

文章编号: 0258-7025(2006)06-0756-04

基于色散平坦光纤的二阶孤子压缩

贾东方, 谈 斌, 王肇颖, 葛春风, 杨天新, 倪文俊, 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 将再生锁模光纤激光器(RMLFL)输出的约5.8 ps脉宽的高质量无啁啾双曲正割脉冲,通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后注入4.28 km长的色散平坦光纤(DFP)中,利用二阶孤子压缩效应成功地将脉冲压缩到1.74 ps,压缩比为3.3,与理论计算结果完全一致。与基于色散渐减光纤(DDF)的绝热孤子压缩(ASC)方案相比,该方案在同样的孤子阶数下大大降低了入射功率,而且色散平坦光纤的非色散渐减特性决定了它对于不同波长、不同脉宽的输入都可以通过调整输入脉冲功率和选取合适的光纤长度来配合满足压缩条件。虽然压缩因子不大,但基本能满足需求。

关键词 导波与光纤光学;高阶孤子;色散平坦光纤;再生锁模光纤激光器

中图分类号 O 437 文献标识码 A

Theoretical and Experimental Studies on Second-Order Soliton Compression Based on Dispersion Flattened Fiber

JIA Dong-fang, TAN Bin, WANG Zhao-ying, GE Chun-feng,
YANG Tian-xin, NI Wen-jun, LI Shi-chen

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract Using second-order soliton compression effect in 4.28 km dispersion flattened fiber (DFP), the 5.8 ps pulse with the repetition rate of 10 GHz generated from a regeneratively mode-locked fiber laser (RMLFL) was compressed into pulse with pulse-width of 1.74 ps. The compression factor was 3.3. The experimental results agree well with the theoretical results. Compared to adiabatic soliton compression (ASC) based on dispersion decreasing fiber (DDF), this scheme can greatly lower the input power for the same soliton order numbers. Moreover, for the input pulses with different wavelength and pulse width, compression condition can be satisfied by adjusting input power and choosing proper fiber length, which is determined by the non-dispersion-decreasing characteristics of DFP. Despite the compression factor is small, it still meets requirement.

Key words guided wave and fiber optics; high-order soliton; dispersion flattened fiber; regeneratively mode-locked fiber laser

1 引 言

光时分复用(OTDM)通信以及光纤非线性有关技术的发展对于脉冲宽度的要求近乎苛刻,能直接产生超短脉冲固然很好,但考虑到直接从调制光源得到满足百 Gbit/s 乃至 Tbit/s 的脉冲已经不太现实,因而腔外脉冲压缩技术的地位显得越重要。

利用压缩技术不但可以得到更窄的脉冲,而且在某些情况下实现起来也要经济简单得多。基于色散渐减光纤(DDF)^[1~4]、梳状色散光纤(CDPF)^[5,6]、分布拉曼放大(DRA)^[7,8]、色散渐减光纤与分布拉曼放大相结合^[9,10]等的绝热孤子压缩(ASC)是一类常用的脉冲压缩技术,其优点是不需要高的脉冲功率,而且压缩脉冲不存在基座。在这几种绝热孤子压缩方

收稿日期:2005-09-02;收到修改稿日期:2006-01-24

基金项目:国家自然科学基金(60507001,60477022),天津市科技发展基金(033800411)和天津大学青年教师基金资助项目。

作者简介:贾东方(1971—),男,山东人,天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授,主要从事光纤通信领域的研究。

E-mail:jiadf@163.com

案中,使用色散渐减光纤进行绝热孤子压缩是比较成熟而且应用较广的一种。然而,采用该方案获得的压缩比由色散渐减光纤的输入输出色散值决定,不可调节;另外,考虑到色散渐减光纤成品率较低,成本很高,不易拉长,因此该方案只适用于几个皮秒或者亚皮秒量级脉冲的压缩。

相对于色散渐减光纤,色散平坦光纤(DFP)的成本较低。本文对利用色散平坦光纤进行二阶孤子压缩进行了理论和实验研究,目的是为160 Gbit/s复用技术提供一种新的行之有效的脉冲压缩方案,进一步拓展孤子光源的可用脉宽范围。

2 理论研究

2.1 参数选择

光脉冲在光纤中的传输特性可以用非线性薛定谔方程(NLSE)来描述^[11]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - i\gamma|A|^2A = 0, \quad (1)$$

式中, A 为光脉冲时域电场振幅, α 为光纤的损耗系数, β_2 为群速度色散系数, γ 为光纤非线性系数, z 为传输距离, T 为以群速度 v_g 为移动参考系下的时间参量。

现有色散平坦光纤长4.28 km,参数见表1。其他参数选取为:初始脉宽(T_{FWHM})5.5 ps, $\gamma = 2.348 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, $\beta_2 = -1.976 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。

表1 色散平坦光纤参数
Table 1 Parameters of DFP

Dispersion D	1.53 ps/(nm·km)
Dispersion slope S	0.015 ps/(nm ² ·km)
Zero dispersion wavelength λ_0	1465 nm
Mode field diameter (MFD)	7.56 μm
Attenuation coefficient α	0.275 dB/km

根据色散长度 L_D 和孤子周期 z_0 的定义^[11]

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}, \quad (2)$$

$$z_0 = \frac{\pi}{2}L_D, \quad (3)$$

其中 T_0 为初始脉冲 $1/e$ 半宽度,与 T_{FWHM} 的关系为 $T_0 = T_{FWHM}/1.763 = 5.5/1.763 = 3.12 \text{ ps}$ 。于是得到色散长度 L_D 和孤子周期 z_0 分别为4.926 km和7.738 km。由此可以推算出4.28 km色散平坦光纤长度对应约0.87倍色散长度和0.55倍孤子周期。最后为了推算孤子阶数还要利用定义^[11]

$$N^2 = \frac{T_0^2 \gamma P_0}{|\beta_2|} = \frac{\bar{P} T_0 \gamma}{2B|\beta_2|}, \quad (4)$$

其中 P_0 为脉冲峰值功率, \bar{P} 为平均功率, B 为脉冲重复速率。

2.2 色散平坦光纤中二阶孤子压缩的理论与计算

由于孤子的周期性行为,在传输过程中不同距离处的时频特性不同。为了精确预测需要根据实际的脉冲和光纤参数进行数值模拟,其中功率按二阶孤子实际所需的条件预设,通过分步傅里叶变换法求解非线性薛定谔方程,详细计算了二阶孤子条件下(根据(4)式计算的平均功率为21.6 mW)脉冲在色散平坦光纤中的演化,如图1所示。由此判断出色散平坦光纤的长度(4.28 km或0.55孤子周期)已经很接近最佳压缩长度。在0.5倍孤子周期处实际计算得到的压缩比为3.5左右,对应输出脉宽1.57 ps。

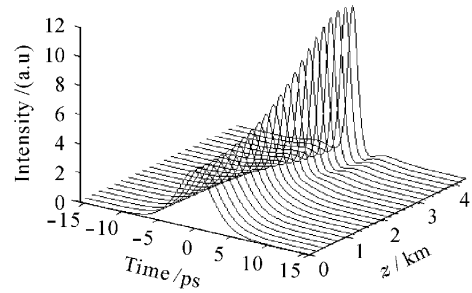


图1 二阶孤子在色散平坦光纤中的演化
Fig. 1 Evolution of second-order soliton in DFD

图2给出了计算得到的0.5倍孤子周期处脉冲的时域波形(a),自相关迹(b)和光谱(c)图。进一步考察图2(a),可以发现脉冲基座确实能量很小,如果对主峰以高斯或 sech^2 函数作相应拟合(拟合函数边界应落在实际脉冲包络曲线上或内部),并定义孤子能量为拟合脉冲的能量与总能量之比,则图2(a)对应的孤子比重占88%。另外消光比也能达到15.7 dB。因此从理论上说,虽然二阶孤子压缩的效率不如更高阶孤子,但从具体需求和压缩脉冲期望质量还是令人满意的。

压缩得到的脉冲虽然从脉宽和基座来说符合要求,但这种脉冲是非变换限制的,从光谱看具有双峰结构,进一步考察其传输性能可以发现强烈的周期性压缩展宽过程,这是不利的。计算了图2对应脉冲的啁啾,如图3所示,为便于说明问题同时给出了脉冲的振幅包络。发现脉冲主体部分对应的基本是线性啁啾,而且从其较小的负啁啾特性来看,脉冲经历压缩已至此处最窄点附近,继续传输脉冲将逐渐

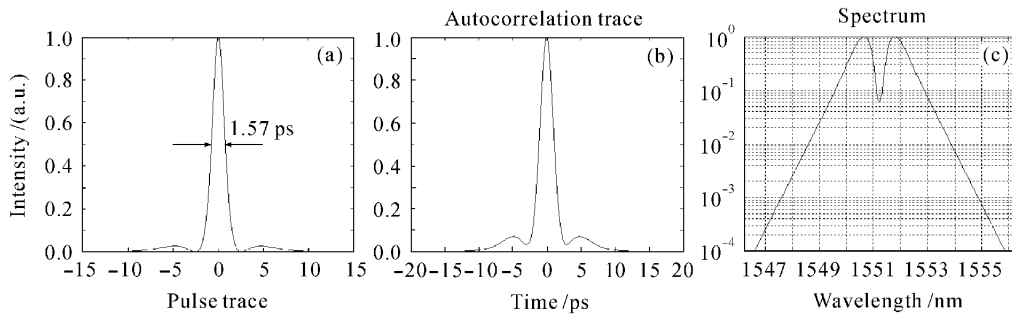


图 2 二阶孤子在半个孤子周期处的波形(a),自相关迹(b)和光谱图(c)

Fig. 2 Waveform (a), autocorrelation trace (b), and spectrum (c) of second-order soliton at half soliton period

展宽;脉冲只在基座处有明显的非线性啁啾,但基座比重小,尤其是大啁啾部分对应的能量很小。对于线性啁啾脉冲,如果脉冲功率能满足孤子条件,那么其传输特性将遵从啁啾孤子传输行为,即经历周期性展宽和压缩,并且展宽压缩程度逐渐减小。图 3 中的啁啾很小,所以相应的展宽压缩效应也很小;而非孤子成分则由于色散效应大于非线性效应的缘故会有所减弱。

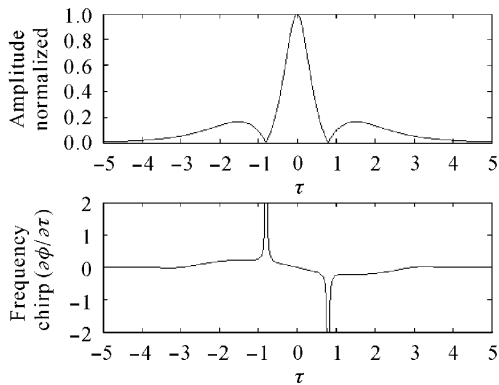


图 3 二阶孤子的振幅和啁啾特性图

Fig. 3 Amplitude and chirp characteristics of second-order soliton

3 实验研究

再生锁模光纤激光器的具体结构参见文献 [12]。图 4 为产生二阶孤子的实验装置图。OA 为抽运放大器,是 IPG 公司的产品,型号 IDE-200C;色散平坦光纤的长度为 4.28 km;VA 为可变衰减器。其中可变衰减器的作用是衰减来自色散平坦光纤的高功率输出,保护光谱仪(OSA)和自相关仪(SHG)免受损伤。采用色散平坦光纤的好处有两点,一是色散平坦光纤的色散值与普通 G. 652 光纤相比小一个量级,所以同样脉宽的脉冲,产生孤子条

件所需的峰值功率也要降低一个量级,在放大器 OA 饱和输出有限的情况下能产生更高阶孤子;二是色散平坦光纤的色散斜率很小,可以避免三阶色散(TOD)对脉冲尾部的影响,并能保持在很宽的带宽范围内获得反常色散,不会因谱展宽效应使部分频谱分量进入正常色散区而破坏孤子条件。

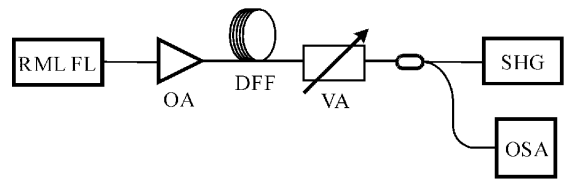


图 4 二阶孤子产生实验装置图

Fig. 4 Experimental setup for second-order soliton generation

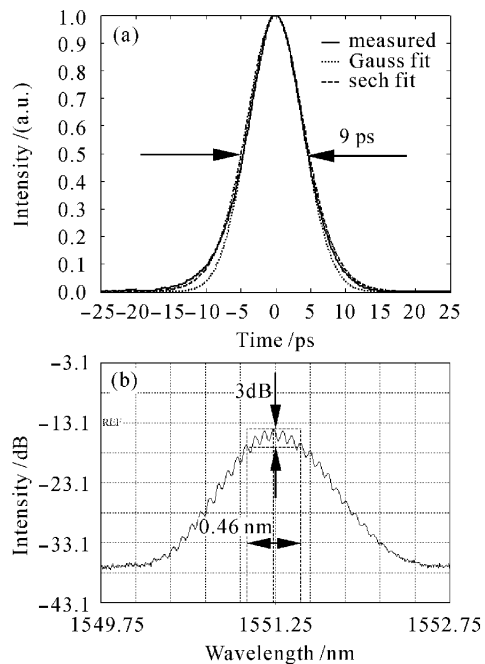


图 5 入射脉冲的自相关迹(a)和光谱图(b)

Fig. 5 Autocorrelation trace (a) and spectrum (b) of input pulse

调节再生锁模光纤激光器腔内滤波器,使得再生锁模光纤激光器输出波长为1551.25 nm;输出锁模脉冲的自相关迹拟合曲线符合双曲正割脉形,因此可以看作无啁啾的孤子脉冲。相应的自相关迹和光谱如图5所示,自相关迹宽约9 ps,换算成双曲正割脉冲宽度为5.8 ps,谱宽0.46 nm,计算得到的时间带宽积为0.32。

调节OA输出功率,观察并记录了功率为25 mW时得到的二阶孤子的光谱和自相关迹,如图6所示,与图2(a)比较一致。其中图6(b)的光谱分辨率设置为0.05 nm(6.25 GHz),小于再生锁模光纤激光器输出脉冲的重复频率10 GHz,因此可以看到明显的锁模调制效果。图6中二阶孤子(脉冲主体未分裂)的自相关迹宽2.7 ps,相当于脉宽值1.74 ps,这和计算得到的1.57 ps非常接近。

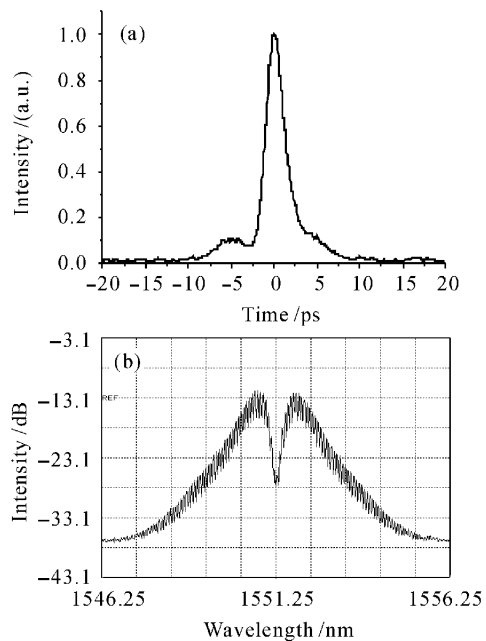


图6 实验得到的二阶孤子的自相关迹(a)和光谱(b)

Fig. 6 Autocorrelation trace (a) and spectrum (b) of second-order soliton

4 结 论

从实验结果来看,虽然压缩因子不大,但基本能满足160 Gbit/s光时分复用系统的要求。二阶孤子压缩和绝热孤子压缩相比的优点在于:利用小色散平坦光纤在同样的孤子阶数下可以大大降低入射功率;色散平坦光纤的非色散渐减特性决定了它对于不同波长、不同脉宽的输入都可以通过调整输

入脉冲功率和选取合适的光纤长度来配合满足压缩条件;色散平坦光纤价格相比色散渐减光纤要低得多,也不用专门设计参数,如果能经受进一步的光时分复用和传输实验考验则将是一种性价比更高的方案。

参 考 文 献

- 1 S. V. Chernikov, D. J. Richardson, E. M. Dianov *et al.*. Picosecond soliton pulse compressor based on dispersion decreasing fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(19):1842~1844
- 2 A. Mostofi, H. H. Hanza, P. L. Chu. Optimum dispersion profile for compression of fundamental solitons in dispersion decreasing fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(4):620~628
- 3 Liu Jianhui, Ding Yongkui, Tan Li *et al.*. Study on pulse compression in dispersion-decreasing fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5):1373~1377
刘俭辉,丁永奎,谭莉等.色散渐减光纤的脉冲压缩研究[J].物理学报,2004,**53**(5):1373~1377
- 4 Chen Zhaoxi, Xu Wencheng, Jin Wei *et al.*. Improved method for the nonlinear optical loop mirror constructed from the dispersion decreasing fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):481~486
陈昭喜,徐文成,金伟等.色散渐减光纤环形镜的一种改进方法[J].中国激光,2005,**32**(4):481~486
- 5 S. V. Chernikov, J. R. Taylor, R. Kashyap. Comblike dispersion profiled fiber for soliton pulse train generation [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8):539~541
- 6 Zhang Fan, Wu Jian, Lin Jintong. Performance study of a comb-like dispersion profiled fiber compressor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7):769~773
张帆,伍剑,林金桐.利用梳状色散光纤实现光脉冲压缩的特性研究[J].光学学报,2001,**21**(7):769~773
- 7 P. C. Reeves-Hall, J. R. Taylor. Wavelength and duration tunable sub-picosecond source using adiabatic Raman compression [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(7):417~418
- 8 T. E. Murphy. 10-GHz 1.3-ps pulse generation using chirped soliton compression in a Raman gain medium [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(10):1424~1426
- 9 K. Igarashi, H. Tobioka, S. Takasaka *et al.*. Duration-tunable 100-GHz sub-picosecond soliton train generation through adiabatic Raman amplification in conjunction with soliton reshaping [C]. *OFC'2003*, Atlanta, GA, USA, 2003. 1:155~156
- 10 T. Kogure, J. H. Lee, D. J. Richardson. Wavelength and duration-tunable 10-GHz 1.3-ps pulse source using dispersion decreasing fiber-based distributed Raman amplification [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4):1167~1169
- 11 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics and Application of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Third edition. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 33
G. P. Agrawal.非线性光纤光学原理及应用[M].贾东方,余震虹,谈斌译.北京:电子工业出版社,2002. 33
- 12 Bin Tan, Zhiyong Li, Zhaoying Wang *et al.*. Wavelength and duration tunable soliton generation from a regeneratively mode-locked fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10):604~606