

# 直接相位调制产生线性啁啾脉冲特性研究

田小程 张 崑 朱 娜 许党朋 张 锐 周丹丹\* 黄志华 王建军

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 直接相位调制可产生带宽可调的线性啁啾脉冲,可作为种子源用于啁啾脉冲放大系统中。对线性啁啾脉冲的产生过程以及啁啾脉冲在光纤中的传输放大过程进行了数值模拟与实验研究,实验获得了底宽为500 ps,带宽为0.69 nm的线性啁啾脉冲。在此基础上提出一种全新的产生冲击点火种子脉冲的方式,即对光脉冲的局部进行调制与压缩以获得高对比度的种子脉冲,并对其进行了实验验证。实验中一方波脉冲经调制压缩为对比度为2:1的阶梯脉冲,验证了该方法产生冲击点火种子脉冲的可行性。该方案为未来多种脉冲类型输出的惯性约束聚变(ICF)驱动器光纤前端系统的研制打下了研究基础。

**关键词** 光纤光学;线性啁啾;直接相位调制;冲击点火脉冲

**中图分类号** TN253 **文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0302002

## Research on Linear Chirped Pulse Generated by Direct Phase Modulation

Tian Xiaocheng Zhang Kun Zhu Na Xu Dangpeng Zhang Rui  
Zhou Dandan Huang Zhihua Wang Jianjun

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Linear chirped pulse generated by direct phase modulation can be used in chirped-pulse amplification system, which can produce ultrashort optical pulses with high pulse energy. The process of the linear chirped pulse generation, the amplification and transmission characteristics of the modulated pulse in fiber have been numerically simulated and experimentally studied. A 500 ps pulse at 0.69 nm bandwidth linear chirped pulse has been generated in experiment. A new method of generating shock ignition seed pulse is proposed. A seed pulse with high contrast is generated by modulating and compressing part of the pulse, which is verified by experiment. A stagewise pulse with 2:1 intensity contrast after modulating and compressing a square pulse is generated to confirm the feasibility of generating stock ignition pulse using this method. This method may be used in the front end system of inertial confinement fusion (ICF) driver in the future.

**Key words** fiber optics; linear chirped pulse; direct phase modulation; shock ignition pulse

**OCIS codes** 140.3510; 140.3615; 140.4480; 220.4830

## 1 引 言

大能量超短脉冲在科研以及工业中有非常重要的应用,目前获得大能量超短脉冲的方法主要为啁啾脉冲放大(CPA)<sup>[1-2]</sup>技术,传统的CPA技术利用光栅展宽器将锁模短脉冲展宽并放大后再利用与展宽器相匹配的光栅压缩器将其压缩以获得高能量超短脉冲<sup>[3]</sup>,但此光路调节困难。利用直接相位调制也可产生CPA系统所需的啁啾种子脉冲,该方案采用全光纤结构,光谱带宽可调,光路调节简单,是更理想的啁啾脉冲放大系统种子源。

收稿日期:2014-08-15;收到修改稿日期:2014-10-15

基金项目:国家自然科学基金(61475145)

作者简介:田小程(1987—),男,硕士,研究实习员,主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: tianxc203@126.com

\*通信联系人。E-mail: dan723@126.com

目前主要有两套利用直接相位调制产生超短脉冲的方案,2007年,James van Howe等<sup>[4]</sup>报导了采用含有相位调制器的环形腔结构,从1.5 μm的连续激光源非锁模得到了516 fs/3.5 nJ(经光栅对压缩后)的脉冲输出,其将正弦调制信号的峰值位置近似为二次波形,对脉冲进行调制以获得线性啁啾脉冲。整个装置为全光纤环形腔结构,脉冲多次通过相位调制器以获得最大的带宽。2010年,Xin等<sup>[5]</sup>提出采用相位调制脉冲作为啁啾脉冲放大种子源的方案。其利用任意波形发生器(AWG)产生二次形的电驱动脉冲作用于相位调制器上,得到了带宽为0.78 nm的线性啁啾脉冲,对应于4.3 ps的变换极限脉宽。

上述两套方案只开展了实验研究,并没有对所获得的相位调制脉冲在光纤中的传输放大过程进行详细的理论研究,而相位调制后的宽带脉冲在光纤中的传输放大会受增益饱和、群速度色散以及自相位调制等效应的影响,其时谱特性会发生改变<sup>[6-8]</sup>。本文对相位调制脉冲在光纤中的传输放大过程进行了详细的研究,并开展实验对其进行验证,实验验证了上述效应对脉冲时谱特性的影响。

在现有线性啁啾脉冲实验的基础上,提出了利用直接相位调制产生冲击点火种子脉冲的方案。冲击点火方式将压缩与点火分开,在脉冲波形上需要一高对比度的阶梯脉冲来实现<sup>[9]</sup>。实验中将一方波脉冲压缩为对比度为2:1的阶梯脉冲,实现了冲击点火脉冲的产生。若增加脉冲的光谱宽度以及使用啁啾量更大的光栅可产生对比度更大的脉冲,可作为冲击点火的种子脉冲。

## 2 理论分析

相位调制使光脉冲的相位随着调制信号的变化规律而变化<sup>[10]</sup>,输入光场时间波形为

$$\tilde{E}_0(t) = E_0(t)\exp(-i\omega_0 t). \quad (1)$$

经过相位调制后的光场变为

$$\tilde{E}_{PM}(t) = E_0(t)\exp(-i\omega_0 t) \times \exp[-ih(t)], \quad (2)$$

式中  $E(t)$  为缓变包络,  $\omega_0$  为中心角频率,  $h(t)$  为与电驱动脉冲函数成正比的相位变化量。脉冲的啁啾量与相位为二阶导关系<sup>[11]</sup>,经相位调制后的脉冲啁啾量为

$$C(t) = -\frac{d^2\phi(t)}{dt^2} = -\frac{d^2[-\omega_0 t - h(t)]}{dt^2} = \frac{d^2 h(t)}{dt^2}, \quad (3)$$

即相位调制器的射频信号决定了调制后的宽带脉冲的啁啾特性。

若注入相位调制器的射频信号为抛物线信号,即  $h(t) = m - \frac{4m}{\tau^2}t^2$ , 其中  $\tau$  为射频信号的全宽度,  $m$  为调制深度,则经相位调制后的脉冲啁啾量为

$$C(t) = \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = -\frac{8m}{\tau^2}, \quad (4)$$

此啁啾量为常数,即获得的脉冲为线性啁啾。因此通过控制相位调制器的射频信号为抛物线信号即可获得线性啁啾脉冲。

## 3 数值模拟

经相位调制后的小宽带脉冲在光纤中的传输放大会受到群速度色散、自相位调制以及增益饱和等的影响,对其传输过程中的时谱特性进行了数值模拟,数值计算中采用金斯堡-朗道(GLE)方程进行求解。GLE形式如下:

$$\frac{\partial\psi}{\partial z} + \frac{i}{2}(\beta_2 + ig_0 T_2^2)\frac{\partial^2\psi}{\partial T^2} = i\gamma|\psi|^2\psi + \frac{1}{2}(g_0 - \alpha)\psi, \quad (5)$$

式中  $\psi$  为脉冲复振幅包络,  $\beta_2$  为光纤的二阶群速度色散(GVD),  $T = t - \beta_1 z$  为延迟时间,  $\beta_2 + ig_0 T_2^2$  为增益色散(GD),  $g_0$  为掺杂光纤的增益系数,  $T_2$  为掺杂元素偶极子的弛豫时间,  $\alpha$  为光纤损耗系数,  $\gamma$  为光纤的非线性系数。光纤中损耗很低,与增益相比可忽略。该方程包含了群速度色散、非线性效应、增益饱和等问题,可以对相位调制脉冲的传输放大过程进行有效的模拟。

数值计算时所选取的参数如下:光脉冲的峰值功率为100 mW,脉宽半峰全宽为500 ps的超高斯脉冲,电

脉冲的脉宽底宽为 600 ps 的抛物线脉冲,调制深度为  $4/9\pi$ 。增益光纤的总小信号增益为 30 dB,且环形腔的总损耗也为 30 dB,保证环形腔的净增益为 1。增益光纤的长度设置为 2 m,无源光纤的长度设置为 25 m,总体腔长约为 135 ns,与实验装置(后述)基本一致。

对相位调制脉冲在理想情况下的传输放大进行数值计算,即不考虑增益饱和、群速度色散、自相位调制、同步误差等的影响,计算结果如图 1 所示。

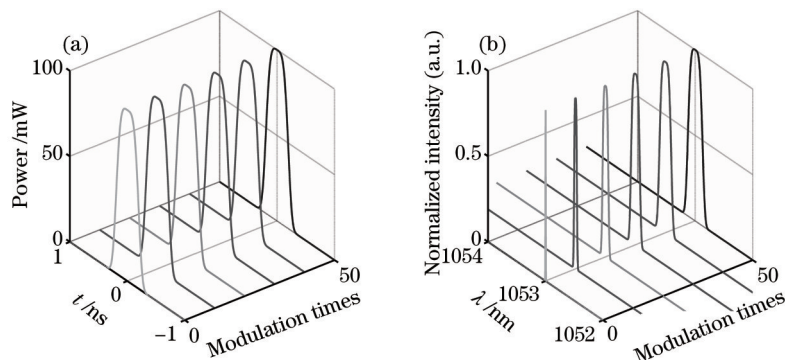


图 1 理想情况下的数值计算结果。(a) 时间波形;(b) 光谱

Fig.1 Numerical simulation results with ideal condition. (a) Waveform; (b) spectrum

从图 1 中可以看出,由于相位调制的影响,脉冲的光谱被逐渐展宽,且由于调制电脉冲为抛物线形,光谱上没有产生正弦调频那样的分立谱结构而是产生了光滑的谱结构,经过 50 次的相位调制后,光谱展宽为 0.25 nm(半峰全宽),其对脉冲的时间波形没有影响,脉冲波形仍为超高斯结构,且无波形畸变。

分别考虑增益饱和、群速度色散、自相位调制以及同步误差对脉冲时谱特性的影响。

增益饱和效应往往会使脉冲的前沿变陡,后沿拉长,使脉冲波形发生畸变。典型单模光纤的饱和能量通量约为  $16 \mu\text{J}$ ,模拟采用峰值功率为 100 mW 的 250 ps 宽的超高斯脉冲,其脉冲能量远低于饱和能量,即使经过 30 dB 的增益以后也远低于饱和能量,因此经过一次放大以后的波形可以忽略增益饱和的影响。但由于每一次增益饱和效应所引起的脉冲波形畸变在下次循环时会保留下来,并且环形腔内的线性损耗只会改变脉冲的整体幅度而不会对脉冲的波形造成影响,因此每一次循环放大后的增益饱和效应会累积起来造成脉冲畸变。考虑增益饱和时的数值计算结果如图 2 所示。

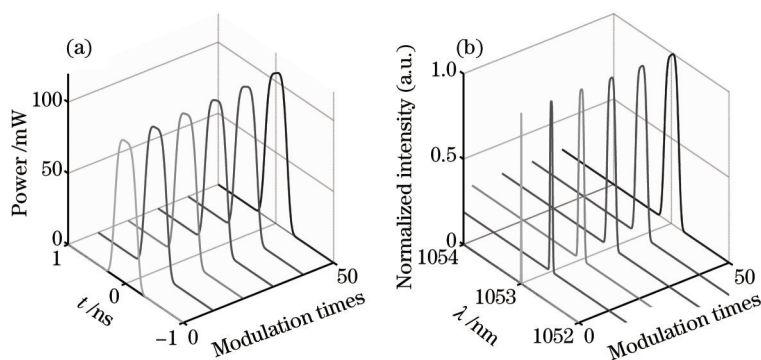


图 2 单独考虑增益饱和时的计算结果。(a) 时间波形;(b) 光谱

Fig.2 Numerical simulation results with gain saturation. (a) Waveform; (b) spectrum

可见,增益饱和效应使脉冲发生轻微的波形畸变,经过 50 次循环以后脉冲的顶部下降了不到 10%,同时由于相位调制脉冲具有啁啾特性,其长波部分与短波部分的增益不同,因而增益饱和效应对脉冲的光谱也有影响,从图中可以看出,光谱略向短波方向偏移。

光纤中另一个非常重要的效应为群速度色散,群速度色散会使脉冲宽度得到压缩或展宽,但其对脉冲的频谱没有影响。光纤中典型的二阶群速度色散系数为  $\beta_2 = 20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,模拟中的光脉冲宽度为 250 ps,因此色散长度为  $L_D = T_0^2/|\beta_2| = 3125 \text{ km}$ ,在数值计算中,环形腔长约为 27 m,50 次循环后约为 1.35 km,远小于

色散长度,因此可以忽略色散的影响。只考虑群速度色散的模拟结果如图3所示,可见,群速度色散对脉冲波形与光谱基本没有影响。

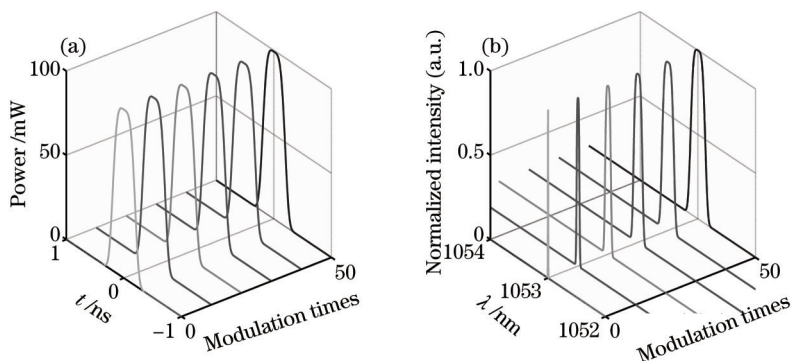


图3 单独考虑群速度色散时的计算结果。(a) 时间波形; (b) 光谱

Fig.3 Numerical simulation results with group velocity dispersion. (a) Waveform; (b) spectrum

自相位调制也是光纤中非常重要的一种效应。在非线性光学介质中,介质的折射率与入射脉冲的光强有关,而这种变化会导致脉冲在空间和时间上的变化。自相位调制是非线性效应在时间上的表征,它将导致光脉冲的频谱展宽,而其对脉冲波形无影响。模拟中选取的非线性参量为  $\gamma = 4.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 初始的注入脉冲功率为 100 mW, 因此非线性长度  $L_{NL} = 1/(\gamma P_0) = 2.08 \times 10^3 \text{ km}$ , 而经过 50 次循环后, 总腔长为 1.35 km, 远小于非线性长度, 因此自相位调制也不会对光脉冲的时谱特性造成较显著的影响。单独考虑自相位调制时的模拟结果如图 4 所示, 可见自相位调制对调制脉冲的时谱特性也没有明显的影响。

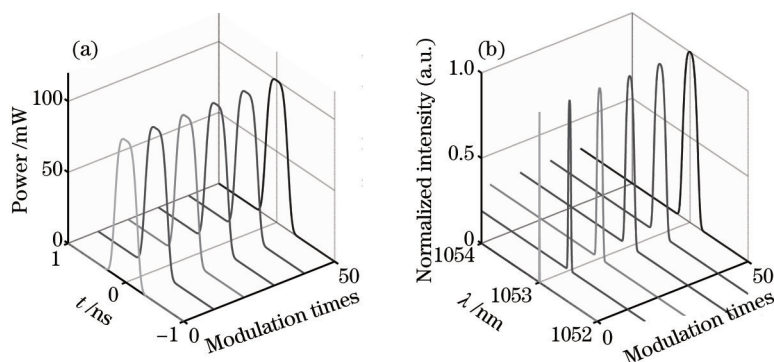


图4 单独考虑自相位调制时的计算结果。(a) 时间波形; (b) 光谱

Fig.4 Numerical simulation results with self-phase modulation. (a) Waveform; (b) spectrum

由于经过一次相位调制后的光谱展宽量有限,并且为了使光谱的展宽量可调,实验与模拟中采用在环形腔内多次循环相位调制的方法对脉冲进行调制,因此光脉冲与电脉冲之间的同步误差也会使脉冲的时谱特性发生变化。考虑存在  $\pm 100 \text{ ps}$  的均匀随机分布的同步抖动下的模拟结果如图 5 所示,可见同步误差对脉冲波形基本没有影响,但其使光谱展宽量略有减小,并且使光谱向长波方向偏移。

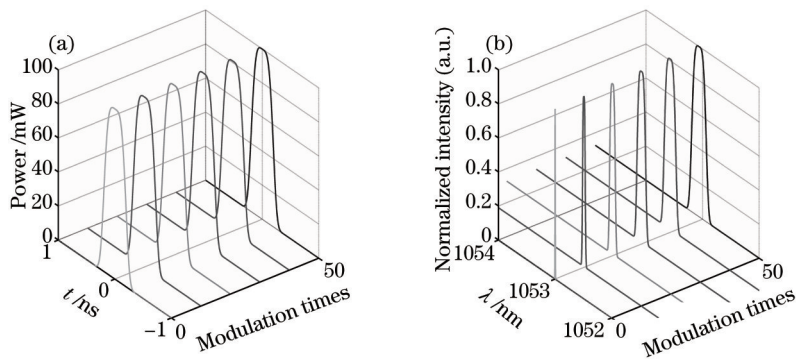


图5 单独考虑同步误差时的计算结果。(a) 时间波形; (b) 光谱

Fig.5 Numerical simulation results with synchronization errors. (a) Waveform; (b) spectrum



图6为同时考虑增益饱和、群速度色散、自相位调制以及同步误差时的模拟结果,从(5)式右边可以看出,非线性效应以及增益系数都会影响脉冲的光谱分布,因此当增益饱和与自相位调制共同作用时将会使光谱两边出现振荡结构,光谱出现较多的调制。由(5)式左边第二项可知,群速度色散与增益饱和效应都会对脉冲波形造成影响,从图6中可以看出,当群速度色散与增益色散共同作用时,脉冲略有窄化,并且顶部出现了较小的增益饱和现象(前沿高,后沿低)。经过50次相位调制以后脉冲的光谱展宽为0.65 nm。

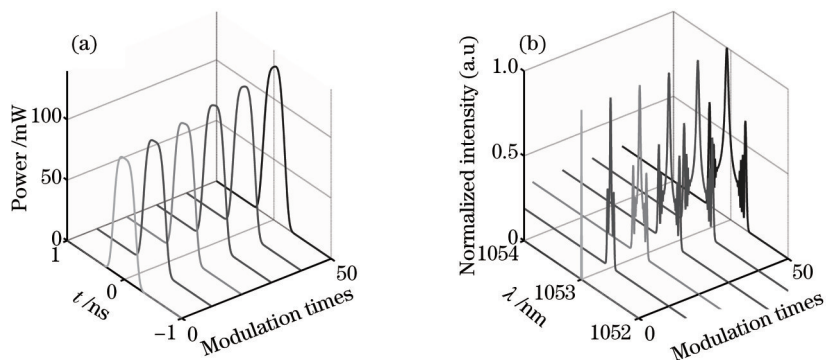


图6 同时考虑几种效应时的计算结果。(a) 时间波形; (b) 光谱  
Fig.6 Numerical simulation results with all conditions. (a) Waveform; (b) spectrum

## 4 实验研究

实验装置如图7所示。其中 front end 为具有产生整形脉冲能力的光纤前端系统。控制偏振控制器(PC)使得由前端系统产生的种子脉冲的偏振态与相位调制器(PM)敏感的偏振方向对准。利用波导开关实现脉冲循环程数的控制,当达到设定程数以后由另一端输出,输出的相位调制脉冲经光纤光栅(CFBG)后被压缩。相位调制器所需的驱动脉冲(抛物线脉冲)以及波导开关的选通时序由任意波形发生器(AWG)产生,AWG可提供动态范围为8 bit的亚纳秒电信号,一路输出经射频(RF)驱动源放大后作用于相位调制器,另一路输出同样经射频驱动放大后作用于波导开关。环形腔内利用掺镱光纤放大器(YDFA)进行损耗补偿,利用可调延迟线(VDL)进行同步微调(延迟线总延时量为500 ps,延时调节精度为0.1 ps),利用偏振控制器调整到所需的偏振方向以后回到波导开关,LD为半导体抽运源。

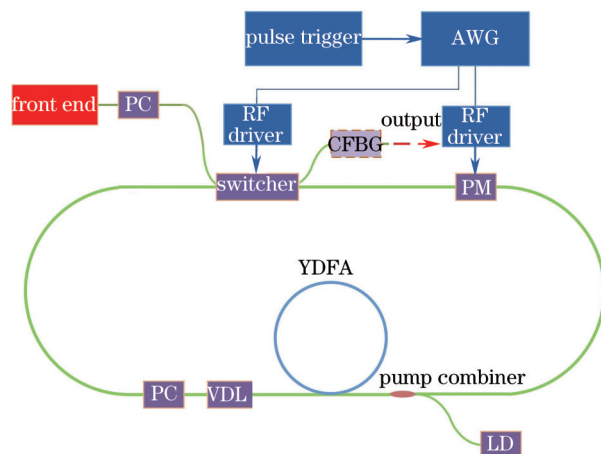


图7 基于直接相位调制的实验光路示意图  
Fig.7 Optical schematic of the direct phase modulation system

### 4.1 线性啁啾脉冲

利用光纤前端系统产生半峰全宽为500 ps,重复频率为1 kHz的方波脉冲,但由于响应带宽等的限制最终前端输出的波形为近似方波的超高斯脉冲,实际半峰全宽约为360 ps,因此在数值计算中也采用超高斯脉冲。同时为增加相位调制器的调制深度,使抛物线形的电脉冲向负向延伸,这样相当于增加了抛物线脉冲的幅度,使调制深度得到加大,另外为了减少脉冲边缘处突变带来的影响,在最低处再加一个较长的平底和

一个缓变的上升沿,这样可以比较准确地调节同步关系,有利于在实验过程中较准确地进行同步调整。由 AWG 编译以及经射频驱动源放大后的电脉冲强度如图 8 所示。

将此电脉冲加载到相位调制器上,并通过 AWG 产生波导开关的选通时序使光脉冲在环形腔内循环调制 50 次,经过 50 次循环相位调制后的光谱如图 9 所示。

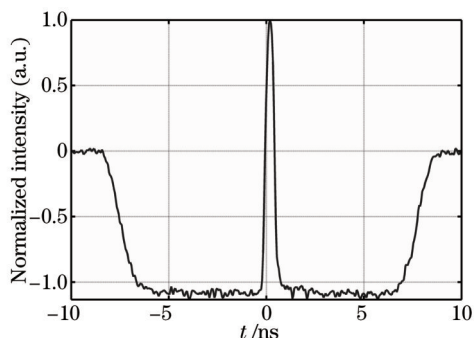


图 8 由 AWG 编译并经射频驱动源放大后的电脉冲波形

Fig.8 Electrical pulse waveform produced by AWG and amplified by RF amplifier

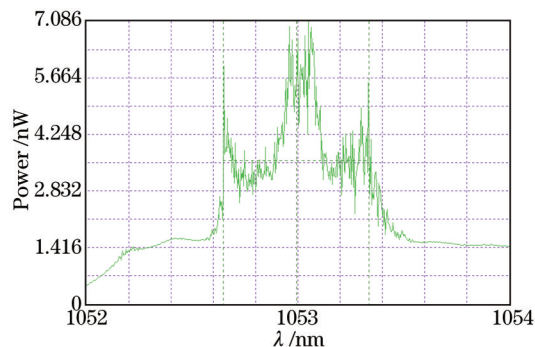


图 9 实验测量光谱

Fig.9 Measured spectrum after direct phase modulation

实验测得的光谱与考虑各种效应后的数值计算结果相比,两者都出现了较多的调制,并且光谱形状也相似,实验获得的光谱带宽为 0.69 nm,数值计算结果的带宽为 0.65 nm,实验结果与模拟结果相吻合。

由于获得的脉冲为线性啁啾脉冲,因此可以利用光栅对其进行压缩,在输出端加一个 120 ps/nm 的光纤光栅对相位调制脉冲进行压缩,压缩前后的对比图如图 10 所示。

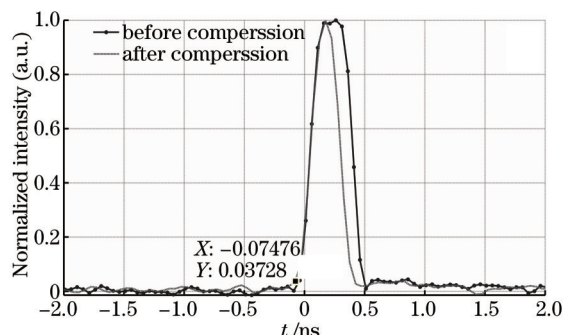


图 10 光栅压缩前后对比图

Fig.10 Contrast diagram with and without grating compression

由于光谱的带宽为 0.69 nm,因而可被压缩的脉宽为 83 ps,从图 10 中可以看出经过光纤光栅后脉冲被压缩了 90 ps 左右。而 0.69 nm 的谱宽对应的傅里叶变换极限脉宽约为 5.35 ps,因此该脉冲并非傅里叶变换极限脉冲,还有剩余啁啾。

本文利用任意波形发生器产生的抛物线脉冲进行相位调制,调制频率为 2 GHz,且相位调制器的调制深度不够高,导致光谱的展宽量不够大,为 0.69 nm,因此压缩率不高。国外报道的方式为采用正弦调频脉冲的尖峰部分来近似抛物线脉冲,可产生较高的调制频率,调制频率为 10 GHz,且其相位调制器的调制深度也较高,最终可将光谱展宽至 20 nm 左右,可将脉冲由十几皮秒压缩至数百飞秒。利用本文的方式若换用调制深度更高的相位调制器,并换用啁啾量更大的光栅进行压缩,可将脉冲压缩的更短。

#### 4.2 冲击点火脉冲种子源

冲击点火脉冲由于将点火过程分为两个阶段,首先在内爆速度较低的情况下,由长激光脉冲直接压缩靶丸,在脉冲压缩的最后阶段,靶中心燃料停滞之前,将一强冲击波耦合到激光脉冲的后沿,形成平滑的脉冲尖峰;继续压缩靶丸,达到点火要求,实现点火,因此冲击点火脉冲的波形为高对比度的阶梯型脉冲。由于 AWG 可编译任意波形的电脉冲,且其同步时序可很方便地调节,因此若单独对一长脉冲的某一部分(最后一部分)进行相位调制,使其获得线性啁啾,而脉冲其余部分由于没有受到相位调制仍为单频脉冲,利用光栅

对其进行压缩,由于脉冲只有受到相位调制的部分为线性啁啾,在经过光栅压缩后受调制部分被压缩而其他部分不受影响,这样可以将一长的方波形脉冲压缩为阶梯型的脉冲,从而产生满足冲击点火要求的点火种子脉冲。

图 11 为实验结果,只需在输出端加一个光纤光栅(如图 7 虚线框内所示),并将前端系统输出的种子脉冲改为长的方波脉冲,仔细调整光脉冲与电脉冲的同步关系,使只有脉冲的最后一部分受到抛物线形的相位调制,即可利用该装置获得冲击点火种子脉冲。从图中可以看出,经相位调制以及光栅压缩后,无相位调制部分脉冲基本没有改变,而受到相位调制的部分脉冲被压缩,且对比度提高到 2:1,证实了该种方法的可行性。利用此方式产生冲击点火种子脉冲光路调节简单,系统集成度高,并可与现有前端系统兼容,若能继续增加其光谱的展宽量以及利用啁啾量更大的光栅对其压缩,可产生对比度更高的种子脉冲。

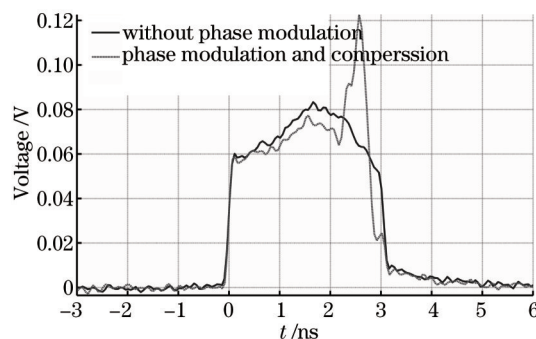


图 11 冲击点火种子脉冲实验结果

Fig.11 Experimental results of shock ignition seed pulse

## 5 结 论

提出了一种新的获取线性啁啾脉冲以及冲击点火种子脉冲的方法,即利用直接相位调制获得所需的啁啾特性。对相位调制后的宽带脉冲在环形腔中的传输放大进行了数值计算,分别模拟了增益饱和效应、群速度色散、自相位调制以及同步误差对相位调制脉冲的影响,并对其进行了实验验证。实验上获得了底宽为 500 ps,线宽为 0.69 nm 的线性啁啾脉冲,其光谱分布与模拟结果吻合得很好。同时由于线性啁啾脉冲具有可压缩性,利用光纤光栅对其压缩,脉冲宽度被压缩了约为 90 ps,证实了获得的脉冲的确为线性啁啾脉冲。在此基础上,基于 AWG 具有灵活可编程的特点,提出了利用直接相位调制产生冲击点火种子脉冲的方案,并从实验上验证了该方案的可行性,实验中将一方波脉冲经部分调制与压缩后变为对比度为 2:1 的阶梯脉冲。若能继续增加其光谱的展宽量以及利用高色散量的光栅对其压缩,可产生对比度更高的种子脉冲。

直接相位调制方案由于采用全光纤结构,并且灵活运用 AWG 任意可编程的特点,使光路调节简单,系统集成度高,与现有惯性约束聚变(ICF)驱动器光纤前端系统兼容,同时由于采用环形腔循环调制的结构,可获得带宽可调的啁啾脉冲以及冲击点火种子脉冲,可满足未来需多种脉冲种类输出的光纤前端系统的需求。

## 参 考 文 献

- 1 D Strickland, G Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Opt Commun, 1985, 56(3): 219-221.
- 2 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(7): 865-872.
- 彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 865-872.
- 3 P Maine, D Strickland, P Bado, *et al.*. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification[J]. IEEE J Quantum Electron, 1988, 24: 398-403.
- 4 James van Howe, Jennifer H Lee, Chris Xu. Generation of 3.5 nJ femtosecond pulses from a continuous-wave laser without mode locking[J]. Opt Lett, 2007, 32(11): 1408-1410.
- 5 R Xin, J D Zuegel. Directly chirped laser source for chirped-pulse amplification[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2010. AMD3.
- 6 Liu Lanqin, Lin Honghuan, Su Jingqin, *et al.*. Characteristics of amplification transmission of stacked chirped pulse[J]. High Power

- Laser and Particle Beams, 2008, 20(12): 2006–2010.
- 刘兰琴, 林宏免, 粟敬钦, 等. 小宽带堆积啁啾脉冲传输放大特性[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 2006–2010.
- 7 Liu Fengnian, Wang Wenliang, Leng Jinyong. Characteristics of all-fiber ring cavity multi-pass pulse amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702006.
- 刘丰年, 王文亮, 冷进勇. 全光纤环形腔多程脉冲放大特性[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702006.
- 8 Yu Zhenhong, Xie Fengfeng. Study of the effects of third-order dispersion in ultra-high speed optical fiber communication system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050604.
- 余震虹, 谢枫锋. 高速光纤传输系统中三阶色散效应影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050604.
- 9 R Betti, C Zhou, J S Anderson. Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal density[C]. The Fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Application, 2008, 112: 022024.
- 10 Xie Shuping, Xu Guoliang. Suppression on fiber stimulated Brillouin scattering based on phase modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0206003.
- 谢淑平, 许国良. 基于相位调制法的光纤受激布里渊散射抑制[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0206003.
- 11 Tian Xiaocheng, Sui Zhan, Huang Zhihua, *et al.*. Research on 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.

栏目编辑: 王晓琰