

# 全光纤多程直接相位调制实现光谱控制技术研究

郭 跃 汪小超\* 乔 治 范 薇

(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)

**摘要** 提出一种对光脉冲直接相位调制进行光谱展宽的方法,对调制深度、调制信号宽度、同步精度和不同调制信号形状对输出光谱的影响进行了数值模拟。模拟结果表明,调制深度越大,调制信号宽度越小,对光谱的展宽效果越明显,单次调制展宽量越大;不同的调制信号宽度对同步精度有不同的要求,调制信号越窄,对同步精度要求越高;相比于抛物线型调制信号,正弦调制信号会带来光谱两侧明显的幅频调制,降低脉冲可压缩性和再压缩信噪比。实验结果与模拟数值结果相符。

**关键词** 光纤光学; 啁啾脉冲放大; 直接相位调制; 光谱展宽

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0905010

## Study on Spectrum Control through All-Fiber Multi-Pass Direct Phase Modulation

Guo Yue Wang Xiaochao Qiao Zhi Fan Wei

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

**Abstract** A method to broaden the spectrum by direct phase modulation is proposed. The effects on the spectrum of modulation depth, modulation signal width, synchronization precision and different signal forms are investigated by numerical simulations. The results show that deeper modulation and more narrow modulation signal width lead to a more obvious effect and a broader spectrum of single modulation; different modulation signal widths require different synchronization precisions, and the narrow signals need a high-precision synchronization; compared to the parabolic signal, sinusoidal signal can lead to an obvious frequency modulation to amplitude modulation, which can bring down the compressibility and the signal to noise ratio. The experiment results of the central wavelength match well the simulation results.

**Key words** fiber optics; chirped pulse amplification; direct phase modulation; spectral broadening

**OCIS codes** 060.5060; 060.2630; 060.2310; 140.3615

## 1 引 言

高功率超短激光脉冲在激光加工、医学、高能物理实验等方面有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。对高功率激光脉冲的需求,促进了激光技术的进步。在高功率超短脉冲产生过程中,普遍采用啁啾脉冲放大(CPA)技术<sup>[2]</sup>,将放大后的脉冲用光栅压缩的方式获得高能超短脉冲,从而避免高功率引起的非线性效应<sup>[3]</sup>。

通常,采用光栅展宽器对锁模脉冲进行展宽作为啁啾脉冲放大种子源,对输出脉宽的调节通过调整光栅展宽器或光栅压缩器实现。在高能物理实验应用中,会对脉冲宽度有不同要求,通过调节光栅的方法实现输出脉宽的调节,操作复杂不便。另外,光栅仅能为激光脉冲提供特定的色散变化<sup>[4]</sup>,不具备灵活控制色散和光谱的能力。

收稿日期: 2014-04-10; 收到修改稿日期: 2014-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(61205103)

作者简介: 郭 跃(1989—),男,硕士研究生,主要从事脉冲光谱控制方面的研究。E-mail: guoyue26536@126.com

导师简介: 范 薇(1975—),女,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: fanweil@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: smilexc@siom.ac.cn

1996年, Kim等<sup>[5]</sup>首次采用直接相位调制获得超短激光脉冲, 但并未采用多程结构, 调制量难以满足应用需求。2007年, Howe等<sup>[6-7]</sup>提出利用再生结构, 实现多次相位累积叠加, 利用连续波斩波产生的脉冲光, 通过直接相位调制得到啁啾脉冲, 并实现脉冲压缩。该方法具有集成度高、结构简单、脉冲宽度易于调节等优点。随着高速电子学的发展, 孔径耦合带状线(ACSL)和任意波形发生器(AWG)等技术可以实现对调制电信号波形的控制, 进而对脉冲光的相位和光谱进行灵活控制。灵活的相位和光谱控制的实现具有广泛的应用价值, 例如可以补偿放大过程中的增益窄化<sup>[8]</sup>, 可用于光谱色散平滑技术<sup>[9-10]</sup>等。通过设计多程相位调制过程中调制电信号的波形还有望实现对CPA系统中相位畸变的补偿<sup>[11]</sup>, 从而可以大幅度提升CPA系统的输出特性<sup>[12-14]</sup>。

Howe等<sup>[6-7]</sup>的工作中, 实验结果中出现明显调制现象, 但并未对该实验现象进行分析解释, 对调制过程中调制深度等参数的影响也未进行分析讨论。本文针对多程直接相位调制过程中调制深度、调制次数、调制信号宽度、同步抖动、调制信号形状对光谱展宽和脉冲可压缩性进行理论分析和数值模拟, 探讨了相关物理量对展宽光谱的影响, 同时开展实验, 实验结果和理论符合较好。

## 2 理论分析

### 2.1 电光相位调制

相位调制是利用晶体的电光效应, 通过改变外加电场使得晶体折射率随之改变, 光经过晶体后, 其相位也随之改变。

设原始光脉冲光场为

$$E(t) = \sqrt{P_0} \cdot U_0(t) \exp(-i\omega_0 t), \quad (1)$$

式中  $P_0$  为入射脉冲峰值功率,  $U_0(t)$  为归一化振幅。

经过加载相位调制电压信号的电光晶体之后, 光场变为

$$E'(t) = \sqrt{P_0} \cdot U_0(t) \exp(-i\omega_0 t - i\Delta\varphi), \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = \frac{V_s(t)}{V_\pi} \cdot \pi, \quad (3)$$

式中  $V_s(t)$  为调制信号,  $V_\pi$  为调制器的半波电压。

则该脉冲频率变为

$$\omega = \omega_0 + \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \omega_0 + \frac{\pi}{V_\pi} \cdot \frac{dV_s(t)}{dt}. \quad (4)$$

### 2.2 产生啁啾脉冲种子源

当调制信号  $V_s(t)$  为抛物线型时, 即

$$V_s(t) = a \cdot (t - b)^2 + c, \quad (5)$$

式中  $a = -\frac{4V_{pp}}{T_s^2}$ ,  $b$  为调制电信号与光脉冲间时间偏差,  $c = V_{pp}$ ,  $V_{pp}$  为电信号幅值,  $T_s$  为电信号宽度。

由(4)式可得, 频率  $\omega$  变为

$$\omega = \omega_0 + \frac{\pi}{V_\pi} \cdot 2a \cdot (t - b), \quad (6)$$

引入调制深度  $m = \frac{V_{pp}}{V_\pi}$ , (6)式改写为

$$\omega = \omega_0 - \frac{8m\pi}{T_s^2} \cdot (t - b), \quad (7)$$

可以看出, 在脉冲持续时间内,  $\omega$  为时间  $t$  的一次函数, 即得到线性啁啾均匀展宽。

### 2.3 光谱展宽脉冲压缩

由(2)式可以得经过多次相位调制之后, 光脉冲归一化振幅变为

$$U(t) = U_0(t) \exp(-i\Delta\varphi), \quad (8)$$

光栅压缩输出光场为<sup>[15]</sup>

$$U_{out}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}(\omega) \exp\left(\frac{i}{2}\varphi_2\omega^2 - i\omega t\right) d\omega, \quad (9)$$

式中  $\tilde{U}(\omega)$  为输入光场归一化振幅的傅里叶变换,  $\varphi_2$  为光栅参数决定的物理量, 此处不展开讨论。将(8)式代入(9)式中, 可得到输出光场时间波形。

## 3 数值模拟

分别对调制信号形状、调制深度和同步精度这三种参数对光谱展宽效果和输出脉冲可压缩特性的影响进行了模拟。模拟采用的输入光脉冲脉宽  $t_0$  为 80 ps、中心波长为 1053 nm 的高斯脉冲, 调制电信号采用底宽为 150 ps、幅值为 6 V 的抛物线型电信号。

首先对理想情况下抛物线型调制信号的啁啾展宽进行了数值模拟, 即光脉冲和抛物线型调制电信号无同步抖动和偏移, 调制电信号宽度远大于光脉冲宽度。图 1(a) 为抛物线型调制电信号和光脉冲的时域关系, 调制电信号中心和光脉冲中心对准, 脉冲宽度为 80 ps, 调制信号脉冲底宽为 300 ps。图 1(b) 为光谱随调制次数增加的变化情况, 随着调制次数的增加, 脉冲谱宽变宽, 其形状保持高斯形状。

由(7)式可知, 在脉冲调制过程中, 光谱半峰全宽(FWHM,  $f_{FWHM}$ ) 随着调制深度  $m$  的增大而增大。其模拟结果如图 2 所示。可以看出, 光脉冲光

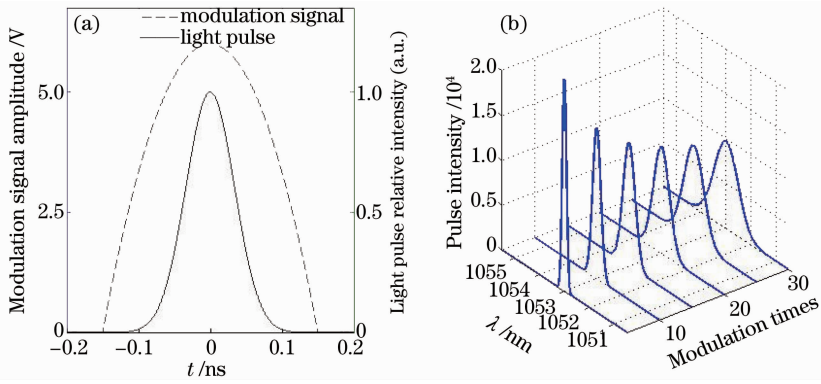


图 1 (a) 抛物线电信号和光脉冲时域相对位置；(b) 光谱随调制次数变化

Fig. 1 (a) Time domain relative position of the parabolic signal and light pulse; (b) optical spectrum versus different modulation times

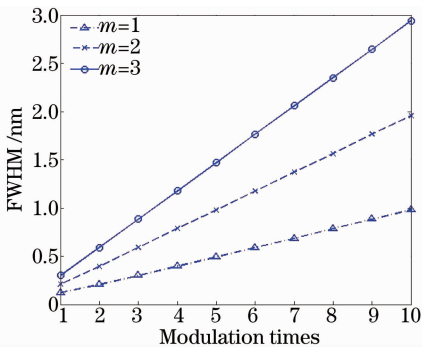


图 2 不同调制深度下, 光谱 FWHM 随调制次数变化情况

Fig. 2 FWHM of spectrum versus modulation times at different modulation depths

谱宽度随着调制次数增加而增宽, 且保持线性增长。

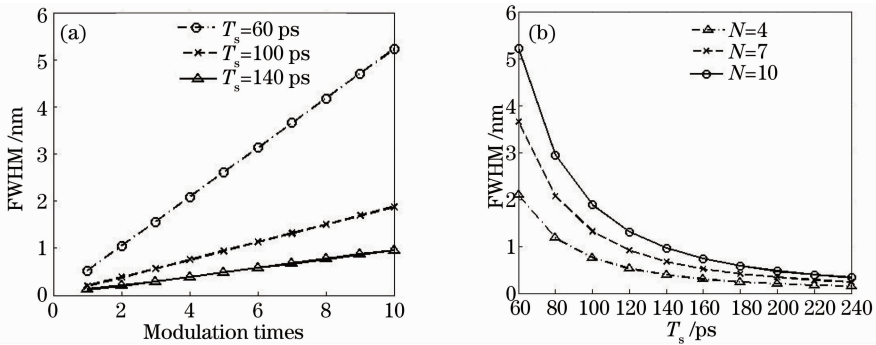


图 3 (a) 不同调制信号宽度, 光谱 FWHM 随调制次数变化情况; (b) 不同调制次数, 光谱 FWHM 随调制脉冲宽度变化情况

Fig. 3 (a) FWHM of spectrum versus modulation times at different modulation signal widths; (b) FWHM of spectrum versus modulation signal width at different modulation times

对于实际直接相位调制系统, 光脉冲和相位调制驱动信号间的同步误差会带来调制光谱的变化。同步系统中存在两种同步误差。1) 调制信号与激光脉冲信号的相对时间延迟  $\Delta t$ , 这种同步误差对调制后信号光中心波长和 FWHM 的影响如图 4 所示; 2) 产生调制信号过程中因光电转换、电放大及触发等过程引入的相对时间抖动  $\Delta t_s$ , 这种同步误

对不同的  $m$  值, 其值越大, 单圈展宽量越大, 展宽速度越快。由于光脉冲在光纤中传输, 存在自相位调制、色散及其他非线性效应, 故应尽量增大调制深度, 增大调制电压幅值, 选择低半波电压的调制器, 减小光脉冲在光纤中传输的距离, 同时降低增益补偿。

从(7)式还可以知道, 调制信号宽度  $T_s$  也会对单次展宽量产生影响。其影响效果如图 3 所示。明显看出, 单次光谱展宽量和  $T_s$  不是线性关系。从(7)式可以推出, 光谱 FWHM 和  $\frac{1}{T_s}$  为线性关系。这一点从图 3(b)中数值拟合得到验证。为了增加单次展宽量, 减少展宽次数, 应在光脉冲本身宽度和电信号上升速度的限制下, 采用窄脉宽的电信号进行调制。

差对调制后信号光中心波长和 FWHM 的影响如图 5 所示。

从图 4 中可以看出, 相对延迟  $\Delta t$  对输出光谱中心波长和宽度有着明显的作用。图中,  $\Delta t$  为负值, 表示调制电信号峰值在光脉冲峰值之前。随着相对延迟  $\Delta t$  的增大, 输出光谱的中心波长变小, 同时输出光谱的宽度也随之变小。不同的调制信号宽度

$T_s$  会有不同程度的影响,且采用  $T_s$  越宽,光谱对于延迟  $\Delta t$  越不敏感,即对同步精度要求降低了。通过数值模拟,可以看出,  $T_s > 140$  ps 时,10 ps 量级的相对延迟对光谱中心波长的影响很小,对 FWHM 几乎没有影响。

在图 4(b)中,相对延迟  $\Delta t$  为负值时,  $\Delta f_{FWHM}$  为

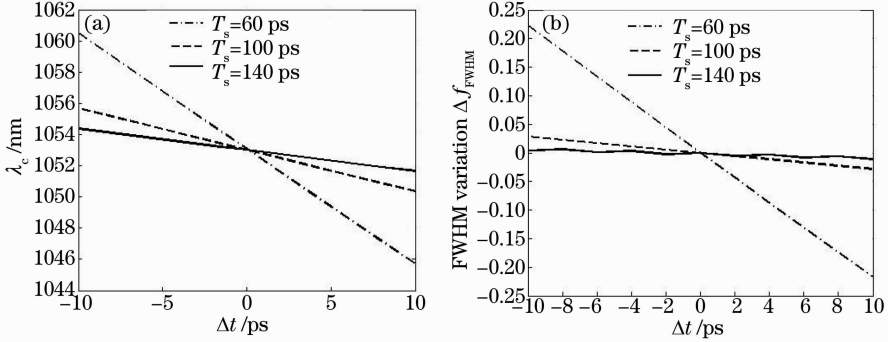


图 4 (a) 不同调制信号宽度下,中心波长  $\lambda_c$  随光脉冲和调制信号间相对延时  $\Delta t$  的变化情况; (b) 不同调制信号宽度下,FWHM 宽度变化量随光脉冲和调制信号间相对延时  $\Delta t$  的变化情况

Fig. 4 (a)  $\lambda_c$  versus  $\Delta t$  at different modulation signal widths; (b) FWHM variation of spectrum versus  $\Delta t$  at different modulation signal widths

对同步抖动  $\Delta t_s$  分别为 0, 8, 16, 24 ps 时进行光谱展宽效果的数值模拟,结果如图 5 所示,图(a)~(d)分别为相应不同同步抖动  $\Delta t_s$  下,直接相位调制输出光谱图。从图中可以看出,脉冲抖动不会改变

正值,相对于无延迟状态,输出光谱 FWHM 变窄,原因是此时中心波长  $\lambda_c$  变长了。由(7)式可知,在调制过程中,  $\Delta t$  的变化不会影响光脉冲频谱宽度,即  $\Delta\omega$  保持不变,故其对应的 FWHM 会随着中心波长变小而变大。

光谱的调制形状,但会带来光谱宽度和中心波长的随机变化,会影响输出脉冲的光谱稳定性,对光谱控制和后续的脉冲压缩带来不稳定因素。

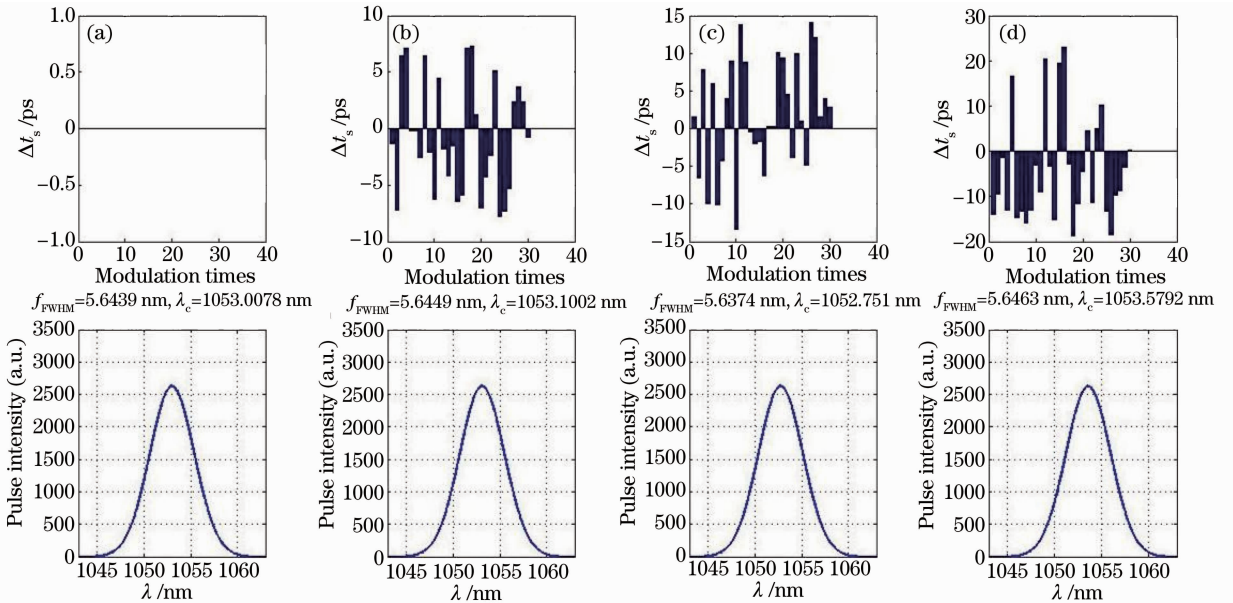


图 5 不同同步时间抖动量  $\Delta t_s$  下,光谱变化情况。(a)  $\Delta t_s = 0$ ; (b)  $\Delta t_s = 8$  ps; (c)  $\Delta t_s = 16$  ps; (d)  $\Delta t_s = 24$  ps

Fig. 5 Spectrum versus  $\Delta t_s$ . (a)  $\Delta t_s = 0$ ; (b)  $\Delta t_s = 8$  ps; (c)  $\Delta t_s = 16$  ps; (d)  $\Delta t_s = 24$  ps

在 Howe 等<sup>[6-7]</sup>的实验中,其实验结果光谱存在明显的调制现象,研究发现该光谱调制正是由正弦调制信号引起的,而采用抛物线型调制信号调制时所输出的光谱其形状仍然保持高斯形状,没有出

现光谱调制现象。分别对抛物线信号和正弦信号进行模拟计算,其结果如图 6 所示。模拟结果表明正弦信号输出光谱两边带有调制,与 Howe 等的实验结果相符。这是由于正弦信号带来的相位变化不是

线性的,使得脉冲不是线性啁啾,从而带来明显的幅频调制,这也降低了输出脉冲的可压缩性和再压缩信噪比。正弦信号调制后的脉冲压缩后带有明显的旁瓣,降低压缩脉冲信噪比。对抛物线调制信号采用同样的参数模拟结果表明,抛物线型调制信号不会带来光谱形状的改变,很好地保持了原始光谱状态,解决了光谱调制问题,并且能够得到更短的压缩

脉冲。随着高速电子学的发展,应尽量采用抛物线型调制信号。此处模拟采用的调制电信号宽度略宽于脉冲宽度,当调制信号脉宽远大于光脉冲宽度时,即  $T_s \gg t_0$  时,正弦信号和抛物线信号在有效作用范围内差别不大,两者对光谱的调制情况,几乎没有区别,故在满足该条件时,可以用正弦信号近似抛物线信号。

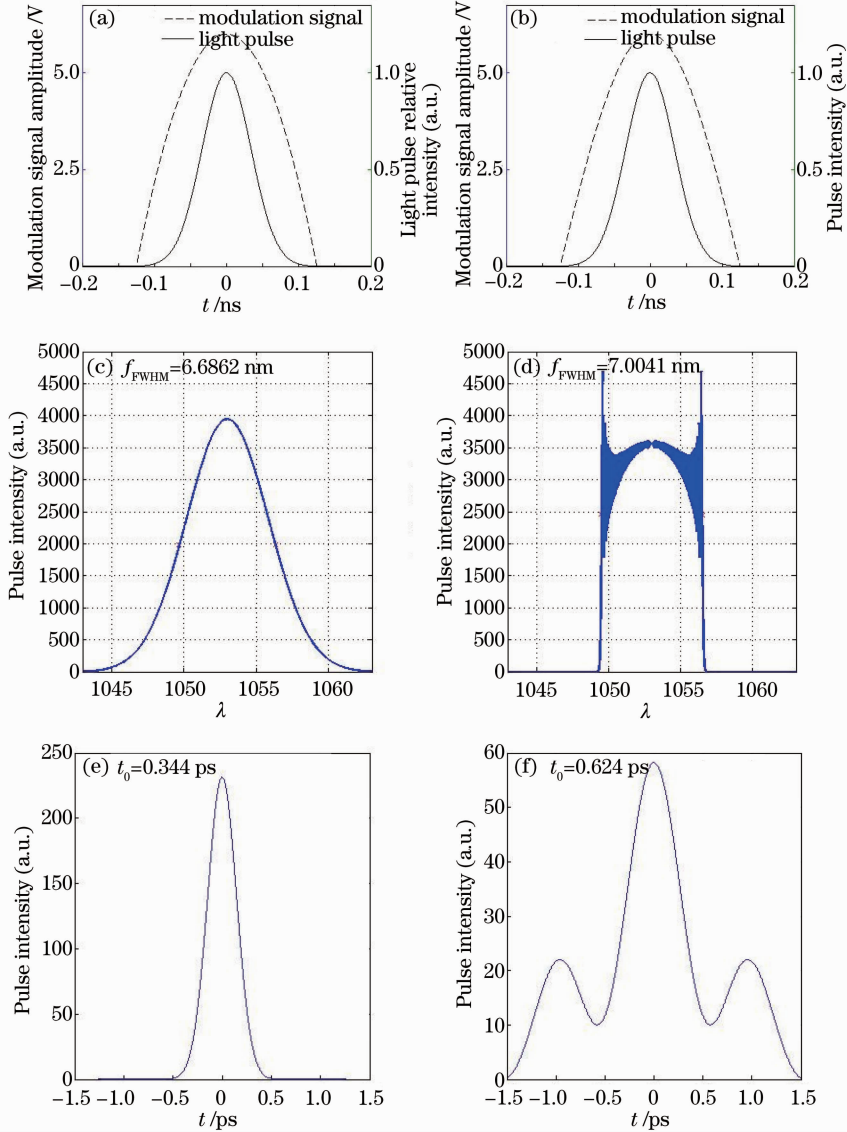


图 6 不同调制信号形状对应的脉冲调制信号(a)、(b)时域关系图,(c)、(d)调制光谱图和(e)、(f)压缩脉冲 [(a)、(c)、(e)为抛物线信号,(b)、(d)、(f)为正弦信号]

Fig. 6 (a)、(b) Time domain relative positions of the signal and light pulse, (c)、(d) the spectra and (e)、(f) compressed pulses [(a)、(c)、(e): parabolic, (b)、(d)、(f): sinusoidal]

## 4 实验研究

实验采用的实验装置如图 7 所示,其中,ISO 为隔离器,PM 为相位调制器,PC 为偏振控制器,LD 为半导体抽运源,WDM 为波分复用器。声光调制

开关(AOM)有“0”和“1”两种工作状态,如图 7 所示。当种子脉冲注入时,AOM 处于“0”状态,种子脉冲进入到腔里后,AOM 状态改变为“1”状态,种子脉冲在腔内进行循环。通过调节 AOM 保持“1”



状态的时间,就可以控制种子脉冲在腔内循环的次数,即对种子脉冲进行调制的次数。实验中,种子脉冲选用的是 80 ps 高斯脉冲光。利用腔内分束器进行实时触发调制信号的方式,对脉冲进行调制,这种方法能够有效地避免同步机精度不够的问题,该方式可以实现精度 10 ps 的同步。触发信号经过 ACSL 后,被整形为任意形状的电脉冲,即调制电信

号  $V_s(t)$ , 进入相位调制器,对光脉冲进行相位调制,  $V_s(t)$  的幅值与相位调制器的半波电压的比值即为调制深度  $m$ , 调制信号  $V_s(t)$  的宽度即  $T_s$ 。通过调节时间延迟线(TDL),可以改变调制电信号和脉冲光的相对延迟即  $\Delta t$ 。调制电信号和光脉冲之间的时间抖动  $\Delta t_s$  为同步触发过程中光电转换和电放大等过程引入的随机抖动。

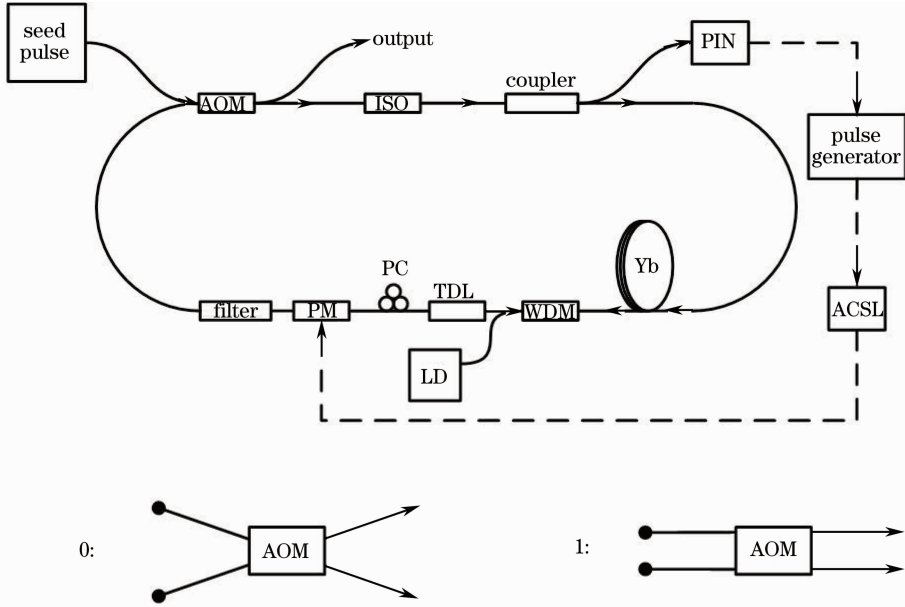


图 7 直接相位调制光路图

Fig. 7 Schematic of the direct phase modulation

实验采用的调制信号如图 8 所示。选取幅值最大的脉冲作为调制信号,其形状近似为抛物线型信号。

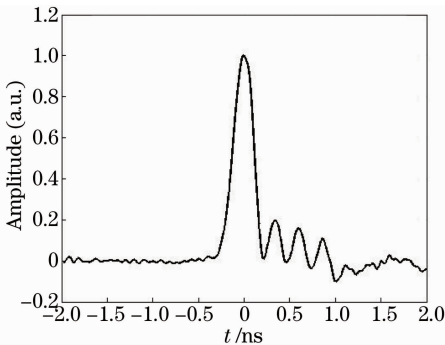


图 8 直接相位调制实际调制信号波形

Fig. 8 Experimental modulation signal of the direct phase modulation

由于光脉冲在再生腔内循环会有自相位调制,其输出光谱有一定程度的展宽。根据实测数值,对数值模拟进行修正,引入初始自相位调制带来的光谱展宽,其结果如图 9 所示。对修正后的光脉冲进

行数值模拟,调制信号为实测调制信号波形。相关参数设定为:调制次数为 15 次,脉冲宽度  $t_0 = 80$  ps,调制信号幅值  $V_{pp} = 6$  V,调制延迟  $\Delta t = 0$ ,调制抖动  $\Delta t_s = 10$  ps,半波电压  $V_\pi = 7.5$  V。模拟结果如图 10 所示。

图 10(b)为经过直接相位调制后的模拟光谱,可以看出 3 dB 宽度  $\tau$  为 0.255 nm,中心波长为 1052.99 nm,图 10(a)为实测光谱,其宽度为 0.199 nm,中心波长为 1052.99 nm。实验光谱与模拟光谱的差别接近光谱仪的测量极限,较好地验证了模拟结果。

对比图 10 的数值模拟结果和图 1、图 6 中的模拟结果,不难看出光谱展宽量的差别。这是因为实际实验所用的光电调制器的半波电压  $V_\pi = 7.5$  V,调制信号宽度  $T_s \approx 500$  ps,和理论模拟所设定的  $V_\pi = 2$  V,调制信号宽度  $T_s = 150$  ps 有差距,半波电压和调制信号宽度是制约着光谱宽度增加的主要因素。后续实验应考虑对实验器材的进一步改进,得到更好的实验结果。

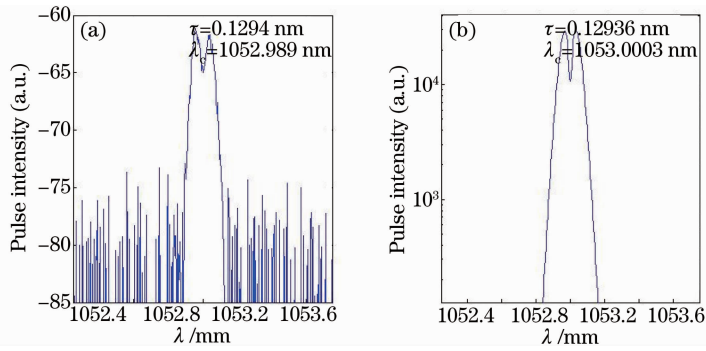


图 9 引入自相位调制修正后的实测光谱和模拟光谱

Fig. 9 Experimental and calculated spectra with modified self phase modulation

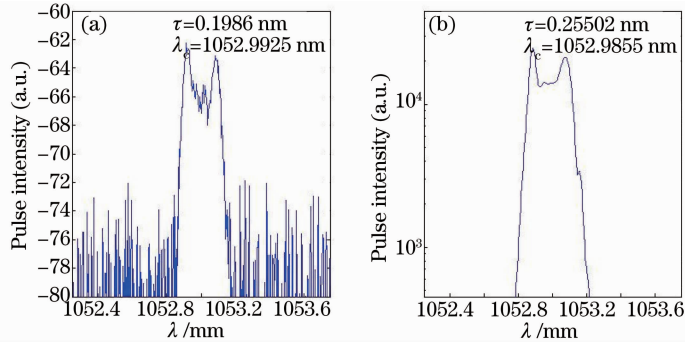


图 10 经过直接相位调制后的实测光谱(a)和模拟光谱(b)

Fig. 10 (a) Experimental and (b) calculated spectra after direct phase modulation

## 5 结 论

提出了一种直接获得线性啁啾的方法,即对光脉冲直接进行相位调制。理论分析了调制深度、调制信号宽度、同步精度、不同相位调制信号波形对相位调制效果的影响。理论模拟表示,调制深度越大,调制信号越窄,单次调制量越大。其中调制信号宽度有更明显的影响。当光脉冲和调制信号出现相对延时,对光脉冲输出光谱形状和可压缩性上几乎没有影响,但会改变光谱的中心波长,且呈现线性关系。相对时延的抖动,会影响脉冲输出光谱的稳定性。对于固定脉宽的光脉冲,不同调制信号宽度会对同步精度有不同的要求。对于 30 ps 的脉冲,140 ps 以上的调制宽度电信号,能够满足在 10 ps 的同步精度内中心波长影响小于 0.5 nm,谱宽几乎无影响。不同的调制信号形状会对光谱的形状有明显影响。正弦调制信号宽度和光脉冲宽度接近时,会有明显的光谱调制,影响后续光脉冲的压缩,降低其可压缩性和再压缩信噪比。对直接相位调制过程中,调制深度、调制信号宽度、同步精度和不同调制信号形状对输出光谱影响的理论分析为后续相位畸变补偿、增益窄化预补偿等相位和光谱灵活控制技

术的研究提供了理论指导。

在理论分析的基础上,采用多程直接相位调制系统,实验验证了模拟结果。对初始光谱谱宽为 0.1294 nm、中心波长为 1052.989 nm、脉宽为 80 ps 的脉冲光进行多程相位调制,得到谱宽为 0.1986 nm、中心波长为 1052.994 nm 的脉冲光,和理论模拟结果相符。实验和理论都说明了多程直接相位调制对光谱直接进行光谱展宽的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 721-729.  
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 721-729.
- 2 D Strickland, G Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Opt Commun, 1985, 56(3): 219-221.
- 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(2): 398-403.
- 4 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.
- 5 D S Kim, M Arisawa, A Morimoto, et al.. Femtosecond optical pulse generation using quasi-velocity-matched electrooptic phase

- modulator[J]. IEEE J Quantum Electron, 1996, 2(3): 493—499.
- 6 J van Howe, J H Lee, C Xu. Generation of 3.5 nJ femtosecond pulses from a continuous-wave laser without mode locking[J]. Opt Lett, 2007, 32(11): 1408—1410.
- 7 R Xin, J D Zuegel. Directly chirped laser source for chirped-pulse amplification [C]. San Diego, CA: Advanced Solid-State Photonics, 2010.
- 8 Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng, *et al.*. Spectral gain narrowing compensation modulation function in high-power ultrashort-pulse laser systems[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(6): 856—860.
- 刘兰琴, 彭翰生, 魏晓峰, 等. 高功率超短脉冲激光系统中光谱增益窄化补偿的调制函数[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(6): 856—860.
- 9 Tian Xiaocheng, Sui Zhan, Huang Zihua, *et al.*. Periodic linear chirped pulse generation based on direct phase modulation[J]. Acta Physics 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.
- 10 Ji Lailin, Liu Chong, Zhu Baoqiang, *et al.*. Analysis of influence of beam smoothing on third harmonic generation in SG II upgrade [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1219002.
- 季来林, 刘崇, 朱宝强, 等. 神光 II 升级系统中束匀滑对三倍频的影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1219002.
- 11 Liu Wei, Xiao Hu, Wang Xiaolin, *et al.*. Study on output spectral characteristic of Yb-doped fiber lasers [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902006.
- 刘伟, 肖虎, 王小林, 等. 掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902006.
- 12 J van Howe, G Zhu, C Xu. Compensation of self-phase modulation in fiber-based chirped-pulse amplification systems[J]. Opt Lett, 2006, 31(11): 1756—1758.
- 13 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.
- 14 Wei Zhaolin, Hu Shuling, Wang Xinlong, *et al.*. Development of research on phase modulation to intensity modulation conversion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 110003.
- 魏朝林, 胡妹玲, 王鑫龙, 等. 相位调制到强度调制转换技术的研究动态[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 110003.
- 15 G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics[M]. San Diego: Academic Press, 2001.

栏目编辑: 王晓琰