

文章编号 : 0253-2239(2001)10-1161-04

# 梳状色散光纤中皮秒脉冲压缩特性研究\*

戴居丰 马晓红 于晋龙 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 利用数值法解非线性薛定谔方程, 分析了光脉冲在梳状色散光纤中的传输特性, 比较了光脉冲在几种不同的色散变化趋势的梳状色散光纤中的脉冲压缩比及脉冲质量, 提出了高阶孤子压缩加梳状色散光纤压缩的方法, 并初步讨论了梳状色散光纤对增益开关激光器输出脉冲进行压缩的效果。

关键词: 光脉冲压缩; 色散渐减光纤; 梳状色散光纤; 光孤子

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## 1 引 言

为适应高速光通信, 特别是光孤子通信和光时分复用系统的应用, 皮秒脉冲压缩技术日益受到重视。目前利用光纤进行脉冲压缩主要有孤子效应压缩和绝热压缩两种技术。前者可以用较短的光纤得到较高的脉冲压缩比, 但缺点是需要较高的输入功率并且压缩后脉冲质量较差; 后者利用色散渐减光纤可以得到质量很好的压缩脉冲, 但需要较长的光纤, 并且此光纤长度与入射光脉冲宽度的平方成正比。目前国内外色散渐减光纤还没有适合的商用产品, 故在实验上, 多采用梳状色散光纤代替。

本文建立了光脉冲在色散渐减光纤中和梳状色散光纤中被压缩的数学模型, 研究了不同色散渐减光纤的压缩效果, 找到最佳的色散变化形式。对梳状色散光纤代替色散渐减光纤所得到的压缩效果进行了比较。为了缩短压缩用光纤的长度, 还试验了高阶孤子在色散渐减光纤中或梳状色散光纤中的压缩效应, 以及高阶孤子压缩与色散渐减光纤脉冲压缩相组合的压缩效果, 找出一种最佳的皮秒脉冲压缩方案。

## 2 理论计算与分析

首先, 当孤子脉冲在色散变化的单模光纤中传输时, 其特性由归一化非线性薛定谔方程描述<sup>[1]</sup>:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2}\beta_2(z)\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + i|u|^2u - \Gamma u, \quad (1)$$

其中  $u(z, \tau)$  为归一化脉冲包络慢变振幅,  $\beta_2(z)$  为色散参量,  $z$  为按色散长度  $L_D$  归一化的位移, 即  $z = Z/L_D$ ,  $Z$  为传输距离。采用以群速度  $v_g$  移动的参考系, 并以脉冲初始宽度  $T_0$  进行归一化, 即  $\tau = (t - Z/v_g)/T_0$ 。定义色散长度  $L_D$  为

$$L_D = T_0^2/|\beta_2|.$$

为了提高计算的精确度, 方程中考虑了光纤损耗,  $\Gamma$  为归一化光纤损耗。假设输入脉冲光场为:

$$u(0, \tau) = N \operatorname{sech}(\tau), \quad (2)$$

其中  $N$  为孤子阶数。在色散渐减光纤中传输时脉冲被压缩, 其压缩比与光纤色散的不同变化形式有关, 常用的色散渐减光纤有线性、双曲型、指数型及高斯型, 若设光纤长度为  $L$ , 光纤输入输出端色散值之比为  $\beta$ , 即

$$\beta = \beta_2(0)/\beta_2(L). \quad (3)$$

几种光纤的色散可表示为<sup>[2]</sup>

线性  $\beta_2(z) = \left(\frac{1-\beta}{\beta L}\right)z + 1, \quad (4)$

双曲函数  $\beta_2(z) = \frac{L}{(\beta-1)z+L}, \quad (5)$

指数  $\beta_2(z) = \exp\left(-\frac{\ln\beta}{L}z\right), \quad (6)$

高斯型  $\beta_2(z) = \exp\left(-\frac{\ln\beta}{L^2}z^2\right). \quad (7)$

其图解如图 1 所示。

考虑绝热压缩 ( $N = 1$ ), 设  $\beta = 5, L = 5$ , 通过数值法解方程 (1), 可得到不同色散光纤的压缩比随光纤长度的变化, 由计算可知, 双曲函数色散渐减光纤的压缩比最大。同时为了表征压缩后脉冲质量, 可计算脉座能量 (%) 为<sup>[3]</sup>:

\* 国家自然科学基金 (69707002) 资助课题。

收稿日期 2000-04-29; 收到修改稿日期 2000-08-14

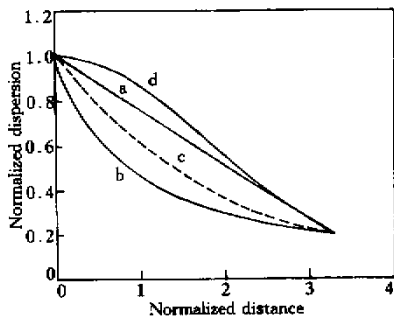


Fig. 1 The dispersion profile of four dispersion decreasing fibers. a : linear ; b : hyperbolic ; c : exponential ; d : Gaussian

$$E_{pedastal} = \frac{|E_T - E_S|}{E_T} \times 100\% , \quad (8)$$

其中  $E_T$  为脉冲总能量,  $E_S$  为与该脉冲等高等宽的孤子脉冲能量。对于色散渐减光纤的压缩效果, 许多文献已作分析, 结论是, 在色散缓变光纤中被压缩的脉冲质量好, 但需要长达几十公里的色散渐减光纤。

目前色散渐减光纤还没有适用的产品面市, 也不容易根据计算结果随意改变光纤的色散变化类型, 因此人们提出用梳状色散光纤来代替<sup>[4]</sup>, 即取不同长度的普通单模光纤和色散位移光纤交替连接在一起, 使其平均色散按渐减规律变化。段数越多, 其色散累积值越接近色散渐减光纤, 但由于段数的增加使附加损耗增加, 从而削弱压缩效果, 因此如何选择光纤色散变化规律及光纤段数是设计梳状色散光纤达到最佳压缩效果的关键。图 2 为按 (4) 式~(7) 式色散变化规律设计的梳状色散光纤的压缩效果。其中, 初始脉宽为 16 ps,  $N = 1$ ,  $L = 3.3$ ,  $\beta = 5$ , 光纤总段数为 20。可以看出, 当光纤的平均色散在光纤近端下降较快时, 最终的压缩比较大, 双曲函数色散

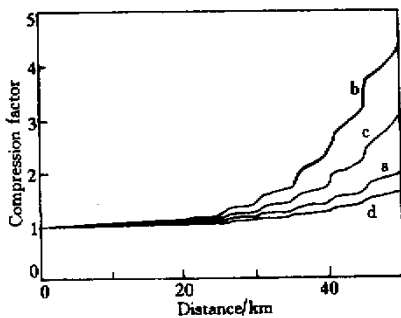


Fig. 2 Pedestal energy of compressed pulses in four dispersion decreasing fibers. a : linear ; b : hyperbolic ; c : exponential ; d : Gaussian

变化就是这种情形。设每个接头损耗为 0.05 dB, 不同段数的双曲函数梳状色散光纤的压缩比数值计算结果如图 3 所示。考虑附加的接头损耗, 当段数增加时, 总的压缩比将有明显减小。由计算可以得出, 选择少于 20 段光纤组成的梳状色散光纤是比较合适的。

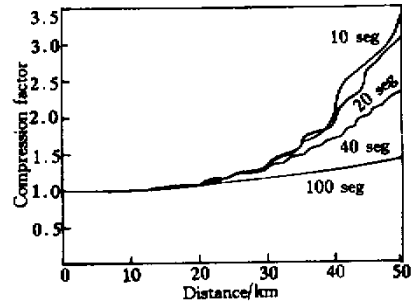


Fig. 3 The compression factor in different number of segments of hyperbolic comb-like dispersion fibers

以上的压缩是属于绝热压缩, 需要较长距离的光纤, 才能得到满意的压缩比。而且由图 2 可知, 压缩比沿光纤长度近似单调上升。而高阶孤子压缩虽然所需光纤短, 但脉冲两侧有较高的次峰和脉座, 脉冲质量差。如果在梳状色散光纤输入端加入  $N > 1$  的光脉冲, 可在较短的光纤中得到较大的压缩比, 但光纤长度需精确控制。而且  $N$  不能过大, 过大会使脉冲质量变差。另外, 由于两种色散值的光纤交替连接, 造成压缩比的较大的波动, 这与  $N = 1$  的情况有所不同。图 4 为色散变化为双曲函数且  $N > 1$  时的压缩比沿光纤长度的变化。图 5 为压缩前后光脉冲波形。

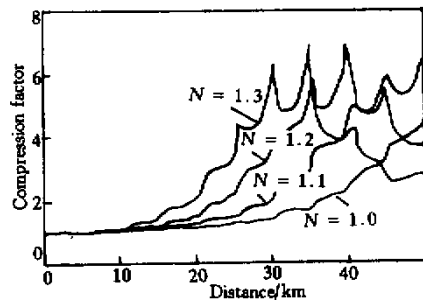


Fig. 4 Compression factor in dispersion decreasing fiber when  $N > 1$  for input pulse

进一步的计算表明, 缩短梳状色散光纤总长, 即在色散快变光纤中, 仍可得到较高的压缩比, 但会形成较大的脉冲底座, 可用非线性环形镜进一步进行消底座的处理。

图 6 为光纤总长为 20 km 的双曲函数梳状色散

光纤(20段)的组合示意图。

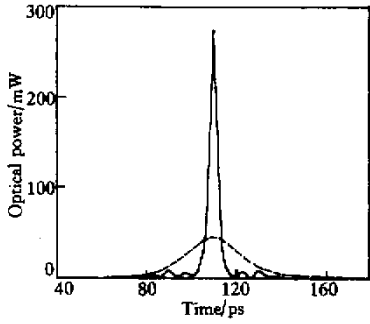


Fig. 5 Compressed optical pulse waveform versus input pulse ( $N = 1.3, L = 3.3, \beta = 5, T_0 = 16 \text{ ps}$ ). ---- :input pulse ; — :output pulse

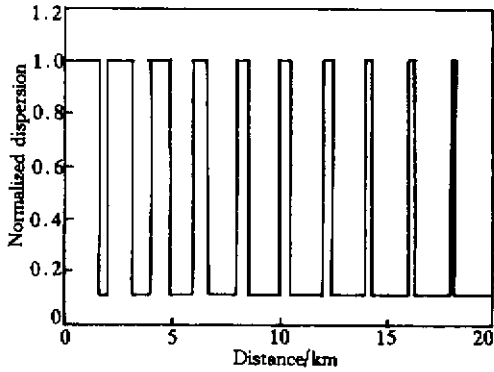


Fig. 6 Dispersion profile of comb-like fiber

增益开关分布反馈激光器是光时分复用光孤子通信系统的实用光源之一,其输出脉冲波形近似为高斯波形,并且带有较大的啁啾。在进入传输光纤之前,必须将脉冲压窄并消啁啾。下面分析增益开关脉冲在色散渐减光纤中的压缩效应。增益开关脉冲波形函数由(9)式表示。

$$u(0, \tau) = N \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\tau^2\right]. \quad (9)$$

从我们的计算中可以发现,当啁啾量  $C$  较大时,需要较大的脉冲注入功率才可能得到较好的压窄效果。这是由于当啁啾较大时,输入的脉冲在色散量较大的初始段受到较大的展宽而导致脉冲的峰值功率下降,不利于孤子压缩。另外,啁啾量较大的光脉冲的波形经过压窄后会形成较大的底座,不利于信号的传输。所以,在进行压窄前应对增益开关半导体激光器进行消啁啾处理。

图7表明,同样的输入峰值脉冲功率( $N = 1.8$ )下, $C = -2.0$ 时,20 km 光纤内得不到压缩(压缩比  $< 1$ ),而  $C = -0.5$ 时,压缩比高达13(18 km处),可见减小啁啾有利于脉冲压缩。图8给出了零啁啾高斯脉冲在不同输入脉冲峰值功率情况下的压缩效

果。由图可见,在  $N = 1.5$  时能得到较大的压缩比。

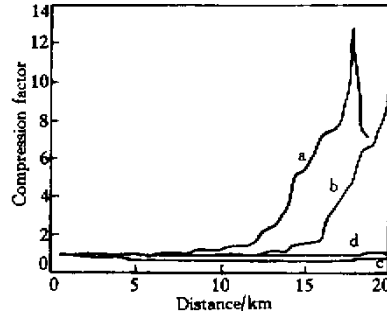


Fig. 7 The compression of the Gaussian pulse with variable chirp in the comb-like dispersion fiber. a : $N = 1.8, C = -0.5$ ; b : $N = 1.8, C = -1.0$ ; c : $N = 1.8, C = -2.0$ ; d : $N = 1.2, C = -0.5$

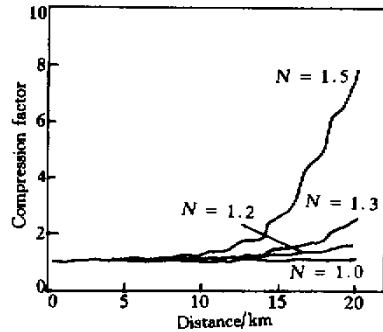


Fig. 8 The compression of the Gaussian pulse with zero-chirp in the comb-like dispersion fiber

结论 本文分析了梳状色散光纤代替色散渐减光纤的压缩效果,并设计了高阶孤子压缩与梳状色散光纤组合的光脉冲压缩方案。对增益开关分布反馈激光器的输出脉冲的压缩也作了初步的分析。

从分析中可以看出,当输入脉冲峰值功率较大或采用色散快变的梳状色散光纤时,脉冲的压缩比较大,但会形成较大的脉冲底座。

利用梳状色散光纤可以克服色散渐减光纤产品化难的问题,并且可以灵活地改变其色散分布值,达到最佳的压缩效果。

### 参 考 文 献

[1] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press Inc., 1995. 228~231

[2] Mostofi A, Hatami-Hanza H, Chu P L. Optimum dispersion profile for compression of fundamental solitons in dispersion decreasing fibers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-33**(4): 620~628

[3] Pelusi M D, Liu Haifeng. Higher order soliton pulse compression in dispersion-decreasing optical fibers. *IEEE*

*J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-33**(8):1430~1439

optical fibre source of multigigahertz soliton pulse train.

[4] Chernikov S V, Taylor J R, Kashyap R. Integrated all

*Electron. Lett.*, 1993, **29**(20):1788~1789

## Compression of Picosecond Optical Pulses in Comb-Like Dispersion Fiber

Dai Jufeng Ma Xiaohong Yu Jinlong Yang Enze

(*The College of Electronics and Information Engineering of Tianjin University, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072*)

(Received 29 April 2000; revised 14 August 2000)

**Abstract:** The propagation characteristics of optical pulses in the variable dispersion fiber is analyzed by numerically solving the nonlinear Schrödinger equation. The optical pulses compression factor and compressed pulses quality in different dispersion decreasing fibers are compared. It is calculated the compression factor of the pulses in comb-like dispersion fiber instead of dispersion decreasing fiber. To optimize the picosecond optical pulses compression, a novel method of combining of high order soliton pulse compression and dispersion decreasing fiber compression is proposed.

**Key words:** optical pulse compression; dispersion decreasing fiber; comb-like dispersion fiber; optical soliton