**文章编号**：0258-7025(2008)12-1951-04

# 基于色散渐减、非线性渐增原理的脉冲压缩

张 浩 谢 康 姜海明
（电子科技大学光电信息学院，四川 成都 610054）

**摘要** 从理论上推导了色散渐减同时非线性渐增原理可以压缩脉冲的结论，并利用对称分步傅里叶方法研究了在不同色散渐减与非线性渐增比值下所得压缩脉冲的压缩比与基座性能，数值结果表明，非线性渐增原理最有利于脉冲压缩，而已有的基于色散渐减原理压缩脉冲的方法是压缩比最低的情况。通过和色散减渐方法压缩脉冲相比，表明利用非线性渐增方法可以在获得几乎相同的压缩比与更小的基座能量的同时将所需光纤长度缩短为原来的一半。

**关键词** 导波与光纤光学；非线性渐增光纤；分步傅里叶方法；色散渐减光纤；绝热孤子压缩
**中图分类号** TN 25 **文献标识码** A **doi**：10.3788/CJL20083512.1951

# Pulse Compression in Dispersion Decreasing Fibers with Increasing Nonlinearity

Zhang Hao Xie Kang Jiang Haiming
(*School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan* 610054, *China*)

**Abstract** Soliton pulse compression based on dispersion decreasing fiber (DDF) with increasing nonlinearity is proved according to the theoretical deduction. Some characteristics of compressed pulse such as compression factor and pedestal energy are analyzed through the symmetrized split-step Fourier method. It is found that the final compression ratio achieved by a nonlinearity increasing fiber is the highest while the ratio achieved by a dispersion decreasing fiber is actually the smallest. Through comparing with dispersion decreasing method, the results show that almost the same compression ratio and lower pedestal energy can be achieved with half of the original fiber length by nonlinearity increasing method.

**Key words** guided wave and fiber optics; nonlinearity increasing fiber; split-step Fourier method; dispersion decreasing fiber; adiabatically soliton compression

## 1 引 言

1987 年，Tajima 首次提出色散渐减光纤(DDF)的概念[1]，目的是用于补偿光孤子在传输过程中由于光纤损耗引起的脉冲展宽。1988 年，Kuehl[2]通过脉冲在非一致性光纤中传输的基态孤子解，提出了色散参量逐渐减小可以使孤子脉冲宽度得到压缩的结论。许多色散渐减光纤压缩脉冲的理论[3~5]与试验[6]研究都证实了基于色散渐减光纤的绝热孤子压缩是光脉冲压缩的一种有效途径，可以得到小基座、高质量的压缩脉冲。最近，张子蕾等[7]数值模拟计算了非线性渐增光纤(NIF)压缩脉冲的压缩比、基座等性能。考虑色散与非线性系数同时变化的绝热孤子压缩研究报道较少。本文从描述脉冲在光纤中传输的非线性薛定谔方程(NLSE)出发，从理论上证明了色散渐减同时非线性渐增原理能够压缩光脉冲的结论，并利用数值模拟研究了在不同非线性

**收稿日期**：2008-01-23；**收到修改稿日期**：2008-04-24
**基金项目**：国家杰出青年基金(60588502)和国家自然科学基金(60607005)资助项目。
**作者简介**：张 浩(1984—)，男，河北人，硕士研究生，主要从事非线性光纤光学、光子晶体光纤方面的研究。
E-mail：zhterran@qq.com
**导师简介**：谢 康(1965—)，男，重庆人，长江学者特聘教授，博士生导师，主要研究方向为非线性光学与微波光电子学。
E-mail：kangxie@uestc.edu.cn

渐增与色散渐减比值下压缩脉冲所得到的压缩比和基座能量等性能。另外，研究表明，二氧化硅光纤的非线性系数大小随 Ge，F 元素的掺杂浓度的变化而变化[8]，而对于光子晶体光纤非线性系数的大小随空气孔直径 $d$ 和空气孔间距 $\Lambda$ 的变化而变化[9]。这就给制作非线性系数沿轴向变化的光纤提供了可能。

## 2 理论模型

皮秒脉冲在无损耗的反常色散光纤中的传输可由归一化的非线性薛定谔方程描述为[10]

$$\mathrm{i}\frac{\partial u}{\partial \xi}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial^2 \tau}+|u|^2 u=0, \tag{1}$$

式中 $u=NU$，$U$ 为脉冲电场包络的归一化慢变振幅；$\xi=z/L_{\mathrm{d}}$ 和 $\tau=(t-z/L_{\mathrm{d}})/T_0$ 分别为归一化传输距离和随脉冲以群速度 $v_{\mathrm{g}}$ 移动的参考系中的归一化时间量度；参量 $N^2=L_{\mathrm{d}}/L_{\mathrm{nl}}$，$N$ 为孤子阶数，色散长度 $L_{\mathrm{d}}=T_0^2/|\beta_2|$，非线性长度 $L_{\mathrm{nl}}=1/\gamma P_0$，$\beta_2$ 和 $\gamma$ 为光纤的二阶色散系数和非线性系数，$T_0$ 和 $P_0$ 为初始脉冲宽度和功率。

在色散、非线性参数延轴向变化的非一致性光纤中，其传输方程经过简单的推导可以得到

$$\mathrm{i}\frac{\partial u}{\partial \xi}+\frac{1}{2}P(\xi)\frac{\partial^2 u}{\partial^2 \tau}+R(\xi)|u|^2 u=0, \tag{2}$$

式中 $P(\xi)=\dfrac{|\beta_2(\xi)|}{|\beta_2(0)|}$，$R(\xi)=\dfrac{\gamma(\xi)}{\gamma(0)}$。

在(2)式中令

$$v(\xi,\tau)=\left(\sqrt{R(\xi)}/\sqrt{P(\xi)}\right)\cdot u(\xi,\tau),$$

并设 $\eta(\xi)=\int_0^{\xi}P(y)\mathrm{d}y$，经过适当推导整理后可以得到

$$\mathrm{i}\frac{\partial v}{\partial \eta}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2}+|v|^2 v=\mathrm{i}\left(\frac{1}{2RP}\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}\xi}-\frac{1}{2P^2}\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\xi}\right)v=\mathrm{i}g(\xi)v, \tag{3}$$

(3) 式右边代表增益项，当增益 $g(\xi)>0$ 时，脉冲可以得到压缩[11]。欲使 $g(\xi)>0$，可使 $\dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\xi}<0$ 同时 $\dfrac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}\xi}>0$，也就是色散系数渐减同时非线性系数渐增。从理论上证明了色散渐减同时非线性渐增原理可以压缩光脉冲的结论。

## 3 数值模拟结果及讨论

为了研究非线性渐增和色散渐减对光脉冲压缩的影响，利用分步傅里叶算法[10]对(2)式进行数值计算。根据绝热孤子压缩理论，如果光纤长度足够长从而使光脉冲在整个传输过程中保持绝热，则最终脉冲压缩比为[4]

$$W=\frac{T_0}{T_1}=\frac{\gamma(L)}{\gamma(0)}\times\frac{|\beta_2(0)|}{|\beta_2(L)|}=R\times P, \tag{4}$$

式中 $T_1$ 为光纤末端脉冲的半峰全宽(FWHM)，$L$ 为光纤长度。$P$ 和 $R$ 分别为色散和非线性系数的变化倍数。考虑皮秒脉冲在光纤中的压缩。文献[3] 指出对于色散渐减光纤，线性渐减是最佳选择。同时，文献[7] 指出对于非线性渐增光纤，非线性系数符合双曲函数递增可以达到最优压缩效果。所以在模拟中，采用色散线性递减和非线性双曲递增的形式。色散线性渐减和非线性双曲渐增的函数形式分别为[3,7]

$$P(\xi)=\frac{|\beta_2(\xi)|}{|\beta_2(0)|}=1-K_1\xi, \tag{5}$$

$$R(\xi)=\frac{\gamma(\xi)}{\gamma(0)}=\frac{1}{1-K_2\xi}, \tag{6}$$

将 $P=\dfrac{|\beta_2(0)|}{|\beta_2(L)|}$ 和 $R=\dfrac{\gamma(L)}{\gamma(0)}$ 以及 $\xi=L$ 代入(5)，(6) 式可以得到

$$K_1=\left(1-\frac{1}{P}\right)\Big/L,\quad K_2=\frac{R-1}{R\times L}。 \tag{7}$$

数值模拟中取输入脉冲为一阶双曲正割孤子，$u=N\mathrm{sech}(\tau)$，$N=1$，为了便于和已有的利用 DDF 压缩脉冲的方法相比较，选取和文献[4] 相同的最大压缩比 $W=18.1$。图 1 给出了不同 $P/R$ 下经过不同光纤长度 $6L(L_{\mathrm{d}},3L_{\mathrm{d}},2L_{\mathrm{d}},L_{\mathrm{d}})$ 的非一致性光纤所达到的最终压缩比。其中 $P$ 的取值从18.1 每隔 0.1 减小到 1，由(4) 式可得，相应 $R=\dfrac{18.1}{P}$。为了使图更清晰，坐标横轴采用了对数分布。图的最左端 $\dfrac{P}{R}=18.1$ 对应色散渐减光纤，图的最右端 $\dfrac{P}{R}=\dfrac{1}{18.1}$ 对应非线性渐增光纤，两端中间对应色散渐减同时非线性系数渐增的非一致性光纤。从图中可以看到当光纤长度 $L$ 较短($3L_{\mathrm{d}},2L_{\mathrm{d}},L_{\mathrm{d}}$) 时，随着非线性渐增的引入，最终压缩比显著增强，特别是对于 $L=3L_{\mathrm{d}}$ 长度的光纤在图 1 的最右端接近最大压缩比 18.1。而对于同样长度的 DDF 其压缩比在 3 以下。由于图 1 的最右端对应的是非线性渐增光纤的情况，所以图 1 表明在光纤长度一样时，利用非线性渐增比利用非线性渐增同时色散渐减以及单纯色散渐减都能获得更大的压缩比，特别是当光纤长度比较短时，利用非线性渐增原理的优势更加明显。

图 1 最左端对应的色散渐减光纤是不同 $P/R$

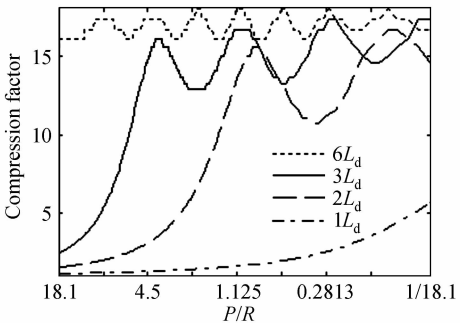


图 1　不同 $P/R$ 下，经过不同长度的非一致性光纤达到的最终压缩比

Fig. 1　Compression factor with different ratios of $P$ to $R$ through axially nonuniform optical fibers of different lengths

中压缩比最低的情况。和已有的利用 DDF 压缩脉冲的方法相比较，只需 $2L_d$ NIF 就可以接近利用 $6L_d$ DDF 才能达到的压缩比 16[4]。由图可见，当光纤长度 $L$ 增加到 $6L_d$ 时，不同 $P/R$ 下得到的压缩比差别不大。

当光纤长度较短时随非线性递增的引入可以更快地达到最大压缩比其原因是，自相位调制（SPM）作用可以展宽频谱，使脉冲前后沿产生不同的频率分量（前沿红移、后沿蓝移），同时这些新的频率分量在反常色散区传播速度不同（蓝移快过红移），从而使后沿追赶前沿，导致脉冲压缩。当 SPM 产生的压缩效应大于色散导致的脉冲展宽效应时，脉冲得到压缩。如果色散渐减光纤的长度比较短（比如 $2L_d$），一方面使非线性作用的距离缩短，减少了新频率分量的产生；另一方面色散的减小减弱了反常色散的环境，从而使脉冲不能得到充分的压缩。如果在这时引入非线性渐增，一方面增强了非线性作用从而产生了更多的新频率分量；另一方面反常色散的环境得以保持，得到了更大的压缩比。

衡量脉冲质量的一个重要指标是基座能量比 $E_{ped}$[4]

$$E_{ped}(\%) = \frac{|E_{total} - E_{sech}|}{E_{total}} \times 100\%, \qquad (8)$$

式中 $E_{total}$ 为脉冲总能量，$E_{sech}$ 为与脉冲有相同峰值功率 $P_{peak}$ 和脉宽 $T(1/e$ 处）的双曲正割脉冲的能量，$E_{sech} = 2P_{peak}T$。图 2 给出了不同 $P/R$ 下经过不同长度 $6L_d$，$3L_d$，$2L_d$，$L_d$ 的非一致性光纤所得到脉冲的基座能量百分比 $E_{ped}$。可以看到除了光纤长度 $L = L_d$ 的情况，其他三种光纤长度均在 $P = 1$，$R = 18.1$ 处，即非线性渐增光纤处得到了最小值。另外，当 $L = 3L_d$ 时，利用非线性渐增光纤得到了基座能量为2.23%的光脉冲，和已有的色散渐减光纤压缩脉冲相比，小于利用 $L = 6L_d$ 色散渐减光纤的情况（大约为 5%[4]）。

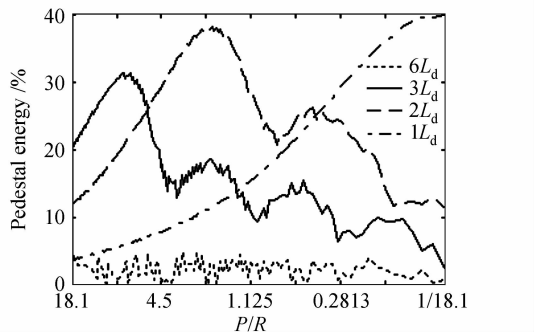


图 2　不同 $P/R$ 比值下，经过不同长度的非一致性光纤所得到的脉冲基座能量百分比

Fig. 2　Pedestal energy with different radios of $P$ to $R$ through axially nonuniform optical fibers of different lengths

可以看出非线性渐增在绝热孤子压缩中的重要作用，即随着非线性渐增的不断引入，最终压缩比增强同时基座能量降低，直到其极端情况——非线性渐增光纤——压缩比达到最高，基座能量降到最低。这表明非线性渐增原理最有利于孤子脉冲压缩。

图 3 与图 4 分别对比了不同长度的 NIF 和 DDF 压缩脉冲的最终压缩比和基座能量。这里 NIF 和 DDF 的理论压缩比均取为18.1，即对于 NIF 取 $R = 18.1$，对于 DDF 取 $P = 18.1$。由图 3 可以看出 NIF 对应压缩比的振荡比 DDF 强烈，但是振荡的范围并不大，而且在光纤长度大于 $3L_d$ 时就可以接近18.1，反观 DDF 需要长度大于 $6L_d$ 时才能接近 18.1。

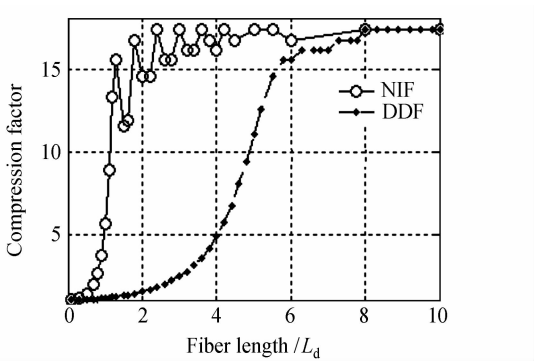


图 3　不同长度下 NIF 和 DDF 得到的脉冲压缩比

Fig. 3　Comparison between compression factors of NIF and DDF with different fiber lengths

由图 4 的基座能量比来看，在 NIF 长度超过 $3L_d$ 后基座能量基本稳定在 5% 以下，十分接近 $6L_d$DDF 的水平。所以综合来看，NIF 仅需 $3L_d$ 就

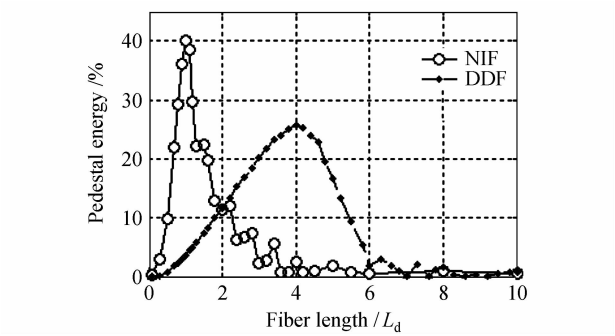


图 4 不同长度下 NIF 和 DDF 得到的基座能量对比

Fig. 4 Comparison between pulse pedestal energies of NIF and DDF with different fiber lengths

能达到与 $6L_d$ DDF 相同的脉冲压缩比和基座能量。如果取 $\beta_2(0)=-20\ \mathrm{ps^2/km}$，$T_0=3$ ps，由 $L_d=\frac{T_0^2}{|\beta_2(0)|}$ 得 $L_d=0.45$ km，则可将所需光纤长度由 2.7 km减少为1.35 km。当前限制利用色散渐减光子晶体光纤压缩脉冲的一个重要问题是色散渐减光子晶体光纤具有很高的损耗。2007 年，Travers 等[12]报道了经过改进后的色散渐减光子晶体光纤的损耗仍然有30 dB/km，如果利用非线性渐增原理压缩脉冲，按上述分析只需原长度的一半，在损耗系数不变的情况下减少了损耗，有望获得更高的压缩比。

## 4 结 论

研究了在不同色散渐减与非线性渐增比值下利用绝热孤子压缩方法所得压缩脉冲的压缩比与基座性能，并阐明了非线性渐增在绝热孤子压缩中所起的重要作用。结果表明，非线性渐增光纤有利于脉冲压缩，而色散渐减光纤是压缩比最低的情况；另外，与已有的利用色散渐减光纤压缩光脉冲相比，利用非线性渐增光纤可以在光纤长度减小一半的情况下获得几乎相同的脉冲压缩比和更小的基座能量。

## 参 考 文 献


1 K. Tajima. Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(1):54～56

2 H. H. Kuehl. Solitons on an axially nonuniform optical fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(3):709～713

3 Amir Mostofi, Hamid Hatami-Hanza, Pak L. Chu. Optimum dispersion profile for compression of fundamental solitons in dispersion decreasing fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(4):620～628

4 Mark D. Pelusi, Liu Hai-feng. Higher order soliton pulse compression in dispersion-decreasing optical fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(8):1430～1438

5 Zhang Shumin, Xu Wencheng, Luo Aiping *et al.*. Enhanced compression of femtosecond soliton in fibers with slowly decreasing dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(7):599～602
张书敏，徐文成，罗爱平 等. 色散缓变光纤中飞秒光脉冲的增强压缩[J]. 中国激光，2001，**A28**(7):599～602

6 Jia Dongfang, Tan Bin, Wang Zhaoying *et al.*. Study of soliton pulse with small pedestal based on adiabatic soliton compression effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):166～170
贾东方，谈 斌，王肇颖 等. 基于绝热孤子压缩效应的小基座孤子脉冲研究[J]. 光学学报，2006，**26**(2):166～170

7 Zhang Yilei, Wang Ziyu. Pulse compression in nonlinearity increasing fibers [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(9):1128～1131
张以蕾，王子宇. 基于非线性渐增原理的脉冲压缩研究[J]. 光电子·激光，2007，**18**(9):1128～1131

8 Jia Guangming, Jia Dongfang, Li Shichen. Highly nonlinear optical fibers and their applications [J]. *Study on Optical Communications*, 2003, **1**:43～46
贾光明，贾东方，李世忱. 高非线性光纤及其应用[J]. 光通信研究，2003，**1**:43～46

9 Liu Jie, Yang Changxi, Claire Gu *et al.*. A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1569～1574
刘 洁，杨昌喜，Claire Gu 等. 一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构[J]. 光学学报，2006，**26**(10):1569～1574

10 Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. 3rd edition. Beijing: World Publishing Corporation, 2001. 51～149

11 Pavel V. Mamyshev, Stanislav V. Chemikov, Dianov E. M.. Generation of fundamental soliton trains of high- bit-rate optical fiber communication lines [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(10):2347～2355

12 J. C. Travers, J. M. Stone, A. B. Rulkov *et al.*. Optical pulse Compression in dispersion decreasing photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20):13203～13211