

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0262-04

# 强双折射光纤中超短光脉冲压缩效应研究\*

陈伟成 徐文成 罗爱平 张书敏 郭 旗 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

摘要: 研究了强双折射光纤中沿偏振主轴入射的超短光脉冲压缩效应。当考虑三阶色散效应时, 三阶色散与光纤非线性相互作用能增强一偏振光脉冲的压缩而抑制另一偏振光脉冲的压缩。正三阶色散增强慢孤子压缩, 负三阶色散增强快孤子压缩。三阶色散参量越大, 脉冲压缩效果越明显。

关键词: 双折射光纤; 脉冲压缩; 三阶色散

中图分类号: O437 文献标识码: A

## 1 引 言

光脉冲压缩技术已从单脉冲压缩技术向双脉冲乃至多脉冲压缩技术发展<sup>[1-3]</sup>。对于单脉冲技术, 它利用高阶孤子效应压缩脉冲所需脉冲能量很高, 这对光源和光纤放大器的性能有较高的要求, 在实际应用中很不方便。此外, 人们还采用抽运脉冲基于交叉相位调制效应对信号光进行相位调制, 使弱能量信号光产生压缩。但是这种方法的缺点是: 抽运光和信号光波长若不对称地选在零色散波长两侧, 两脉冲因走离效应而不同步传输, 导致交叉相位调制效应失效。用此方法压缩低阶孤子, 走离效应将对低阶孤子脉冲压缩产生很大影响, 因为对低阶孤子压缩所需的纤长较长。若两脉冲波长对称地选择在零色散波长两侧, 波长的选取就对光源提出比较苛刻的要求。另外, 即使两脉冲波长选取恰当, 两脉冲无走离, 在光纤接收端选取信号光也会带来不便。

本文研究了双折射光纤中双脉冲压缩方法。该压缩方法基于自捕获现象<sup>[4]</sup>。研究发现, 偏振脉冲在负色散区压缩过程中可克服脉冲走离效应。若考虑三阶色散效应时, 三阶色散与非线性相互作用对脉冲有增强压缩效果。三阶色散无论正负, 将对压缩有贡献。三阶色散参量越大, 压缩比越大。

## 2 理论模型

研究皮秒量级的光脉冲传输, 若在强双折射光

纤零色散波长附近传输, 需要考虑三阶色散。在负色散区, 归一化耦合非线性薛定谔方程为<sup>[5]</sup>

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \delta_w \frac{\partial u}{\partial \tau} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - \delta_p \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3} = i\gamma N^2 (|u|^2 + B|v|^2)u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \xi} - \delta_w \frac{\partial v}{\partial \tau} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} - \delta_p \frac{\partial^3 v}{\partial \tau^3} = i\gamma N^2 (|v|^2 + B|u|^2)v, \quad (2)$$

式子左边第三、第四项代表群速度色散和三阶色散, 右边分别代表自相位调制效应和交叉相位调制效应。 $B$  为交叉相位调制系数, 对于线性双折射率光纤, 取值为  $2/3$ , 对于圆双折射率光纤, 取值为  $2$ 。 $\gamma$  为非线性系数。这里忽略了光纤损耗的影响。式中,  $\delta_w = (\beta_x - \beta_y)T_0 / (2|\beta_2|)$ , 为归一化双折射率参量,  $\beta_x, \beta_y$  为快慢偏振模的群速度的倒数。 $\delta_p = \beta_3 / (2|\beta_2|T_0)$  为归一化三阶色散参量,  $\beta_2$  和  $\beta_3$  为群速度色散、三阶色散系数,  $T_0$  为入射脉冲脉宽。 $N = (\gamma P_0 T_0^2 / |\beta_2|)^{1/2}$ , 整数  $N$  的物理意义表示为孤子阶数, 本文主要研究基本孤子, 所以  $N = 1$ 。 $u, v$  分别表示慢、快轴偏振分量脉冲包络。 $\xi$  为归一化长度,  $\tau$  为归一化时间。

为研究方便, 从光纤的两个偏振主轴上同步输入基本孤子脉冲。对(3)式、(4)式采用对称分步傅里叶算法<sup>[6]</sup>数值模拟。

## 3 计算结果和分析

### 3.1 光纤传输参量对脉冲的影响

在线性双折射率光纤中, 基于(3)式、(4)式(不考虑三阶色散)数值模拟双折射率对沿偏振主轴入射的孤子传输的影响, 所得结果与文献[4, 5, 7]一

\* 广东省青年自然科学基金(980030)、国家自然科学基金(19674015)资助课题。

收稿日期 2000-09-30; 收到修改稿日期 2001-04-16

致。在文献 [4] 的数值模拟中发现, 入射参量  $N$  和  $\delta_w$  的选择对脉冲演化影响很大。若光纤双折射率参量  $\delta_w$  较大, 交叉相位调制效应不足以克服  $\delta_w$ , 两偏振轴脉冲将产生时延, 即偏振模色散。若交叉相位调制效应能与  $\delta_w$  平衡, 快慢孤子在传输中相互作用, 两脉冲中心频率发生漂移, 慢孤子中心频率蓝移, 快孤子中心频率红移, 最后两孤子达到共同的速度, 出现自捕获现象, 两脉冲保持着不走离的状态传输下去。这对于基于交叉相位调制效应压缩脉冲技术是非常有利的。它解决了双脉冲压缩过程中因走离效应选择波长的缺点。图 1、图 2 分别是在线性双折射率光纤 ( $B = 2/3$ ) 和圆双折射率光纤 ( $B = 2$ ) 快 (曲线 2) 慢 (曲线 1) 基本孤子在传输相同距离时压缩的脉冲图像。输入脉冲的初始条件相同, 都是基本孤子,  $\delta_w$  取值在图 1 中为 0.40, 图 2 为 0.66, 波长在负色散区任意选取, 脉宽为 1 ps。光纤中考虑的效应有群速度色散、交叉相位调制、自相位调制和双折射效应。

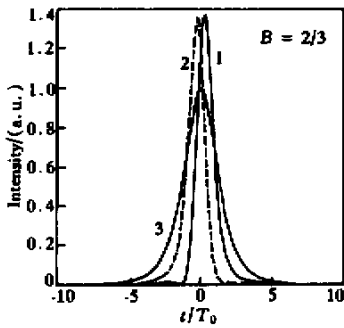


Fig. 1 Pulse shapes of hyperbolic secant in linearly birefringent fiber over a distance of a soliton period. Curve 1 represents slow soliton, curve 2—fast soliton and curve 3—input pulse of one-polarization axis

模拟中发现在双折射光纤中, 这种压缩方法与一般双脉冲基于交叉相位调制效应压缩的最大不同之处是, 两偏振轴的脉冲既是信号光, 又是抽运光, 无论传输多远, 两脉冲压缩效果是一样的; 在传输中, 两脉冲不一定总是重合在一起, 但是它们却因自捕获而总是交叠在一起, 从而增加交叉相位调制效应作用距离 (图 1、2 所显示的是两脉冲交叠的情况)。在图中很容易发现,  $B = 2$  比  $B = 2/3$  的压缩效果更好。这是很自然的, 因为  $B = 2$  时对脉冲的相位调制作用较大, 产生的非线性效果较强, 因而压缩效果更明显。双脉冲基于交叉相位调制效应的压缩方法<sup>[8]</sup>中, 双脉冲波长选取恰当而不发生走离的情况, 对信号光的压缩过程与本文压缩方法的压缩过程相似, 故本方法详细过程不在此赘述。

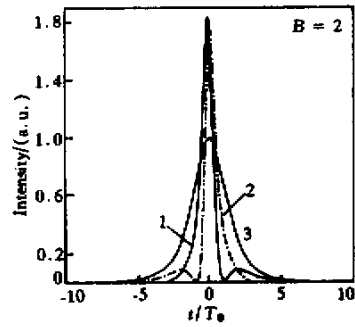


Fig. 2 Pulse shapes of hyperbolic secant in circularly birefringent fiber over a distance of a soliton period. Curve 1 represents slow soliton, curve 2—fast soliton and curve 3—input pulse of one-polarization axis

### 3.2 三阶色散的影响

为使脉冲的压缩效果增强, 人们通常采用多种方法来降低群速度色散系数。由于孤子峰值功率正比于  $|\beta_2|$ , 降低了  $|\beta_2|$  就等于降低初始入射脉冲所需的能量, 也就意味着在相同入射功率下, 入射脉冲的孤子阶得到提高, 从而提高脉冲压缩效果。其中一种方法是用色散缓变光纤代替传统光纤<sup>[9,10]</sup>。但是色散缓变光纤制造工艺复杂, 不利于这种方法的推广。本文将采取工作波长在零色散波长附近的方法来降低  $|\beta_2|$ 。这种方法使三阶色散对压缩效果产生很大影响。下面从三阶色散的大小和正负两方面来研究三阶色散对脉冲压缩的影响。

#### 1) 三阶色散的大小影响

在数值模拟中, 我们采用以下参数: 在双折射光纤中脉冲工作中心波长在负色散区且非常靠近零色散波长, 二阶色散参量  $\beta_2 = -0.80$  (ps)<sup>2</sup>/km, 入射脉冲脉宽为 1 ps, 三阶色散参量  $\beta_3 = 0.1$  (ps)<sup>3</sup>/km。图 3 表示两基本孤子在线双折射光纤 ( $B = 2/3$ ,  $\delta_w = 0.40$ ) 的两个偏振轴传输一个孤子周期的脉冲图像。图 3 清楚地表明, 由于三阶色散的作用, 两脉冲的压缩不再与图 1、2 时两脉冲同步压缩的情况一样, 慢轴上的光脉冲 (曲线 1) 压缩效果比快轴的光脉冲 (曲线 2) 强。而且此时的慢孤子的压缩比没有三阶色散时在相同的传输距离处的压缩要强。这说明三阶色散已打破两偏振轴上的同步压缩, 并以牺牲一偏振轴的压缩来换取另一偏振轴的更好压缩。这从另一侧面来说, 三阶色散的引入, 使要获取相同压缩比的光纤长度缩短。图 4 表示慢孤子在圆双折射光纤 ( $B = 2$ ,  $\delta_w = 0.66$ ) 传输一个孤子周期时, 三阶色散参量  $\delta_p$  大小对压缩的影响。曲线 1 代表  $\delta_p = 0.03$ , 曲线 2 代表  $\delta_p = 0.02$ 。从图中很清晰

地看到,三阶色散参量越大,对脉冲压缩贡献越大。

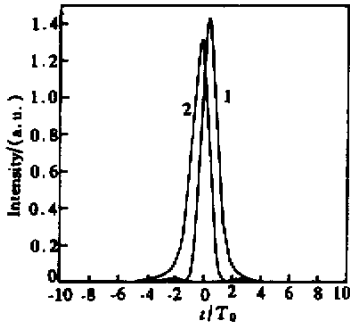


Fig. 3 Pulse shapes of two polarization axes over a distance of a soliton period in linearly birefringent fiber with third-order dispersion ( $\delta_p = 0.02$ ). Curve 1 represents slow soliton, curve 2—fast soliton

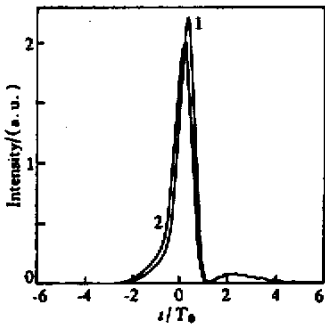


Fig. 4 Slow soliton shape over a distance of a soliton period in circularly birefringent fiber with different values of the third-order dispersion. Curve 1 represents  $\delta_p = 0.03$ , curve 2— $\delta_p = 0.02$

产生如此压缩效果的机理是:当不考虑三阶色散效应时,群速度色散效应与自相位调制效应相平衡,偏振模色散与交叉相位调制效应相平衡,两偏振脉冲产生自捕获效应,将保持孤子包络互不走离地传输下去。此时慢轴孤子频率蓝移,快轴孤子红移<sup>[4,5]</sup>。当三阶色散引入后,由三阶色散系数表达式

$$\beta_3 = d\beta_2/d\omega \quad (3)$$

可知,对于慢孤子频率蓝移( $d\omega > 0$ ),光纤中三阶色散的系数为正时( $\beta_3 > 0$ ),有 $d\beta_2 > 0$ ,在负色散区就意味着 $|\beta_2|$ 在减少,这说明光纤非线性在进一步加强,慢孤子得到增强压缩。对于快孤子频率红移,即 $d\omega < 0$ ,因而 $d\beta_2 < 0$ ,在负色散区就意味着 $|\beta_2|$ 在增大,光纤非线性效应在减弱,因而快孤子脉冲压缩被削弱。对于负三阶色散,情况刚好相反。这就说明了三阶色散与交叉相位调制效应的联合作用使某一偏振轴上的光脉冲压缩得到增强而另一偏

振轴的光脉冲的压缩受到抑制。而且随着三阶色散效应越大,脉冲的群速度色散系数飘移 $d\beta_2$ 越大,对某一偏振轴光脉冲的压缩越强。这可从数值模拟中得到证实。

## 2) 正负三阶色散参量对压缩的影响

采用图3的模拟参量,除了三阶色散参量取值由正值取为负值,曲线1仍代表慢孤子,曲线2代表快孤子,模拟结果如图5所示。图5表明,当三阶色散为负值时,压缩结果与图3相反,作为被压缩的信号光交换了角色。此时是以抑制慢轴的压缩来获取快轴的压缩。图5快孤子的压缩效果与图3的慢孤子的压缩效果等价。有些研究<sup>[11]</sup>表明正三阶色散会导致脉冲压缩性能的严重下降,具体表现在压缩比的下降和压缩纤长的增加,但是对本方法来说,不管是正负三阶色散在基于孤子自捕获效应压缩中均对脉冲压缩有贡献,只不过是交换偏振轴脉冲的压缩角色。对于光脉冲压缩而言,选取哪个作为快慢轴的脉冲信号意义不大。因此本压缩方法将突破三阶色散参量符号的束缚。

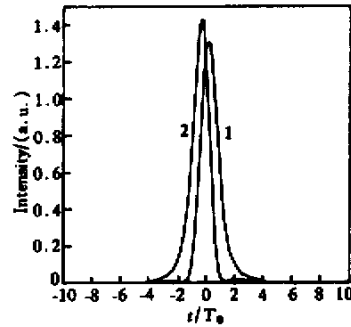


Fig. 5 Pulse shapes of two polarization axes over a distance of a soliton period in linearly birefringent fiber with negative values of third-order dispersion ( $\delta_p = -0.02$ ). Curve 1 represents slow soliton, curve 2—fast soliton

## 4 最佳压缩比和纤长

对圆双折射光纤,在考虑三阶色散效应( $\delta_p = 0.02$ )情况下,数值模拟了慢孤子随传输距离改变的压缩比( $F_c$ )改变。模拟发现,尽管三阶色散扭曲脉冲时域的波形,并辐射色散波,然而在与光纤非线性的共同作用下能对某一偏振轴光脉冲进行增强压缩。随传输距离的增加,偏振模色散使色散波与主脉冲分离,主脉冲会自身调整形状减少脉冲变形。模拟30个孤子周期(孤子周期 $Z_0 = \frac{\pi}{2} \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$ )后看脉冲

波形,色散波已经脱离主峰飘离,主脉冲基本恢复对称性。但这是以降低脉冲压缩比和增长最佳纤长为代价的,这在压缩技术中是不可取的。故一般对波形要求不太高的情况下,从压缩比和纤长这两个参量中平衡选取两者的值。图 6 是模拟一个孤子周期脉冲压缩的结果。在半个孤子周期处,压缩比已经较大,此后压缩比在较长的一端传输距离内保持不变,一个孤子周期后压缩比仍会上下抖动,但压缩比增量不大。故采用本方法压缩脉冲时,不必刻意追求最高压缩比,选取半孤子周期为纤长比较合适。

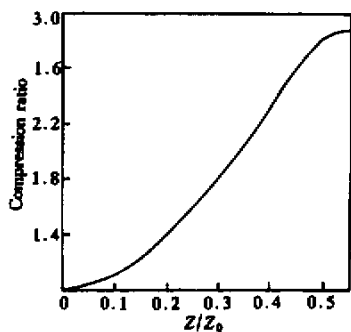


Fig. 6 The relationships between pulse compression ratio and fiber distance

**结论** 研究了强双折射光纤中对沿偏振主轴入射的脉冲进行压缩的方法,解决了低能量脉冲压缩过程中脉冲走离现象的问题。当考虑三阶色散时,三阶色散与光纤的非线性(主要是交叉相位调制效应)的共同作用对一偏振轴光脉冲进行增强压缩而抑制另一偏振轴光脉冲。正三阶色散与交叉相位调制共同作用可提高慢孤子压缩,负三阶色散与交叉相位调制共同作用可提高快孤子压缩。且随着三阶色散参

量的增大,压缩效果会更明显。这对脉冲压缩技术有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P *et al.*. Extreme picosecond pulse narrowing by means of soliton effect in single-mode optical fibers. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(5): 285~291
- [2] Jin R, Liang M, Khitrova G *et al.*. Compression of bright optical pulses by dark soliton. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7): 494~496
- [3] Hickmann J M, Gomes A S L. Dynamics of femtosecond soliton-effect optical compression in monomode fibers. *Opt. Commun.*, 1993, **97**(5): 333~336
- [4] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics* (second edition). New York: Academic Press, 1995. 260~263
- [5] Taylor J R. *Optical Solitons-Theory and Experiment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 314~377
- [6] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics* (second edition). New York: Academic Press, 1995. 50~54
- [7] Huang Hongtao, Nie Zaiqing. Numerical studies on collisions of orthogonally polarized solitons in birefringent optical fibers. *Chinese J. Laser* (中国激光), 1999, **A26**(2): 163~170 (in Chinese)
- [8] Cao Wenhua, Liu Songhao. Pulse compression for strengthened soliton effect based on cross phase modulation. *Science in China (E)* (中国科学 E 辑), 2000, **30**(3): 230~239 (in Chinese)
- [9] Xu Wencheng, Liao Changjun, Guo Qi *et al.*. The compression effect of picosecond soliton in fibers with slowly decreasing dispersion. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1994, **23**(4): 327~334 (in Chinese)
- [10] Cao Wenhua, Yao Aimin, Liao Changjun *et al.*. Soliton-effect compression of picosecond pulses in optical fibers with slowly decreasing dispersion. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(2): 118~124 (in Chinese)
- [11] Chan K C, Liu H F. Effect of third-order dispersion on soliton-effect pulse compression. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(1): 49~51

## Ultrashort Pulse Compression in Strongly Birefringent Optical Fibers

Chen Weicheng Xu Wencheng Luo Aiping Zhang Shumin Guo Qi Liu Songhao  
(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

(Received 30 September 2000; revised 16 April 2001)

**Abstract:** Compression of ultrashort pulses in strongly birefringent optical fibers is studied. When the third-order dispersion is considered, one of polarization pulse compression is enhanced and the other polarization pulse compression is suppressed due to the interaction of the third-order dispersion and nonlinear effects. Slow soliton is compressed in the fiber with positive third-order dispersion, fast soliton is done in the fiber with negative third-order dispersion. The large value of third-order dispersion parameter, the more evident the compression effect.

**Key words:** birefringent optical fiber; pulse compression; third-order dispersion