

全光纤多程相位调制的光谱控制研究

井媛媛^{1,2} 汪小超^{1*} 乔治^{1,2} 李玉荣^{1,2} 范薇¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率物理联合实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于全光纤多程相位调制的光谱控制方法, 并对其进行了理论模拟和实验研究。理论模拟结果表明, 调制次数、调制深度、调制信号形状和宽度以及调制信号和光脉冲的时间同步均会对输出光谱的中心波长、光谱宽度和形状产生影响。在实验上对光谱宽度为 0.03 nm 的注入信号进行多程相位调制, 得到了带宽为 2.238 nm 的输出光谱, 实验结果与理论模拟结果相符合。并从实验上研究了不同相位调制信号波形与输出光谱的对应关系, 验证了通过控制调制信号波形进行光谱特性控制的可行性。

关键词 光纤光学; 啁啾脉冲放大; 光谱控制; 相位调制

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0801004

Spectrum Control Based on All-Fiber Multi-Pass Phase Modulation Structure

Jing Yuanyuan^{1,2} Wang Xiaochao¹ Qiao Zhi^{1,2} Li Yurong^{1,2} Fan Wei¹

¹National Laboratory on High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

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

Abstract A method of controlling spectrum based on all-fiber multi-pass phase modulation is demonstrated experimentally and theoretically. Numerical simulation results indicate that modulation times, modulation depth, shape and width of the modulation signal and synchronized precision between optical pulse and modulation signal have influences on the central wavelength, bandwidth as well as the shape of the output spectrum. The input spectrum with bandwidth of 0.03 nm is broadened into 2.238 nm after multi-pass phase modulation, and the experimental results match well with the simulation results. The corresponding relationship between the modulation signal waveforms with different phases and the output spectra is obtained, and the feasibility of the spectral characteristics control is verified.

Key words fiber optics; chirped pulse amplification; spectrum control; phase modulation

OCIS codes 060.2310; 060.2630; 070.4790; 140.3615

1 引言

高能量超短激光脉冲在激光加工^[1-2]、超快光谱学、医学和高能物理^[3-4]等多个领域广泛使用。高能量超短激光脉冲通常采用啁啾脉冲放大(CPA)技术获得, 目的是为了降低激光脉冲的峰值功率, 避免高峰值功率引起的强非线性效应^[5], 如自聚焦效应等。

目前, CPA 的啁啾脉冲种子源通常是锁模脉冲经光栅展宽器展宽获得。在高能物理实验中, 为了获得满足要求的再压缩超短脉冲时间波形, 需要匹配展宽器与压缩器^[6]。且在实验中对压缩脉冲的宽度调节

收稿日期: 2016-03-08; 收到修改稿日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(61205103)

作者简介: 井媛媛(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事脉冲光谱控制方面的研究。E-mail: apriljyy@foxmail.com

导师简介: 范薇(1975—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光脉冲整形方面的研究。

E-mail: fanwei@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: smilexc@siom.ac.cn

是通过改变光栅展宽器和光栅压缩器的光路实现的,其调节方法复杂,操作不便。此外,利用光栅展宽器对锁模脉冲进行展宽获得啁啾脉冲的过程仅能为激光脉冲提供特定的色散展宽量^[7],不具备灵活控制色散和光谱的能力。

为实现 CPA 系统的集成化及色散灵活控制,目前已经提出了多种技术方案,例如增益开关激光二极管光源^[8-9]、分布布拉格反射器激光二极管^[10]及直接相位调制啁啾光源^[11]。1996年, Kim 小组^[12]利用直接相位调制,获得超短脉冲激光源,但实验中由于使用的射频驱动功率高达千瓦量级,获得的输出脉冲能量低,波形质量差。2007年, van Howe 等^[11]提出环状光路结构多次相位调制叠加的方案,其集成度高且带宽可调。在2010年, Xin 等^[13]利用全光纤可编程直接相位调制系统,获得了重复频率为 10.5 kHz,中心波长为 1053 nm,带宽为 1.15 nm 的啁啾脉冲。2014年,郭跃等^[14]基于孔径耦合带状线的多程相位调制结构,将 0.03 nm 的光谱展宽至 0.23 nm,但其光谱展宽量较小,并且未对输出光谱特性进行精确分析。此外,田小程等^[15]在2013年报道了多程相位调制在光谱束匀滑方面的应用,并取得了一些多周期啁啾脉冲的研究成果。综上所述,采用多程相位调制方式产生线性啁啾的种子源的技术方案具有集成度高和色散调节灵活等优点,并且有希望基于高速电子学技术实现啁啾脉冲光谱的可编程控制。

本文针对多程相位调制进行光谱控制的过程进行了理论分析,针对调制信号形状、调制深度、调制信号宽度以及光信号和电调制信号的时间同步等因素对光谱的影响进行了模拟仿真。基于理论分析指导,从实验上对仿真结果开展验证,将光谱宽度为 0.03 nm 的注入脉冲进行多程相位调制得到了光谱宽度为 2.238 nm 的输出脉冲。在此基础上研究了不同相位调制信号波形与输出光谱的对应关系,验证了在多程相位调制结构中通过控制调制信号波形进行光谱特性控制的可行性,为激光脉冲的任意光谱整形打下基础。

2 理论模拟

多程相位调制是基于晶体的电光效应,利用电信号对激光脉冲进行相位调制获得光谱展宽,激光脉冲多次经过电光晶体,光谱展宽效果进行累积,从而得到宽谱激光脉冲输出,输出脉冲的光谱特性和多程相位调制过程中的多个物理量相关。

假设入射脉冲具有高斯形式,即

$$A(T) = \sqrt{P_{\max}} \exp\left[-\frac{1+iC}{2} \left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right], \quad (1)$$

$$T_0 = \frac{T_{\text{FWHM}}}{2(\ln 2)^{1/2}}, \quad (2)$$

式中 P_{\max} 是脉冲峰值功率, C 为啁啾参量, T_{FWHM} 为脉冲半峰全宽(FWHM)。其通过相位调制器(PM)之后,在脉冲上附加了一个相位,得到的调制脉冲为

$$A_{\text{out}}(T) = \exp[i\Phi(T)] A(T). \quad (3)$$

经过 N 次调制后,叠加的总相位为

$$\phi(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\pi}{V_{\pi}} V_i(t) = N \frac{\pi}{V_{\pi}} V(t), \quad (4)$$

式中 $V(t)$ 为相位调制器的驱动电信号, V_{π} 为半波电压。那么由(4)式可得其瞬时频率为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{N}{2V_{\pi}} \frac{dV(t)}{dt}, \quad (5)$$

$$\lambda(t) = \frac{c}{nf(t)}, \quad (6)$$

式中 c 为光在真空中的速度, n 为介质折射率。

经过对多程相位调制过程的理论分析得出,调制次数、调制深度、光信号和调制信号的相对时间关系以及调制信号的时间波形是影响光谱输出特性的几个关键参数。选用常见的高斯型调制信号和针对理想线性啁啾的抛物线形调制信号对上述几个影响因素进行理论分析。注入光脉冲为脉宽 80 ps 的高斯脉冲,中心波长为 1053 nm。

通过改变调制次数 N , 可以改变脉冲多次调制所增加的相位, 即可改变脉冲最终展宽的光谱宽度。为研究调制次数 N 与输出光谱宽度的关系, 分别采用抛物线信号和高斯信号(如图 1 所示)对理想高斯脉冲进行调制, 在不考虑其他因素的情况下, 经仿真计算可得, 输出光谱宽度随调制次数 N 的增加呈线性增长, 如图 2 所示。对实验中要求的不同宽度的光谱, 可以通过改变调制次数来实现, 这一模拟结果在实际工程应用中具有一定指导意义。

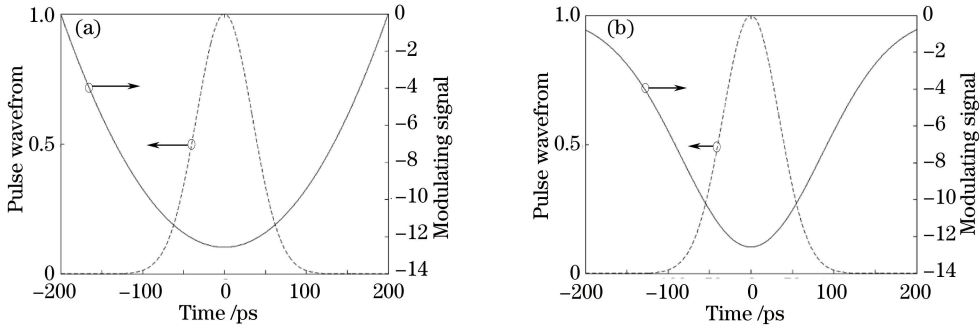


图 1 (a) 抛物线调制信号, 半峰全宽为 141 ps; (b) 高斯调制信号, 半峰全宽为 100 ps
Fig. 1 (a) Parabolic signal, T_{FWHM} is 141 ps; (b) Gaussian signal, T_{FWHM} is 100 ps

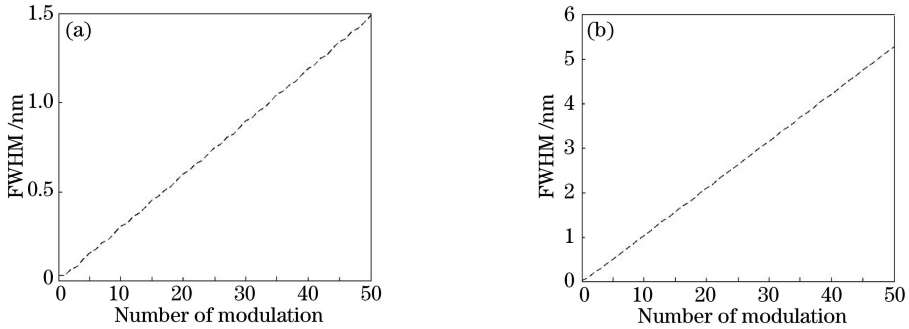


图 2 光谱宽度随调制次数变化图。(a) 抛物线信号; (b) 高斯信号
Fig. 2 FWHM versus number of modulation. (a) Parabolic signal; (b) Gaussian signal

根据(5)和(6)式可以看出在直接相位调制中, 当驱动电压固定时, V_{π} 越小则调制深度(驱动电压与半波电压的比值)越大, 那么单圈调制量越大, 因而获得一定的光谱展宽宽度所需要的调制圈数越少。光谱展宽输出特性和调制深度的关系如图 3 所示, 可以看出, 对于抛物线和高斯调制信号, 光谱展宽量均随调制深度的增加呈近似线性增长。因此在实验中, 需增大调制深度以获得更宽的光谱展宽量, 即在实验器件破坏阈值允许的情况下, 增大驱动电压幅值, 并减小相位调制器的半波电压。

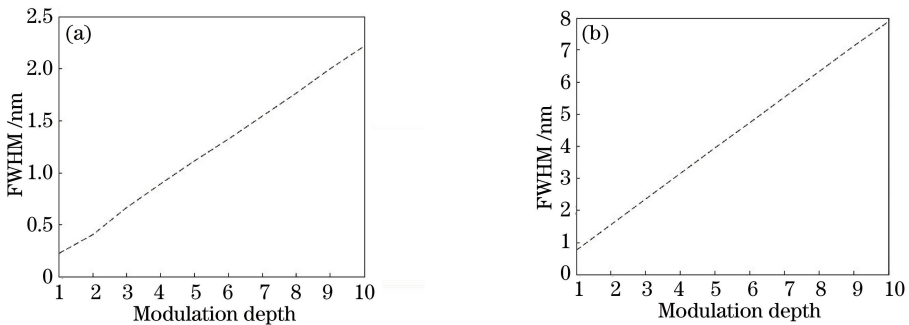


图 3 光谱宽度随调制深度变化图。(a) 抛物线信号; (b) 高斯信号
Fig. 3 FWHM versus modulation depth. (a) Parabolic signal; (b) Gaussian signal

光信号和调制信号的时间同步是指两个信号的相对延时。调制信号与光信号之间的延时对光谱形状的影响如图 4 所示。由仿真结果可知, 当调制信号为抛物线且延时为 0 时得到的光谱形状呈高斯型。当调制

信号中心相对光脉冲前移时,输出光谱中心波长向短波方向移动;当调制信号中心相对光脉冲后移时,输出光谱中心波长向长波方向移动。而调制信号前移或后移不会使光谱形状发生变化。当调制信号为高斯型且延时为 0 时,光谱两侧出现对称的尖峰,即脉冲能量对称分布;当调制信号中心相对光脉冲前移时,输出光谱中心波长向短波方向移动,光谱形状发生改变,脉冲能量向短波方向移动;调制信号中心相对光脉冲后移时,输出光谱中心波长向长波方向移动,脉冲能量向长波方向移动。因此,为获得良好的输出光谱特性,实验中需要使调制信号中心与光脉冲中心精确对准,保证他们之间的延时为 0。

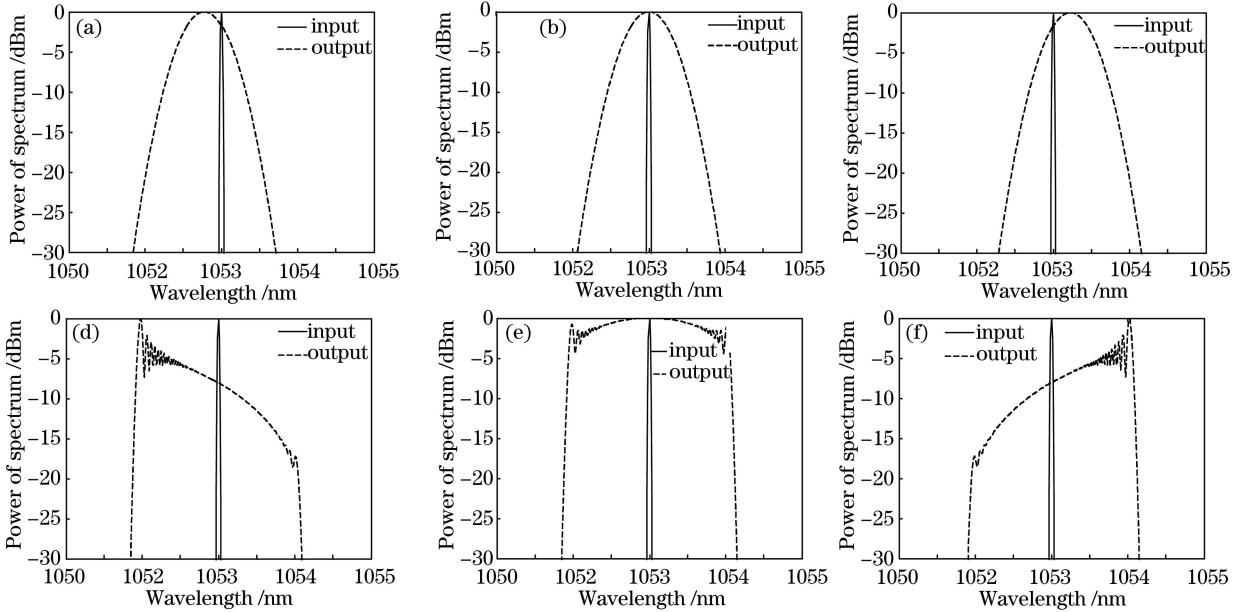


图 4 延时对光谱的影响。(a)抛物线信号,延时为-30 ps; (b)抛物线信号,延时为 0 ps; (c)抛物线信号,延时为+30 ps; (d)高斯信号,延时为-30 ps; (e)高斯信号,延时为 0 ps; (f)高斯信号,延时为+30 ps

Fig. 4 Influence of delay time between optical pulse and modulation signal on spectrum. (a) Parabolic signal, delay time of -30 ps; (b) parabolic signal, delay time of 0 ps; (c) parabolic signal, delay time of +30 ps; (d) Gaussian signal, delay time of -30 ps; (e) Gaussian signal, delay time of 0 ps; (f) Gaussian signal, delay time of +30 ps

综合以上分析可知,对同一种调制信号波形来说,脉冲的调制圈数越大,相位调制信号的调制深度越大,则输出光谱宽度越宽。此外,当调制圈数和调制深度相同时,不同的调制信号也会引起输出光谱特性发生改变。

3 实验结果

利用基于 2×2 声光开关(AOM)的多程光纤环形增益结构来对种子光进行多程相位调制。注入信号为锁模激光序列经电光开关后获得的重复频率为 10 kHz 的激光脉冲,脉冲宽度为 80 ps,中心波长为 1053 nm,实验装置如图 5(a)所示。图 5(b)描述了 AOM 工作状态与光的衍射输出级次关系,当 AOM 工作在“0”状态时,0 级入射由衍射 0 级输出;AOM 工作在“1”状态时,0 级入射由衍射 1 级输出。当信号光注入时,声光开关工作在“0”状态,信号光进入腔内后,声光开关工作在“1”状态,脉冲在腔内循环多次,然后声光开关切换至“0”状态,激光脉冲输出。实验中所用声光开关上升沿时间为 70 ns,腔周期为 196 ns。调节声光开关工作在“1”状态的时间可以改变脉冲在环形腔内循环的圈数,从而改变光谱的展宽量。光脉冲经腔内的光纤耦合器分离出部分能量来触发相位调制信号产生模块。调制信号产生模块是基于光纤技术和高速电子学技术获得的^[16],激光信号经光纤堆积、光电转换和快速比较器处理获得快前沿方波信号,信号注入孔径耦合带状线(ACSL)后,整形为相位调制信号,通过调控 ACSL 的带状线形状可以控制相位调制信号的波形。相位调制信号和激光脉冲信号的同步精度小于 5 ps [均方根误差(RMS)]。相位调制信号经相位调制器作用到激光脉冲上,对光脉冲进行相位调制,相位调制器的半波电压为 1.5 V。腔内使用可调光延时线(TDL),精确调节光脉冲与调制信号的时间同步。在相位调制器注入端使用偏振控制器(PC),调节相位调制器注入端的激光信号偏振态,使其对准相位调制器的起偏方向。掺镱光纤放大器(YDFA)用来补偿脉冲

在光纤环形结构内循环的能量损失,为了避免非线性效应并实现多圈循环,环形腔内的净增益维持在 1 左右,如图 6 所示,图中幅值较小的等幅序列脉冲为 AOM 漏光输出,最后一个幅值较大的脉冲为腔最终输出。腔内使用隔离器(ISO)防止脉冲反向传输,并结合控制增益来抑制腔内自激振荡的发生。

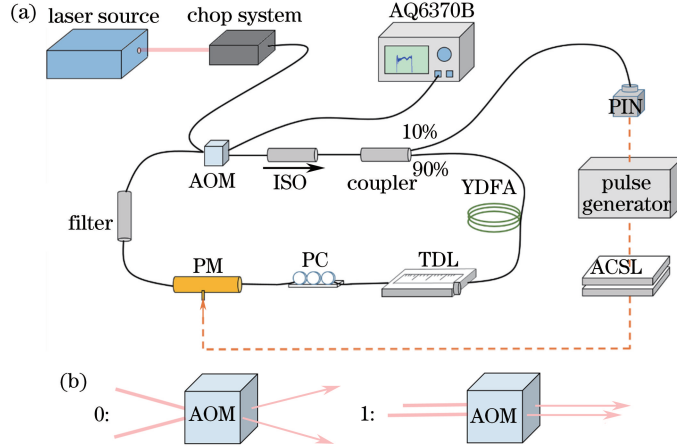


图 5 (a)实验装置图;(b)AOM 工作状态(AOM 工作在“0”状态时,0 级入射由衍射 0 级输出;AOM 工作在“1”状态时,0 级入射由衍射 1 级输出)

Fig. 5 (a) Schematic of experimental setup; (b)work state of AOM, when working at state "0", the input pulse goes to the zero diffraction class, and when working at state "1", the input pulse goes to the first diffraction class

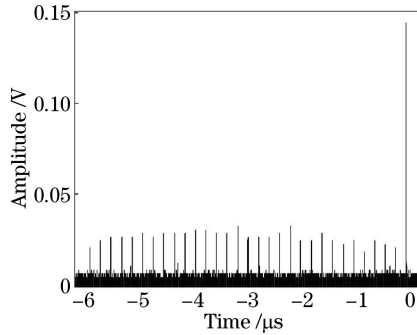


图 6 工作在 30 圈时的环形腔输出序列

Fig. 6 Circular cavity output sequence at the 30th cycle

在实验中采用近高斯信号对光脉冲进行调制。一方面高斯信号的中心可以近似为抛物线信号;另一方面高斯信号在时间延时方面的调制特性有助于研究调制信号波形与输出光谱特性的关系。实验中的光信号为脉宽为 80 ps 的高斯脉冲,用示波器(Tektronics, TDS6124C,带宽为 12 GHz)测得电调制信号的幅值为 5 V,半峰全宽为 180 ps[如图 7(a)所示]。当调制圈数为 30 时,用光谱仪(Yokogawa, AQ6370B,分辨率为 0.02 nm)测得其输出的光谱为宽度为 2.238 nm,与理论模拟结果相符光谱形状较吻合[如图 7(c)和(d)所示]。如图 7(b)所示,调制后的脉冲时间波形与注入脉冲基本保持一致,这是因为相位调制仅仅是在光脉冲函数上引入一个附加相位,相位的改变仅对脉冲的频谱有影响,并不会引起脉冲时间波形的改变;而且脉冲在腔内循环引入的色散较小,由色散引入的时间波形变化可以忽略不计。

通过改变相位调制器的半波电压,研究了调制深度对输出光谱特性的影响。当调制次数为 10,单圈调制深度为 0.8 和 3.33 时,分别获得 0.23 nm 和 0.80 nm 的光谱展宽输出,与理论模拟结果相符(如图 8 所示)。调制深度越大,单圈光谱展宽量越大,那么实现一定的光谱展宽时所需的调制次数越小,有效地提升调制深度可以降低光脉冲在腔内的循环次数,从而降低非线性效应的影响,并有利于系统稳定性的提升。

进一步分析了调制信号形状对输出光谱特性的影响,利用 ACSL 任意波发生技术改变调制信号的波形可以获得不同特性的输出光谱。分别对两个不同调制信号所产生的输出光谱进行仿真计算和实验测量,结果如图 9 所示。通过对比发现,对应不同的调制波形,可以得到与理论预期相符的光谱输出特性。光谱顶部

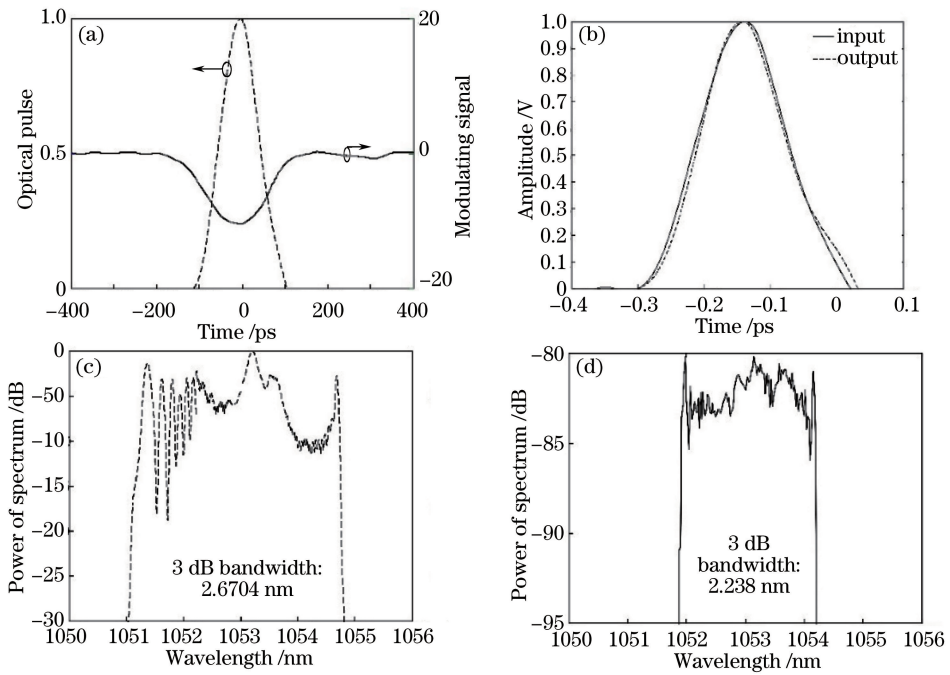


图 7 (a)电调制信号与光脉冲波形；(b)注入脉冲与输出脉冲的时间波形；(c)循环 30 圈的理论光谱；
(d)循环 30 圈的实际光谱

Fig. 7 (a) Pulse shapes of modulation signal and optical pulse; (b) time shapes of input pulse and output pulse; (c) simulation spectrum after the 30 th cycle; (d) actual spectrum after the 30 th cycle

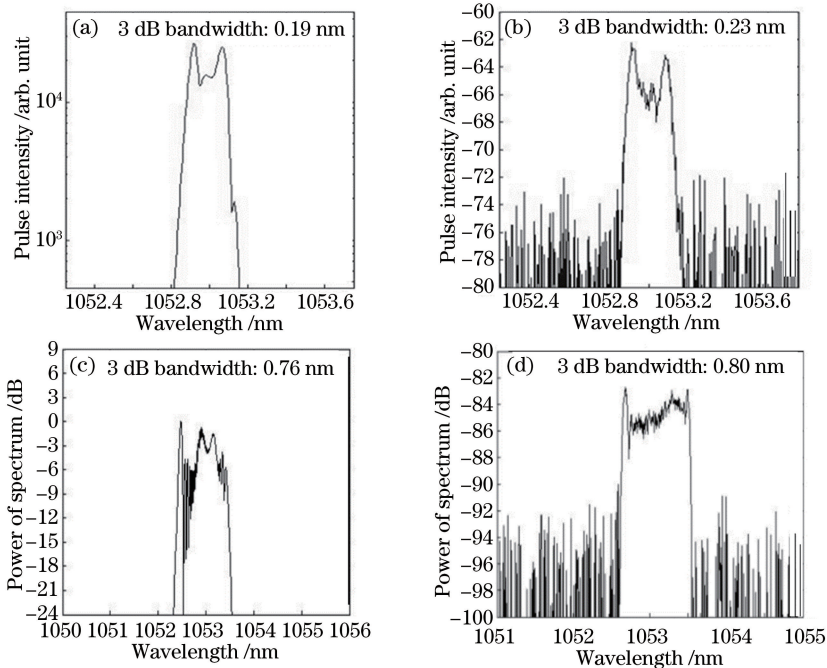


图 8 调制深度对输出光谱宽度的影响。(a)调制深度为 0.8 时的模拟光谱；(b)调制深度为 0.8 时的实际光谱；
(c)调制深度为 3.33 时的模拟光谱；(d)调制深度为 3.33 时的实际光谱

Fig. 8 Influences of different modulation depths on bandwidth of output spectrum. (a) Simulated spectrum when modulation depth is 0.8; (b) actual spectrum when modulation depth is 0.8; (c) simulation spectrum when modulation depth is 3.33; (d) actual spectrum when modulation depth is 3.33

出现的尖峰,是调制信号顶部不够圆滑造成的。实验结果验证了调制信号波形与输出光谱特性的对应关系,表明通过控制调制信号波形对光谱特性进行控制是可行的。同时,也为下一步利用任意波形产生器(AWG)

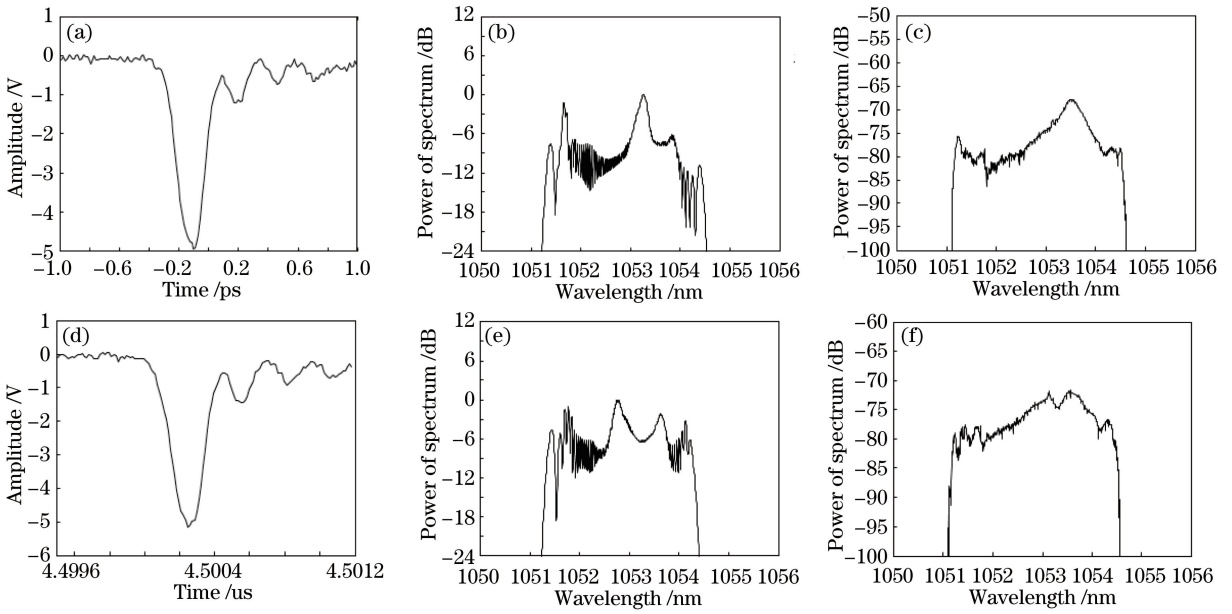


图 9 两种相位调制波形及对应光谱特性。(a)调制波形 1, -4.97 V, 210.10 ps; (b)调制波形 1 对应的模拟光谱; (c)调制波形 1 对应的实际光谱; (d)调制波形 2, -4.70 V, 210.55 ps; (e)调制波形 2 对应的模拟光谱; (f)调制波形 2 对应的实际光谱

Fig. 9 Two modulation signals and corresponding spectrum features. (a) Modulation signal 1, -4.97 V, 210.10 ps; (b) corresponding simulated spectrum for modulation signal 1; (c) corresponding actual spectrum for modulation signal 1; (d) modulation signal 2, -4.70 V, 210.55 ps; (e) corresponding simulated spectrum for modulation signal 2; (f) corresponding actual spectrum for modulation signal 2

进行灵活的光谱整形打下基础。

此外,还从实验上验证了光脉冲与调制信号的时间同步对输出光谱特性的影响。通过调节 TDL 改变调制信号与光脉冲中心的相对延时,脉冲对应调制信号的不同位置,则调制后脉冲的中心波长以及光谱形状都会产生变化。调制圈数为 10 圈,改变电调制信号相对光脉冲的延时,分别对其进行仿真计算和实验测量,获得了相应的输出光谱如图 10 所示。通过对照发现,实验结果和计算得到的光谱形状保持一致,且与图 4 计算的光谱变化的趋势保持一致。

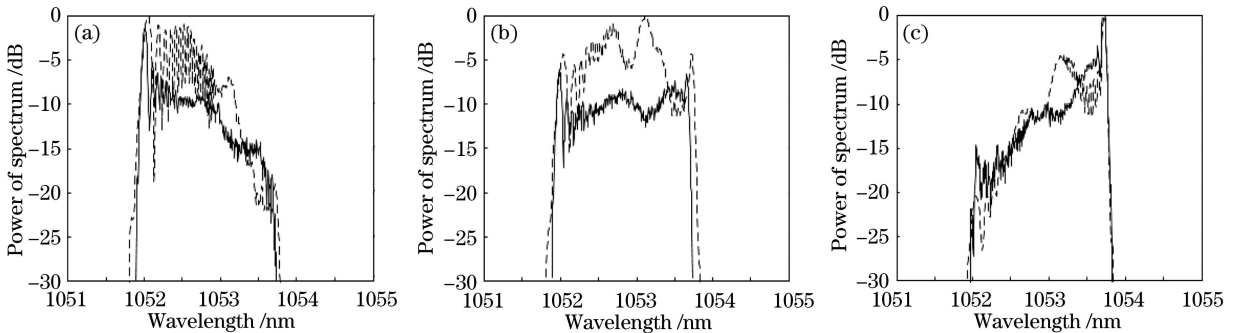


图 10 不同延时下的实际光谱(实线)和仿真光谱(虚线)。(a) -15 ps; (b) 0 ps; (c) $+15$ ps

Fig. 10 Experimental spectra (solid line) and simulation spectra (dashed line) under different delay time.

(a) -15 ps; (b) 0 ps; (c) $+15$ ps

最后,从实验上测量了输出光谱宽度随循环圈数的变化,由图 11 可知,圈数较少时,光谱宽度随圈数的增加呈现近似线性变化,单圈对应的增加光谱约为 0.08 nm。但在 35 圈后,此时光谱宽度为 3 nm,单圈调制量逐渐减小,光谱宽度不再增加,这与理想条件下得到的光谱宽度随调制圈数线性增加有所差别。

经推断造成该差别的原因是电调制信号与光脉冲信号的同步精度随圈数增加而降低,目前采用的同步方式其同步精度与脉冲幅度相关,所有由偏振稳定性等问题带来的多圈循环后的幅度抖动使圈数增加后的

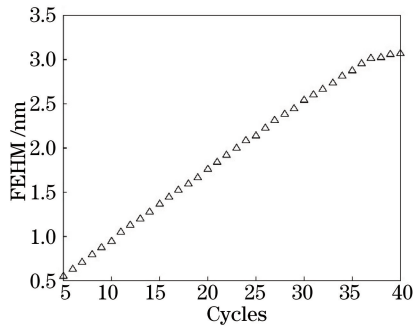


图 11 光谱宽度随圈数的变化

Fig. 11 FWHM of spectrum with different cycles

同步精度的降低,该问题将在下一步的工作中解决。

4 结 论

提出一种利用电调制信号对光脉冲直接调制的光谱展宽方法,理论分析了单圈调制深度、调制信号形状、调制次数以及光脉冲和调制信号的时间同步对输出光谱特性的影响。理论分析结果表明,单圈调制深度越大,调制次数越多,则得到的光谱展宽量越大。调制信号相对光脉冲中心前移时,输出光谱中心波长向短波方向移动,光谱在长波方向塌陷;调制信号相对光脉冲中心后移时,输出光谱中心波长向长波方向移动,光谱在短波方向塌陷。此外,调制信号波形与光谱输出特性具有对应关系。

针对上述仿真结果展开实验研究,用宽度为 180 ps,幅值为 5 V 的负向近高斯型电信号对中心波长为 1053 nm、脉冲宽度为 80 ps、光谱宽度为 0.03 nm 的脉冲进行调制,当圈数为 35 圈时,光谱宽度最大可展宽到 3 nm。经实验得到在循环圈数小于 35 圈时,光谱宽度随圈数增加呈近似线性的变化,在圈数大于 35 圈时,单圈调制量由 0.08 nm 逐渐减小,光谱宽度趋于不变,这是由于腔内光信号的幅值降低且不稳定性增加造成的,最终导致光信号与电信号的同步精度下降。但同步精度仍小于 5 ps。因此系统工作稳定圈数在 30 圈以内,此时光谱宽度为 2.238 nm,和理论计算较为符合。理论和实验研究证明了全光纤多程相位调制结构具有通过控制相位调制波形实现输出光谱特性可控的能力。为下一步利用不同相位调制信号对光脉冲光谱特性实现灵活控制打下了技术基础。

参 考 文 献

- 1 Qiu S R, Wolfe J E, Monterrosa A M, *et al.* Searching for optimal mitigation geometries for laser-resistant multilayer high-reflector coatings[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(9): C373-C381.
- 2 Fang Zhiwei, Su Yahui, Wang Chaowei, *et al.* Analysis and set up of optical system for holographic femtosecond laser processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0222002.
方致伟, 苏亚辉, 汪超伟, 等. 飞秒激光全息加工光学系统搭建与分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0222002.
- 3 Maywar D N, Kelly J H, Waxer L J, *et al.* OMEGA EP high-energy petawatt laser: progress and prospects[C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 112(3): 032007.
- 4 Abulikemu A, Abudurexiti A. Self-magnetic field and proton acceleration in a laser plasma interaction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 021401.
阿不力克木, 阿不都热苏力. 激光等离子体中的自生磁场和质子加速[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 021401.
- 5 Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 56(3): 219-221.
- 6 Maine P, Strickland D, Bado P, *et al.* Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(2): 398-403.
- 7 Xu Tingting, Sun Meizhi, Yang Qingwei, *et al.* Double-line-density gratings for dispersion compensation of ultra-short laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0532002.
徐婷婷, 孙美智, 杨庆伟, 等. 基于双密度棱栅的新型超短脉冲色散补偿装置[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0532002.

- 8 Liu H, Gao C, Tao J, *et al.* Compact tunable high power picosecond source based on Yb-doped fiber amplification of gain switch laser diode[J]. *Optics Express*, 2008, 16(11): 7888-7893.
- 9 Peng Yapei, Jiang Benxue, Fan Jintai, *et al.* Review of in mid-infrared laser materials directly pumped by laser-diode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 020001.
彭雅珮, 姜本学, 范金太, 等. 激光二极管直接抽运中红外固体激光材料综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 020001.
- 10 Galvanauskas A, Blixt P, Tellefsen J A, *et al.* Hybrid diode-laser fiber-amplifier source of high-energy ultrashort pulses [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(14): 1043-1045.
- 11 van Howe J, Lee J H, Xu C. Generation of 3.5 nJ femtosecond pulses from a continuous-wave laser without mode locking [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1408-1410.
- 12 Kim D S, Arisawa M, Morimoto A, *et al.* Femtosecond optical pulse generation using quasi-velocity-matched electrooptic phase modulator[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 493-499.
- 13 Xin R, Zuegel J D. Directly chirped laser source for chirped-pulse amplification[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2010, AMD: AMD3.
- 14 Guo Yue, Wang Xiaochao, Qiao Zhi, *et al.* Control of spectrum based on all-fiber multi-pass direct phase modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0905010.
郭 跃, 汪小超, 乔 治, 等. 全光纤多程直接相位调制实现光谱控制技术研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0905010.
- 15 Tian Xiaocheng, Sui Zhan, Huang Zhihua, *et al.* Periodic linear chirped pulse generation based on direct phase modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 104216.
田小程, 隋 展, 黄志华, 等. 直接相位调制产生周期性线性啁啾脉冲特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(10): 104216.
- 16 Wang X, Fan W, Li G, *et al.* Long-term stable fiber-based picoseconds optical synchronization system in SG-II [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(s2): s20606.