

两种基于交叉相位调制的光脉冲压缩方案*

李博 姜淑琴[†] 谭中伟 苏伟

(北京交通大学, 电子信息工程学院, 北京 100044)

(2011年12月22日收到; 2012年4月5日收到修改稿)

基于交叉相位调制的时间透镜可实现精确的二次相位调制, 但是它在光脉冲压缩领域的应用受到了抽运光脉冲的峰值功率过高的限制. 对该峰值功率的表达式进行了推导, 提出使用带有正色散的传输介质来实现输出段色散, 从而降低了抽运光脉冲的峰值功率. 并进一步指出, 可以将基于交叉相位调制的时间透镜应用于 4f 系统, 来实现光脉冲压缩, 从而更有效地降低了抽运光脉冲的峰值功率. 推导了该系统的抽运光脉冲的峰值功率和分辨率的表达式, 并进行了光脉冲压缩的仿真分析. 研究表明, 在基于交叉相位调制的 4f 系统中, 可以利用峰值功率较低的抽运光脉冲产生飞秒量级超短光脉冲; 随着压缩系数的提高, 输出光脉冲的脉冲宽度主要受到 4f 系统分辨率的限制, 并对 4f 系统分辨率的提高进行了讨论.

关键词: 光脉冲压缩, 时间透镜, 交叉相位调制, 4f 系统

PACS: 42.30.-d, 42.30.Lr, 42.65.-k, 42.65.Re

1 引言

高重复频率、超短光脉冲的产生是一项重要的研究课题, 超短光脉冲能应用在超高速采样^[1]、频谱检测^[2]和生物影像^[3]等领域中. 目前被动锁模是产生飞秒量级超短光脉冲的主要方法, 其重复频率由谐振腔长度决定, 因此重复频率调节性较差; 另外, 谐振腔长度很容易受到外界环境的影响, 从而导致重复频率发生改变. 时间透镜可以对光脉冲进行主动压缩^[4], 产生飞秒量级超短光脉冲, 并且具有更好的重复频率调节性和稳定性^[5,6]. 空间透镜的作用为对傍轴光束附加一个空间的二次相位, 类似地, 时间透镜是一种对光脉冲进行时域的二次相位调制的光器件^[7,8]. 通过利用正弦射频信号来驱动电光相位调制器, 可实现时间透镜. 但是由于只能实现近似的二次相位调制, 因此基于电光相位调制的光脉冲压缩系统的输出光脉冲质量较差, 输出光脉冲的本底和傍瓣带有噪声^[9]; 并且, 由其产生的光脉冲宽度一般在 1 ps 以上, 只有当利用时间

透镜环^[6]、色散渐减光纤^[10]或者孤子自频移效应^[11]等来组成结构复杂的光脉冲压缩系统时才能产生飞秒量级超短光脉冲, 这三种光脉冲压缩系统产生的光脉冲的最小脉冲宽度分别为 516 fs, 200 fs 和 200 fs. 除此之外, 利用两个时间透镜来组成 4f 系统也是一种很有前景的光脉冲压缩系统, 然而由于基于电光相位调制的时间透镜不能实现精确的二次相位调制, 限制了 4f 系统的实现^[12].

利用交叉相位调制 (cross phase modulation, XPM) 也可以实现时间透镜^[13-19]. 相比电光相位调制, 基于 XPM 的时间透镜可实现精确的二次相位调制^[13]. 目前, 基于 XPM 的时间透镜的主要应用为对光脉冲进行频域到时域的转变, 例如时域光傅里叶变换^[14]、时间抖动消除^[15]以及线性畸变补偿^[16]等. 但是由于光脉冲压缩对相位调制幅度的要求较高, 导致其抽运光脉冲的峰值功率过高, 极大地限制了光脉冲压缩的实现^[18-20].

本文对基于 XPM 的时间透镜在光脉冲压缩领域的应用进行了研究, 分析了降低抽运光脉冲的峰值功率的方法. 首先推导了基于 XPM 的时间透镜

* 国家自然科学基金 (批准号: 60977033, 61177082, 61177012) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2012YJS002, 2011YJS212) 资助的课题.

[†] E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

的峰值功率的表达式,提出了使用带有正色散的传输介质来实现输出段色散,从而降低了抽运光脉冲的峰值功率.接着进一步指出,根据基于 XPM 的时间透镜可实现精确二次相位调制的特点,可以将基于 XPM 的时间透镜应用于 4f 系统,来实现光脉冲压缩,从而更有效地降低抽运光脉冲的峰值功率,并获得了很高的分辨率.推导了该系统的抽运光脉冲的峰值功率和分辨率的表达式,进行了光脉冲压缩的仿真分析,利用峰值功率较低的抽运光脉冲,产生了脉冲宽度为 649 fs 的光脉冲.随着压缩系数的提高,输出光脉冲的脉冲宽度主要受到 4f 系统分辨率的限制,并对 4f 系统分辨率的提高进行了讨论.

2 基于正色散的光脉冲压缩方案

时域成像系统由输入段色散、时间透镜、输出段色散组成,其中时间透镜是一种可以对输入光信号进行二次相位调制的器件.通过令波形为抛物线型的抽运光脉冲与信号光脉冲在一段高非线性光纤中发生 XPM 作用,即可实现二次相位调制.然而,在实际情况中并不存在脉冲宽度无穷大的抽运光脉冲,事实上抽运光脉冲的时域包络表达式为^[18]

$$|A(\tau)|^2 = \begin{cases} -a\tau^2 + P_p, & \tau < \frac{\tau_a}{2}, \\ 0, & \tau \geq \frac{\tau_a}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $a = -(4l_0\gamma_0\varphi_f'')^{-1}$, l_0 和 γ_0 分别为高非线性光纤的长度和非线性系数, φ_f'' 为时间透镜的群时延色散 (group-delay dispersion, GDD) 焦距^[20], P_p 为抽运光脉冲的峰值功率, τ_a 为基于 XPM 的时间透镜的孔径,其物理意义为该时间透镜能对信号光脉冲进行调制的最大时间范围,其表达式为

$$\tau_a = 2\sqrt{P_p/a}. \quad (2)$$

为了满足孔径的限制,下面将以高斯脉冲作为信号光脉冲为例对其进行分析.设输入光脉冲的脉冲宽度为 T_0 ,经过输入段色散的色散展宽后,其脉冲宽度为

$$T_0' = T_0\sqrt{1 + \frac{\varphi_1''^2}{T_0^4}}, \quad (3)$$

式中 φ_1'' 为输入段色散的 GDD.为了保证对信号光脉冲进行精确的二次相位调制,依据基于电光相位调制的时间透镜的孔径限制^[21],我们对基于 XPM

的时间透镜的孔径限制进行了推导.令该时间透镜的孔径等于信号光脉冲的功率为峰值功率的 1% 时的脉冲宽度,经计算后可得出基于 XPM 的时间透镜的孔径限制为

$$T_0' \leq 0.23\tau_a = 0.93\sqrt{-P_p l_0 \gamma_0 \varphi_f''}. \quad (4)$$

大量的仿真结果证明,当且仅当输入基于 XPM 的时间透镜的信号光脉冲不满足 (4) 式时,时域成像系统的输出信号光脉冲开始发生畸变.

对由单个基于 XPM 的时间透镜组成的时域成像系统来说,其系统成像条件为

$$\frac{1}{\varphi_1''} + \frac{1}{\varphi_2''} = \frac{1}{\varphi_f''}, \quad (5)$$

其中 φ_2'' 为输出段色散的 GDD.放大系数的表达式为

$$M = -\frac{\varphi_2''}{\varphi_1''}. \quad (6)$$

由 (3)—(6) 式可得抽运光脉冲的峰值功率满足

$$P_p \geq \frac{1.16}{l_0\gamma_0} \cdot \frac{M-1}{M} \cdot \left(\frac{T_0^2}{-\varphi_1''} + \frac{-\varphi_1''}{T_0^2} \right). \quad (7)$$

经过仿真计算可知,抽运光脉冲的峰值功率非常高.当抽运光脉冲功率过高时,时域成像系统容易产生四波混频 (FWM) 作用,从而降低系统的性能.为了减小抽运光脉冲的峰值功率,对 (7) 式进行了分析.首先,当且仅当 $\varphi_1'' = -T_0^2$ 时,峰值功率有最小值

$$P_{p\min} = \frac{2.32}{l_0\gamma_0} \cdot \frac{M-1}{M}. \quad (8)$$

其次,高非线性光纤的非线性系数 γ_0 的大小受到了目前光纤生产技术的限制,同时随着高非线性光纤的长度 l_0 的增加,高非线性光纤中的色散将对二次相位调制产生影响,因此只能通过调节放大系数 M 的大小来降低峰值功率 P_p .设 $\gamma_0 = 0.02 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$, $l_0 = 200 \text{ m}$,峰值功率 $P_{p\min}$ 随放大系数 M 的变化如图 1 所示.

由图 1 可以看出,当 $0 < M < 1$ 时,相比当 $-1 < M < 0$ 时抽运光脉冲的峰值功率 P_p 更小,特别是当 M 趋近于 1 时抽运光脉冲的峰值功率 P_p 趋近于 0,因此能在一定程度上降低抽运光脉冲的峰值功率.当 $M > 1$ 或 $M < -1$ 时,抽运光脉冲的峰值功率 P_p 均较小,均适用于对光脉冲展宽.在目前的时域成像系统中,输入段色散和输出段色散大多为负值,由 (6) 式可知 $M < 0$.为了得到 $0 < M < 1$,可令输出段色散为正值,例如光纤光栅或者色散补偿光纤均可实现,该时域成像系统的结构如图 2 所示.

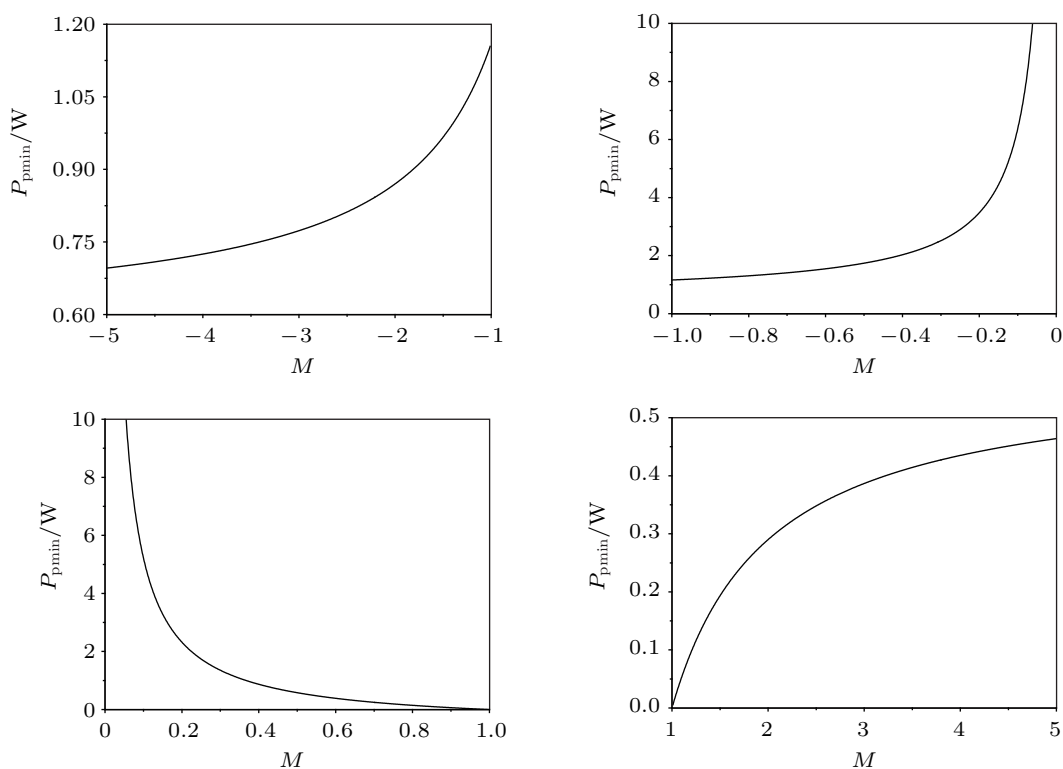


图1 峰值功率 $P_{p\min}$ 随放大系数 M 的变化

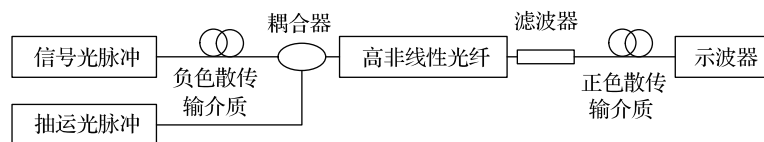


图2 输出段色散为正值的时间域成像系统结构示意图

综上所述, 推导出了抽运光脉冲的峰值功率的表达式, 指出了通过利用正色散的传输介质来实现输出段色散, 可在一定程度上有效地降低抽运光脉冲的峰值功率.

3 基于 4f 系统的光脉冲压缩方案

3.1 理论分析

利用两个时间透镜来组成 4f 系统是一种很有前景的光脉冲压缩系统, 然而, 由于基于光电相位调制的时间透镜不能实现精确的二次相位调制, 因此经过两次近似二次相位调制后, 输出光脉冲将发生严重畸变, 限制了 4f 系统的实现. 相比光电相位调制, 基于 XPM 的时间透镜可实现精确的二次相位调制, 因此本文指出了可以利用基于 XPM 的时间透镜来实现 4f 系统, 不仅可有效地降低抽运光脉

冲的峰值功率, 还可以获得很高的分辨率, 从而产生飞秒量级超短光脉冲.

4f 系统由两个 2f 系统组成, 其结构如图 3 所示. 2f 系统由输入段色散、时间透镜和输出段色散组成, 其中输入段色散和输出段色散的 GDD 均等于时间透镜的 GDD 焦距. 2f 系统的输出光信号的频谱与输入光信号的时域包络形状一致, 同时输出光信号的时域包络与输入光信号的频谱形状一致. 设两个 2f 系统中时间透镜的 GDD 焦距分别为 φ''_{f1} 和 φ''_{f2} , 输入光信号的时域包络为 $A(0, \tau)$, 频谱为 $\Lambda(0, \omega)$, 则 4f 系统的输出光信号的时域包络和频谱表达式为

$$A(4f, \tau) = A\left(0, -\frac{\varphi''_{f1}}{\varphi''_{f2}}\tau\right), \quad (9)$$

$$\Lambda(4f, \omega) = \Lambda\left(0, -\frac{\varphi''_{f2}}{\varphi''_{f1}}\omega\right).$$

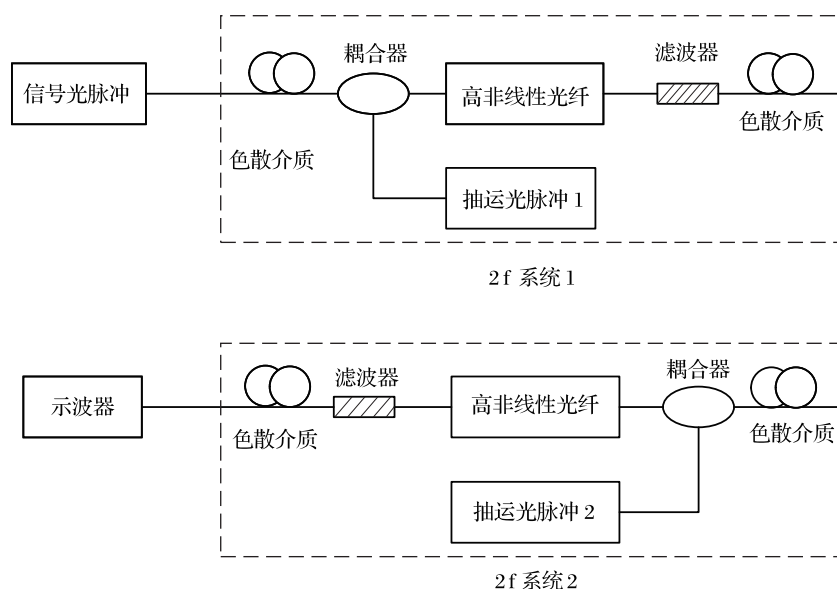


图3 4f系统结构示意图

由(9)式可知,输出光信号的时域包络和频谱表达式分别与输入光信号形状一致,只是差了一个压缩系数,其表达式为

$$C = -\frac{\varphi''_{f1}}{\varphi''_{f2}}. \quad (10)$$

由(9)和(10)式可知,4f系统可对输入光信号进行脉冲压缩.

利用基于XPM的时间透镜进行光脉冲压缩的主要困难为抽运光脉冲的峰值功率过高,因此下面对4f系统中抽运光脉冲的峰值功率进行了理论分析,并推导了其分辨率.以输入高斯脉冲为例,设输入光脉冲的脉冲宽度为 T_1 ,经过输入段色散的色散展宽后,代入孔径限制(4)式,可得到第一个2f系统中抽运光脉冲的峰值功率表达式为

$$P_{p1} \geq \frac{1.16}{l_1 \gamma_1} \cdot \left(\frac{T_1^2}{-\varphi''_{f1}} + \frac{-\varphi''_{f1}}{T_1^2} \right). \quad (11)$$

其中 l_1 和 γ_1 分别为发生XPM的高非线性光纤的长度和非线性系数.将第一个2f系统的输出光脉冲作为输入光脉冲注入到第二个2f系统中,经过输入段色散展宽后,再次代入孔径限制(4)式可得第二个2f系统抽运光脉冲的峰值功率表达式为

$$P_{p2} \geq \frac{1.16}{l_2 \gamma_2} \cdot \left(\frac{\varphi''_{f1}}{-\varphi''_{f2} T_1^2} + \frac{-\varphi''_{f2} T_1^2}{\varphi''_{f1}} \right), \quad (12)$$

其中 l_2 和 γ_2 分别为发生XPM的高非线性光纤的长度和非线性系数.通过对比(7)式与(11),(12)式可知, $\frac{M-1}{M}$ 项被消去,这将意味着抽运光脉冲的

峰值功率将大大地降低.由于受到孔径和相位调制幅度的限制,每一个2f系统均存在最小分辨率,依据基于电光相位调制的时间透镜的分辨率公式^[21],可推导出其分辨率表达式分别为

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0.7 \sqrt{\frac{-\varphi''_{f1}}{l_1 \gamma_1 P_{p1}}}, \\ \tau_2 &= 0.7 \sqrt{\frac{-\varphi''_{f2}}{l_2 \gamma_2 P_{p2}}}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 l_2 和 γ_2 分别为发生XPM的高非线性光纤的长度和非线性系数.

3.2 仿真分析

单一的基于XPM的时间透镜的光脉冲压缩系统已经在文献[19]中进行了详细的仿真分析,在此基础上,对由两个基于XPM的时间透镜组成的4f系统进行了仿真分析.在仿真中,高斯信号光脉冲的半高全宽度(简记为FWHM)为10 ps,其中心波长为1560 nm,抛物线形抽运光脉冲的中心波长为1540 nm,两段高非线性光纤采用相同的参数,即在1550 nm处二阶色散系数 $\beta_2 = 0 \text{ ps}^2/\text{km}$,三阶色散系数 $\beta_3 = 2 \times 10^{-4} \text{ ps}^3/\text{km}$,非线性系数 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.02 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$,长度 $l_1 = l_2 = 200 \text{ m}$ ^[15-18].

通过改变两个2f系统的GDD焦距,可获得不同的压缩系数.为了有效降低抽运光脉冲的峰值功率,在仿真中令两个2f系统中的抽运光脉冲的峰值功率相同,从而以较低的功率获得更大的压缩系

数. 随压缩系数的变化, 4f 系统输出光脉冲的波形如图 4 所示. 由图 4 可以看出, 信号光脉冲被有效地压缩, 随着压缩系数的增大, 输出光脉冲的脉冲宽度减小; 同时, 输出光脉冲的波形与输入光脉冲的波形一致, 没有出现本底和傍瓣的噪声, 验证了利用基于 XPM 的时间透镜可实现更精确的二次相位调制.

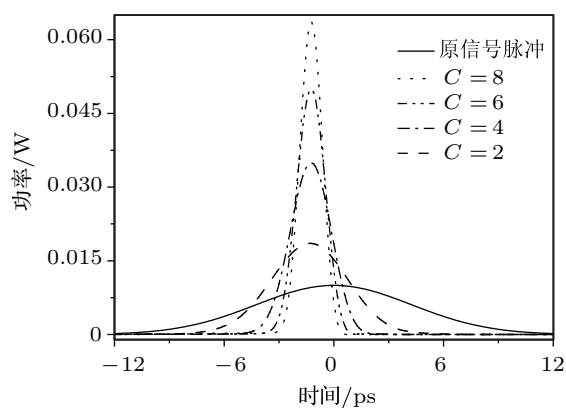


图 4 4f 系统输出光脉冲的波形

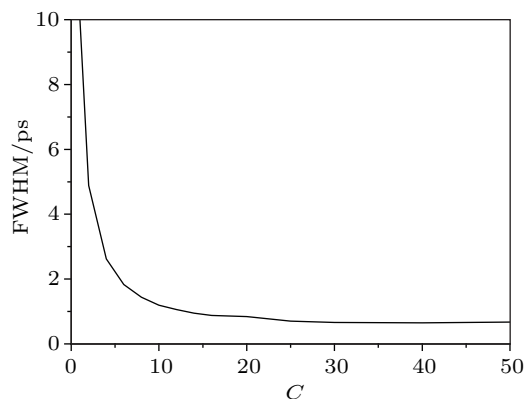


图 5 4f 系统输出光脉冲的脉冲宽度随着压缩系数的变化

随着压缩系数的变化, 4f 系统输出光脉冲的脉冲宽度如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 当压缩系数增大到一定程度时, 4f 系统输出光脉冲的脉冲宽度不再随着迅速减小. 经过分析可知, 输出光脉冲的脉冲宽度受到了时间透镜的分辨率的限制, 随着压缩系数的增大, 可以得到两个 2f 系统中的时间透镜的分辨率如图 6 所示. 综合图 5 和图 6 可以看出, 随着压缩系数的增大, 4f 系统输出光脉冲的脉冲宽度主要受到时间透镜分辨率的影响. 从图 5 和图 6 还可以看出, 当压缩系数增大到一定程度时, 输出光脉冲等于两个 2f 系统的分辨率中的

最大值, 例如当 $C = 40$ 时, 输出光脉冲的 FWHM 为 649 fs, 由图 6 可以看出, 当 $C = 40$ 时, 两个 2f 系统的分辨率中的最大值为 603 fs, 与理论分析非常接近. 抽运光脉冲的峰值功率与压缩系数的关系如图 7 所示, 当 $C = 40$ 时, 即输出光脉冲的 FWHM 为 649 fs 时, 抽运光脉冲的峰值功率为 1.881 W, 由图 1 可以看出, 当利用单个时间透镜来实现压缩系数 $C = 40$ 的光脉冲压缩时, 抽运光脉冲的峰值功率高达 24 W, 因此 4f 系统有效地降低了抽运光脉冲的峰值功率, 提供了利用基于 XPM 的时间透镜来实现光脉冲压缩的可能性.

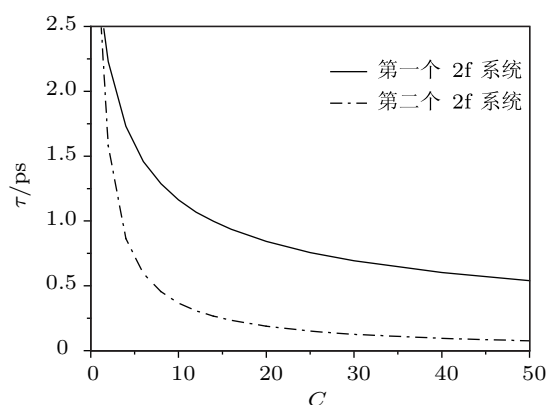


图 6 两个 2f 系统中的时间透镜的分辨率随着压缩系数的变化

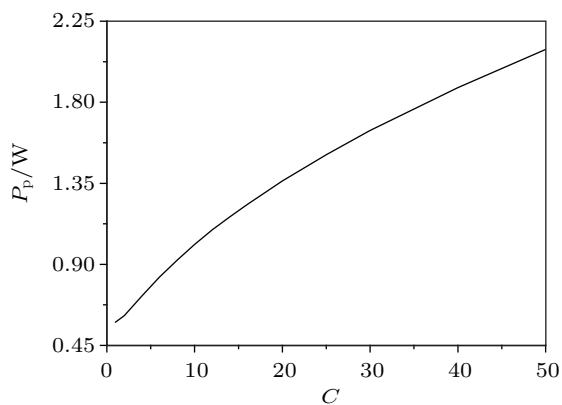


图 7 抽运光脉冲的峰值功率随压缩系数的变化

因此, 进一步压缩光脉冲需要提高两个 2f 系统的分辨率. 由 (13) 式可知, 提高两个 2f 系统的分辨率需要增大抽运光脉冲的峰值功率. 综合图 6 和图 7 可以看出, 随着压缩系数的增大, 4f 系统的分辨率提高, 同时其抽运光脉冲的峰值功率也随着提高. 然而, 当峰值功率过高时, 不但抽运光脉冲难以获得, 而且 4f 系统中的 FWM、色散等因素的影响

也将随着提高. 例如当 $C = 40$ 时, 输出光脉冲的波形如图 8 所示, 此时的输出光脉冲出现了畸变, 该畸变是由高非线性光纤中的色散斜率引起的.

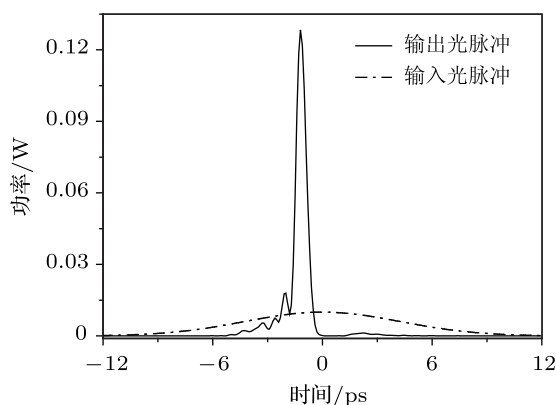


图 8 当 $C = 40$ 时, 输出光脉冲的波形

综上所述, 4f 系统可以实现精确的二次相位调制, 消除输出光脉冲的本底和傍瓣噪声; 其次, 4f 系统大大降低了光脉冲压缩系统的复杂程度; 最后, 4f 系统可有效地降低抽运光脉冲的峰值功率, 并获得很高的分辨率. 在仿真中利用峰值功率为 1.881 W 的抽运光脉冲产生了 FWHM 为 649 fs 的输出光脉冲; 随着压缩系数的提高, 如何进一步提高 4f 系统

的分辨率是提高系统性能的关键.

4 结论

本文通过对降低抽运光脉冲的峰值功率的研究, 提供了利用基于交叉相位调的时间透镜实现光脉冲压缩的可能性, 扩展了基于 XPM 的时间透镜的应用. 研究表明, 利用带有正色散的传输介质来实现输出段色散可在一定程度上降低抽运光脉冲的峰值功率. 进一步的研究表明, 利用两个时间透镜组成 4f 系统来进行光脉冲压缩, 可更有效地降低抽运光脉冲的峰值功率, 并可获得很高的分辨率. 在仿真中, 利用峰值功率为 1.881 W 的抽运光脉冲实现了 FWHM 为 649 fs 的输出光脉冲. 相比目前基于时间透镜的光脉冲压缩系统, 该 4f 系统可实现的最短脉冲与之相似, 然而由于其具有精确的二次相位调制, 使该系统的输出光脉冲噪声更小, 同时其系统结构更加简单. 随着压缩系数的提高, 如何进一步提高 4f 系统的分辨率是提高系统性能的关键.

感谢北京交通大学大学电子信息工程学院姜淑琴教授和谭中伟教授的讨论.

- [1] Bartels A, Cerna R, Kistner C, Thoma A, Hudert F, Janke C, Dekorsy T 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 351071
- [2] Cundiff S T 2007 *Nature* **450** 1175
- [3] Wang K, Freudiger C W, Lee J H, Saar B G, Xie X S, Xu C 2010 *Opt. Express* **18** 24019
- [4] Kolner B H 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 1122
- [5] Khayim T, Yamauchi M, Kim D, Kobayashi T 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 1412
- [6] Howe J V, Lee J H, Xu C 2007 *Opt. Lett.* **32** 1408
- [7] Kolner B H, Nazarathy M 1989 *Opt. Lett.* **14** 630
- [8] Kolner B H, Nazarathy M 1990 *Opt. Lett.* **15** 655
- [9] Wang K, Lee J H, Dai Y, Cheng J, Xu C 2010 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, CA, May 16, 2010 JTuD57
- [10] Morohashi I, Sakamoto T, Sotobayashi H, Kawanishi T, Hosako I 2009 *Opt. Lett.* **34** 2297
- [11] Wang K, Xu C 2011 *Opt. Lett.* **36** 942
- [12] Lohmann A W, Mendlovic D 1992 *Appl. Opt.* **31** 6212
- [13] Mouradian L K, Louradour F, Messager V, Barthelemy A, Froehly C 2000 *J. Quantum Electron.* **36** 795
- [14] Hirooka T, Nakazawa 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1869
- [15] Parmigiani F, Petropoulos P, Ibsen M, Roelens M A F, Richardson D J 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 829
- [16] Ng T T, Parmigiani F, Ibsen M, Zhang Z, Petropoulos P, Richardson D J 2007 *Optical Fibre Communication and the national fiber engineers Conference* Anaheim, CA, March 25, 2007 JWA58
- [17] Ng T T, Parmigiani F, Ibsen M, Zhang ZH W, Petropoulos P, Richardson D J 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1097
- [18] Li B, Tan ZH W, ZH X X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084204 (in Chinese) [李博, 谭中伟, 张晓兴 2011 物理学报 **60** 084284]
- [19] Li B, Tan ZH W, ZH X X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 014203 (in Chinese) [李博, 谭中伟, 张晓兴 2012 物理学报 **61** 014203]
- [20] Salem R, Foster M A, Turner A C, Geraghty D F, Lipson M, Gaeta A L 2008 *Opt. Lett.* **33** 1047
- [21] Kauffman M T, Banyai W C, Godil A A, Bloom D M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 270

Two kinds of optical pulse compression approaches based on cross phase modulation*

Li Bo Lou Shu-Qin[†] Tan Zhong-Wei Su Wei

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 22 December 2011; revised manuscript received 5 April 2012)

Abstract

Time lens based on cross phase modulation can realize accurate quadratic phase modulation. However, its application in optical pulse compression is restricted by the pump pulse with a high peak power. The formula of the peak power is deduced. It is proposed to use an output fiber with positive dispersion to lower the high peak power requirement for the pump pulse. It is also proposed to use a 4f system which consists of two time lenses to realize optical pulse compression, thereby more effectively lowering the peak power of the pump pulse. The formulas of the peak power and the resolution of the 4f system are deduced. The optical pulse compression is simulated and analysed. The research results demonstrate that in a 4f system based on cross phase modulation, femtosecond pulses can be generated by using pump pulses with small peak power; With compression factor increasing, the pulse width of the output pulse is restricted mainly by the solution of the 4f system. The method of improving the solution of the 4f system is discussed.

Keywords: optical pulse compression, time lens, cross phase modulation, 4f system

PACS: 42.30.-d, 42.30.Lr, 42.65.-k, 42.65.Re

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977033, 61177082, 61177012), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. 2012YJS002, 2011YJS212).

[†] E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn