

文章编号: 0253-2239(2002)04-0389-04

# 色散缓变光纤中超短光脉冲的绝热压缩\*

徐文成 张书敏 罗爱平 陈伟成 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

伍 剑 娄采云 高以智

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 报道了色散缓变光纤中超短光脉冲压缩效应的实验结果。采用两段长度分别为 100 m 和 500 m 的色散缓变光纤, 成功地将分布反馈激光器输出的 4.4 ps 光脉冲压缩到 1.1 ps 和 830 fs。脉冲压缩比分别为 4.0 和 5.3。研究还发现, 色散沿纵向变化较慢的光纤有利于脉冲的进一步压缩, 理论分析与实验结果一致。

关键词: 色散缓变光纤; 绝热压缩; 光脉冲产生

中图分类号: O437 文献标识码: A

## 1 引 言

利用光纤非线性效应压缩光脉冲是产生超短光脉冲的重要技术之一, 近年来受到国内外广泛重视和研究<sup>[1-3]</sup>。在众多基于光纤非线性效应产生超短光脉冲的方法中, 利用色散缓变光纤的绝热放大特性<sup>[4]</sup>压缩超短光脉冲一直被认为是一种很有发展前景的脉冲压缩技术<sup>[5-7]</sup>。理论研究结果表明, 利用这种技术不仅可以压缩皮秒光脉冲, 而且可以产生飞秒量级的超短光脉冲。目前, 这种技术在 1.55  $\mu\text{m}$  波段的超短光脉冲产生方面已有重要应用。国内在利用色散缓变光纤压缩光脉冲方面已做

了大量的理论研究工作<sup>[8-10]</sup>, 实验方面还未见报道。

本文报道利用色散缓变光纤实现脉冲压缩的实验研究。采用两段长度分别为 100 m 和 500 m 的色散缓变光纤, 成功地将分布反馈激光器输出的 4.4 ps 光脉冲压缩成 1.1 ps 和 830 fs 的光脉冲, 脉冲压缩比分别为 4.0 和 5.3。

## 2 实验装置

我们采用增益调制分布反馈激光器作为产生皮秒光脉冲的光源, 实验装置如图 1 所示。

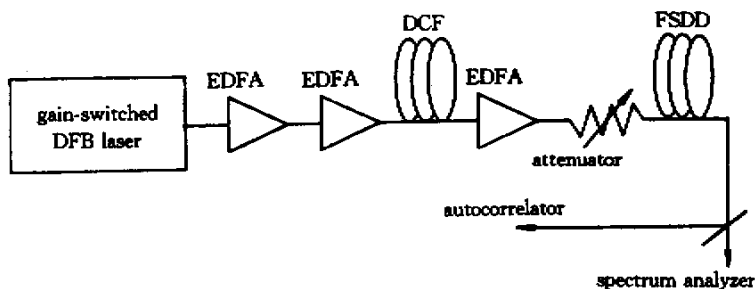


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

由于分布反馈激光器输出的是红移啁啾脉冲, 需

经色散补偿光纤进行啁啾补偿和压缩。考虑到啁啾脉冲的补偿一般对输入脉冲的能量要求较高, 且存在最优光纤补偿长度<sup>[11]</sup>。因此, 实验中选用两个掺铒光纤放大器 (EDFA) 为脉冲提供足够的能量。色散补偿光纤的长度选为 660 m。中心波长 1553 nm 处, 色散补偿光纤的色散参量为  $D = -150 \text{ ps}^2/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。这样, 增益调制分布反馈激光器能产生工作波长为

\* 广东省自然科学基金 (980030) 广东省教育厅自然科学基金 (200019) 集成光电子国家联合实验开放室基金资助课题。

E-mail: xuwch@scau.edu.cn

收稿日期 2001-03-07; 收到修改稿日期 2001-05-14

1553 nm、重复率为 2.5 GHz、脉宽为 4.4 ps 的超短光脉冲。为了研究峰值功率对压缩效果的影响,在实验装置中采用光衰减器(attenuator)来调整峰值功率的大小。随后,我们将此皮秒光脉冲耦合到长度分别为 500 m 和 100 m、色散值均从 10 ps/(nm·km) 线性减少到 0.5 ps/(nm·km) 的色散缓变光纤(FSDD)中,光脉冲的自相关曲线和频谱分别由自相关仪和光谱分析仪测量。

### 3 实验结果和分析

图 2 给出了平均功率为 27.53 mW 光脉冲耦合进入 500 m 色散缓变光纤前[图 2(a)]后[图 2(b)]实验测得的强度自相关曲线。

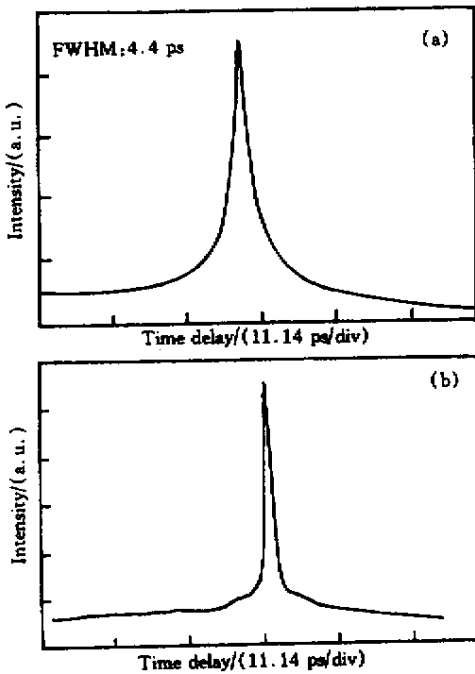


Fig.2 The autocorrelation curves of pulses in dispersion decreasing fiber with the length of 500 m. (a) Before compression ;(b) After compression

比较图 2(a)和图 2(b)可知,压缩后光脉冲明显变窄,经测量知其半宽度为 830 fs,脉冲压缩因子为 5.3。从图 2 还可以看出,压缩后的光脉冲存在一定的底座。研究分析表明,脉冲底座主要起源于两种因素,一种是输入脉冲含有初始源啁啾  $c$ ,另一种是输入脉冲不是基孤子,而是高阶孤子脉冲。因为增益调制分布反馈激光器输出的光脉冲含有初始源啁啾<sup>[1,2]</sup>,而利用色散位移光纤的色散补偿技术并不能理想地消除啁啾<sup>[1,3]</sup>。实验中我们测得的初始啁啾量约为 -1.2。理论计算与数值模拟显示<sup>[14,15]</sup>,

含有初始负啁啾( $c < 0$ )的光脉冲在光纤中传输时同样可以被压缩,且光纤存在最佳压缩长度。与不含啁啾的光脉冲的压缩效果相比,所需光纤的最佳压缩长度增长,压缩因子有所下降。由于线性啁啾只集中在脉冲的中心部分,因此,只有脉冲中心部分得到压缩,压缩后脉冲存在底座。另外,对于平均功率为 27.53 mW 的初始光脉冲,已不是基孤子脉冲输入,而是  $N = 2.07$  阶孤子输入(见后面的数值计算结果)。而高阶孤子在色散缓变光纤中传输时,脉冲是存在底座的<sup>[9]</sup>。因此,采用色散缓变光纤压缩光脉冲时,压缩脉冲存在一定的底座。

图 3 示出了脉冲压缩前[图 3(a)]及脉冲压缩后[图 3(b)]的频谱。

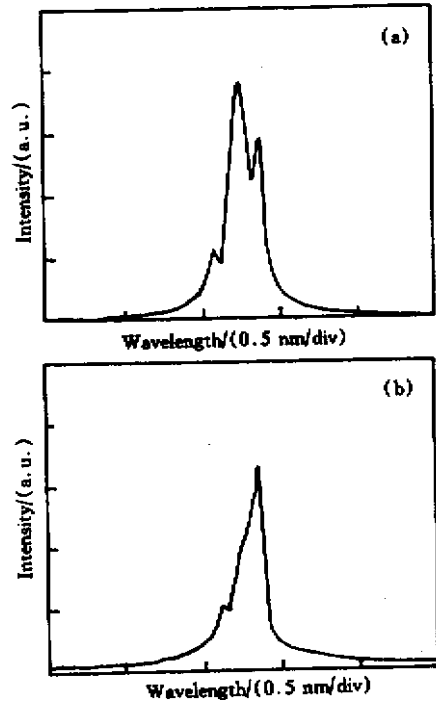


Fig.3 The spectra of pulse in dispersion decreasing fiber. Center: 1553.238 nm. (a) Before compression ;(b) After compression

从频谱图可以看出:1)压缩光脉冲偏离变换极限脉冲。这可以通过脉冲的脉宽  $\Delta\tau$  与谱宽  $\Delta\nu$  的乘积来衡量。假定输入脉冲是孤子脉冲(双曲正割波形),其值应为  $\Delta\tau \cdot \Delta\nu = 0.315$ 。本实验中,由图 2(b)和图 3(b)可分别测得压缩光脉冲的  $\Delta\tau$  和  $\Delta\nu$ ,其乘积  $\Delta\tau \cdot \Delta\nu \approx 0.1$ ,与孤子脉冲的时谱特征值 0.315 有一定的偏差,这是因为输入脉冲是高阶孤子(二阶孤子),脉冲经过色散缓变光纤的绝热放大后演化成更高阶孤子,压缩脉冲本身已不是变换极限脉冲。另外,脉冲脉宽的测量是基于对底座上的主峰进行的,测量  $\Delta\tau$  时偏小,因此,脉冲时谱值比

特征值  $0.315$  小; 2) 在脉冲压缩过程中, 随着传输距离的增加, 二阶色散越来越小, 脉宽变得越来越窄, 高阶色散和高阶非线性效应对脉冲传输的影响越来越重要, 以使脉冲在压缩过程中部分能量以色散波扩散掉, 并伴有拉曼自频移。从频谱图中可以测出脉冲主峰拉曼自频移量约为  $0.25 \text{ nm}$  (红移)。

皮秒光脉冲在色散缓变光纤中传输特性由下列归一化的非线性薛定谔方程描述<sup>[16]</sup>:

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

其中,  $u$  为归一化振幅,  $\xi$  为归一化距离。由其定义式  $\xi = z/L_D$  ( $L_D$  为色散长度) 可知, 当光纤长度为  $500 \text{ m}$  时,  $\xi$  近似为  $1.024$ 。参量  $p(\xi) = |\beta_2(\xi)|/|\beta_2(0)|$  代表光纤缓变程度。若光纤色散变化是线性减少的, 即参量  $p(\xi)$  满足关系  $p(\xi) = 1 - \theta\xi$ , 其中  $\theta$  为光纤色散变化参数。对于长度为  $500 \text{ m}$ , 色散参量  $D$  从  $10 \text{ ps}(\text{nm} \cdot \text{km})$  线性递减到  $0.5 \text{ ps}(\text{nm} \cdot \text{km})$  的光纤,  $\theta$  近似为  $0.92$ 。若输入光脉冲的平均功率为  $27.53 \text{ mW}$ , 由峰值功率与孤子阶数之间的关系式<sup>[15]</sup>:

$$N^2 = \frac{\gamma p_0 T_0^2}{|\beta_2|}, \quad (2)$$

可知, 孤子阶数  $N$  近似为  $2.07$ 。从(1)式出发, 图4用数值模拟方法给出了皮秒光脉冲在色散缓变光纤中传输时压缩比随归一化距离的变化曲线。从图4可以看出, 当归一化距离为  $1.024$  (实际光纤长度为  $500 \text{ m}$ ) 时, 压缩比  $F_c$  近似为  $6$ , 与实验结果基本一致。

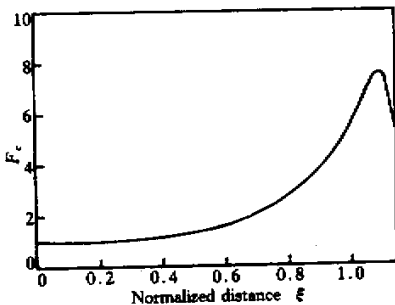


Fig.4 The relationship between pulse compression rate  $F_c$  and normalized distance  $\xi$

#### 4 峰值功率、光纤增益系数对压缩效果的影响

在脉冲压缩过程中, 我们发现脉冲的压缩效果与输入色散缓变光纤的峰值功率有关。实验时, 我

们选取平均率分别为  $27.53 \text{ mW}$ 、 $35.74 \text{ mW}$ 、 $25.45 \text{ mW}$  的三种不同情况进行研究, 结果发现与平均功率为  $27.53 \text{ mW}$  相比, 当平均功率选为  $35.74 \text{ mW}$ 、 $25.45 \text{ mW}$  时, 脉冲的压缩比均有所下降。对这一结果我们可以这样理解: 由(2)式可知, 孤子阶数与峰值功率有关。平均功率越大, 孤子阶数越高, 压缩比越大<sup>[15]</sup>, 故平均功率为  $27.53 \text{ mW}$  时压缩比明显大于平均功率为  $25.45 \text{ mW}$  的情形。但随着孤子阶数的增加, 所需光纤的最佳压缩长度变短, 即对于平均功率为  $35.74 \text{ mW}$  的输入脉冲, 当光纤长度选为  $500 \text{ m}$  时, 其脉冲处于达到最佳压缩后又重新展宽的状态, 故其压缩比与平均功率为  $27.53 \text{ mW}$  相比明显降低。

为了研究不同色散参量对光脉冲压缩效果的影响, 我们利用长度为  $100 \text{ m}$  代替  $500 \text{ m}$  长的光纤 (两光纤的色散参量  $D$  均从  $10 \text{ ps}(\text{nm} \cdot \text{km})$  线性递减到  $0.5 \text{ ps}(\text{nm} \cdot \text{km})$ )。图5给出了脉冲压缩前 [图5(a)] 和压缩后 [图5(b)] 的强度自相关曲线。图中显示, 压缩后光脉冲的脉宽  $1.1 \text{ ps}$ , 脉冲压缩比为  $4.0$ , 明显比  $500 \text{ m}$  长的色散缓变光纤的压缩比低。这是因为当光纤长度由  $500 \text{ m}$  变为  $100 \text{ m}$  时, 光纤的色散缓变参量  $\theta$  亦由  $0.92$  变为  $4.6$ , 色散缓变参量过大, 绝热放大条件不再成立, 压缩比降低。

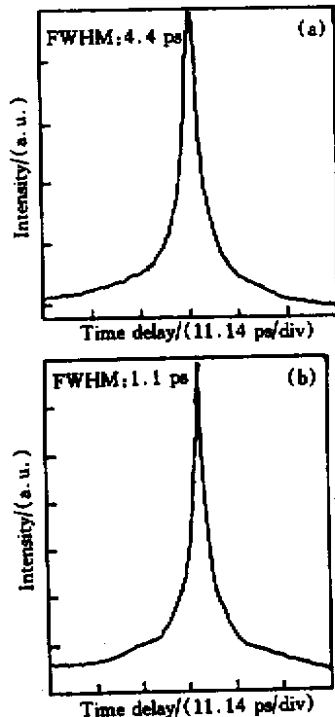


Fig.5 The autocorrelation curves of pulses in dispersion decreasing fiber with the length of  $100 \text{ m}$ . (a) Before compression; (b) After compression

结论 我们研究了超短光脉冲在色散缓变光纤中传

输时的动力特性,发现利用色散缓变光纤的绝热放大特性可以对超短光脉冲进行压缩。采用 500 m 长的色散缓变光纤,成功地将 4.4 ps 的超短光脉冲压缩到了 830 fs,脉冲压缩比为 5.3。研究还表明,色散沿纵向变化较慢的光纤有利于脉冲的进一步压缩,理论分析与实验结果基本一致。

### 参 考 文 献

- [1] Fork R L, Cruz C H B, Becker P C *et al.*. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(7):483 ~ 485
- [2] Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P. Extreme picosecond pulse narrowing by means of soliton effect in single-mode optical fiber. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(5):289 ~ 291
- [3] Chernikov S V, Mamyshev P V. Femtosecond soliton propagation in fibers with slowly decreasing dispersion. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(8):1633 ~ 1641
- [4] Mamyshev P V, Taylor J R. *Optical Solitons—Theory and Experiment*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1992. 266 ~ 313
- [5] Malomed B A. Ideal amplification of an ultrashort soliton in a dispersion-decreasing fiber. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(5):341 ~ 343
- [6] Chernikov S V, Dianov E M. Soliton pulse compression in dispersion decreasing fiber. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7):476 ~ 478
- [7] Tamura K R, Nakazawa M. Femtosecond soliton generation over a 32-nm wavelength range using a dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(3):319 ~ 321
- [8] Xu Wencheng, Guo Qi, Liao Changjun *et al.*. Femtosecond soliton compression and stabilization in fibers with slowly decreasing dispersion. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1995, **15**(2):174 ~ 179 (in Chinese)
- [9] Xu Wencheng, Guo Qi, Liu Songhao. Higher order dispersion and soliton pulse compression in the dispersion decreasing fibers. *Chin. Phys. Lett.*, 1997, **14**(4):298 ~ 301
- [10] Liu Songhao, Xu Wencheng, Liao Changjun *et al.*. Generation of high-quality fundamental soliton pulses in fibers with slowly decreasing dispersion. *Chin. J. Lasers*(中国激光), 1995, **A22**(5):377 ~ 381 (in Chinese)
- [11] Liu Haifeng, Ogawa Y, Oshiba S. Generation of an extremely short single mode pulse by fiber compression of a gain-switched pulse from a 1.3  $\mu\text{m}$  distributed-feedback laser diode. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(11):1284 ~ 1286
- [12] Olsen C M, Lin C, Izadpanah H. Compression and dispersionless transmission of chirped 1.3  $\mu\text{m}$  DFB ps laser pulses in dispersion-shifted single-mode fibers. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(12):767 ~ 768
- [13] Wu Jian, Lou Caiyun, Zhong Shan *et al.*. Generation of 5 GHz and 6.8 ps optical pulses by fiber compression. *Chin. J. Lasers*(中国激光), 1997, **A24**(2):123 ~ 126 (in Chinese)
- [14] Tomlinson W J, Konx W H. Limit of fiber-grating optical pulse compression. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1987, **4**(9):1404 ~ 1411
- [15] Agrawal G F. *Nonlinear Fiber Optics*( Second Edition). San Diego, New York: Academic Press, 1995. 133 ~ 200
- [16] Agrawal G F. *Nonlinear Fiber Optics*( Second Edition). San Deigo, New York: Academic Press, 1995. 201 ~ 237

## Adiabatic Compression of Ultra-Short Pulses in Fibers with Slowly Decreasing Dispersion

Xu Wencheng Zhang Shumin Luo Aiping Chen Weicheng Liu Songhao  
(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

Wu Jian Lou Caiyun Gao Yizhi  
(Department of Electronical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 7 March 2000; revised 14 May 2000)

**Abstract:** The adiabatic compression of ultrashort pulses from a DFB laser operating at 1550 nm in the fibers with slowly decreasing dispersion (FSDD) is investigated. High quality soliton compressions from 4.4 ps down to 1.1 ps in a 100 m FSDD and from 4.4 ps down to 830 fs in a 500 m FSDD are obtained. Furthermore, the results show that FSDD with more slowly decreasing can benefit to the pulse compression. Theoretical analyses are in good agreement with experimental results.

**Key words:** decreasing-dispersion fiber; adiabatic compression; ultrashort pulse generation