

文章编号: 1001-3806(2011)05-0606-04

## 离散效应对光子晶体光纤中飞秒脉冲压缩影响

赵荣霞<sup>1</sup>, 李爱萍<sup>1,2</sup>

(1. 滨州学院 物理与电子科学系, 滨州 256603; 2. 滨州学院 理论物理研究所, 滨州 256603)

**摘要:** 为了研究离散效应对光子晶体光纤中飞秒信号脉冲压缩的影响, 采用分步傅里叶方法数值求解耦合的非线性薛定谔方程, 模拟了双飞秒脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输过程; 计算和分析了离散效应和非同步耦合对信号脉冲压缩的影响。结果表明, 当抽运脉冲在反常色散区进行抽运, 而信号脉冲在正常色散区入射时, 在群速度色散、3阶色散, 自相位调制及交叉相位调制联合作用下, 信号脉冲在传输过程中不仅被压缩且存在最佳光纤长度; 离散效应导致信号脉冲压缩因子减小, 所需最佳光纤长度增加以及压缩后的脉冲频谱呈现不对称, 采用非同步耦合有利于改善信号脉冲的压缩质量。

**关键词:** 非线性光学; 光子晶体光纤; 分步傅里叶方法; 离散效应; 非同步耦合

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.009

### Effect of pulse walk-off on femtosecond pulse compression in photonic crystal fibers

ZHAO Rong-xia<sup>1</sup>, LI Ai-ping<sup>1,2</sup>

(1. Department of Physics, Binzhou University, Binzhou 256603, China; 2. Institute for Theoretical Physics, Binzhou University, Binzhou 256603, China)

**Abstract:** In order to study the influence of pulse walk-off on femtosecond signal pulse compression in photonic crystal fibers, the coupled nonlinear Schrödinger equations were numerically solved by means of standard split-step Fourier method. The nonlinear propagation of two femtosecond optical pulses in a photonic crystal fiber was simulated. The effect of pulse walk-off and asynchronous coupling on signal pulse compression was simulated and analyzed. It is found that the signal pulse can be compressed through the cooperation by group velocity dispersion, third-order dispersion, self-phase modulation and cross-phase modulation, when the pump pulse is input in the anomalous dispersion region while the signal pulse is input in the normal dispersion region. Pulse walk-off not only leads to the degradation of the compression ratio of the signal pulse but also leads to a longer fiber length at which the width of the compressed signal pulse is the minimum, and leads to the non-symmetry of the compressed signal pulse. It is also found that the quality factor of the signal pulse will be improved with the asynchronous coupling method.

**Key words:** nonlinear optics; photonic crystal fiber; split-step Fourier method; effect of pulse walk-off; asynchronous coupling

## 引言

光子晶体光纤<sup>[1-3]</sup> (photonic crystal fiber, PCF), 又叫多孔光纤 (holey fiber, HF) 或微结构光纤 (micro-structure optical fiber, MF), 是一种由单一材料构成, 包层中具有周期性微米量级空气孔结构的新型光纤。其所具有的独特性质都是由于包层中的2维光子晶体结构带来的, 主要包括: 无休止单模特性、可控的色散特

性以及增强的非线性特性等。基于此, 光子晶体光纤极有可能成为比传统光纤更优异的下一代传输光纤。因此, 激光脉冲特别是超短激光脉冲在光子晶体光纤中的传输及其相互作用的研究<sup>[4-7]</sup>, 已成为当前国际上的研究热点。其中双脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输及其相互作用, 目前已有大量的研究<sup>[8-14]</sup>。但对于离散效应对光子晶体光纤中信号脉冲压缩的影响方面没有进行深入的研究。

作者数值模拟了飞秒双脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输, 探讨了在群速度色散、高阶色散、自相位调制和交叉相位调制联合作用下, 信号脉冲在光子晶体光纤中非线性传输和压缩过程, 计算和分析了离散效应和非同步耦合对信号压缩的影响并探讨其产生机制。

基金项目: 滨州学院科研基金资助项目 (Bzzykj0812)

作者简介: 赵荣霞 (1980-), 女, 硕士, 助教, 主要从事宇宙线物理和光子晶体光纤非线性特性的应用研究。

E-mail: zhaorxbzxy@163.com

收稿日期: 2010-12-03; 收到修改稿日期: 2010-12-16

## 1 理论模型及初始输入条件

为研究飞秒双脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输,考虑高阶色散、高阶非线性效应,根据参考文献[15]~参考文献[16],在忽略光纤损耗的情况下,对飞秒脉冲的耦合非线性薛定谔方程组无量纲形式进一步推导如下:

$$\frac{\partial U_1}{\partial \xi} + \frac{i}{2} \operatorname{sgn}(\beta_{21}) \frac{\partial^2 U_1}{\partial \tau^2} - \frac{1}{6} \frac{\beta_{31}}{|\beta_{21}| T_{01}} \frac{\partial^3 U_1}{\partial \tau^3} - \frac{i}{24} \frac{\beta_{41}}{|\beta_{21}| T_{01}^2} \frac{\partial^4 U_1}{\partial \tau^4} + \dots = iN^2 \left[ |U_1|^2 + 2|U_2|^2 - \tau_R \frac{\partial |U_1|^2}{\partial \tau} \right] U_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial \xi} + \delta \frac{\partial U_2}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{22}}{|\beta_{21}|} \frac{\partial^2 U_2}{\partial \tau^2} - \frac{1}{6} \frac{\beta_{32}}{|\beta_{21}| T_{01}} \frac{\partial^3 U_2}{\partial \tau^3} - \frac{i}{24} \frac{\beta_{42}}{|\beta_{21}| T_{01}^2} \frac{\partial^4 U_2}{\partial \tau^4} + \dots = iN^2 \frac{\omega_2}{\omega_1} \left[ |U_2|^2 + 2|U_1|^2 - \tau_R \frac{\partial |U_2|^2}{\partial \tau} \right] U_2 \quad (2)$$

为方便起见,设脉冲1为抽运脉冲;脉冲2为信号脉冲。选取时间随抽运脉冲移动的坐标系并作变换:

$$\tau = \left( t - \frac{z}{v_{g,1}} \right) / T_{01}, \xi = \frac{z |\beta_{21}|}{T_{01}^2}, U_j = \frac{A_j}{\sqrt{P_1}} \quad (3)$$

式中, $t$ 表示时间; $z$ 表示脉冲传输距离; $v_{g,j}$ ( $j=1,2$ )表示脉冲群速度; $\beta_j$ 表示群速度色散系数; $\beta_3, \beta_4$ 分别表示3阶和4阶群速度色散系数; $T_{01}$ 为抽运脉冲的初始半峰全宽; $A_j$ 表示脉冲包络复振幅; $P_1$ 为抽运脉冲的初始峰值功率; $\tau, \xi, U_j$ 分别为归一化时间变量、距离、振幅;(1)式左边的第2项,(2)式左边的第3项分别表示各脉冲群速度色散效应;等式右边的第1项、第2项分别表示各脉冲的自相位调制效应和由于另一脉冲存在而引起的交叉相位调制效应。 $N^2 = \gamma_1 P_1 T_{01}^2 / |\beta_{21}|$ ,其中, $N$ 表示抽运脉冲的孤子阶数; $\gamma_j$ 为非线性系数,其定义为 $\gamma_j = n_2 \omega_j / (c A_{\text{eff}})$ , $n_2$ 为非线性折射率系数, $\omega_j$ 为脉冲中心频率, $c$ 为光速, $A_{\text{eff}}$ 为纤芯的有效面积。在上述方程中,假定两光波的 $A_{\text{eff}}$ 相等。归一化离散参数 $\delta = \operatorname{sgn}(v_{g,1} - v_{g,2}) \frac{L_d}{L_w}$ ,式中, $L_d = T_{01}^2 / |\beta_{21}|$ 为抽运脉冲的色散

长度; $L_w = T_{01} v_{g,1} v_{g,2} / |v_{g,1} - v_{g,2}| = \frac{T_{01}}{|d|}$ 表示因两脉冲群

速度不等而引起的走离长度;其中, $d = \frac{v_{g,1} - v_{g,2}}{v_{g,1} v_{g,2}}$ 是两脉

冲间群速度失配的量度, $\tau_R = \frac{T_R}{T_{01}}$ 为归一化脉冲喇曼参

量,其中, $T_R = 5fs$ 是相应于喇曼响应的的时间参量, $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 分别为抽运脉冲和信号脉冲的中心频率。本文中,选取位于反常色散区的双曲正割脉冲作为抽运脉冲来研究位于正常色散区的双曲正割脉冲的传输特性。并选取初始输入条件为:

$$U_1(0, \tau) = \operatorname{sech}(\tau) \quad (4)$$

$$U_2(0, \tau) = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \operatorname{sech} \left[ \frac{T_{01}}{T_{02}} (\tau - \tau_d) \right] \quad (5)$$

式中, $T_{02}$ 为信号脉冲的初始半宽度, $P_2$ 为信号脉冲的入射峰值功率,信号脉冲的孤子阶数 $N_2$ 满足公式 $N_2^2 = \gamma_2 P_2 T_{02}^2 / |\beta_{22}|$ , $\tau_d$ 为时间延迟量,由于抽运脉冲比信号脉冲要慢,即:

$$\delta = -\frac{L_d}{L_w} = -\frac{T_{01}}{|\beta_{21}|} d \quad (6)$$

## 2 计算结果与分析

在数值计算中,采用零色散波长 $\lambda_d = 767\text{nm}$ 的光子晶体光纤<sup>[8]</sup>,并假设信号脉冲(弱脉冲)波长 $\lambda_2 = 740\text{nm}$ ,抽运脉冲的波长 $\lambda_1 = 800\text{nm}$ ,对于处于反常色散区的抽运脉冲,非线性系数 $\gamma_1 = 0.075\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , $\beta_{21} = -5.9998 \times 10^{-6}\text{fs}^2/\text{nm}$ , $\beta_{31} = 6.0445 \times 10^{-5}\text{fs}^3/\text{nm}$ , $\beta_{41} = -3.3683 \times 10^{-5}\text{fs}^4/\text{nm}$ , $\beta_{51} = -4.7893 \times 10^{-5}\text{fs}^5/\text{nm}$ , $\beta_{61} = 3.3037 \times 10^{-4}\text{fs}^6/\text{nm}$ ,初始脉宽 $T_{01} = 100\text{fs}$ ,孤子阶数 $N = 5$ ;对于正常色散区的信号脉冲, $\gamma_2 = 0.081\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$ , $\beta_{22} = 4.9731 \times 10^{-6}\text{fs}^2/\text{nm}$ , $\beta_{32} = 5.4568 \times 10^{-5}\text{fs}^3/\text{nm}$ , $\beta_{42} = -2.9155 \times 10^{-5}\text{fs}^4/\text{nm}$ , $\beta_{52} = 6.3452 \times 10^{-6}\text{fs}^5/\text{nm}$ , $\beta_{62} = -1.1828 \times 10^{-4}\text{fs}^6/\text{nm}$ ,初始脉宽 $T_{02} = 200\text{fs}$ ,孤子阶数 $N_2 = 1$ 。根据飞秒光脉冲的耦合非线性薛定谔方程组,由于抽运脉冲受信号脉冲的影响很小,只考虑信号脉冲的演变情况,取 $\tau_R = 0.05$ 。除非特别说明,后面的计算都采用以上参量来进行。

### 2.1 未计脉冲离散情况

首先考虑群速度匹配( $d=0$ )的情况。图1a和图1b中分别示出在同步耦合条件下且 $N=5$ 和 $N_2=1$ 时,信号脉冲时域演化情况和在最佳光纤长度处的频谱图。图1a表明,随着传输距离的增加,信号脉冲逐渐被压缩,且峰值功率逐渐增高。信号脉冲的压缩主要是由于交叉相位调制效应与群速度色散效应的相互作用,因为信号脉冲的峰值功率相对于抽运脉冲的峰值功率很低,故信号脉冲本身的自相位调制效应相对于交叉相位调制效应可忽略不计。进一步数值模拟发现,信号脉冲压缩存在一最佳光纤长度,在这长度之后,信号脉冲又逐渐展宽,峰值功率逐渐降低。这是由

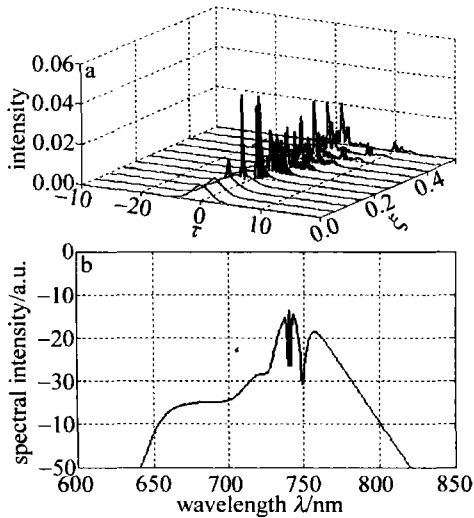


Fig. 1 Temporal evolutions and the spectrum of the signal pulse while the group-velocity dispersion matching is satisfied

于抽运脉冲在传输过程中的演化具有周期性,在每个周期的开始阶段,抽运脉冲会经历一初始变窄过程。最佳光纤长度处的信号脉冲频谱展宽较大,呈现不对称性,如图1b所示。

## 2.2 离散效应对信号脉冲传输的影响

图2a和图2b中分别示出计入离散效应后( $d = 1.24 \times 10^{-6}$  fs/nm, 即  $\delta = -124/5.9998 \approx -20.6674$ ),在信号脉冲和抽运脉冲同步耦合情况下,信号脉冲的时域演化情况和其在最佳光纤长度处的频谱图。图2a表明,由于信号脉冲的群速度比抽运脉冲大,因而在传输过程中信号脉冲逐渐超前于抽运孤子,即由输入时的同步耦合发展到逐渐分离;信号脉冲频谱出现蓝移,导致频谱中心偏移,如图2b所示。与图1相比,图2表明,离散效应不仅导致信号脉冲压缩比的减小而且导致压缩后的信号脉冲频谱不对称性进一步增强,这是由于离散效应使得信号脉冲在传输过程中经历的交叉相位调制效应减弱,由于离散效应,信号脉冲

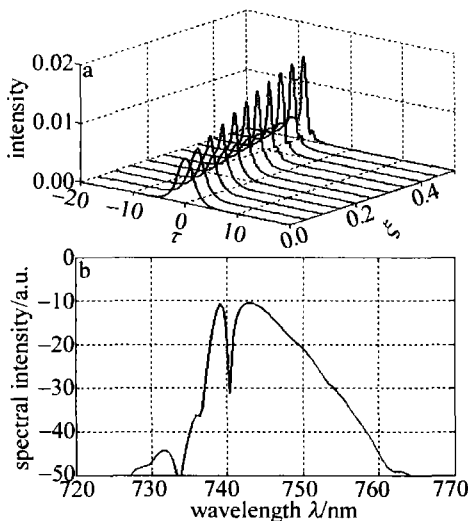


Fig. 2 Temporal evolutions and the spectrum of the signal pulse while the group-velocity dispersion matching is not satisfied

来不及充分利用抽运脉冲在初始变窄时所给予的交叉相位调制作用而产生上述现象。

## 2.3 离散效应对信号脉冲压缩比和最佳光纤长度的影响

离散效应对信号脉冲压缩因子和最佳光纤长度的影响如图3所示。当归一化离散参数  $\delta = 0, \delta = -20.6674$  时,通过改变抽运脉冲孤子阶数分析信号脉冲压缩因子、最佳光纤长度的变化。从图3a中可以看出,离散效应不利于信号脉冲的压缩。在相同抽运脉冲孤子阶数条件下, $\delta = 0$  时可以获得更大的压缩因子,且随着峰值功率的增大,信号脉冲压缩因子逐渐增大,同时最佳光纤长度在减小,如图3b所示。

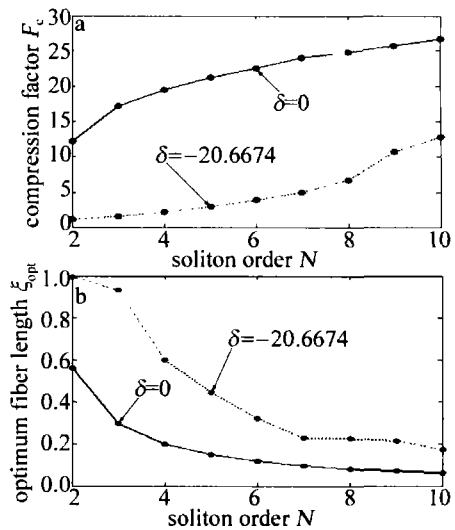


Fig. 3 Properties of compression factor  $F_c$  and optimum fiber length  $\xi_{opt}$  of the signal pulse with increased peak power of the pump pulse in the presence of pulse walk-off or without pulse walk-off

## 2.4 存在离散效应时,非同步耦合对信号脉冲压缩的影响

如图4所示,数值模拟了在  $\delta = -20.6674$ , 抽运

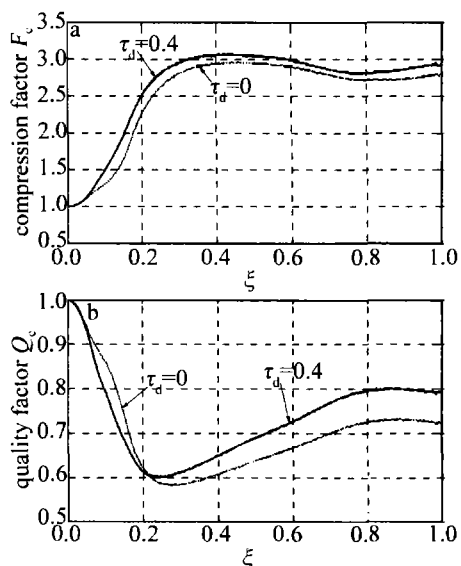


Fig. 4 Calculated compression factor and quality factor of the signal pulse transmission with or without the asynchronous coupling method

脉冲孤子阶数  $N=5$  时,时间延迟量  $\tau_d$  对信号脉冲压缩因子和品质因子随传输距离演化的影响,可以发现,引入时间延迟因子  $\tau_d = -20.6674$  之后,与  $\tau_d = 0$  相比,信号脉冲的压缩因子增大,品质因子增大,即压缩后的脉冲峰值功率提高,压缩质量得到改善。对上述现象可以这样解释:由于离散效应,信号脉冲在传输过程中逐渐往抽运脉冲的后沿移动,使得信号脉冲不能充分利用抽运脉冲初始变窄阶段的交叉相位调制,从而影响信号脉冲的压缩。但是,若根据实际的离散性质,在光纤输入端让信号脉冲适当滞后抽运脉冲  $\tau_d$ ,使得信号脉冲尽量能够在抽运脉冲变得最窄时与其发生重叠,则可以最大限度地利用抽运脉冲初始变窄过程中的交叉相位调制效应,从而改善信号脉冲的压缩效果。

### 3 结 论

在忽略光子晶体光纤损耗的前提下,运用分步傅里叶方法数值求解耦合的非线性薛定谔方程,研究了在群速度色散、高阶色散、自相位调制、交叉相位调制、脉冲内喇曼效应以及脉冲之间离散效应的联合作用下,位于反常色散区的抽运飞秒脉冲和位于正常色散区的信号飞秒脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输过程。着重分析了离散效应对信号脉冲在光子晶体光纤非线性传输和压缩的影响。研究发现,与不计离散效应时的压缩结果相比,离散效应不仅导致信号脉冲压缩因子的减小,还导致信号脉冲压缩所需的最佳光纤长度增大,随着抽运脉冲孤子阶数的增加,信号脉冲的压缩因子缓慢增大,同时最佳光纤长度减小;进一步数值模拟发现,采取非同步耦合可以减弱离散效应对信号脉冲的影响,改善信号脉冲的压缩质量。

### 参 考 文 献

- [1] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSEL P St J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [2] BIRKS T A, KNIGHT J C, RUSSEL P St J, *et al.* Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 961-963.
- [3] WANG Q Y, HU M L, CHAI L. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(1): 57-66 (in Chinese).
- [4] WELCH M G, COOK K, CORREA R A, *et al.* Solitons in hollow core photonic crystal fiber: engineering nonlinearity and compressing pulses[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(11): 1644-1652.
- [5] WASHBURN B R, RALPH S E, WINDELER R S. Ultrashort pulse propagation in air-silica microstructure fiber[J]. *Optics Express*, 2002, 10(13): 575-580.
- [6] GAETA A L. Nonlinear propagation and continuum generation in microstructured optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(11): 924-926.
- [7] WANG R X, DOU Ch Sh, YUE X Ch. Numerical study on a femtosecond laser pulse in photonic crystal fiber[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 555-557 (in Chinese).
- [8] CHENG Ch F, WANG X F, FANG Z, *et al.* Nonlinear copropagation of two optical pulses of different frequencies in photonic crystal fibers[J]. *Applied Physics*, 2005, B80(3): 291-294.
- [9] AGRAWAL G P, BALDECK P L, ALFANO R R. Temporal and spectral effects of cross-phase modulation on copropagating ultrashort pulses in optical fibers[J]. *Physical Review*, 1989, A40(9): 5063-5072.
- [10] GENTY G, LEHTONEN M, LUDVIGSEN H. Effect of cross-phase modulation on supercontinuum generated in microstructured fibers with sub-30fs pulses[J]. *Optics Express*, 2004, 12(19): 4614-4624.
- [11] CAO W H, ZHANG Y W. Effect of pulse walk off on optical pulse compression based on cross-phase modulation in single-mode fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(12): 1737-1744 (in Chinese).
- [12] ZHANG Sh M, LUO A P, XU W Ch. Higher-order soliton compression due to cross-phase modulation in optical fibers[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(8): 877-880 (in Chinese).
- [13] LUO A P, XU W Ch, CHEN W Ch, *et al.* Soliton pulse compression based on cross-phase modulation in anomalous dispersive optical fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(5): 421-425 (in Chinese).
- [14] DONG L L, YANG X Y. Effect of high-order dispersion and nonlinear on compression pulse pair in PCF[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(8): 792-795 (in Chinese).
- [15] CAO W H, LIU S H. Enhanced soliton-effect pulse compression by cross-phase modulation in optical fibers[J]. *Science in China*, 2000, 43(6): 595-605.
- [16] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics*[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 172-181 (in Chinese).