

文章编号: 0258-7025(2001)05-0421-05

# 基于交叉相位调制的孤子脉冲 压缩效应研究\*

罗爱平 徐文成 陈伟成 郭旗 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所 广州 510631)

**提要** 在负色散区,基本孤子在光纤中传输时其波形与脉宽保持不变。提出一种在负色散区利用交叉相位调制效应压缩基本孤子脉冲的新方法。采用分步傅里叶方法对非线性耦合方程进行了数值计算与模拟。研究了不同抽运功率、不同抽运脉冲啁啾参数以及不同脉宽对基本孤子脉冲压缩的影响。发现基本孤子脉冲不仅能够被压缩,而且光纤存在最佳压缩长度。在抽运功率一定的条件下,选取负啁啾的抽运脉冲,可获得更高压缩比的压缩光脉冲。另外,不同的脉冲宽度对孤子脉冲的压缩产生较大的影响,一般情况下,选用较窄的抽运脉冲易于产生较短的压缩光脉冲。

**关键词** 交叉相位调制效应,孤子脉冲压缩,高压压缩比脉冲的产生

中图分类号 TN 787+.3 文献标识码 A

## Soliton Pulse Compression Based on Cross-phase-modulation in Anomalous Dispersive Optical Fiber

LUO Ai-ping XU Wen-cheng CHEN Wei-cheng GUO Qi LIU Song-hao

(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

**Abstract** In anomalous dispersive fiber, fundamental soliton pulses have the desirable property i. e. their shape and pulse width are invariant during propagation along the fiber. In this paper, a new method to compress fundamental soliton pulses in the anomalous dispersion regime through cross-phase-modulation for pump pulse and soliton pulse is proposed. Two nonlinear coupled equations were established to describe the propagation of pulses in the fiber and solved numerically. It is found that the fundamental soliton can be compressed by using the method of the cross-phase modulation and exists an optimum value of fiber length in the compression. It is also found that the pump pulse power, pump frequency chirp and various pulse widths have great effects on soliton pulse compression. In order to obtain large compression factor, pump pulses with negative chirp and narrow pulse-width are desirable selected.

**Key words** cross-phase-modulation, soliton pulse compression, generation of ultra-short pulses

### 1 引言

随着光纤中超短光脉冲传输特性研究的不断深入,利用光纤非线性效应压缩光脉冲已经成为有效的方法之一<sup>[1-4]</sup>。目前,利用该方法可以获得短至几十乃至几个飞秒的光脉冲。这种方法根据光波波长的不同,一般分为两类:即光纤-光栅对压缩和光

孤子脉冲压缩。在可见光和近红外波段(波长  $\lambda \leq 1.32 \mu\text{m}$ ),通常采用光纤-光栅对技术压缩光脉冲,因为光栅对提供反常色散以补偿光脉冲受正常群速度色散时产生的近似线性的啁啾,利用这种技术现已在 620 nm 波段获得短至 6 fs 的压缩光脉冲<sup>[1]</sup>;在 1.32  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  波段,利用光孤子效应压缩光脉冲。光孤子压缩效应是利用高阶孤子传输时脉冲分裂、脉宽变短效应来实现的,压缩率取决于脉冲的峰值功率,在 1.32  $\mu\text{m}$  附近的波长范围内,上述两种技术都可以采用,利用色散位移光纤,已得到压缩率为 5000 的超短光脉冲<sup>[2]</sup>。但对于常规光纤在 1.32  $\mu\text{m}$

\* 广东省自然科学基金(980030)和国家自然科学基金(19674015)资助项目。

收稿日期:1999-12-06;收到修改稿日期:2000-04-17

至  $1.6 \mu\text{m}$  波段,利用孤子效应只能压缩高阶孤子,对基本孤子脉冲的压缩则无能为力。文献[3]报道了利用色散缓变光纤可实现对基本孤子脉冲的压缩,适当选取色散缓变光纤结构参数,可以获得短至  $10 \text{ fs}$  的高质量(无底座)超短光脉冲,但色散缓变光纤的拉制工艺复杂,价格昂贵。本文提出在常规光纤中利用交叉相位调制效应压缩基本孤子脉冲的新方法。该方法基于两光束在光纤中传输时一束光对另一束光产生相位调制(交叉相位调制),使该束光产生近似线性的频率啁啾,从而与群速度色散相互作用得到压缩。由于交叉相位调制效应在光开关[5]、光脉冲压缩[6~9]方面具有重要应用前景,近年来受到人们普遍关注。本文研究了两个中心波长不同的光脉冲同时在光纤中传输时相互作用的情形。发现交叉相位调制效应对孤子脉冲压缩产生重要影响。数值计算结果表明基本孤子脉冲不仅可得到压缩,而且压缩存在最佳光纤长度。

## 2 耦合方程与初始输入条件

两个中心波长不同的皮秒脉冲在单模光纤中共同传输时,满足以下非线性耦合方程[10]

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{21} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{\alpha_1}{2} A_1 = i\gamma_j [ |A_1|^2 + 2 |A_2|^2 ] A_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{22} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{\alpha_2}{2} A_2 = i\gamma_j [ |A_2|^2 + 2 |A_1|^2 ] A_2 \quad (2)$$

其中  $A_j (j = 1, 2)$  为两脉冲的慢变包络振幅,  $v_{gj}$  为脉冲群速度,  $\beta_{2j}$  为群速度色散系数,  $\alpha_j$  为损耗系数,  $\gamma_j$  为非线性系数。为了研究方便,设脉冲 1 为抽运脉冲,脉冲 2 为信号脉冲。在忽略光纤损耗的条件下,选取时间随抽运脉冲移动的坐标系作以下变换

$$T = t - \frac{z}{v_{g1}}, \quad \tau = \frac{T}{T_{01}}, \quad \xi = \frac{z\beta_{21}}{T_{01}^2}, \quad U_j = \frac{A_j}{\sqrt{P_1}} \quad (3)$$

则方程(1)(2)变为以下归一化形式

$$\frac{\partial U_1}{\partial \xi} + \frac{i}{2} \text{sgn}(\beta_{21}) \frac{\partial^2 U_1}{\partial \tau^2} = iN^2 [ |U_1|^2 + 2 |U_2|^2 ] U_1 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial \xi} - \sigma \frac{\partial U_2}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{22}}{|\beta_{21}|} \frac{\partial^2 U_2}{\partial \tau^2} =$$

$$iN^2 \frac{\omega_1}{\omega_1} [ |U_2|^2 + 2 |U_1|^2 ] U_2 \quad (5)$$

其中,  $N^2 = \gamma_1 P_1 T_{01}^2 / |\beta_{21}|$ ,  $P_1$  为抽运脉冲初始峰值功率,  $T_{01}$  为抽运脉冲的初始半宽度,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为抽运脉冲和信号脉冲的中心频率,  $\sigma = T_{01} (v_{g1}^{-1} - v_{g2}^{-1}) / |\beta_{21}|$  为走离参数,由两束光波在传输过程中群速度不同所引起,适当选取两脉冲的波长使零色散波长位于抽运波长和信号波长的中点时,则两脉冲的群速度近乎相等,走离效应可忽略[11],即  $\sigma \approx 0$ 。本文将研究位于正色散区的高斯脉冲与位于负色散区的孤子脉冲相互作用的情形。初始输入脉冲条件为

$$U_1(0, T) = \exp\left(-\frac{1 + iC}{2} \frac{T^2}{T_{01}^2}\right) \quad (6)$$

$$U_2(0, T) = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \text{sech}\left(\frac{T}{T_{02}}\right) \quad (7)$$

上式中  $C$  为高斯脉冲的啁啾参量,  $T_{02}$  为孤子脉冲的初始脉宽,  $P_2$  为孤子脉冲的初始峰值功率。

## 3 数值计算结果及分析

双光束脉冲同时在光纤中传输时脉冲演化由归一化方程(4)与(5)支配,式中右边第二项代表交叉相位调制项。当抽运脉冲在正色散区,信号脉冲在负色散区时,交叉相位调制效应使信号脉冲中心部分产生近似线性的正啁啾,正的啁啾与负的群速度色散相互补偿,从而在初始阶段信号脉冲得到压缩[6],而抽运脉冲展宽。随之交叉相位调制效应减弱,群速度色散效应起主要作用,信号脉冲展宽,因而信号脉冲的压缩存在最佳光纤长度。在一般情况下,该耦合方程无解析解,因此,数值计算与模拟成为解决此类复杂方程的有效方法之一。本文将采用分步傅里叶方法模拟双光束脉冲在光纤中传输时的动力学特性。设抽运脉冲的中心波长为  $1.06 \mu\text{m}$ , 信号脉冲的中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ 。采用零色散波长为  $1.3 \mu\text{m}$  的常规硅光纤,则有  $\beta_{21} \approx |\beta_{22}| = 20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2 = 1.3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , 走离效应可忽略(即  $\sigma \approx 0$ )。

### 3.1 抽运功率对孤子脉冲压缩的影响

在方程(5)中,右边第二项是交叉相位调制项,该项与抽运光的功率成正比,因此,抽运功率的大小对信号光将产生重要影响[7]。设抽运脉冲的啁啾为零,两脉冲初始脉宽相同,图1给出了当  $N = 10$  时的孤子演化情况。从图中可以看出,信号光脉冲在

传输过程中峰值增强,脉宽变短,当传输到一定距离后,脉冲出现较宽的底部,脉冲展宽,压缩比降低,脉冲压缩存在最佳光纤长度。从脉冲压缩的质量及压缩比方面考虑,脉冲的压缩存在一最佳位置。我们取信号脉冲第一次出现最大相对强度时的归一化距离为光纤最佳长度  $Z_{OPT}$ 。当  $N = 10$  时,计算结果表明最佳位置  $Z_{OPT} \approx 0.16L_D$ 。

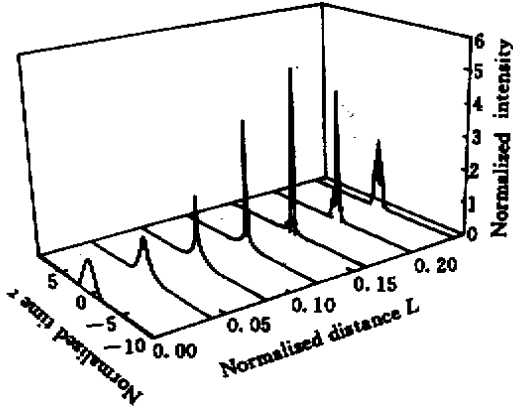


图 1  $N = 10, C = 0, T_{01} = T_{02}$  时孤子脉冲的演化

Fig.1 Temporal evolution of the one-soliton for the case  $N = 10, C = 0, T_{01} = T_{02}$

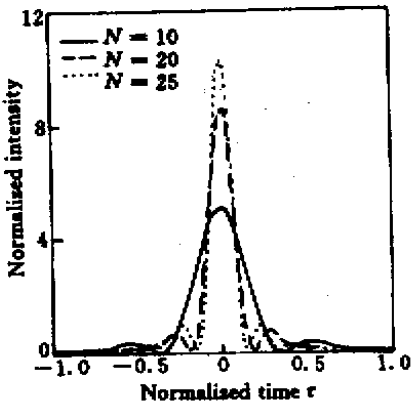


图 2  $C = 0, T_{01} = T_{02}$  时,对应不同抽运参数  $N = 10, 20, 25$  孤子脉冲压缩至最短时的强度谱,最佳光纤长度  $L_{OPT}$  分别为  $0.16, 0.077, 0.061$

Fig.2 Shapes of signal pulses at optimum fiber length  $L_{OPT} = 0.16, 0.077, 0.061$  for  $N = 10, 20, 25, T_{01} = T_{02}$  and  $C = 0$

为了研究抽运功率对孤子脉冲压缩的影响,我们选取了不同的抽运脉冲参数进行了数值模拟。图 2 给出了  $N$  分别等于  $10, 20, 25$  时,脉冲压缩至最短时的强度谱。从图中可以看出,当抽运脉冲功率增大时,孤子脉冲可获得更大的压缩,且最佳光纤长度变短。为了清楚表明孤子脉冲在压缩过程中啁啾的

变化情况,图 3 给出了不同抽运功率条件下孤子脉冲传输至同一位置 ( $\xi = 0.047$ ) 时的啁啾分布曲线。图中显示抽运功率越强,其在信号脉冲的中心部分诱导的线性正频率啁啾范围越窄,因而导致压缩最佳光纤长度变短。

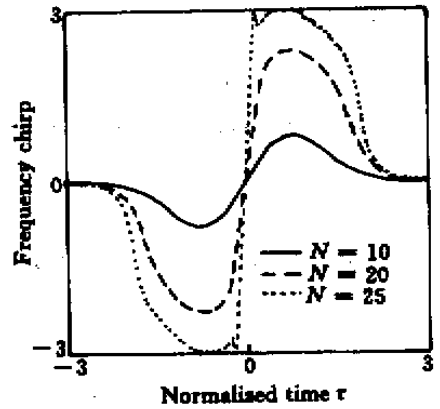


图 3  $N = 10, 20, 25, C = 0, T_{01} = T_{02}, \xi = 0.047$  时信号脉冲的啁啾分布曲线

Fig.3 Frequency chirp of signal pulse at  $\xi = 0.047$  for  $N = 10, 20, 25, C = 0, T_{01} = T_{02}$

### 3.2 抽运脉冲啁啾对孤子压缩的影响

抽运脉冲无啁啾时,由于交叉相位调制的作用使孤子脉冲中心部分具有正的啁啾,因而在负色散区可以被压缩。而实际中,激光器输出的脉冲往往带有啁啾,因而有必要考虑啁啾抽运脉冲对信号脉冲压缩的影响。我们对不同啁啾参数下孤子脉冲传输特性进行了大量的数值计算,结果表明,抽运脉冲的啁啾参数对孤子脉冲压缩产生较大的影响。正的啁啾脉冲难以获得高压缩比的压缩光脉冲,最佳压缩光纤长度相应延长;负的啁啾脉冲不仅能够得到高压缩比的光脉冲,而且最佳压缩光纤长度变短。图 4 给出了抽运功率  $N = 10$ , 啁啾参数  $C$  分别为  $-3, 0, 3$  时孤子脉冲压缩至最短时的脉冲强度谱。从图中可以看出抽运脉冲具有负啁啾时,孤子脉冲可得到更大的压缩,且最佳光纤长度较短。抽运脉冲啁啾对孤子压缩的影响可以这样来解释:当抽运脉冲具有负啁啾时,负啁啾对抽运脉冲的展宽具有补偿作用,使孤子脉冲比抽运无啁啾时产生更大的正啁啾,但线性正啁啾的范围减小,因而其压缩比提高,最佳压缩光纤长度变短。当抽运脉冲啁啾为正时,正啁啾使得抽运脉冲的展宽加快,因此通过交叉相位调制施加给孤子脉冲中心部分的线性正啁啾比抽运脉冲无啁啾时的要小,但其范围增大,从而使其

获得的压缩比降低,最佳压缩光纤长度变长。

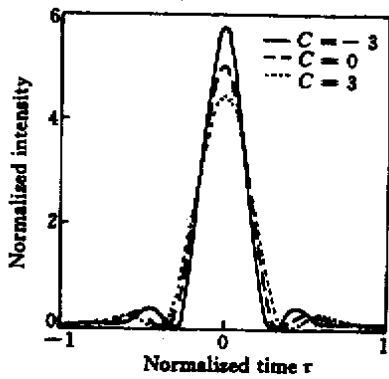


图4  $N = 10, T_{01} = T_{02}, C = -3, 0, 3$  时孤子脉冲压缩至最短时的强度谱,相应的最佳光纤长度  $L_{OPT}$  分别为 0.144, 0.16, 0.178

Fig.4 Shapes of the signal pulses at the optimum fiber length  $L_{OPT} = 0.144, 0.16, 0.178$  for  $N = 10, T_{01} = T_{02}, C = -3, 0, 3$

### 3.3 不同脉宽对孤子压缩的影响

一般情况下,抽运光和信号光的脉冲宽度是不相等的,因此研究两脉冲不同脉宽时由于交叉相位调制效应作用而对信号光压缩的影响有现实意义<sup>[7]</sup>。为研究方便,我们通过改变两脉冲初始脉宽的比率,对孤子脉冲的演化情况进行了一系列数值计算。图5给出了  $N = 25, C = 0$  时,对应不同初始脉宽比  $\delta = T_{02}/T_{01}$ , 信号脉冲的压缩比曲线。该曲线近似满足下列关系式

$$F_C = 16\delta - 3.1 \quad (8)$$

(8)表明,随着初始脉宽比  $\delta$  的增加,信号脉冲的压缩比  $F_C$  线性增加。当  $\delta = 2$  时,脉冲压缩比  $F_C$  可达 28.9。为了显示不同脉宽比对信号脉冲压缩的影响,图6给出了  $\delta$  分别为 0.5, 1, 1.5 时,信号脉冲压缩至最短时的强度谱曲线。从图中可看出,当抽运脉冲比信号脉冲宽即  $\delta < 1$  时,信号脉冲的压缩比降低,但所获得的压缩光脉冲质量较好(压缩脉冲的底座较低)。当信号脉冲比抽运脉冲宽( $\delta > 1$ )时,可获得较高的压缩比光脉冲,但其质量较差,底座较大。这是因为在抽运功率一定的条件下,脉冲宽度越短,其峰值功率越高,由其产生的交叉相位调制效应越强。对于越强的交叉相位调制效应,其诱导的线性正啁啾在脉冲中心部分的范围越窄,因此只有脉冲中心部位较窄的一段范围得到色散补偿而被压缩,在压缩脉冲的两翼出现较宽的底座。所以根据不同的要

求,选取相应的脉宽比以获得所需的压缩光脉冲。

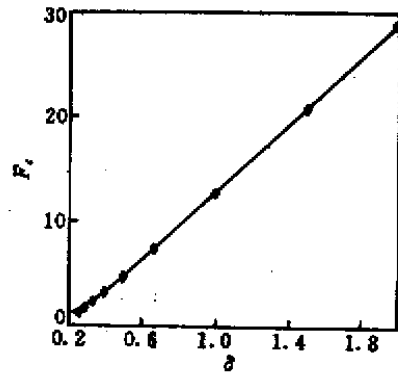


图5  $N = 25, C = 0$  孤子脉冲压缩比  $F_C$  与初始脉宽比  $\delta$  的关系曲线

Fig.5 Variation of compression factor  $F_C$  with the parameter  $\delta$  for  $N = 25, C = 0$

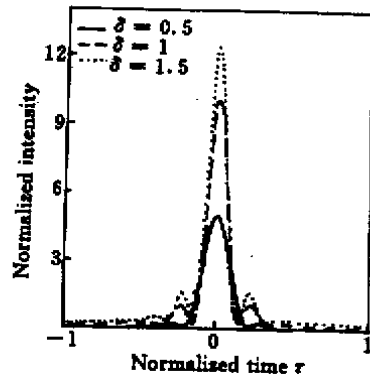


图6  $N = 25, C = 0, \delta = 0.5, 1, 1.5$  时孤子脉冲压缩至最短时的强度谱

Fig.6 Shapes of the signal pulse where it is shortest for  $N = 25, C = 0, \delta = 0.5, 1, 1.5$

## 4 结论

本文采用分步傅里叶方法对激光双脉冲在光纤中传输动力学特性进行了较系统的研究,提出了在负色散区利用交叉相位调制效应压缩基本孤子脉冲的新方法。研究了不同抽运功率、不同抽运脉冲啁啾参数以及不同脉宽对基本孤子脉冲压缩的影响。发现基本孤子能够被压缩,而且光纤存在最佳压缩长度。对于较强功率的抽运脉冲,孤子压缩所需的光纤长度较短;在抽运功率一定的条件下,选取负啁啾的抽运脉冲易于产生高压缩比的压缩光脉冲;另外,不同的脉冲宽度对孤子脉冲的压缩产生较大的影响,一般情况下,选用较窄的抽运脉冲易于获得较短的压缩光脉冲。

## 参 考 文 献

- 1 R. L. Fork , C. H. Brito Cruz , P. C. Becker *et al.*. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation. *Opt. Lett.* , 1987 , **12** ( 7 ) :483 ~ 485
- 2 A. S. Gouveia-Neto , A. S. L. Gomes , J. R. Taylor. Pulses of four optical cycles from an optimized optical fiber/grating pair/soliton pulse compressor at 1.32  $\mu\text{m}$ . *J. Mod. Opt.* , 1988 , **35** ( 1 ) :7 ~ 10
- 3 Xu Wencheng , Guo qi , Liao Changjun *et al.*. Femtosecond soliton compression and stabilization in fibers with slowly decreasing dispersion. *Acta Optic Sinica* ( 光学学报 ) , 1995 , **15** ( 2 ) :174 ~ 179 ( in Chinese )
- 4 Xu Wencheng , Guo Qi , Liu Songhao. Higher-order dispersion and soliton pulse compression in the dispersion-decreasing fibers. *Chin. Phys. Lett.* , 1997 , **14** ( 4 ) :298 ~ 301
- 5 B. A. Umarov , F. Kh. Abdullaev , M. R. B. Wahiddin. Soliton interaction and switching in a coupler with third order dispersion and Raman effect. *Opt. Comm.* , 1999 , **162** :340 ~ 346
- 6 Bozena Jaskorzynska , Dieter Schadt. All-fiber distributed compression of weak pulses in the regime of negative group-velocity dispersion. *IEEE J. Quantum Electron.* , 1988 , **24** ( 10 ) :2117 ~ 2120
- 7 Govind P. Agrawal , P. L. Baldeck , R. R. Alfano. Temporal and spectral effects of cross-phase modulation on copropagating ultrashort pulses in optical fibers. *Phys. Rev. A* , 1989 , **40** ( 9 ) :5063 ~ 5072
- 8 Wen-hua Cao , Shenping Li , Kam-tai Chan. Generation of dark pulse trains from continuous-wave light using cross-phase modulation in optical fibers. *Appl. Phys. Lett.* , 1999 , **74** ( 4 ) :510 ~ 512
- 9 L. Xu , N. Karasawa , N. Nakagawa *et al.*. Experimental generation of an ultra-broad spectrum based on induced-phase modulation in a single-mode glass fiber. *Opt. Comm.* , 1999 , **162** :256 ~ 260
- 10 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* ( Second Edition ). San Diego : Academic Press , 1995. 239 ~ 243
- 11 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* ( Second Edition ). San Diego : Academic Press , 1995. 289 ~ 292