

# 色散渐减光纤组成的环形镜对高阶孤子的理想压缩\*

张书敏<sup>1,2</sup> 吕福云<sup>1</sup> 董法杰<sup>1</sup> 董孝义<sup>1</sup>

(1 南开大学物理科学学院, 天津 300071)

(2 河北师范大学物理学院, 石家庄 050016)

**摘要** 利用数值模拟方法证明, 采用色散渐减光纤组成的非线性光纤环形镜不仅可压缩高阶光孤子, 而且能有效地消除压缩后脉冲的底座、提高光脉冲的输出能量. 研究表明, 对于一确定的色散渐减光纤, 只要选取不同环形镜长度, 即可对不同阶数的高阶孤子进行理想压缩. 且孤子阶数越高, 所需最佳环形镜长度越短、压缩后光脉冲的峰值强度越大、能量透射率越低. 研究同时发现, 环形镜的功率分束比存在一最佳值, 在此值下所得压缩后的光脉冲不仅具有较大的峰值及能量透射率, 且不含底座.

**关键词** 光脉冲压缩; 色散渐减光纤; 高阶孤子; 光纤环形镜

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

产生变换极限的超短光脉冲源是未来高码率光通信系统的一个重要组成部分. 在众多基于光纤非线性效应产生超短光脉冲的方法中, 人们常采用孤子效应脉冲压缩技术来压缩高阶孤子<sup>[1-5]</sup>. 其基本原理是光纤中的自相位调制效应 (SPM) 和反常色散区群速度色散效应 (GVD) 的相互作用, 使得高阶孤子在传输过程中会经历一初始窄化的过程, 对于给定的初始光脉冲, 只要适当选取光纤长度, 即可实现对光脉冲的最佳压缩. 尽管该方法以其技术简单和较易获得高压缩比的超短光脉冲而倍受青睐. 但该技术有一较大的缺点, 即因 SPM 引起的啁啾仅在脉冲中心部分是线性的, 所以脉冲两翼的能量不被压缩, 故使压缩后的光脉冲伴随一大的底座. 该底座不仅使相邻光脉冲在传输过程中互相重叠而降低通信系统的性能, 同时使压缩后的光脉冲包含能量较少. 为了克服这一缺点, 人们常采用谱滤波器等方法来消除底座<sup>[6,7]</sup>, 但该方法不仅技术复杂, 且底座亦不能被很好抑制. 本文通过数值模拟方法证明, 利用色散渐减光纤 (DDF) 组成的非对称光纤环形镜 (NOLM) 的孤子开关特性<sup>[8,9]</sup> 与孤子效应脉冲压缩技术相结合来压缩高阶孤子, 不仅可有效抑制压缩后光脉冲的底座, 还可提高压缩后光脉冲的能量. 研究表明, 在色散渐减参量一定的情况下, 压缩不同阶数的孤子光脉冲须采用长度不同的非线性光纤环形镜, 且孤子阶数越高, 所需最佳环形镜长度越短、

压缩后光脉冲的峰值强度越大、能量透射率越低. 研究同时发现, 对一确定的非线性光纤环形镜, 功率分束比存在一最佳值, 在此值下所得压缩后的光脉冲不仅具有较大的峰值及能量透射率, 且不含底座.

## 1 理论模型

图 1 为非线性光纤环形镜的工作原理图. 高阶孤子光脉冲从端口 1 入射到长度为  $L$  的色散渐减光纤中, 功率分束比为  $\alpha:(1-\alpha)$  的环形镜耦合器使得输入光脉冲被分为能量不等的两部分, 各自沿顺、逆时针方向传播. 根据环形镜的耦合方程可知<sup>[10]</sup>

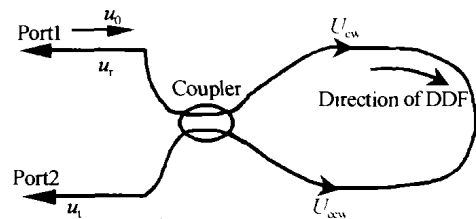


图 1 工作原理图

Fig. 1 Schematic setup of the NOLM

$$u_{cw} = \sqrt{\alpha}u_0 \quad (1)$$

$$u_{ccw} = i\sqrt{1-\alpha}u_0 \quad (2)$$

式中,  $u_0, u_{cw}, u_{ccw}$  分别代表耦合器各端口的归一化光场振幅.

当光场进入环形镜后, 其演化过程可由皮秒光脉冲在色散渐减光纤中传输时所遵从的归一化非线性薛定谔方程描述<sup>[11]</sup>

$$i\frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{1}{2}p(\zeta)\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2u = 0 \quad (3)$$

式中,  $u = (\gamma L_D)^{1/2}q$  为光场的归一化振幅,  $\zeta = z/L_D$  为归一化距离,  $\tau = \frac{t-z/v_g}{T_0}$  为归一化时间,  $p(\zeta) = \beta_2(\zeta)/\beta_2(0)$  代表色散系数,  $L_D = \frac{T_0^2}{\beta_2(0)}$  为光纤的色

\*河北省教育厅科研计划(2001241)、国家自然科学基金重点(No. 60137010)和国家自然科学基金(No. 69977012)项目  
022-23509856 Email: zhangsm\_sd@eyou.com  
收稿日期: 2004-02-24

散长度,  $\beta_2(0)$  为初始的二阶群速度色散系数,  $v_g$  为中心频率处的群速度,  $T_0$  为初始脉冲在  $1/e$  功率处的半宽度,  $q$  为归一化前的慢变包络振幅,  $\gamma$  为非线性系数. 式(3)左边的第二、三项分别表示群速度色散效应和自相位调制效应. 由于在计算中所需的环形镜长度较短, 且研究对象选为皮秒光脉冲, 式(3)中我们忽略了光纤损耗、高阶色散及高阶非线性效应对光脉冲压缩效果的影响.

为方便起见, 本文中不考虑脉冲的初始啁啾对光脉冲压缩效果的影响, 即选取理想的无啁啾的高阶孤子作为初始输入条件

$$u_0 = N \operatorname{sech}(\tau) \quad (4)$$

式中,  $N$  为高阶孤子阶数. 式(3)可通过分步傅里叶方法求解. 当沿顺、逆时针的光脉冲各自沿环形镜传输一周后重新在耦合器处相遇时, 所产生的透射波  $u_t$  和反射波  $u_r$  可由下列逆向耦合矩阵方程求出<sup>[11]</sup>

$$\begin{pmatrix} u_t \\ u_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\alpha} & i\sqrt{1-\alpha} \\ i\sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u'_{cw} \\ u'_{ccw} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中,  $u'_{cw}, u'_{ccw}$  分别表示  $u_{cw}, u_{ccw}$  各自绕环形镜传输一周后返回耦合器时的归一化振幅.

## 2 计算结果和分析

### 2.1 $\beta, \alpha$ 一定时的情况

为简单起见, 我们首先考虑色散渐减参量  $\beta$  及功率分束比  $\alpha$  一定时, 非线性光纤环形镜对高阶孤子的压缩效应. 本文中假设光纤色散变化是线性减少的, 即:  $p(\zeta) = \frac{(1-\beta)}{\beta L} \zeta + 1$ , 并选取中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 脉宽为  $3 \text{ ps}$  的四阶孤子作为研究对象. 色散渐减光纤在上述波长处的参量值为:  $\beta_2(0) = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\gamma = 2 \text{ (Wkm)}^{-1}$ . 图 2(a) 分别给出了色散渐减参量  $\beta = 2$ 、功率分束比  $\alpha = 0.6$ 、环形镜长度  $z = 0.53 \text{ km}$  (由  $\zeta = z/L_D$  知  $\zeta = 0.38$ , 此时透射脉冲峰值最大且不含底座) 时, 四阶光孤子的初始波形、沿顺、逆时针传输一周且耦合之前的波形、及透射波的波形图. 从图中可以看出, 与初始波形相比, 沿顺时针方向传输的光脉冲在环形镜中传输一周后得到较强的压缩, 但所得波形含有一较大的底座; 而沿逆时针方向传输的光脉冲在环形镜中传输一周后得到压缩较小; 透射波不仅压缩比大于前两种波, 形状亦为不含底座的理想光脉冲. 对这一现象我们可以这样理解, 当光脉冲在色散渐减光纤中传输时, 沿顺时针方向传输的光脉冲(CW)除了受到高阶孤子的压缩效应作用以外, 同时因其所经历的 GVD 效应沿传输方向逐渐减小, SPM 效应相对逐渐增强, 较

强的 SPM 作用虽使光脉冲的压缩效应增强, 却使压缩后的光脉冲含有较大底座; 反之, 沿逆时针方向传输的光脉冲(CCW)因其所经历的 GVD 效应沿传输方向逐渐增大, SPM 效应相对减弱, 因而在传输过程中获得的压缩较小; 由于光纤环形镜的不对称性, 使得相向传输的光脉冲在环形镜中传输一周后获得不同程度的相移, 这样, 当两者在耦合器处发生干涉时, 只要适当选取环形镜的长度, 就会使位于中心频率处的光脉冲干涉加强, 而使脉冲前、后沿处的干涉减弱. 再利用非线性光纤环形镜的开关特性, 就可得到峰值较大, 不含底座的理想光脉冲.

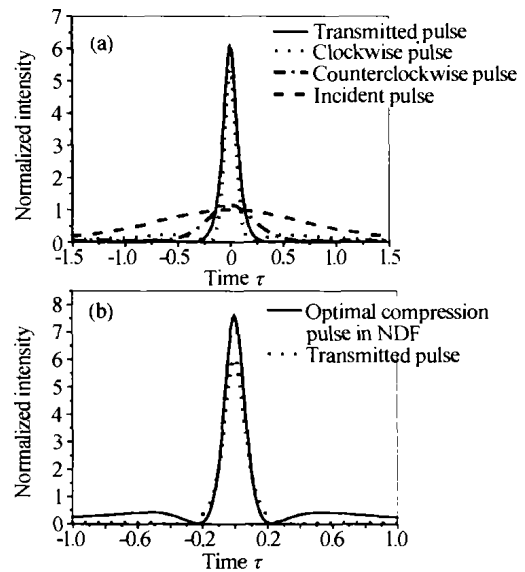


图 2 (a) 入射光脉冲、沿顺、逆时针传输的光脉冲及透射光脉冲的波形图, (b) 四阶孤子在负色散光纤中传输达到最佳压缩及在环形镜中传输时所得透射波的波形图

Fig. 2 (a) Temporal shapes of the incident optical pulse, the clockwise pulse and the counterclockwise traveling pulses before recombination and the transmitted pulse, (b) Temporal shapes of optimal compression pulse propagating in negative dispersion fiber (NDF) and the transmitted pulse in the fiber loop mirror of the fourth-order soliton

作为比较, 图 2(b) 同时给出了四阶孤子在负色散光纤中传输达到最佳压缩 ( $\zeta = 0.23$ ) 时的波形图及在光纤长度为  $\zeta = 0.38$  的环形镜中传输所得透射波的波形图. 从图 2(b) 可以看出, 尽管因环形镜的长度大于四阶孤子在负色散光纤中传输达到最佳压缩时的长度使透射波的压缩比有所降低, 但其很好地消除了利用孤子效应压缩光孤子时所产生的底座. 进一步计算表明, 压缩后包含在主脉冲的能量也由入射光脉冲能量的 21% 提高到了 51.1%.

由非线性相移的关系式<sup>[11]</sup>:  $\phi = i\gamma|u|^2L$  (其中,  $u$  为归一化振幅,  $L$  为环形镜长度) 可知, 要想使高阶光孤子经过环形镜后得到理想压缩, 压缩阶数不同的光孤子须采用不同长度的环形镜. 图 3(a) 给出了达到最佳压缩时所需的环形镜长度(曲线 a) 及

压缩脉冲的峰值强度(曲线 *b*)随孤子阶数的关系变化曲线. 作为比较,图 3(b)给出了达到最佳压缩

时,能量透射率<sup>[12]</sup> ( $T = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |u_i(\zeta, t)|^2 d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} |u(0, \tau)|^2 d\tau}$ )随孤子阶

数的变化曲线. 从图中可以看出,孤子阶数越高,达到理想压缩时所需环形镜的长度越短,压缩后光脉冲的峰值强度越大,能量透射率越低. 这些均是由于随孤子阶数的增加,SPM 效应逐渐增强的结果.

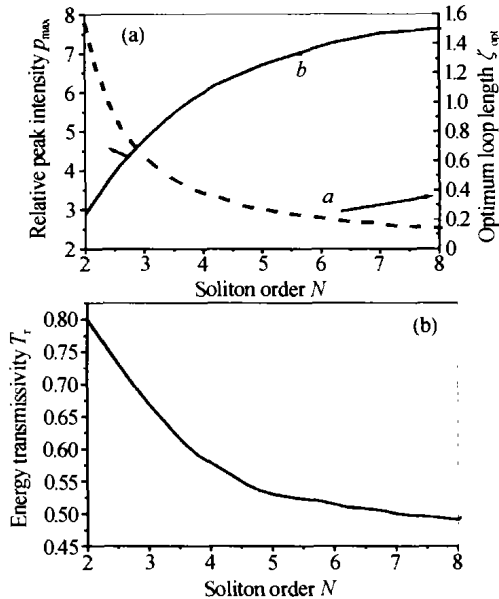


图 3 (a)最佳环形镜长度(曲线 *a*)及相对峰值功率(曲线 *b*)随孤子阶数变化的关系曲线,(b)能量透射率随孤子阶数变化的关系曲线

Fig. 3 (a) Variation of the optimum loop length (curve *a*) and the relative peak intensity  $p_{max}$  (curve *b*) with the soliton order  $N$ , (b) Variation of the energy transmissivity  $T_r$  with the soliton order  $N$

## 2.2 $\alpha$ 对压缩效果的影响

为了进一步研究环形镜的功率分束比对高阶孤子压缩效应的影响,图 4(a)示出了不同  $\alpha$  值下,四阶光孤子分别达到最佳压缩时的波形图. 从图中可以看出,无论是  $\alpha = 0.65$  还是  $\alpha = 0.55$ ,其压缩后所得光脉冲的峰值均小于  $\alpha = 0.6$  时的情形. 图 4(b)同时给出了色散渐减参量  $\beta = 2$  且达到最佳压缩时,光脉冲的相对峰值强度(曲线 *a*)及能量透射率(曲线 *b*)随环形镜的功率分束比的变化关系曲线. 从图 4(a)及图 4(b)可以看出,当色散渐减参量一定时, $\alpha$  存在一大于 0.5 的最佳值( $\alpha = 0.6$ ),在此值下所得压缩后的光脉冲不仅峰值较高,能量透射率最大,且不含底座. 对这一现象我们可以这样解释,由式(1)、(2)可知,若  $\alpha > 0.5$ ,即相当于  $|u_c| > |u_{cc}|$ ,即入射光的大部分能量在色散渐减的光纤中传输,而色散渐减光纤的作用是相当于为在常规光纤中传输的光孤子提供一净增益. 同样,入射光脉冲的小

部分能量在色散渐增的光纤中传输,而色散渐增光纤的作用是相当于为在常规光纤中传输的光孤子提供一净损耗. 所以,要想得到理想的压缩,增益大于损耗是必要的. 但  $\alpha$  值不宜太大,这是因为,随着  $\alpha$  值的逐渐增大,相向传输两光波的能量差亦逐渐增大,干涉效应减弱,亦即非线性光纤耦合器的光开关特性减弱. 这样,尽管此时峰值功率有所增加,但由于较大的 SPM 作用会使底座增大,能量透射率降低,所得到的压缩光脉冲质量较差.

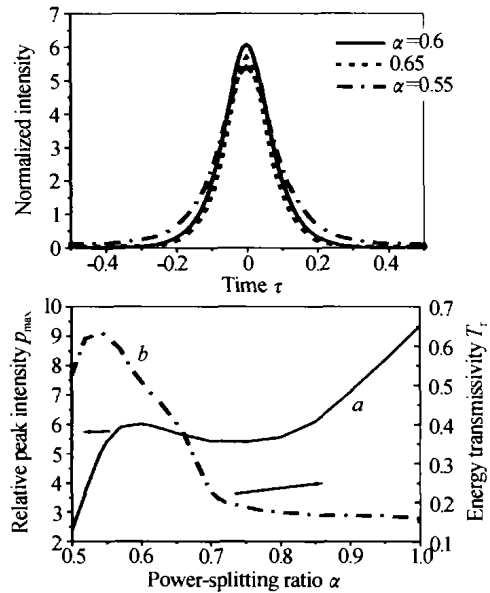


图 4 (a) $\alpha = 0.6, 0.65$  及  $0.55$  时,四阶光孤子达到最佳压缩时的波形图,(b)相对峰值强度(曲线 *a*)及能量透射率(曲线 *b*)随环形镜的功率分束比的变化关系曲线

Fig. 4 (a) Temporal shapes of optimal compression pulse of the fourth-order soliton with different  $\alpha = 0.6, 0.65$  and  $0.55$ , (b) Variation of the relative peak intensity  $p_{max}$  (curve *a*) and the energy transmissivity  $T_r$  (curve *b*) with the power-splitting ratio of the loop

## 3 结论

本文从求解皮秒光脉冲在色散渐减光纤中传输时所遵从的归一化非线性薛定谔方程出发,研究了色散渐减光纤组成的环形镜对高阶孤子的压缩效应. 发现利用环形镜的开关特性与孤子效应脉冲压缩技术相结合的方法来压缩高阶孤子,可有效地消除压缩后脉冲的底座、提高光脉冲的输出能量. 研究表明,在色散渐减参量一定的情况下,对不同阶数的高阶孤子可利用不同长度的光纤环形镜对其进行压缩,且孤子阶数越高,所需最佳环形镜长度越短、压缩比越大、光脉冲的能量透射率越低. 研究同时发现,环形镜的功率分束比对高阶孤子的压缩有一定影响,在色散渐减参量一定的情况下,功率分束比存在一最佳值,在此值下工作的光纤环形镜,不仅使压缩后的光脉冲同时具有较高的峰值功率和最大的能量透射率,而且可使其不含底座.

## 参考文献

- 1 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics. (Second Edition). San Diego London Boston: Academic Press, 1995, Chap. 6
- 2 曹文华, 姚爱民, 廖常俊, 等. 色散渐减光纤中皮秒脉冲的孤子压缩效应. 光学学报, 1994, **14**(2): 206 ~ 212  
Gao W H, Yao A M, Liao C J, et al. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(2): 206 ~ 212
- 3 张书敏, 徐文成, 罗爱平, 等. 光纤中飞秒基孤子压缩的一种改进性方法. 光子学报, 2001, **30**(3): 280 ~ 283  
Zhang S M, Xu W C, Luo A P, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(3): 280 ~ 283
- 4 徐文成, 张书敏, 罗爱平, 等. 色散渐减光纤中超短光脉冲的绝热压缩. 光学学报, 2002, **22**(4): 389 ~ 392  
Xu W C, Zhang S M, Luo A P, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 389 ~ 392
- 5 曹文华, 刘颂豪. 光纤中孤子效应脉冲压缩三色阶色散的抑制. 中国激光, 1999, **26**(1): 220 ~ 223  
Gao W H, Liu S H. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(1): 220 ~ 223
- 6 李智红, 娄采云, 王桐, 等. 利用半导体光放大器进行光脉冲消基座的理论研究. 光子学报, 2002, **31**(3): 285 ~ 293  
Li Z H, Lou C Y, Wang T, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(03): 285 ~ 293
- 7 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics. (Second Edition). San Diego London Boston: Academic Press, 1995, Chap. 5
- 8 Wong W S, Namiki S, Margalit M, et al. Self-switching of optical pulses in dispersion-imbalanced nonlinear loop mirrors. *Opt Lett*, 1997, **22**(5): 1150 ~ 1152
- 9 Steele A L, Hemingway J P. Nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion decreasing. *Opt Commun*, 1996, **123**(4-6): 487 ~ 491
- 10 Doran N J, Wood D. Nonlinear optical loop mirror. *Opt Lett*, 1988, **13**(1): 56 ~ 58
- 11 Agrawal G P. Application of Nonlinear Fiber Optics. San Diego, CA: Academic, 2001, Chap. 6
- 12 Silva M G da, Nobrega K Z, Sombra A S B. Analysis of soliton switching in dispersion-decreasing fiber couplers. *Opt Commun*, 1999, **171**(4-6): 351 ~ 364

## Optimal Compression of Higher-order Soliton with a Nonlinear Optical loop Mirror Constructed from Dispersion-decreasing Fiber

Zhang Shumin<sup>1,2</sup>, Lu Fuyan<sup>1</sup>, Dong Fajie<sup>1</sup>, Dong Xiaoyi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071

<sup>2</sup> Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016

Received date: 2004-02-24

**Abstract** A nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion-decreasing fiber is proposed for simultaneous compression and pedestal suppression of higher-order soliton. Numerical simulation indicates that with the different soliton order, we can use the different fiber length for optimum compression. It is found that the higher of the soliton order, the shorter of the fiber length for optimal compression, with the greater peak intensity and the lower energy transmissivity. Our research results also show that the power-splitting ratio of the loop for optimal compression can be obtained, under this condition, the peak intensity and energy transmissivity of the pulse compressed is greater, and the pedestal is efficiently suppressed.

**Keywords** Optical pulse compression; Dispersion-decreasing fiber; Higher-order soliton; Optical loop mirror

**Zhang Shumin** was born in 1965. She received her B. S. degree from Hebei Normal University in 1987 and M. S. degree from South China Normal University in 2000, respectively. Now, she is a Ph. D. candidate in Institute of Physics, Nankai University. Her current research interests include optical pulse compression in fibers and fiber laser.

