

色散渐减光纤的脉冲压缩研究*

刘俭辉 丁永奎 谭 莉 胡智勇 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2003 年 3 月 26 日收到, 2003 年 9 月 24 日收到修改稿)

介绍了色散渐减光纤的绝热孤子压缩(ASC)过程, 分析结果表明利用线性渐减的色散渐减光纤(DDF)对飞秒基态孤子进行绝热压缩可以得到高质量的压缩脉冲, 但用于压缩的 DDF 长度很长, 因此又提出 DDF 的高阶孤子($1 < N \leq 2.1$)脉冲压缩技术, 以在较短的 DDF 长度下获得较大压缩比和高质量的压缩脉冲.

关键词: 色散渐减光纤, 绝热孤子压缩, 脉冲压缩, 高阶孤子

PACC: 4265S, 4281D, 8120J

1. 引言

飞秒超短光脉冲的产生是高速光时分复用(OTDM)系统中的关键技术之一, 也是应用于超快物理过程测量的重要技术. 半导体激光器是一种比较好的超短光脉冲源, 但它通常只能直接产生皮秒脉冲, 如果要使用超快飞秒或亚皮秒脉冲, 则须对这些脉冲做压缩处理. 利用色散渐减光纤(dispersion decreasing fibers, DDF)压缩脉冲宽度是一种新的脉冲压缩技术, 它通过控制光纤中的非线性传输特性来实现压缩^[1], 不需要高的脉冲功率, 且压缩脉冲没有基座, 因此是一种很有发展前途的技术^[2,3]. 本文首先介绍了 DDF 的绝热孤子压缩过程, 然后对 DDF 中的高阶孤子效应进行了分析, 将绝热孤子压缩(adiabatic soliton compression, ASC)技术与高阶孤子效应相结合, 以优化 DDF 的脉冲压缩效果.

2. 色散渐减光纤中的脉冲压缩

2.1. 绝热孤子压缩

ASC 也称为绝热脉冲压缩, 这种压缩技术是将基态孤子输入光纤, 在微弱的能量扰动下通过保持其基态孤子的稳定性来实现脉冲压缩的. 基态孤子在无损耗反常色散光纤中能够传播无限长的距离而

保持其形状和脉宽.

假设基态孤子对于弱能量扰动是稳定的, 在传播过程中保持孤子状态, 则在距离 z 处的孤子脉宽 $T_0(z)$ 可表示为^[4]

$$T_0(z) = \frac{\beta_2(z)}{\beta_2(0)} \cdot \frac{\gamma(0)}{\gamma(z)} \cdot \frac{T_0(0)}{G}, \quad (1)$$

式中 $T_0(0)$ 为输入脉冲的 $1/e$ 脉宽, $G (= e^{-\alpha z})$ 为光纤的损耗系数, $\beta_2(0)$ 和 $\beta_2(z)$ 分别为光纤输入端和 z 处的色散参量, $\gamma(0)$ 和 $\gamma(z)$ 分别为光纤输入端和 z 处的非线性系数.

由(1)式可以看出, $|\beta_2(z)| < |\beta_2(0)|$ 时(如采用 DDF 光纤), 就能实现对输入脉冲的压缩^[5-9]. 而在这个过程中, 脉冲的能量基本保持不变, 即压缩的过程是绝热的.

飞秒脉冲在 DDF 中的传播过程可由下面的归一化非线性薛定谔方程(NLSE)来描述^[10]:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2} P(\xi) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + N^2 \exp(-\alpha L_d \xi) |U|^2 U = 0, \quad (2)$$

其中 $u(\xi, \tau)$ 为脉冲电场包络的慢变振幅, $\xi = z/L_d$ 和 $\tau = (t - z/v_g)/T_0$ 分别为归一化传输距离和随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中归一化时间量度, z 为物理传输距离, T_0 为脉冲宽度, 色散长度 $L_d = T_0^2/|\beta_2|$, α 为光纤的线性损耗系数, 参量 $N^2 = L_0/L_{NL} = (\gamma P_0 T_0^2)/|\beta_2|$, 参量 $P(\xi) = |\beta_2(\xi)/\beta_2(0)|$ 为沿光纤长度渐减的归一化色散系数, DDF 的渐减

* 国家自然科学基金(批准号 69877012)资助的课题.

形式通常有五种函数来表示^[2], L_{DDF} 为 DDF 的长度, $W_{eff} = \beta_2(0) \beta(L_{DDF})$ 为输入端与输出端色散参数的比值, 它决定了最大脉冲压缩比, 通常称为有效放大因子, ξ 为归一化传输距离.

图 1 是由(1)式计算出的按照线性、余弦、高斯、指数、双曲函数递减的 DDF 中理想脉宽在 DDF 中的变化, DDF 长度为 $L_{DDF} = 20L_d$. 由图 1 可以看出, 双曲形 DDF 对脉冲的压缩与长度成线性关系, 由(2)式可知, 指数函数递减的 DDF 能够补偿由于损耗引起的脉冲展宽, 所以, 人们最初认为双曲线和指数形 DDF 很适于绝热孤子压缩, 但随着研究的深入发现^[2] 指数、双曲形 DDF 并不能保证压缩过程的绝热, 与线性、高斯形 DDF 相比, 压缩质量要差一些.

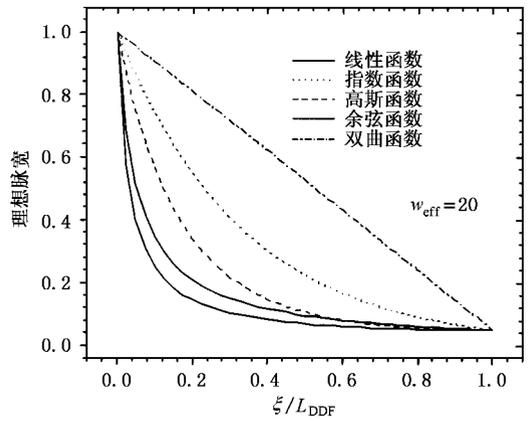


图 1 DDF 长度与理想压缩脉宽关系曲线

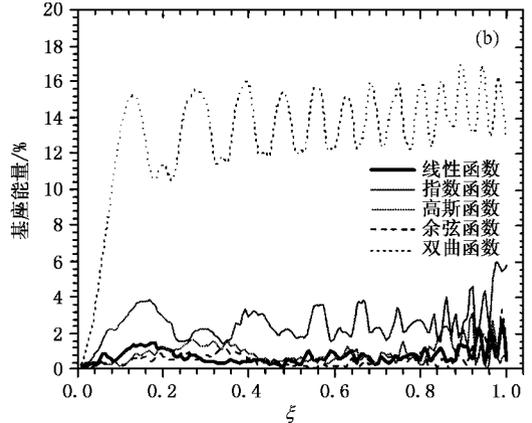
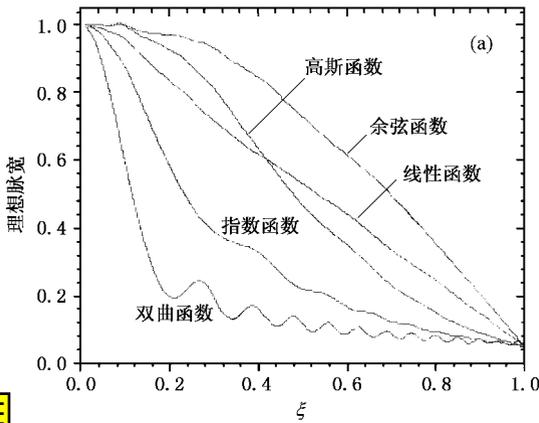


图 2 脉冲压缩宽度及基座能量在无损耗 DDF 中的变化

通过数值计算(2)式所示的归一化 NLSE, 可以得到基态孤子在 $L_{DDF} = 20L_d$, $P(\xi)$ 分别为五种函数形式渐减的无损耗 DDF 中传播过程中的脉宽变化情况, 如图 2(a) 所示. 可以看出, 基态孤子在进入线性、余弦及高斯渐减的 DDF 后, 脉宽变化比较平滑, 与图 1 所示的理想情况比较一致, 近乎绝热地压缩脉冲. 而脉冲在双曲和指数形式的 DDF 中传播时, 由于色散系数在初始阶段的渐减速率较大, 使脉宽产生振荡结构, 因此, 基态孤子由于脉宽压窄过快, 会逐渐发展为高阶孤子的传播. 通过计算我们发现, 如果增大 DDF 的长度, 这种振荡结构的间隔及幅度都会减小, 逐渐逼近图 1 所示的理想情况.

基座能量参数(%)代表基座能量所占输出脉冲总能量的百分比, 用于衡量脉冲压缩后的质量. 图 2(b) 为基态孤子在五种函数渐减形式的 DDF 中传输时基座能量随传输距离的变化. 可以看出, 以指数和

双曲形式色散渐减的 DDF 使得脉冲具有很大的基座能量, 压缩质量比较差, 而基态孤子在线性、余弦和高斯形的 DDF 中传输时, 基座能量一直保持在 < 5% 的水平.

图 3 为数值计算方程式(2)所得的基态孤子脉冲用不同长度、不同函数渐减形式的 DDF 所能得到的脉宽压缩因子及基座能量情况. 压缩因子 F_C 定义为

$$F_C = T_0(0) T_0(z). \tag{3}$$

计算中忽略光纤的损耗($\alpha = 0$), 各种 DDF 的有效放大因子 W_{eff} 均为 20, 这样, 用于压缩的 DDF 色散值渐减量的不同就反应为长度的不同. 从图中曲线可以看出, 各种渐减形式的 DDF 都存在压缩因子的振荡, 这是因为脉冲离开光纤前时恰好发展为高阶孤子, 经过 DDF 尾段的传输脉宽有可能变大, 也有可能变小. 显然, 利用各种光纤都能得到 20 的压

缩比,但是从基座能量来看,要得到高质量的压缩脉冲,线性 DDF 要优于其他几种光纤,而且要求线性 DDF 的长度至少为 $8L_d$ 才能使得基座能量 $< 5\%$ 。

利用 DDF 进行 ASC 的压缩因子实际上小于 W_{eff} ,这是因为当亚 ps 脉冲输入时存在高阶效应,而当 ps 脉冲输入时,要求色散渐减的速率很大,使基态孤子能量增大很快,变成了高阶孤子的传播,因此压缩的质量变得很差。

冲压缩技术,就可以用较短的 DDF 获得较大的压缩比和较高质量的压缩效果。

2.2.DDF 中的高阶孤子($1 < N \leq 2.1$)脉冲压缩技术

DDF 中的高阶孤子脉冲压缩技术就是将较高功率($1 < N \leq 2.1$)的孤子脉冲注入到线性渐减 DDF 中。图 4 所示的是不同输入功率情况下计算出的脉冲压缩因子和基座能量与 DDF 长度的对应关系,计算时使用的参数分别为 $T_0 = 5\text{ps}$, $W_{eff} = 20$, $D(0) = 17\text{ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 光纤损耗 $\alpha = 0\text{dB}/\text{km}$ 。由图 4 可以看出,随着输入脉冲功率的增大,压缩所需用的光纤也越短,获得的压缩因子也越大,当然,压缩后的脉冲基座也较大。例如,当 $1.5L_d$ 长度的 DDF 用于压缩脉冲时, $N = 1.2$ 时,压缩倍数为 1.7,基座能量为 15%; $N = 2.1$ 时,用 $1.5L_d$ 长度的 DDF 就可得到 36 的压缩比,基座能量为 35%。如果采用较长一些的光纤,压缩后脉冲的基座能量就会 $< 15\%$ 。

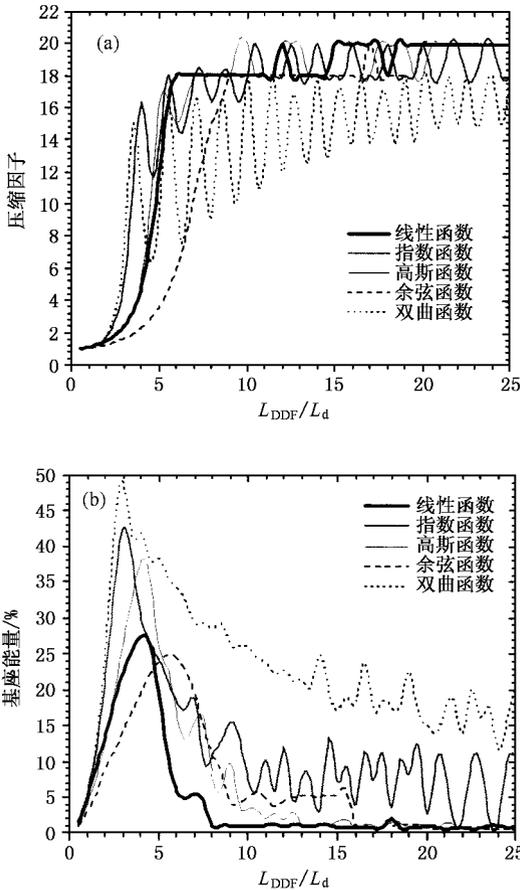


图 3 ASC 所得到的压缩因子及基座能量与 DDF 的长度对应关系

综上所述,用线性渐减的 DDF 对基态孤子进行绝热压缩比余弦、高斯形 DDF 的压缩因子大,而压缩后的脉冲质量比双曲、指数形的 DDF 要好,因此,我们认为利用线性渐减的 DDF 对 ps 基态孤子进行绝热压缩可以得到高质量的压缩脉冲。

但是我们也看到,ASC 时压缩需要的 DDF 长度很长,例如,对于 $T_0 = 5\text{ps}$ 的输入脉冲,如果 DDF 初始色散值为 $D(0) = 17\text{ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$,则要得到高质量的绝热压缩至少要 9.22km 的 DDF,这在另一方面也说明 ASC 技术不适用于较宽脉冲($> 10\text{ps}$)的压缩。因此,人们提出了 DDF 高阶孤子($1 < N \leq 2.1$)脉

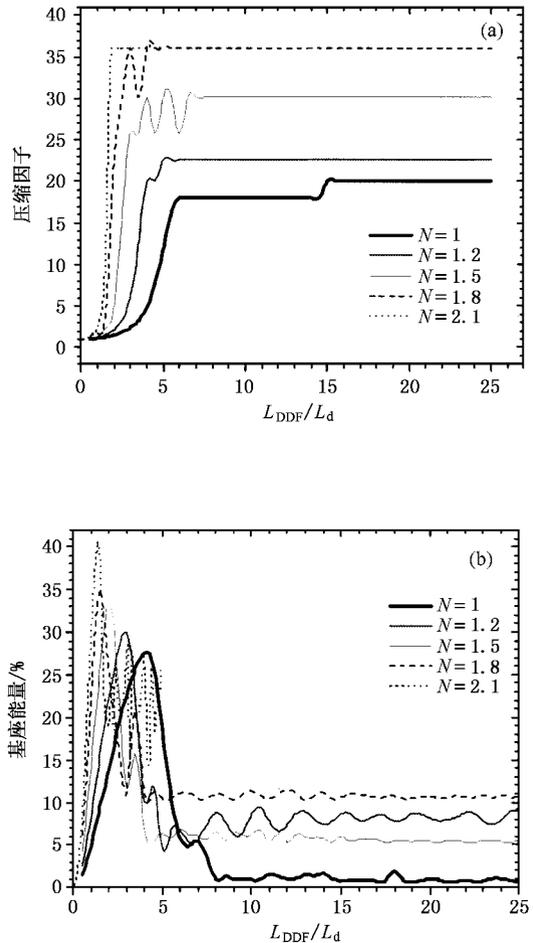


图 4 不同输入功率时用不同长度的 DDF 所得到的脉冲压缩因子及基座能量

DDF 中的高阶孤子脉冲压缩技术获得的压缩因子和脉冲质量同时受 DDF 参数(如损耗、有效放大因子)及输入脉冲特性(如脉冲形状、啁啾)的影响也较大.图 5 为 $N = 1.8$ 的孤子脉冲经过不同长度的 DDF 所获得的脉宽压缩因子随损耗的变化情况.可以看出,由于损耗的存在,压缩因子随光纤长度的增大而逐渐减小,损耗越大,压缩因子减小得越快.如用长度为 $25L_d$ 、损耗为 0.5dB/km 的 DDF 来压缩脉冲,得到的压缩因子为 0.26 ,反而将脉冲展宽了.这是因为大的损耗使得脉冲展宽较快,使渐减的色散产生的脉冲压缩速度不能补偿这种展宽.用较短的 DDF 时,压缩因子随损耗的增大而减小的程度相对较小,如用长度为 $3L_d$ 的光纤,在损耗为 0.5dB/km 时,仍能得到 16.5 的压缩因子.

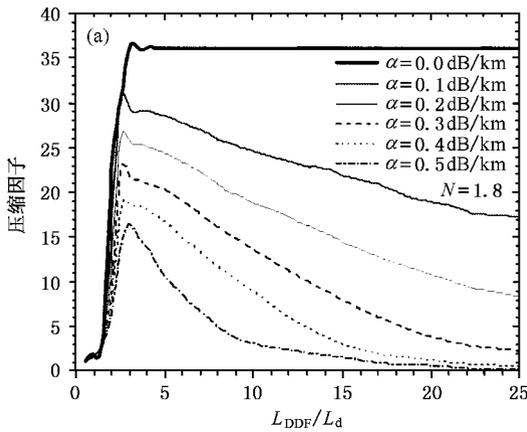


图 5 不同损耗下脉冲压缩因子随 DDF 长度的变化

以上分析都是在 DDF 的有效放大因子 $W_{\text{eff}} = 20$ 的情况下进行的.图 6 为用长度为 $L_{\text{DDF}} = 3L_d$ 的 DDF 压缩 $N = 1.8$ 的孤子脉冲所得到的压缩因子和基座能量随 W_{eff} 的变化,计算时假定光纤的损耗都为 0.2dB/km .可以看出,压缩因子基本上与 W_{eff} 成线性关系,当 W_{eff} 从 4 增加到 25 时,压缩因子也线性地从 3.2 增大到 25.8 ,而基座能量仅从 2.9 增大到 13.9 .因此,利用 DDF 的高阶孤子效应进行脉冲压缩时,脉冲的压缩因子会随光纤的有效放大因子 W_{eff} 的增大而增大,但脉冲压缩质量变差的幅度却很微小.

图 7 为在 DDF 中输入相同功率、相同脉宽的双曲正割函数(sech)脉冲($u(0, \tau) = 1.8\text{sech}(\tau)$)和高斯(Guass)脉冲($u(0, \tau) = 1.8\exp(-\tau^2)$)时所得到的压缩因子和基座能量随光纤长度的变化.由于

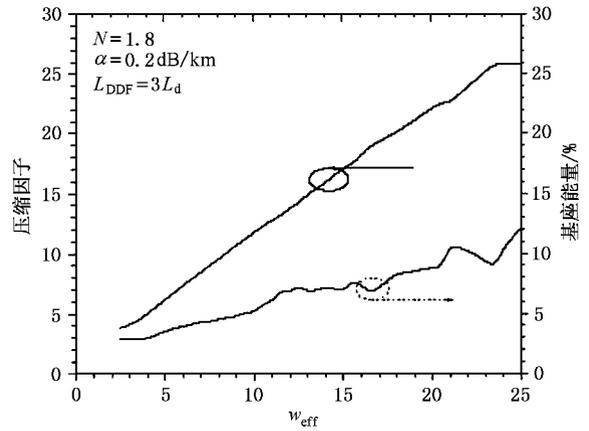


图 6 DDF 的 W_{eff} 对脉冲压缩因子及基座能量的影响

DDF 中存在损耗(假定为 0.2dB/km),因此压缩用 DDF 光纤的长度越长,获得的压缩因子会越小(输入 Guass 脉冲时获得的压缩因子比 sech 脉冲会更小些),基座能量也相对小一些.因此,无论是 sech 脉冲还是 Guass 脉冲都适用于 DDF 中的高阶孤子脉冲压缩.

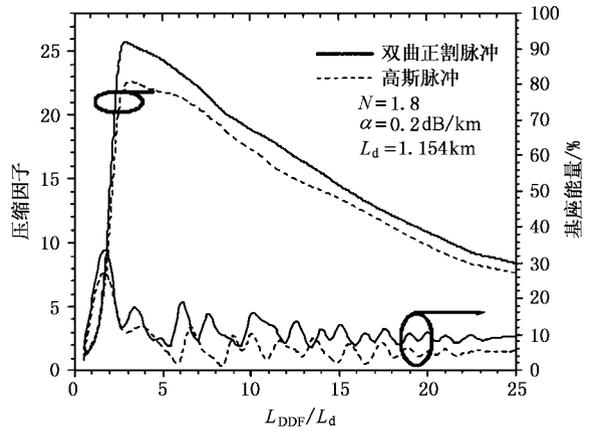


图 7 输入脉冲形状对脉冲压缩因子及基座能量的影响

3. 结 论

从上面的分析可以看出,利用线性递减形式的 DDF 对飞秒基态孤子进行绝热压缩可以得到高质量的压缩脉冲,但需要的光纤长度较长,如果将较高功率($1 < N \leq 2.1$)的孤子脉冲注入到线性渐减 DDF 中后,使绝热孤子压缩与高阶孤子压缩技术结合起来,则可以用较短的 DDF 获得较大脉冲压缩比,且压缩后的脉冲质量仍可以得到保证.

- [1] Ganapathy R 2003 *Solitons and Fractals* **15** 99
- [2] Mostofi A 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 620
- [3] Richardson D J 1995 *Electron. Lett.* **31** 1681
- [4] Pelusi M D 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 1430
- [5] Reeves-Hall P C 2000 *Electron. Lett.* **36** 622
- [6] Chemikov S V 1992 *Electron. Lett.* **28** 1842
- [7] Chemikov S V 1991 *J. Opt. Soc. Am. B* **8** 1633
- [8] Chemikov S V 1993 *Opt. Lett.* **18** 476
- [9] Mamyshev P V 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 73
- [10] Agrawal G P 2002 *Applications of Nonlinear Fiber Optics* **35** 269

Study on pulse compression in dispersion-decreasing fibers *

Liu Jian-Hui Ding Yong-Kui Tan Li Hu Zhi-Yong Li Shi-Chen

(School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering ,Laboratory of Opto-electronics Information Technical Science ,
Education Ministry of China ,Tianjin University ,Tianjin 300072)

(Received 26 March 2003 ; revised manuscript received 24 September 2003)

Abstract

This paper studies the adiabatic soliton compression of pulses in dispersion decreasing fibers(DDF). We indicate that although high quality compressed pulse could be achieved from ps fundamental soliton by using DDF with linear profile ,the required fiber length is too long to be useful. As a result ,higher order soliton compression in DDF is proposed to achieve large compression factor and high quality compression with relatively short fiber lengths.

Keywords : dispersion decreasing fiber , adiabatic soliton compression , pulse compression , higher order soliton

PACC : 4265S , 4281D , 8120J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.69877012).