的光斑模场分布进行了测量,如图 5 所示,从 CCD 采集的光斑模场图像可以看出,压缩前

后的光斑均具有单模输出特性.由于体光栅的通光孔径一定,放大以后光束的光斑直径过大,为了提高空间的耦合效率,采用透镜对光束进行聚焦后再耦合进入体光栅压缩器,压缩后的光束再被一个透镜进行准直,由于准直光学系统存在像差以及体光栅自身的结构特征限制,导致压缩后的光斑椭圆度有一定程度的增加,如图 5(b)所示.

利用自相关仪测量输出的超快激光脉冲宽度.图 6 是实验测得的自相关曲线,并用 Lorentz 曲线拟合计算出相应的脉冲宽度.适当地裁剪普通石英光纤的长度来粗略地补偿系统中展宽器和压缩器之间的色散失配.图 6(a)为未对啁啾光纤光栅施加连续温度梯度场调制,通过试探性的剪裁优化展宽光纤的长度,获得的近似最优化脉冲自相关曲线图,如图所示压缩脉宽为 1.455 ps,且脉冲带有较大的底座.可见,通过优化展宽光纤的长度很难精密地补偿光纤 CPA 系统中的色散失配,且这种色散调节方法步骤繁琐、色散调节量不连续,工作效率低下.为了实现 CPA 系统中的色散失配进行连续精密的调节,由式(6)可知,对啁啾光纤光栅施加连续的线性温度梯度场,通过调节连续温度梯度场的梯度大小,从而精密地补偿光纤 CPA 系统中的色散失配,使压缩后的激光脉冲得到进一步的优化.考虑到温度发生改变时,由于材料的热胀冷缩效应而引起的弹光效应变量对实验结果的影响,试验中设置 TEC 温度时,两块 TEC 温度分别高于和低于环境温度.图 6(b)为设置 TEC 温度分别为 3.5℃ 和 55℃ 时所获得的脉冲的自相关曲线图,脉冲宽度被压缩到 602 fs,脉冲宽度得到了明显的优化,同时脉冲底座在一定程度上得到了压缩.由于光纤 CPA 系统的非线性效应积累以及 CFBG 和 CVBG 所引入的高阶色散导致最终优化后的脉冲带有一定的底座.

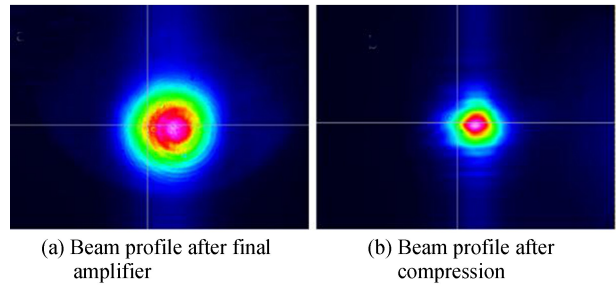


图 5 输出光斑测量

Fig.5 Characterization of the beam quality

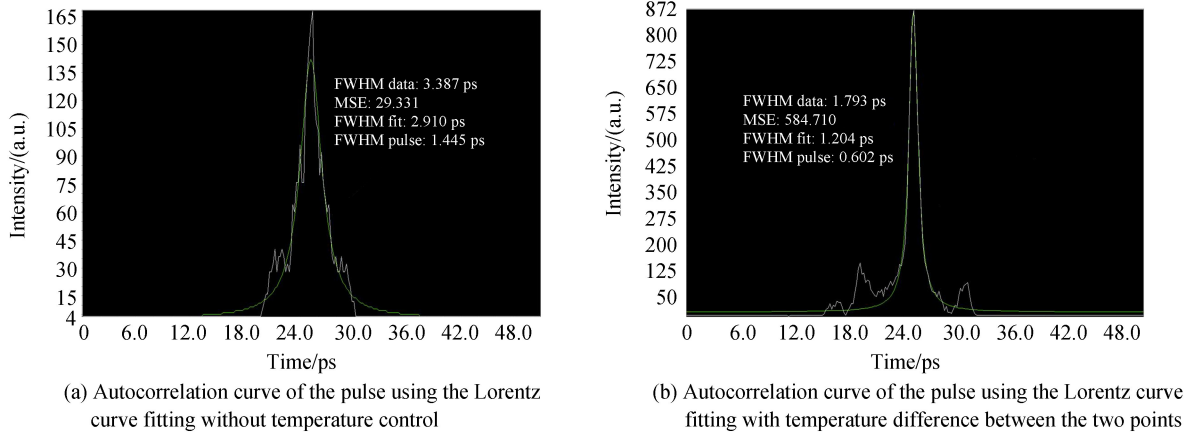


图 6 输出脉冲自相关图

Fig.6 Autocorrelation curve of the pulse

同时为了更加精细地反应连续温度梯度场对压缩以后的超快激光脉冲波形的精密调制作用,采用 13 ps 量程来观察脉冲的波形.图 7(a)为设置 TEC 温度分别为 4.5℃ 和 45℃ 时所获得的脉冲的自相关曲线图,通过温度梯度场的优化作用,得到了 400 fs 的激光脉冲.为了证明温度梯度场在优化过程中起到决定性的作用,而不是其他环境因素造成的这种现象,使两块 TEC 板同时断电,从而使啁啾光纤光栅的温度整体恢复到室温状态.记录啁啾光纤光栅恢复到室温后的输出激光脉冲,如图 7(b)所示,激光脉冲变为 1.394 ps,且脉冲波形不尖锐,能量大部分集中在底座,证明温度梯度场是脉冲优化过程中主要起到色散调节功能的因素.由以上实验结果可知,对啁啾光纤光栅施加连续的线性温度梯度场可以精密地调节在以体光栅为压缩器的超快光纤 CPA 系统中的色散失配,获得优质的飞秒激光脉冲输出.

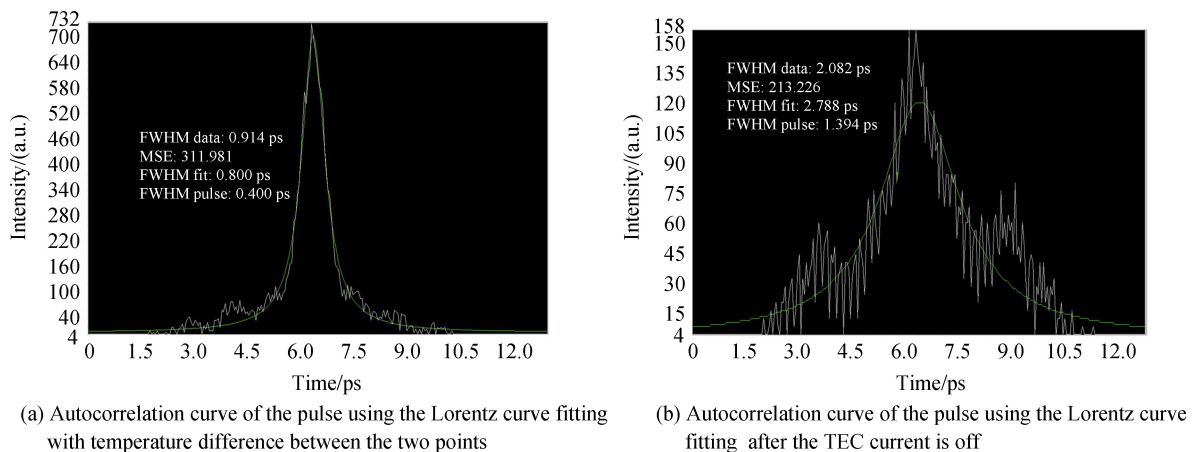


图7 输出脉冲自相关图

Fig.7 Autocorrelation curve of the pulse

由式(8)可知,连续线性温度梯度场的温度差值决定了CFBG的色散调节量.当施加在啁啾光纤光栅上的连续温度场的温度差不同时,对啁啾光纤光栅的色散调节量也不同,超快CPA系统获得的脉冲也会有所区别.为了找出温差不同时脉冲波形的变化规律,实验中使激光器的输出功率、实验环境温度等因素不变,同时为了突出反映温差对色散调节量的影响,试验中为了防止色散的过度补偿而造成随着温差变大,脉冲变差的情况.试验开始前,通过裁剪展宽光纤的长度来加大CPA系统中展宽器和压缩器之间的色散失配量.通过调节施加在啁啾光纤光栅展宽器两端的温度差,来观察所获得的激光脉冲变化规律.图8所示为连续线性温度梯度场的温差取不同数值时对最终输出的脉冲自相关曲线的影响.由实验结果可知,随着温差变大,啁啾光纤光栅的色散调节量变大,脉冲的脉宽变窄,峰值功率变大,脉冲得到进一步的优化.为了避免温差过大对啁啾光纤光栅造成破坏性的损伤,实验所施加的最大温差为 $50^{\circ}\text{C}$ ,温差并没有继续增加,CPA系统的色散失配并没有出现过度补偿.

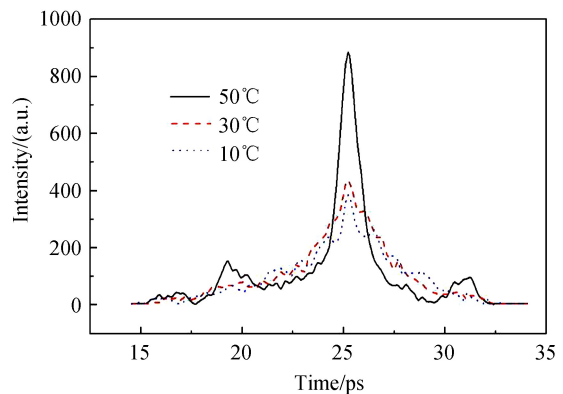


图8 不同的温度差值对超快脉冲的调制

Fig.8 The dependence of pulse duration on temperature difference

### 3 结论

实验研究了在以啁啾光纤光栅为展宽器,以啁啾体光栅为压缩器的光纤CPA系统中,对啁啾光纤光栅施加连续线性温度场,连续精密地调节系统中的色散失配的技术方案.通过调节温度梯度场的梯度大小,可以显著地对压缩脉冲进行精密地调制,弥补了体光栅作为压缩器其色散量固定不能调节的缺陷,省去了传统的繁琐且不连续的脉宽优化步骤,获得了最优化的飞秒激光脉冲输出.这项技术在实现结构紧凑的飞秒光纤激光器方面有着一定的应用前景.

#### 参考文献

- [1] 王梦影. 飞秒激光加工光纤微孔方法及其模拟[D]. 武汉理工大学, 2012.
- [2] SCHIMPF D N. Control of nonlinearity in fiber CPA system by pulse-shaping[C]. OSA/ASSP, 2007; Tu C2.
- [3] LI Feng, ZANG Zhi, ZHAO Wei, *et al.* Hundred micro-joules level femtosecond fiber laser amplification system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(12): 36-41.  
李峰, 杨直, 赵卫, 等. 百微焦级飞秒光纤激光放大系统[J]. *中国激光*, 2015, **42**(12): 36-41.
- [4] VISKONTAS K. Femtosecond fiber CPA system based on picosecond master oscillator and power amplifier with CCC fiber[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(5): 5338-5345.
- [5] LIMPET J, LIEM A. High-average-power femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. *Optics Letters*,

2003, **28**(20): 1984-1986.

- [6] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, **56**(3): 219-221.
- [7] PANICHAUD, YVES, PAQUET, *et al.* Martin optical tunable dispersion compensators based on thermally tuned fiber Bragg gratings[J]. *Optics & Photonics News*, 2007, **18**(9): 48-53.
- [8] VADIM I K H. Large-aperture chirped volume Bragg grating based fiber CPA system[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(8): 4876-4882.
- [9] QIN Zi-xiong, ZENG Qing-ke. A novel strain method for precisely adjusting the grating chirp and center wavelength[J]. *Smart Materials and Structures*, 2000, **9**(6): 985-989.
- [10] ZHOU Jian-hua, REN Guo-rong, YANG JIAN-Jun, *et al.* Magnetic field tuning optical fiber grating delay line [J]. *Journal of Electronic Science and Technology University*, 2009, **38**(1): 152-156.  
周建华,任国荣,杨健君,等. 磁场调谐的啁啾光纤光栅延迟线[J]. 电子科技大学学报, 2009, **38**(1): 152-156.
- [11] ZHANG Xin, YANG Zhi, LI Qiang-long, *et al.* Pulse duration tunable fiber CPA system based on thermally dispersion tuning of chirped fiber bragg grating[J]. *Optik*, 2016, **127**(20): 8728-8731.
- [12] SUN T, ANDREAS T. A wide temperature tunable fiber laser using a chirped grating and a type IIA fiber Bragg grating [J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, **15**(6): 1113-1119.