

文章编号: 1002-2082(2006)03-0232-03

# 色散补偿和色散位移光纤实现光脉冲压缩

杨晓萍, 王云才, 周希坚

(太原理工大学 理学院 应用物理系, 太原 030024)

**摘要:** 根据超短光脉冲在光纤中传输的非线性薛定谔方程, 模拟了不同色散参量情况下色散补偿和色散位移光纤对增益开关半导体激光器产生的光脉冲的压缩, 给出了光脉冲在经过色散补偿光纤前后的啁啾曲线。结果表明, 使用色散参量  $D$  分别为  $-150$ ,  $-180$  和  $-20$  ps/(nm·km) 的色散补偿光纤可以实现其他脉冲压缩方法的压缩效果, 最大压缩因子达到 6.09, 但色散参量越大, 所需光纤长度就越短。此外, 脉冲经过色散补偿光纤后线性啁啾几乎为零。还利用色散位移光纤对脉冲进行孤子压缩, 脉冲宽度由最初的 45 ps 减小到 1.23 ps。指出采用这 2 种光纤相结合的方法可以对光脉冲实现高效压缩。

**关键词:** 光脉冲压缩; 分步傅里叶; 色散补偿光纤; 色散位移光纤; 增益开关

中图分类号: TN929.11; O437

文献标志码: A

## Light pulse compression implemented by dispersion-compensation fiber and dispersion-shifted fiber

YANG Xiao-ping, WANG Yun-cai, ZHOU Xi-jian

(College of Science, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** According to the nonlinear Schrödinger equation on picosecond pulse transmission in optical fiber, the pulse compression at 1 553 nm in dispersion-compensation fiber and dispersion-shifted fiber were studied with numerical method. Three different dispersion values were simulated and compared. The chirp curves of the pulse before and after dispersion-compensation fiber are given. As a result, the optical pulse from gain-switched distributed-feedback laser diode can be compressed from 45.00 ps to 7.39 ps by dispersion-compensation fibers, and the larger the fiber dispersion value is, the shorter the fiber is needed to achieve the same compression effect. The pulse was further compressed using dispersion-shifted fiber from 7.39 ps to 1.23 ps with fiber dispersion value of 6.0 ps/(nm·km). The results indicate that optical pulse can be compressed very efficiently with dispersion-compensation fiber and dispersion-shifted fiber in the two consecutive modes.

**Key words:** pulse compression; split-step Fourier; dispersion-compensation fiber; dispersion-shifted fiber; gain-switching

## 引言

半导体激光超短脉冲在信息光电子学领域, 尤其在电光取样系统、超高速光时分复用(OTDM)

系统及光孤子通信系统等方面有着重要的应用。目前, 超短光脉冲源主要有: 增益开关半导体激光器、锁模半导体激光器及锁模光纤激光器等。其中增益

收稿日期: 2005-08-19; 修回日期: 2006-01-12

基金项目: 山西省自然科学基金资助(20041042); 山西省留学回国人员基金资助(200417)

作者简介: 杨晓萍(1980—), 女, 山西运城人, 太原理工大学理学院硕士研究生, 主要从事超短激光脉冲产生及压缩等方面工作。

E-mail: dlmyxp@sohu.com

开关半导体激光器由于具有结构简单,工作性能稳定、可靠,重复频率在很大范围内可调等优点成为孤子通信系统的实用光源之一。但是通常用此方法产生的光脉冲宽度较宽,且有一定的负啁啾,因此需要消啁啾并压缩后才能用于通信系统中。

对增益开关法产生的脉冲进行压缩,通常有 F-P 滤波消啁啾压缩法<sup>[1]</sup>以及利用色散渐减光纤环镜法<sup>[2]</sup>。文献[3]中采用色散补偿光纤、掺铒光纤放大器(EDFA)、单模传输光纤、色散渐减光纤及色散平坦光纤等多个步骤相结合来压缩脉冲。F-P 滤波引入的损耗比较大,并且不适用于全光纤系统。后 2 种方法理论上可以得到基座小的高质量窄脉冲,但由于色散渐减光纤拉制工艺复杂,价格昂贵,因此限制了其在实际中的广泛应用。本文采用色散补偿光纤(DCF)和色散位移光纤(DSF)来压缩光脉冲,避免了使用色散渐减光纤,方案简单,便于进行压缩实验。文中首先研究了 DCF 对光脉冲的消啁啾压缩,然后再用 DSF 进行高阶孤子压缩,最后得到 1.23 ps 的光脉冲。文献[4]在采用 DCF 压缩光脉冲时,考虑到入射光功率较小,忽略了自相位调制这一非线性作用。本文则同时考虑了自相位调制(SPM)和群速度色散(GVD)效应,从而更准确地模拟出了光脉冲在光纤中的传输情况及演化规律,并选取最佳压缩条件,为下一步光脉冲压缩实验提供了理论依据。

## 1 理论分析

描述皮秒光脉冲在光纤中传输情况的非线性薛定谔(NLS)方程为<sup>[5]</sup>

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{\alpha}{2}A + i\gamma|A|^2A \quad (1)$$

为便于数值计算,将上述方程归一化,即令

$$U(z, T) = \frac{A(z, T)}{\sqrt{P_0}}$$

$$\tau = \frac{T}{T_0}$$

$$\xi = \frac{z}{L_D} \quad (2)$$

得

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} = \frac{\beta_2 L_D}{2 T_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - i \frac{\alpha}{2} L_D U - \gamma P_0 L_D |U|^2 U \quad (3)$$

式中,  $U$  是脉冲的归一化复振幅;  $\xi$  是传输距离;  $\beta_2$  为群速度色散系数;  $L_D = T_0^2/\beta_2$  为光纤的色散长度;  $T_0$  为初始脉冲宽度(1/e 强度处);  $\tau$  为采用以群速度移动的参考系下的归一化时间坐标;  $\alpha$

为光纤损耗;  $\gamma$  为光纤的非线性系数;  $P_0$  为脉冲初始峰值功率。方程右边各项依次为 GVD 项, 光纤损耗项及 SPM 项。通常情况下, 方程(1)无解析解。本文采用分步傅里叶方法对其进行数值模拟, 以此研究光脉冲在光纤中传输时的演化过程。

### 1.1 色散补偿光纤对光脉冲的压缩

文中光脉冲由增益开关 DFB 半导体激光器产生, 脉冲宽度(半峰全宽)  $T_{FWHM} = 45$  ps。计算时所选参数如下: 光纤损耗为 0.45 dB/km, 非线性系数  $\gamma = 3.0 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 初始脉冲近似为高斯型  $u_0 = e^{-(1+i)c\tau^2/2}$ , 线性啁啾参数经测量计算为  $c = -6$ 。图 1 给出了色散参量  $D = -2\pi c\beta_2\lambda^{-2} = -180 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  时光脉冲在 DCF 中的演化过程。由图

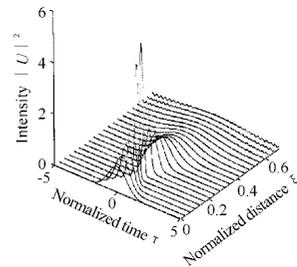


图 1 DCF 中脉冲演化图

Fig. 1 Pulse evolution in DCF

可以看出, 在传输过程中脉冲宽度逐渐变窄, 强度越来越大。在某一位置处, 脉冲得到最大程度的压缩, 脉冲强度也达到最大值, 说明在此光纤长度时, 脉冲的初始啁啾得到最佳补偿。在此之后脉冲开始展宽, 这是因为超过最佳补偿点后, DCF 又引入了过多的正色散。在  $z = 0.32L_D$  处展宽到初始宽度, 随后, 色散导致能量分布发生很大变化, 峰值渐渐消失, 脉冲形状趋于平坦。图 2 给出了不同色散参量下压缩因子随归一化传输距离的变化曲线。图 2 中

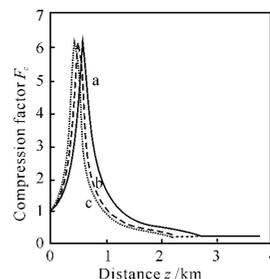


图 2 DCF 中压缩因子  $F_c$  随传输距离  $z$  的变化曲线

Fig. 2 Variation of compression factor  $F_c$

曲线  $a, b, c$  分别对应  $D = -150, -180$  和  $-200 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  时的情况。由图 2 可知,压缩因子  $F_c$  对光纤长度  $z$  存在一个最佳值,此后随着传输距离的增加,脉冲又开始展宽,这与图 1 所示情况符合。此外,以上 3 种情况下,  $F_c$  最大值可达到 6.09(此时脉冲的半峰全宽为 7.39 ps),对应的最佳光纤长度分别为 0.62 km, 0.52 km 和 0.47 km。显然,这 3 种情况实现了同样大小的色散补偿,所需光纤长度不同正是由于色散参量的差异引起的。图 3 给出了脉冲压缩前后的啁啾曲线,曲线  $a$  对应初始啁啾。由于 3 种情况下补偿效果相同,所以经过 DCF 后的啁啾曲线为同一条曲线,即曲线  $b$ 。由图 3 可见,脉冲经过 DCF 后线性啁啾减小到几乎为零(最大值为  $\delta_\omega = 1.51 \times 10^{-3}$ )。

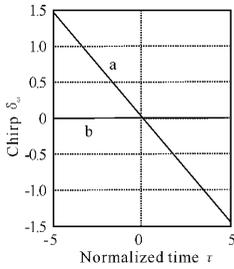


图 3 脉冲在经过 DCF 前后的啁啾曲线

Fig. 3 Pulse chirp curve before and after DCF

这说明 DCF 消啁啾效果较好,为下一步孤子压缩提供了有利条件。因为在孤子压缩中,如果脉冲初始啁啾较大,则脉冲更易于展宽,导致脉冲的峰值功率下降,不利于形成孤子压缩,并且直接对啁啾量较大的光脉冲压缩后会形成较大的底座<sup>[6]</sup>,所以,首先用 DCF 消除脉冲啁啾是非常必要的。

### 1.2 色散位移光纤对光脉冲的孤子压缩

经色散补偿光纤压缩后的光脉冲峰值功率增大,再通过掺铒光纤放大器等进一步放大后,可以利用色散位移光纤对其进行高阶孤子压缩,此时的理论计算仍根据方程(3)来进行。

由于高阶孤子在传输过程中呈现周期性,每个周期中脉冲宽度会出现一个最小值。因此,只要选择适当的光纤长度,就可以对输入脉冲进行压缩,压缩因子  $F_c$  取决于孤子阶数  $N(N^2 = \gamma P_0 T_0^2 / |\beta_2|)$ 。对于参数一定的光纤,它与脉冲的初始峰值功率  $P_0$  也有关。图 4 给出了  $F_c$  随  $N$  的变化曲线。图中光纤色散参量  $D = 6.0 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,损耗为  $0.22 \text{ dB/km}$ ,光纤长度为  $0.3L_D$  即 686.30 m。由图 4 可

以看出,在给定光纤长度条件下,随着功率即孤子阶数的增大,压缩效果越来越显著;当孤子阶数  $N$

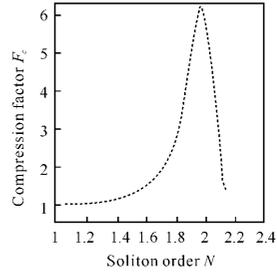


图 4 DSF 中压缩因子  $F_c$  随孤子阶数  $N$  的变化曲线

Fig. 4 Variation of compression factor with soliton order  $N$  in DSF

$= 1.98$  时,脉冲得到最大程度的压缩,压缩因子  $F_c = 6.02$ ,此时的脉冲宽度为 1.23 ps。由于高阶色散及高阶非线性效应在脉冲宽度小于 1 ps 时会变得非常显著,因此对于小于 1 ps 的脉冲进行数值模拟时就必须使用广义非线性薛定谔方程。

## 2 结论

本文根据皮秒光脉冲在光纤中传输的非线性薛定谔方程,模拟并分析了色散补偿光纤及色散位移光纤对增益开关分布反馈半导体激光器所产生的光脉冲的压缩,并对不同色散参量的光纤的压缩效果进行了比较。结果表明,初始脉宽为 45 ps,啁啾参数为  $-6$  的脉冲经过最佳长度的 DCF 后,线性啁啾基本被消除,脉冲宽度被压缩到 7.38 ps,此时脉冲强度也最大。同时发现,不同色散参量的 DCF 可以实现同一最大压缩因子,只是色散参量越大,达到同样补偿效果所需要的光纤长度越小。由于孤子效应色散位移光纤可以将脉冲进一步压缩至 1.23 ps,因此利用这 2 种光纤进行 2 步压缩,可以达到很高的压缩因子。

### 参考文献:

[1] ZHONG Shan, WU Jian, LOU Cai-yun, *et al*, Study on dechirping of pulses from gain-switched semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Semi-conductors, 1997, 18 (10):741-747.  
 [2] CAO Wen-hua, WAI P K A. Higher-order soliton compression with pedestal suppression in nonlinear optical loop mirrors constructed from dispersion decreasing fibers [J]. Opt Commun, 2003, 221:181-190.