

利用交叉相位调制和四波混频制作的 时间透镜的仿真分析*

李博 谭中伟[†] 张晓兴

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2010年12月24日收到; 2011年3月5日收到修改稿)

利用高非线性光纤中的交叉相位调制和四波混频分别在仿真中实现了时间透镜. 对基于交叉相位调制的时间透镜中的高非线性光纤中的非线性过程进行了仿真分析. 仿真结果表明, 该时间透镜的主要影响因素为色散、自相位调制与四波混频; 通过采用带有一定色散斜率的高非线性光纤可同时消除色散、自相位调制和四波混频的影响; 另外, 该高非线性光纤的色散零点最好选在信号脉冲和抽运脉冲波长的中心附近. 然后对基于四波混频的时间透镜的实现进行了仿真分析. 仿真结果表明, 该时间透镜的主要影响因素为色散、自相位调制和其他的四波混频; 通过设定合适大小的信号脉冲和抽运脉冲的功率可消除自相位调制和其他的四波混频的影响; 另外, 通过在高非线性光纤中引入一定的色散可进一步提高信号脉冲和抽运脉冲的功率, 从而获得更高功率的输出脉冲. 最后对两种时间透镜系统做出了比较.

关键词: 光脉冲压缩, 时间透镜, 交叉相位调制, 四波混频

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

1 引言

通过对比傍轴光束在自由空间中传输的衍射方程和窄带光脉冲在色散介质中传输的色散方程, 人们得到了时空对应原理^[1,2]. 时空对应原理指出, 通过对光脉冲的时间变量进行二次相位调制, 就可以得到与空间透镜类似的器件, 即时间透镜. 时间透镜最早由 Kolner 和 Nazarathy^[1] 提出. 近年来人们对这个领域产生了浓厚的兴趣, 并做了大量的研究. 时间透镜既能对光脉冲进行展宽或者压缩, 起到放大镜的作用, 也能对信号脉冲进行时域和频域之间的转换. 时间透镜一般被用在时间成像、光通信、光信号处理等领域, 例如基于时间成像技术^[1]的波形放大^[3]、基于时间-频率转换的波形检测^[4]、基于光学 Fourier 变换^[5]的线性扰动消除^[6]、基于多波长脉冲压缩技术^[7]的任意波形生成器^[8]等.

时间透镜可以通过利用电光相位调制、非线性晶体上的和频与差频、交叉相位调制 (XPM) 以

及四波混频 (FWM) 来实现. 因为基于电光相位调制的时间透镜易于实现、性能稳定, 所以早期实验中的时间透镜大都是通过电光相位调制来实现的. 基于电光相位调制的时间透镜一般是利用由正弦射频 (RF) 时钟信号的电光相位调制器来提供近似二次相位调制^[9], 但是这种近似性限制了信号脉冲必须在调制中心附近驱动调制信号周期的 $1/2\pi$ 以内的区域, 这被称为时间透镜的孔径限制^[10]; 同时, 由于受到电光相位调制器的最大驱动电压的限制, 基于电光相位调制的时间透镜组成的时间成像系统的分辨率较低. 因此, 近年来许多学者开始利用非线性光学中的一些原理来实现时间透镜. 例如非线性晶体上的和频与差频, Bennett 等通过在非周期极化铌酸锂 (APPLN) 上加入不对称 Y 型模式复用器/解复用器, 并利用该时间透镜实现了 640 GHz 实时记录^[11,12], 以及高非线性光纤上的 XPM, 在最近的实验中基于 XPM 的时间透镜已经被用于线性扰动补偿^[13,14]; 在高非线性硅波导上的 FWM 也可以实现时间透镜, Foster 等^[15] 使用基于 FWM

* 国家自然科学基金 (批准号: 60607001) 和北京交通大学科研基金 (批准号: 2009JBM011) 资助的课题.

[†] E-mail: zhwtan@bjtu.edu.cn

的时间透镜在超快光测量上得到了分辨率为 220 fs 的突破性进展.

相比基于电光相位调制的时间透镜, 基于非线性光学原理的时间透镜可实现精确二次相位调制^[11-16], 没有孔径限制, 并且由其组成的时间成像系统具有更高的分辨率. 因此, 本文首先讨论了时间透镜的一些基本原理, 然后利用 MATLAB 7.8.0 (R2009a), 采用分步 Fourier 方法作为数值分析方法^[17], 分别对基于 XPM 和 FWM 的时间透镜以及由它们组成的时间成像系统进行了分析和仿真, 最后对两种时间透镜的特点进行了比较.

2 时间透镜的原理

当忽略非线性效应和光纤损失时, 窄带光脉冲在色散介质中的传输方程可以用非线性 Schrödinger 方程来描述, 与空间中的傍轴光束的传输方程相似, 这就是时空对应原理的基础. 在 Fraunhofer 近似条件下, 傍轴光束的空间传输方程为^[18]

$$E_z = -\frac{i}{2k}(E_{xx} + E_{yy}), \quad (1)$$

式中 E_z 是傍轴光束光场对 z 轴的一阶偏导, k 为波数, E_{xx} 和 E_{yy} 分别是对 x 轴和 y 轴的二阶偏导. 而窄带光脉冲在色散介质中的传输方程经过变量代换后可以表示为

$$A_\xi = \frac{i}{2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} A_{\tau\tau}, \quad (2)$$

其中, A_ξ 是窄带光脉冲的振幅 $A(\xi, \tau)$ 对色散长度 ξ 的导数, $d^2\beta/d\omega^2$ 为群速度色散系数, $A_{\tau\tau}$ 为窄带光脉冲的振幅 $A(\xi, \tau)$ 对时间的二阶偏导. 由 (2) 式可知, 窄带光脉冲在色散介质中的传输方程与空间中的傍轴光束的传输方程很相似. 基于时空对应原理, 可以将空间领域中的透镜理论类比应用到时间领域中. 空间透镜的相位函数为

$$\phi(x, y) = \frac{k(x^2 + y^2)}{2f_s}, \quad (3)$$

式中 f_s 为空间透镜的焦距. 如 (3) 式所示, 空间透镜对空间位置 x 和 y 产生了一个二次相位调制, 因此, 对于时间透镜来说, 其相位函数也应该为对时间变量的二次相位调制, 表达式为

$$\phi(\tau) = \frac{\omega_0\tau^2}{2f_T}, \quad (4)$$

其中 ω_0 为输入光信号的中心频率, f_T 为时间透镜

的焦距.

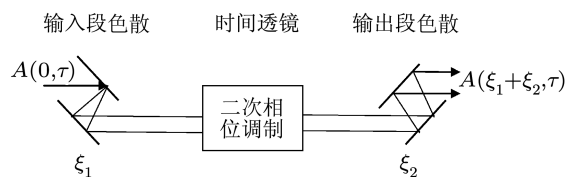


图 1 时间成像系统

一个有效的时间成像系统一般由三部分组成, 分别为输入段色散, 时间透镜和输出段色散, 如图 1 所示. 其中 $A(0, \tau)$ 为输入波形, ξ_1 为输入段色散长度, ξ_2 为输出段色散长度, $A(\xi_1 + \xi_2, \tau)$ 为输出波形. 对任意波形进入该时间成像系统后, 将 (4) 式中的时间透镜的相位函数代入并经过计算可得出时间成像系统的成像条件为

$$\frac{1}{\xi_1 \frac{d^2\beta_1}{d\omega^2}} + \frac{1}{\xi_2 \frac{d^2\beta_2}{d\omega^2}} = -\frac{\omega_0}{f_T}, \quad (5)$$

其中 β_1 和 $d^2\beta_1/d\omega^2$ 分别为输入段色散的传输常数和色散系数, 而 β_2 和 $d^2\beta_2/d\omega^2$ 分别为输出段色散的传输常数和色散系数^[19]. 当时间成像系统满足 (5) 式的成像条件时, 输出波形可表示为

$$A(\xi_1 + \xi_2, \tau) = \frac{1}{\sqrt{M}} \exp\left(\frac{i\omega_0\tau^2}{2Mf_T}\right) A\left(0, \frac{\tau}{M}\right), \quad (6)$$

其中, ω_0 为输入光脉冲的中心频率, M 为时间成像系统的放大系数, 其表达式为

$$M = -\frac{\xi_2 \frac{d^2\beta_2}{d\omega^2}}{\xi_1 \frac{d^2\beta_1}{d\omega^2}}. \quad (7)$$

由 (6) 式可知, 输出光脉冲的波形 $A(\xi_2, \tau)$ 与输入光脉冲的波形 $A(0, \tau)$ 非常相似, 两者之间的区别在于它们的脉冲宽度不同, 输出光脉冲的脉冲宽度为输入光脉冲幅度的 M 倍. 利用这种关系就可以对脉冲在时域上进行展宽或者压缩, 主要应用于超短光脉冲的探测和光脉冲的压缩. 当放大系数 $|M| > 1$ 时, 输出光脉冲被展宽; 当 $|M| < 1$ 时, 输出光脉冲被压缩^[20].

3 基于 XPM 的时间透镜

通过引入一个与信号脉冲波长不同的、波形为抛物线型的抽运脉冲, 通过与信号脉冲发生 XPM 作用, 可对整个信号脉冲实现精确的二次相位调制^[16]. 基于 XPM 的时间透镜组成的时

间成像系统的结构如图 2 所示, 信号脉冲是中心波长为 1556 nm 的 Gauss 脉冲, 抽运脉冲是中心波长为 1542 nm 的波形为抛物线型的脉冲, 两个脉冲经过一个耦合器后在一段非线性光纤 l_0 中发生 XPM 作用, 抽运脉冲就可以对信号脉冲实现二次相位调制. 另外, 输入段色散和输出段色散分别由两段单模光纤实现, 它们分别被称为输入段光纤和输出段光纤. 在文献 [21] 中, 我们已经对理想状态下的抽运脉冲的峰值功率、输入段光纤的长度、非线性光纤的非线性系数等进行了讨论, 因此在仿真系统中, 已知最佳输入段光纤长度 $l_1 = 162.32$ m, 输出段光纤长度 $l_2 = l_1/C$, C 为压缩系数, 其表达式为

$$C = \frac{1}{|M|}, \quad (8)$$

以及高非线性光纤的长度 $l_0 = 200$ m, 其非线性系数 $\gamma_0 = 0.02 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$.

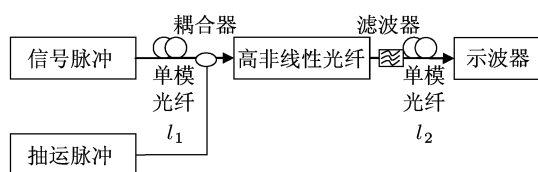


图 2 基于 XPM 的时间透镜组成的时间成像系统

3.1 基于 XPM 的时间透镜的实现难点和影响因素

在非线性光纤中只存在 XPM 的理想情况下, 图 2 中的时间透镜可提供精确的二次相位调制, 然而在实际中的实现却比较困难, 其主要难点为很难得到高功率抛物线型抽运脉冲和零色散高非线性光纤 [21]. 在近期的研究中通过使用超结构 Bragg 光栅 (SSFBG) 波形为抛物线型的脉冲得以实现 [14], 因此实现时间透镜的主要困难就集中在高非线性光纤部分. 在实际情况下, 除 XPM 作用外, 图 2 中的时间成像系统的高非线性光纤中还存在着信号脉冲和抽运脉冲的自相位调制 (SPM)、色散等因素, 在很多情况下这些因素对时间成像系统的影响会超过 XPM. 因此, 如何减小这些因素的影响, 是实现基于 XPM 的时间透镜的主要工作.

色散能引起抽运脉冲与信号脉冲的走离效应, 还能和抽运脉冲的 SPM 共同作用改变抽运脉冲的形状, 因此只有采用零色散光纤才能满足系统要求, 这是实现时间透镜的关键之一 [21]. 在使用零色散

高非线性光纤的 XPM 时间透镜组成的时间成像系统中, 经过仿真得到了与脉冲宽度与放大系数成正比的输出脉冲. 然而, 输出脉冲的功率相比原信号脉冲增大了几百倍. 经过分析发现, 高非线性光纤中不仅存在着抽运脉冲与信号脉冲的 XPM, 还存在着抽运脉冲与信号脉冲的 FWM. 抽运脉冲通过 FWM 可以对信号脉冲进行参量放大, 由于抽运脉冲功率很高, 同时零色散光纤使相位匹配得到满足, 因此抽运脉冲与信号脉冲的 FWM 作用很强, 信号脉冲被放大了几百倍. 同时, 在通过 FWM 对信号脉冲进行参量放大的过程中, 抽运脉冲的能量减小, 其时域波形发生中心凹陷, 不再精确满足抛物线型脉冲的要求, 使二次相位调制产生偏离. 因此, 色散, SPM 和 FWM 成为影响基于 XPM 的时间透镜的三大因素.

为了得到更有效的基于 XPM 的时间透镜, 我们做了进一步的仿真分析. 为了减弱 FWM 的影响, 在零色散高非线性光纤中引入了很小量的色散斜率. 仿真结果证明, 不仅 FWM 的影响大大减弱, 而且走离效应、色散与 SPM 的共同作用也保持在一个对系统性能影响极小的状态. 在这种时间透镜组成的时间成像系统中, 抽运脉冲对信号脉冲的 XPM 是导致脉冲放大的主要因素, 同时抽运脉冲的波形可保持精确的抛物线型, 从而对信号脉冲实现精确的二次相位调制.

3.2 基于 XPM 的时间透镜的色散的仿真分析

上面的理论分析指出, 色散的选择是实现时间透镜的首要工作. 因此在仿真中, 首先采用了一种非线性色散位移光纤 [22] 对三种影响因素进行仿真分析, 然后又对高非线性光纤的最佳零色散点位置进行了仿真和讨论.

3.2.1 基于 XPM 的时间透镜的色散斜率的仿真分析

除了保证一定量的色散值以减弱 FWM 作用外, 色散的值越小, 色散与 SPM 对时间透镜的影响就越小. 经过仿真分析得出, 在高非线性光纤的色散值 $\beta_{02} = 0 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的情况下, 只需要一定的色散斜率就可使 FWM 作用大大减小. 专利 [22] 中的非线性色散位移光纤具有高非线性, 同时在 1550 nm 处的色散值可设定, 色散斜率在 0.001 至 $0.1 \text{ ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 的范围内, 恰好符合系统的要

求. 因此在仿真中采用了该非线性色散位移光纤, 令 1550 nm 处 $\beta_{02} = 0 \text{ ps}^2/\text{km}$, 通过设定一定值的色散斜率 β_{03} 来实现时间成像系统. 由 (6) 和 (8) 式可知, 当进行光脉冲压缩, 即 $C > 1$, 信号脉冲的脉冲宽度被压缩的同时, 其峰值功率被放大, 放大倍数等于 C . 信号脉冲峰值功率的放大倍数在下文中简称为放大倍数. 由于 FWM 的主要影响为信号脉冲的功率, 而信号功率的放大倍数与脉冲的压缩系数相等, 因此为了分析系统的影响因素, 下面对信号脉冲的峰值功率进行分析. 当色散、SPM 和 FWM 的作用减弱后, 最终结果证明, 信号脉冲被有效压缩. 当压缩系数 $C = 2$ 时, 随着 β_{03} 的变化,

信号脉冲的峰值功率变化如图 3 所示.

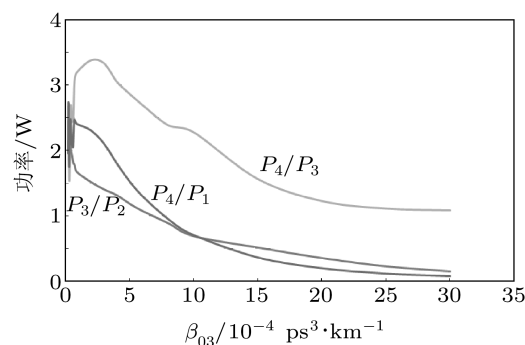


图 3 信号脉冲的功率随 β_{03} 的变化

表 1 信号脉冲经过高非线性光纤以后其波形的变化及原因分析

β_{03}	$\beta_{03} < 2 \times 10^{-4} \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$	$2 \times 10^{-4} \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1} < \beta_{03} < 15 \times 10^{-4} \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$	$\beta_{03} > 15 \times 10^{-4} \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$
P_3/P_2	$P_3/P_2 > 1.5$ 并逐渐减小	$0.5 < P_3/P_2 < 1.5$	$P_3/P_2 < 0.5$ 并逐渐减小
主要影响因素	FWM	色散、SPM 与 FWM 都较弱	色散、SPM
原因及物理现象	β_{03} 较小的时候, FWM 作用较强, 抽运脉冲对信号脉冲进行参量放大. 随着 β_{03} 的增大, FWM 作用减弱	此时色散、SPM 与 FWM 都较弱, 信号脉冲受到的参量放大和其色散展宽都较弱, 信号脉冲的波形变化较小	β_{03} 较大的时候, 色散作用较强, 信号脉冲被色散展宽. 随着 β_{03} 的增大, 色散作用加强

表 2 信号脉冲在输出段光纤中被放大的程度及原因分析

β_{03}	$\beta_{03} < 4 \times 10^{-5} \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$	$4 \times 10^{-5} \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1} < \beta_{03} < 10 \times 10^{-4} \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$	$\beta_{03} > 10 \times 10^{-4} \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$
P_4/P_3	$P_4/P_3 < 2$ 并逐渐增大	$P_4/P_3 > 2$ 并在某位置达到最大	$P_4/P_3 < 2$ 并逐渐减小
主要影响因素	FWM	色散、SPM 与 FWM 都较弱	色散、SPM
原因及物理现象	β_{03} 很小的时候, FWM 作用非常强, 导致抽运脉冲发生中心凹陷, 不能提供有效的二次相位调制. 随着 β_{03} 的增大, FWM 作用减弱	FWM 作用很快减弱, 基本不再改变抽运脉冲的波形, 同时色散与 SPM 对抽运脉冲波形的影响也较小, 时间成像系统的放大倍数达到最大	随着 β_{03} 的进一步增大, 色散将与 SPM 共同改变抽运脉冲的波形, 同时色散也会展宽抽运脉冲, 这些都将导致二次相位调制作用减弱

图 3 中, P_1, P_2, P_3, P_4 分别为原始信号脉冲、经过输入段光纤后的信号脉冲、经过高非线性光纤后的信号脉冲、经过输出段光纤后的信号脉冲的峰值功率, P_3/P_2 代表了信号脉冲经过高非线性光纤以后其波形的变化程度, 反映了在高非线性光纤中抽运脉冲通过 FWM 对信号脉冲进行参量

放大的程度以及信号脉冲受到色散展宽的程度, 如表 1 所示. P_4/P_3 代表了经过二次相位调制后的信号脉冲的峰值功率在输出段光纤中被放大的程度, 反映了信号脉冲在高非线性光纤中被抽运脉冲二次相位调制的程度, 也反映了抽运脉冲的波形维持抛物线型的程度, 如表 2 所示. P_4/P_1 反映了信号

脉冲峰值功率的总放大倍数.

综合表 1 和表 2 可知, 当 $2 \times 10^{-4} \text{ ps}^3/\text{km} < \beta_{03} < 10 \times 10^{-4} \text{ ps}^3/\text{km}$ 时, 高非线性光纤中的色散、SPM 与 FWM 对时间透镜的影响较小. 最后, 为了分析走离效应的影响, 因为色散越大走离效应越严重, 所以在仿真中令色散斜率取最大值 $\beta_{03} = 10 \times 10^{-3} \text{ ps}^3/\text{km}$, 此时信号脉冲与抽运脉冲走离了大约相当于一个信号脉冲的半高宽的长度, 但是信号脉冲的波形并没有变化, 同时 $P_4/P_3 = 2.28$, 这说明信号脉冲在高非线性光纤仍然得到了有效的二次相位调制, 因此, 在上述色散斜率范围内走离效应的影响可以忽略.

综合以上因素可知, 通过引入一定量的色散斜率, 就可大大减小 FWM, 同时又使走离效应、SPM 和色散不影响系统的性能. 从图 3 中可以看出, 在 $\beta_{03} = 2 \times 10^{-4} \text{ ps}^3/\text{km}$ 附近, 时间成像系统的总的放大倍数最大, 即 $P_4/P_1 \approx 2.3$, 由于 FWM 的参量放大和时间透镜的放大相叠加, 超过了理想的放大倍数. 而在 $\beta_{03} = 3 \times 10^{-4} \text{ ps}^3/\text{km}$ 附近, FWM 作用已经非常小, XPM 成为唯一对脉冲放大的主要因素, 此时得到的放大倍数等于设定的放大倍数, 即 $P_4/P_1 \approx 2$. 随着 β_{03} 的进一步增大, 色散的影响越来越大, 放大倍数也逐渐减小. 同时, 仿真结果证明, 当放大倍数等于 2 时, 信号脉冲的脉冲宽度也被压缩为 1/2, 时间成像系统的影响因素被有效降低, 光脉冲被有效压缩.

3.2.2 基于 XPM 的时间透镜的高非线性光纤的色散零点的仿真分析

在上面的仿真中, 直接采取了以中间的 1550 nm 波长处为色散零点. 为了对系统性能进行进一步的优化和理论分析, 在新的仿真中以 1 nm 为间隔, 分别以 1442, 1443 ..., 1556 nm 为色散零点, 对系统的性能、最大放大倍数、 β_{03} 的大小进行了仿真分析.

首先, 当以 1442 nm 为色散零点时, 仿真结果表明只有在 $\beta_{03} \geq 1 \times 10^{-3} \text{ ps}^3/\text{km}$ 时 FWM 才稍微减弱, 但此时过大的色散与 SPM 共同作用严重影响了抽运脉冲的波形. FWM, SPM 对色散值的要求不可调和, 因此无法得到有效的时间透镜.

其次, 随着色散零点波长的增大, 从 1547 nm 处开始可以得到有效的时间透镜. 随着波长的增大, 时间成像系统的性能如图 4 和图 5 所示. 由图 4 可知, 时间成像系统的最大放大倍数在 2—2.5 之间;

由图 5 可知, 随着零色散点波长的变化色散斜率的有效范围变化较大. 综合最大放大倍数和色散斜率 β_{03} 的有效范围可知, 该时间透镜系统最佳色散零点应选在抽运脉冲与信号脉冲中间附近.

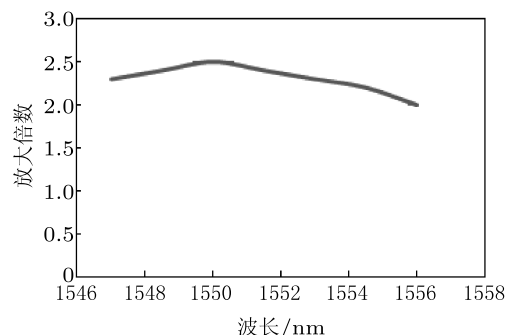


图 4 最大放大倍数

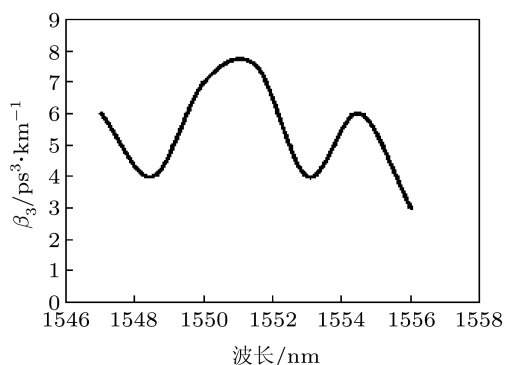


图 5 有效 β_{03} 范围

4 基于 FWM 的时间透镜

通过抽运脉冲与信号脉冲进行 FWM 作用也可以实现时间透镜, 基于 FWM 来实现时间透镜是近几年出现的新方法. 与其他时间透镜系统不同的是, 基于 FWM 的时间透镜组成的时间成像系统输出的脉冲不是信号脉冲, 而是抽运脉冲与信号脉冲进行 FWM 作用后产生的转换波脉冲, 相比基于电光相位调制的时间透镜, 基于 FWM 的时间透镜具有可实现精确二次相位调制的优点, 相比基于 XPM 的时间透镜, 基于 FWM 的时间透镜具有更易于实现等优点. 基于 FWM 的时间透镜组成的时间成像系统如图 6 所示. 首先信号脉冲经过色散系数为 β'_{12} 的输入段色散光纤 l'_1 , 抽运脉冲经过一段相同色散系数的光纤 l'_p , 根据 FWM 效应的性质, 对电场强度分别为 $E_s(t)$ 和 $E_p(t)$ 的信号脉冲和抽运脉冲, 产生的转换波脉冲的电场强度为 [23]

$$E_i(t) \propto E_p^2(t)E_s^*(t), \quad (9)$$

其中 $E_p^2(t)$ 可提供二次相位调制, 相位函数为

$$\phi(t^2) = \frac{t^2}{\beta'_{12} l'_p}, \quad (10)$$

根据转换波脉冲与信号脉冲的相位共轭, $E_s^*(t)$ 可

向转换波提供与信号脉冲相反色散系数的色散量. 在输出端加入与 β'_{12} 相反色散系数的输出段色散光纤, 例如色散补偿光纤, 只要满足 (5) 式的时间成像条件, 就可以实现时间成像系统.

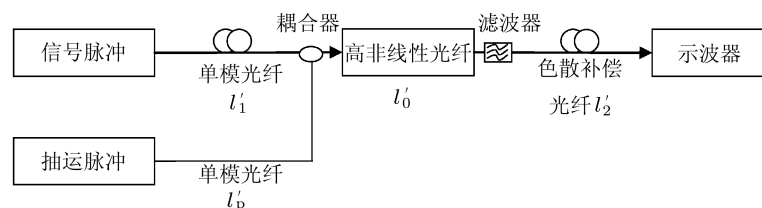


图6 基于 FWM 的时间透镜组成的时间成像系统

4.1 基于 FWM 的时间透镜的实现难点和影响因素

如何提高 FWM 作用和减小 SPM, XPM 和色散的影响是实现基于 FWM 的时间透镜的主要工作. 提高 FWM 作用有四种主要途径: 提高非线性系数 γ'_0 、增大高非线性光纤长度 l'_0 、提高信号脉冲和抽运脉冲的峰值功率 P_s 和 P_p . 因此在仿真中采用了较高的非线性系数 $\gamma'_0 = 0.002 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$ 以及较大的高非线性光纤长度 $l'_0 = 1000 \text{ m}$. 同时, 为了得到更大功率的转换波脉冲, 采用了适当高功率的抽运脉冲. 其中, 信号光脉冲的中心波长为 1542 nm , 抛物抽运脉冲的中心波长为 1556 nm .

在基于 FWM 的时间透镜中的非线性光纤部分存在着 SPM, XPM 和色散等影响因素, 为了实现时间透镜, 这些因素的影响也需要减小. 首先, 信号脉冲和抽运脉冲的 SPM 能引起脉冲频域展宽, 因此其峰值功率 P_s 和 P_p 需要适当减小; 另外, 增长色散光纤长度 l'_1 和 l'_p 能有效减小 SPM 效应, 因此在仿真中令输入段光纤长度 $l'_1 = 1000 \text{ m}$ 、抽运光脉冲的输入段光纤长度 $l'_p = 1900 \text{ m}$. 其次, 由于抽运脉冲经过较长的色散展宽, 因此信号光脉冲受到的 XPM 作用很小, 可忽略不计; 由于信号脉冲的功率较小, 因此抽运脉冲受到的 XPM 作用也比较小. 再次, 仿真结果表明, FWM 作用并不是越强越好, 在 FWM 作用过强的时候, 由于系统中还存在着其他的 FWM 作用, 例如信号脉冲和转换脉冲还可继续作为抽运脉冲与其他频率的脉冲发生 FWM, 产生新的频率的脉冲, 从而导致信号脉冲和转换脉冲畸变. 因此系统中的 FWM 作用需要维持在一个适当的状态. 最后, 色散能大大减弱 FWM 作用,

所以非线性光纤中的色散值应该非常小. 然而, 仿真结果证明, 一定量的色散可以减小 SPM 和其他的 FWM, 从而可以适当增大信号光脉冲和抽运脉冲的功率, 提高抽运脉冲与信号脉冲的 FWM 作用, 使输出光脉冲的功率增大.

4.2 基于 FWM 的时间透镜的仿真分析

根据基于 FWM 的时间透镜的影响因素的理论分析, 对时间成像系统进行了仿真分析, 并分别对如何减小这些影响因素进行了仿真和讨论. 首先, 在只存在 SPM 作用的理想情况下, 利用时间成像系统进行光脉冲展宽, 令放大系数 $M = 20$, SPM 作用对时间透镜的影响的仿真结果如表 3 所示. 在只存在 SPM 作用的理想情况下, 信号脉冲和抽运脉冲的峰值功率分别需要满足 $P_s \leq 15 \text{ mW}$ 和 $P_p \leq 200 \text{ mW}$.

由表 3 可知, 信号脉冲和抽运脉冲的峰值功率分别需要满足 $P_s \leq 15 \text{ mW}$ 和 $P_p \leq 200 \text{ mW}$. 其次, 为了检验 XPM 作用对时间透镜的影响, 在只存在 XPM 作用的理想情况下, 令 $P_s = 15 \text{ mW}$, $P_p = 200 \text{ mW}$, 仿真结果证明信号脉冲基本不受 XPM 作用的影响, 而抽运脉冲只是受到微弱的 XPM 作用, 对时间透镜的影响非常小. 由于信号脉冲和抽运脉冲的功率越小, XPM 作用就越小, 因此 XPM 作用对时间透镜的影响非常小. 再次, 当在仿真中加入 FWM 作用后, FWM 作用对时间透镜的影响如表 4 所示. 当考虑 FWM 作用时, 信号脉冲和抽运脉冲的峰值功率需要满足 $P_s \leq 15 \text{ mW}$, $P_p \leq 50 \text{ mW}$.

仿真结果证明, 当 $P_s = 15 \text{ mW}$, $P_p = 50 \text{ mW}$ 时, 仿真得到的输出脉冲与输入脉冲的波形一致,

输出脉冲的峰值功率为 16 mW, 脉宽为 60 ps, 而输入脉冲的脉宽为 3 ps, 输出脉冲的脉宽恰好等于输入脉冲脉宽的 20 倍, 实现了有效的时间成像系统. 最后, 当在仿真中加入色散后, 虽然色散会大大减弱 FWM 的作用, 从而输出脉冲的峰值功率降低, 但是色散并不影响输出脉冲的脉宽. 当 $P_s = 15 \text{ mW}$, $P_p = 50 \text{ mW}$ 时, 输出脉冲的峰值功率大小随色散的变化如图 7 所示. 由图 7 可知,

当色散值 $\beta'_{02} \geq 0.04 \text{ ps}^2/\text{km}$ 时, 由于色散值过大导致输出脉冲发生畸形. 相比理想时间透镜系统中放大 20 倍后的输出脉冲峰值功率为 0.8 mW, 显然 FWM 的时间透镜的输出脉冲峰值功率要大得多. 综上可知, 只要满足 $P_s \leq 15 \text{ mW}$, $P_p \leq 50 \text{ mW}$ 以及相应的色散要求, $P_s = 15 \text{ mW}$, $P_p = 50 \text{ mW}$ 时 $\beta'_{02} \geq 0.04 \text{ ps}^2/\text{km}$, 就可以得到有效的时间成像系统.

表 3 SPM 对信号脉冲和抽运脉冲的影响

峰值功率	$P_s \leq 15 \text{ mW}$	$P_s \geq 15 \text{ mW}$	$P_p \leq 200$	$P_p \geq 200 \text{ mW}$
SPM 的影响	弱	强	弱	强
原因及物理现象	P_s 较小的时候, 信号脉冲的 SPM 作用较弱, 信号光脉冲的频谱不受 SPM 的影响	当 P_s 增大时, 信号脉冲的 SPM 作用加强, 信号脉冲的频谱受到 SPM 的影响而出现频谱展宽, 甚至出现多峰结构 [17]	P_p 较小的时候, 抽运脉冲的 SPM 作用较弱, 抽运脉冲的频谱不受 SPM 的影响	P_p 增大时, 抽运脉冲的 SPM 作用加强, 抽运脉冲的频谱受到 SPM 的影响而出现频谱展宽, 甚至出现多峰结构

表 4 其他 FWM 对信号脉冲和抽运脉冲的影响

峰值功率	$P_s \leq 15 \text{ mW}, P_p \leq 50 \text{ mW}$	$P_s = 15 \text{ mW}, P_p \geq 50 \text{ mW}$
其他 FWM 的影响	弱	强
原因及物理现象	输出脉冲不受其他 FWM 作用的影响	由于系统中的 FWM 作用过强, 信号脉冲和转换波脉冲均可作为抽运脉冲参与其他新频率产生的 FWM 作用中导致信号脉冲和转换光脉冲的波形发生畸变

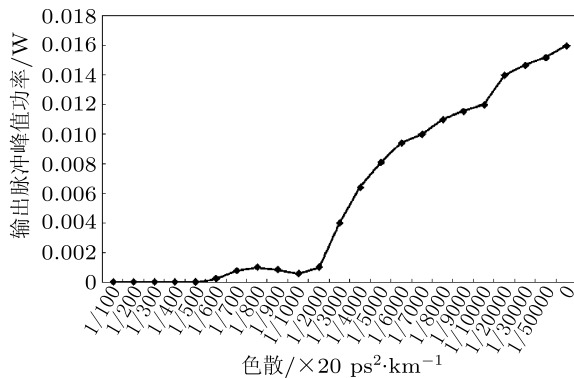


图 7 输出脉冲峰值功率随色散值 β'_{02} 大小的变化

由于上面的仿真分析是针对各个影响因素逐一讨论的结果, 因此对于完整的时间成像系统来说该结果还不够完善. 因为在仿真中加入色散以后, 高非线性光纤中的 SPM 和 FWM 作用也相应地减弱, 其中 SPM 作用的减弱使信号脉冲和抽运脉冲的峰值功率可以适当提高, FWM 作用的减小也使得信号脉冲和抽运脉冲的峰值功率可以进一

步提高. 因此, 实际的系统需要综合这些项来共同决定信号脉冲和抽运脉冲的大小. 当 $P_s = 20 \text{ mW}$, $P_p = 200 \text{ mW}$ 时, 输出脉冲的峰值功率大小随色散的变化如图 8 所示. 由图 8 可知, 随着色散值的变化, 输出脉冲的峰值功率上下波动; 另外, 当色散值取某一些值时, 输出脉冲的峰值功率可高达 0.1 W 以上. 仿真结果证明, 在图 8 中的波浪线的波峰位置附近, 输出脉冲的波形与信号脉冲精确相似, 脉宽为 60 ps, 恰好是信号光脉冲脉宽的 20 倍; 而在图 8 中波浪线的波谷位置附近, 输出脉冲的波形出现中心凹陷, 发生畸变. 经过分析可知, 在波浪线的波峰位置附近, 色散的引入使干扰项 SPM、其他的 FWM 作用降低, 同时由于抽运脉冲的提高, 最终的输出脉冲与输入脉冲的波形一致, 并且其峰值功率非常高; 在波浪线的谷底附近, 色散的引入同样也使干扰项 SPM 作用降低, 然而, 在这些位置其他的 FWM 作用恰好满足相位匹配条件, 因此这些干扰时间成像系统的 FWM 作用非常严重, 信号脉冲和转换脉冲作为新的抽运脉冲将能量转移到其他

频率的脉冲上去, 输出脉冲的波形出现了严重的恶化, 并且其峰值功率非常低.

以第一个波峰为例, 可以对输出脉冲功率和色散的关系做进一步仿真. 由图 8 可知, 在 $\beta'_{02} = 0.05 \text{ ps}^2/\text{km}$ 附近, 输出脉冲功率将近 0.02 W. 由于在此附近取点的色散间隔较大, 为了进一步分析, 取更小间隔的色散系数, 得出了输出脉冲峰值功率随色散系数 β'_{02} 大小的变化情况, 如图 9 所示. 与图 8 中波浪线的情况相似, 在图 9 中波浪线的波峰位置附近, 输出脉冲的形状与信号脉冲精确相似,

脉宽为 60 ps, 恰好是信号脉冲脉宽的 20 倍; 而在图 9 中波浪线的波谷位置附近, 输出脉冲的形状出现中心凹陷, 发生畸变. 因此, 输出脉冲峰值功率处于波峰位置时的色散系数为高非线性光纤的最佳色散系数.

综上所述, 通过引入一定量的色散可以使光纤中的干扰项 SPM 和其他的 FWM 作用减弱, 使 FWM 转换效率大大增加, 同时, 也从很大程度上减小了对高非线性光纤低色散值的要求, 使系统更容易实现.

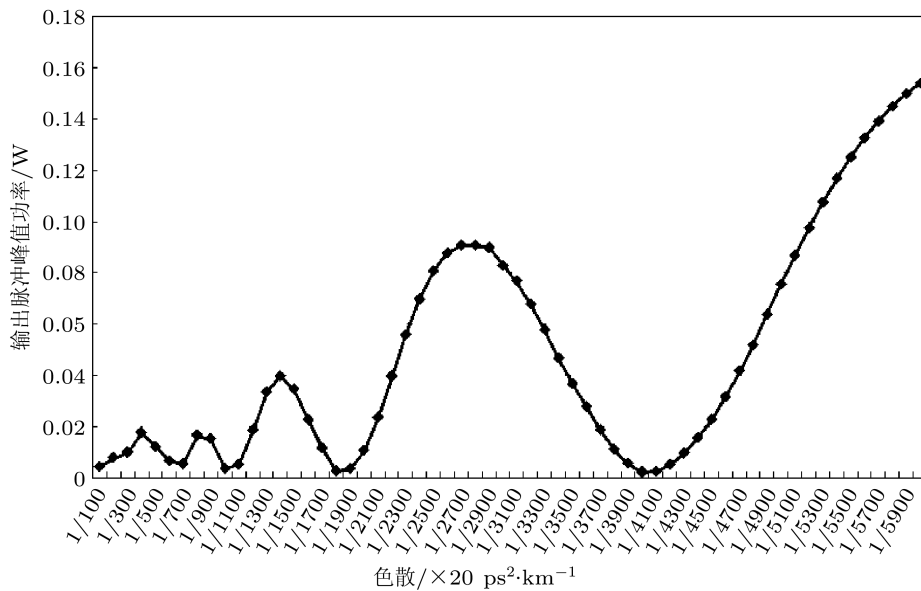


图 8 输出脉冲峰值功率随色散值 β'_{02} 大小的变化

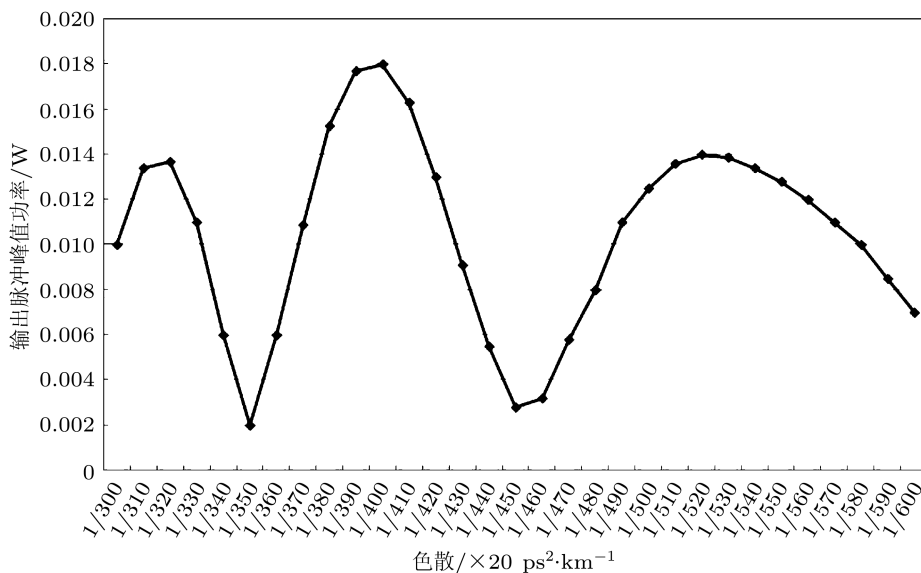


图 9 在 $\beta'_{02} = 0.05 \text{ ps}^2/\text{km}$ 附近输出脉冲峰值功率随色散值 β'_{02} 大小的变化

5 基于 XPM 的时间透镜和基于 FWM 的时间透镜的比较

基于 XPM 的时间透镜和基于 FWM 的时间透镜都是基于光纤中的非线性效应来实现的时间透镜. 两者目前均处于时间透镜研究的前沿领域^[14,23], 均可用于时间透镜的时间成像、时域-频域等领域. 同时, 两者也具有不同的特点. 首先, 基于 XPM 的时间透镜的输出脉冲与信号脉冲的波长相同, 而基于 FWM 的时间透镜系统的输出脉冲与信号脉冲的波长不同, 因此基于 XPM 的时间透镜适合进行直接的信号脉冲处理, 而基于 FWM 的时间透镜在处理脉冲的同时还可以进行波长转换, 适合用于未来全光网络中的脉冲处理和波长转换. 其次, 基于 XPM 的时间透镜中的输出脉冲与信号脉冲的总能量基本相同, 而基于 FWM 的时间透镜中的输出脉冲相比信号脉冲其能量可实现放大. 第三, 基于 XPM 的时间透镜的实现难点在于高功率抽运脉冲的产生以及高非线性光纤的制作, 而相比之下基于 FWM 的时间透镜的实现更容易一些, 其难点主要在于高非线性光纤的制作, 在目前的研究中大多使用硅波导实现^[24].

6 结论

首先对基于 XPM 的时间透镜的高非线性光纤中的非线性过程进行理论和仿真分析, 提出采用带有一定色散斜率的高非线性光纤可同时消除色散、SPM 和 FWM 的影响, 并对高非线性光纤中的色散斜率的大小进行了讨论, 接着从理论上分析了色散零点的位置对系统的影响. 得出色散零点最好选在信号脉冲与抽运脉冲的中心处附近的结论. 经过仿真证明了文献 [22] 中的非线性色散位移光纤就可以满足系统的要求. 然后对基于 FWM 的时间透镜的实现进行了仿真和讨论, 结果证明其主要影响因素为色散、SPM 以及其他的 FWM 作用. 在信号脉冲和抽运脉冲的功率维持在合适大小时, SPM 和其他的 FWM 的影响可有效地减小, 得到了有效的的时间透镜; 另外, 当高非线性光纤中引入一定色散时, 可大大减小 SPM 和其他的 FWM 的影响, 从而使信号脉冲和抽运脉冲的功率可以进一步增大; 仿真结果不仅得到了有效的输出脉冲, 还可以得到很高功率的输出脉冲. 最后对两种时间透镜的特点进行了比较.

-
- [1] Kolner B H, Nazarathy M 1989 *Opt. Lett.* **14** 630
 [2] Kolner B H, Nazarathy M 1990 *Opt. Lett.* **15** 655
 [3] Bennett C V, Scott R P, Kolner B H 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 2513
 [4] Kauffman M T, Banyai W C, Godil A A, Bloom D M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 270
 [5] Jansson T 1983 *Opt. Lett.* **8** 232
 [6] Nakazawa M, Hirooka T 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 1842
 [7] Howe J V, Hansryd J, Xu C 2004 *Opt. Lett.* **29** 1470
 [8] Torres-Company V, Chen L R 2009 *Opt. Express* **17** 22553
 [9] Kolner B H 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 1122
 [10] Tan Z W, Zhou N, Chen M, Gong T R, Ren W H, Tao P L, Chang Y L, Jian S S 2009 *Communications and Photonics Conference and Exhibition* Shanghai, China, November 2–6, 2009 763111-1
 [11] Bennett C V, Kolner B H 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 430
 [12] Bennett C V, Moran B D, Langrock C, Fejer M M, Ibsen M 2008 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, CA May 4–9, 2008 1272
 [13] 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, USA, March 25–29, 2007 JWA58
 [14] Ng T T, Parmigiani F, Ibsen M, Zhang Z W, Petropoulos P, Richardson D J 2008 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **20** 10971099
 [15] Salem R, Foster M A, Turner A C, Geraghty D F, Lipson M, Gaeta A L 2008 *Opt. Lett.* **33** 1047
 [16] Hirooka T, Nakazawa M 2008 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **20** 1869
 [17] Agrawal G P (Translated by Jia D F, Yu Z H) 2002 *Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics* (3rd Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp64–67 (in Chinese) [阿加瓦尔 G P 著, 贾东方, 余震虹译 2002 非线性光纤光学原理及应用 (北京: 电子工业出版社) 第 64—67 页]
 [18] Kolner B H 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **30** 1951
 [19] Azaña J 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 94
 [20] Bennett C V 1999 *Opt. Lett.* **24** 783
 [21] Li B, Tan Z W, Zhang X X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084204 (in Chinese) [李博, 谭中伟, 张晓兴 2011 物理学报 **60** 084204]
 [22] Hiroishi J, Kumanu N, Sugizaki R 2003 China Patent CN1410787 [广石治郎, 熊野尚美, 杉崎隆一 2003 中国专利 CN1410787]
 [23] Salem R, Foster M A, Turner A C, Geraghty D F, Lipson M, Gaeta A L 2008 *Opt. Lett.* **33** 1047
 [24] Foster M A, Salem R, Okawachi Y, Turner-Foster A C, Lipson M, Gaeta A L 2009 *Nature Photonics* **3** 581

Simulation and analysis of time lens using cross phase modulation and four-wave mixing*

Li Bo Tan Zhong-Wei[†] Zhang Xiao-Xing

(*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

(Received 24 December 2010; revised manuscript received 3 March 2011)

Abstract

Cross phase modulation based time lens and four-wave mixing based time lens are realized by utilizing cross phase modulation effect and four-wave mixing effect in the high nonlinear fiber, respectively. The nonlinear process in the high nonlinear fiber of cross phase modulation based time lens is simulated and analyzed. The simulation and the analysis show that the main influence factors are dispersion, self phase modulation and four-wave mixing, which can be eliminated by using the high nonlinear fiber with a certain amount of dispersion slope. Besides, the zero-dispersion wavelength of the high nonlinear fiber should be around the centre between the signal pulse and pump pulse. Then, the nonlinear process in the high nonlinear fiber of four-wave mixing based time lens is simulated and analyzed. The simulation and the analysis show that the main influence factors are dispersion, self phase modulation and other four-wave mixing, which can be eliminated by using the signal pulse and pump pulse with a certain amount of power. Besides, the powers of the signal pulse and the pump pulse can be improved by using the high non-linear fiber with a certain amount of dispersion, then the power of the output pulse can be improved, too. Finally, two kinds of time lenses are compared with each other.

Keywords: optical pulse compression, time lens, cross phase modulation, four-wave mixing

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

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60607001) and Research Foundation of Beijing Jiaotong University, China (Gran No. 2009JBM011).

[†] E-mail: zhwtan@bjtu.edu.cn