

全光纤脉冲压缩器的理论及实验研究^{*}

丁永奎[†] 李智勇 倪文俊 葛春风 李世忱

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

(2003 年 8 月 1 日收到)

对色散位移光纤 + 普通单模光纤构成的全光纤脉冲压缩器进行了理论分析, 分析了压缩效果与光纤参数及输入脉冲参数的关系, 对不同中心波长和脉宽的主动锁模光纤激光器的输出脉冲进行了压缩实验, 均得到了近变换限 Sech 的压缩脉冲, 实验结果与理论分析一致.

关键词: 全光纤脉冲压缩器, 压缩因子, 基座能量, 主动谐波锁模光纤激光器

PACC: 4280M, 4281D, 4280W

1. 引言

高重复频率超短光脉冲的产生技术是高速光通信系统的关键技术之一, 特别是高速 RZ 码时分复用(OTDM)通信系统的传输速率越高, 所需的脉冲宽度越窄, 对脉冲质量(脉冲形状、啁啾、色散波分量等参数)要求也越高. 而一般的高重复频率光脉冲源直接产生的光脉冲往往较宽, 必须采取适当的脉冲压缩、整形后才能满足高速光通信的要求. 光脉冲压缩技术是产生超短脉冲的关键技术之一, 光纤-光栅对脉冲压缩技术^[1]、孤子效应脉冲压缩技术(SEC)和绝热孤子压缩技术(ASC)^[2,3]是应用比较广泛而且成熟的压缩方法, 其他脉冲压缩技术还包括利用光纤布拉格光栅的脉冲压缩器^[4,5]、利用交叉相位调制(XPM)的脉冲压缩技术^[6,7]、利用光纤放大器的脉冲压缩技术^[8-10]、利用光纤耦合器和干涉仪^[11,12]的脉冲压缩器等, 但这些压缩技术在可行性、压缩比和压缩质量方面仍需进一步提高.

采用色散位移光纤(DSF) + 普通单模光纤(SMF)全光纤脉冲压缩器是一种简单实用、效果较好的脉冲压缩技术, 在工作原理上与光纤-光栅对压缩器是相似的, 即利用色散位移光纤(DSF)较小的正常色散和较强的自相位调制(SPM)作用对通过它的光脉冲引入近乎线性的正啁啾, 然后再用 SMF 的反常色散来压缩. 与光纤-光栅对压缩器相比, DSF +

SMF 脉冲压缩器是全光纤结构的, 降低了耦合损耗, 也不存在光纤-光栅对压缩器中的耦合及空间整形^[1]问题; DSF 在入射光脉冲的中心波长处较小的色散值可使光脉冲以较低的入射功率获得较强的 SPM 作用, 从而得到较大的压缩比.

本文在数值计算的基础上对 DSF + SMF 全光纤脉冲压缩器进行了深入详细的理论分析, 重点讨论了光纤长度、色散值比、损耗、三阶色散、输入脉冲功率及初始啁啾等因素对压缩质量的影响; 并对主动锁模光纤激光器的输出脉冲进行了压缩实验, 得到了 10GHz 4.69ps 的近变换限 sech 脉冲, 压缩比达到了 2.72, 实验结果与理论分析基本一致.

2. DSF + SMF 啁啾-色散脉冲压缩的理论分析

ps 光脉冲在光纤中的传输可由归一化非线性 Schrödinger 方程(NLS)来描述^[11]

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + N^2 \exp(-\alpha L_D \xi) |U|^2 U = 0, \quad (1)$$

式中 $U(\xi, \tau)$ 为脉冲电场包络的归一化慢变振幅; $\tau = (t - z/v_g)/T_0$ 为随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度, T_0 是输入脉冲 $1/e$ 幅度处半宽度; β_2 为光纤的二阶群速度色散(GVD)参量; $\xi = z/L_D$ 是归一化传输距离, 而 $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ 是色散长度; $N^2 = L_D/L_{NL} = (\gamma P_0 T_0^2)/|\beta_2|$, P_0 是入射脉冲的

^{*} 国家自然科学基金(批准号 69877012)资助的课题.

[†] E-mail: ykdling@263.net

峰值功率; $L_{NL} = 1/\gamma P_0$ 为非线性长度, γ 为光纤的非线性参量; α 为损耗系数.

用对称分布傅里叶算法^[1](S-SSFT)数值解方程(1),可模拟脉冲在 DSF + SMF 压缩器中的演变过程.图 1 给出了输入为 5 阶孤子脉冲($U(0, \tau) = 5\text{sech}(\tau)$)时其波形及在 DSF 中获得的频率啁啾 $\delta\omega(\tau)$ 的变化.计算中,DSF 和 SMF 的色散值之比为 $|\beta_{2\text{DSF}}|/|\beta_{2\text{SMF}}| = 1/10$,DSF 的长度和 SMF 的长度不妨分别取 $\xi_{\text{DSF}} = 0.3$ 和 $\xi_{\text{SMF}} = 0.35$,忽略光纤的损耗.从图中可以看到,脉冲在 DSF 中逐渐变宽,由于 SPM 的作用脉冲获得的正啁啾也逐渐变大,同时正常 GVD 的作用使脉冲逐渐向方波演变,整个脉冲宽度上的啁啾也逐渐线性化,当脉冲进入到 SMF 光纤中传播时,在反常 GVD 的作用下,具有啁啾的脉冲不断被压缩.

同时从图 1 可以看到,压缩后的脉冲具有较大的基座能量,这是由于 DSF 引入的啁啾在脉冲两翼是非线性的,得不到有效的压缩.此外,当脉冲进入到 SMF 中时,尽管脉宽较宽,但 SPM 的作用也仍然不可忽略,正是 SPM 的作用增强了压缩后脉冲的基座.因此,引入基座能量比 η_p ,这一参数以衡量压缩

后的脉冲质量,定义为基座能量所占输出脉冲总能量的百分比:

$$\eta_p = \frac{|E_{\text{Total}} - E_{\text{Sech}}|}{E_{\text{Total}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 E_{Total} 为输出脉冲总能量, E_{sech} 为与压缩后脉冲具有相同峰值功率和 FWHM 脉宽的 sech 脉冲的能量.

2.1. DSF + SMF 脉冲压缩的决定因素

图 2 给出输入 N 分别为 1, 3, 5, 6, 10 的 Sech 脉冲时,压缩因子和基座能量随 DSF 光纤长度(以孤子周期 $z_0 = L_D \cdot \pi/2$ 量度)的变化曲线.对于每个 DSF 长度值,都选取相应长度的 SMF 以使脉冲得到最大压缩,同时使压缩后脉冲的基座能量最小.计算中,DSF 和 SMF 的色散值之比为 $|\beta_{2\text{DSF}}|/|\beta_{2\text{SMF}}| = 1/10$,同时忽略光纤的损耗.可见,输入脉冲的功率(即 N)越大,SPM 作用引入的啁啾越大,获得的压缩因子也越大,压缩因子基本上正比于 N ;同时,可以看到,随着输入脉冲的功率的增大,压缩后脉冲的基座能量也增大,增大压缩比是以压缩质量的降低为代价的,因此, N 值最好小于 10.

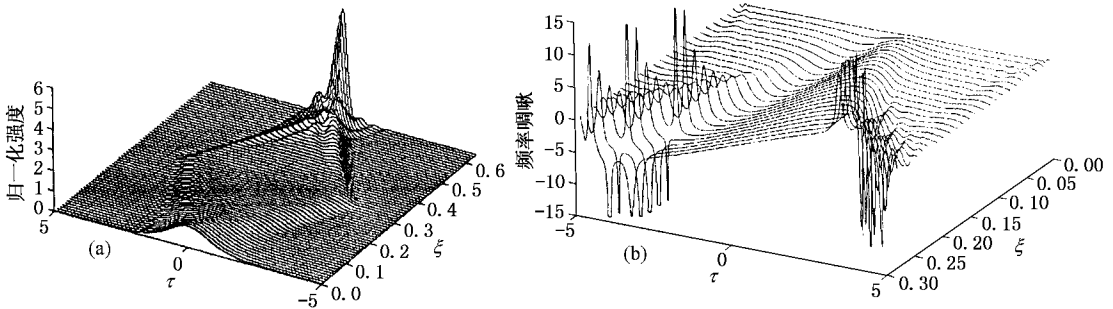


图 1 脉冲在 DSF + SMF 光纤中的波形 (a) 及频率啁啾 (b) 变化

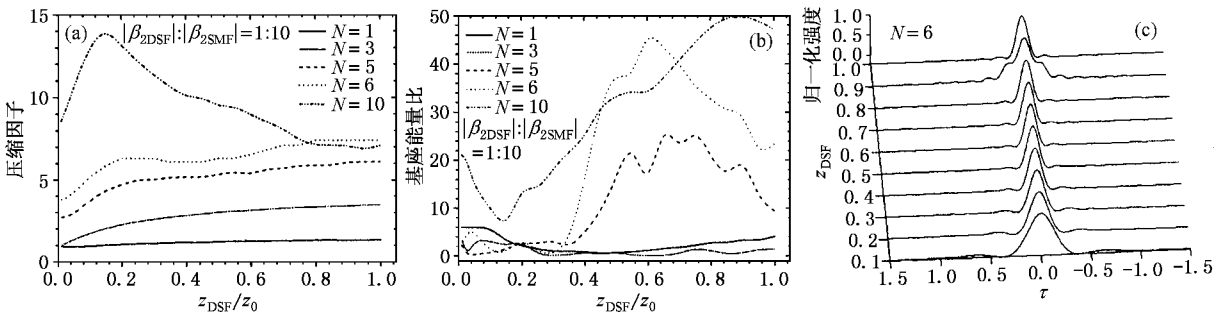


图 2 压缩因子 (a) 和基座能量 (b) 随 DSF 长度的变化 (c) 为 $N = 6$ 时,用不同长度 DSF 压缩后的脉冲形状

从图 2(b) 可以看到, 当 DSF 光纤过短 ($z_{DSF} < 0.12$) 时, 脉冲在 SMF 光纤中仍保持较大的功率, 受 SPM 的作用较大, 因此, 基座能量大, 压缩质量差. 综合考虑压缩因子和脉冲质量两方面因素, DSF 光纤也并不是越长越好, 而是存在最佳值 z_{opt} . 当 $N > 5$ 时, 通过计算, 得到如下的经验公式:

$$z_{opt} \approx 1.35z_0/N. \quad (3)$$

除了输入脉冲功率和 DSF 光纤长度外, 压缩因子和基座能量的大小还取决于 DSF 光纤与 SMF 光

纤的色散值之比 $|\beta_{2DSF}|/|\beta_{2SMF}|$, 以 $N = 6$ 的 sech 输入脉冲为例, 计算压缩因子和基座能量随 DSF 和 SMF 色散比值的变化曲线, 如图 3 所示. 从图中可以看到, $|\beta_{2DSF}|$ 与 $|\beta_{2SMF}|$ 越接近, 所得到的压缩因子和基座能量越大, 最佳光纤长度稍有减小. 但是, 这并不意味着 $|\beta_{2DSF}| = |\beta_{2SMF}|$ 会适宜压缩, 因为这种情况下, 脉冲在 SMF 光纤中分裂很严重, 这是非常不利的. 因此, 只有选择具有适当色散的 DSF 及输入脉冲波长, 才能获得最佳压缩结果.

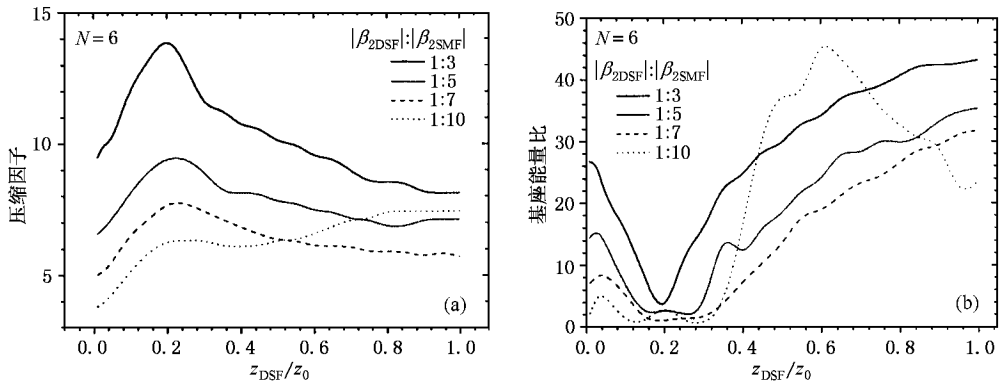


图 3 压缩因子 (a) 和基座能量 (b) 随 DSF 和 SMF 色散比值的变化

2.2. DSF + SMF 脉冲压缩的影响因素

以上的计算和分析都假定输入脉冲是无啁啾的. 对于负啁啾脉冲, 因为 DSF 光纤提供的正啁啾需要补偿初始的负啁啾, 所以最佳光纤长度增大, 同时, 因为在整个脉冲宽度上这种补偿并不是很完全, 所以压缩因子稍有减小. 对正啁啾脉冲, 情况恰恰相反. 可对较大的 N 值 ($N > 10$), 脉冲谱宽比无啁啾时增加两倍^[13], 所以 z_{opt} 和压缩因子变化较小 ($< 10\%$).

接下来考虑 DSF 光纤损耗的影响, 图 4 为压缩 $T_{FWHM} = 10\text{ps}$, $N = 6$ 的无啁啾 sech 脉冲时, DSF 的损耗系数对压缩因子和压缩质量的影响, DSF 长度取最佳光纤长度: $z = z_{opt} = 0.21z_0$. 随着损耗的增大, SPM 引入的啁啾将变小, 所得到的压缩因子减小, 所以最佳光纤长度 z_{opt} 应适当增大. 在压缩因子随损耗减小的同时基座能量也减小, 可见压缩因子的增大是以降低压缩质量为代价的.

另外, 以上这些结论是通过数值解方程 (1) 得到的, 忽略了高阶非线性和高阶色散效应. 在 DSF + SMF 脉冲压缩器中, 由于利用 DSF 较小的色散值来获得较大的 SPM 效应, 因此不能忽略 DSF 光纤中的

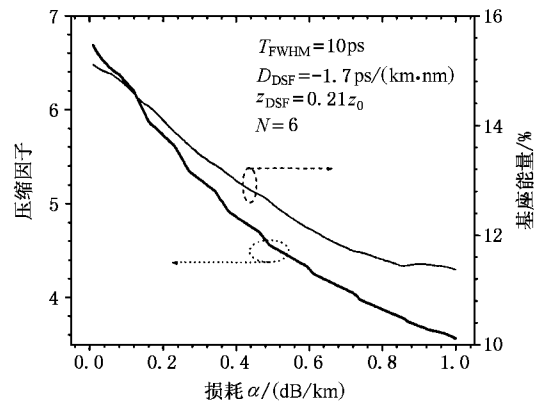


图 4 DSF 光纤的损耗对压缩因子及基座能量的影响

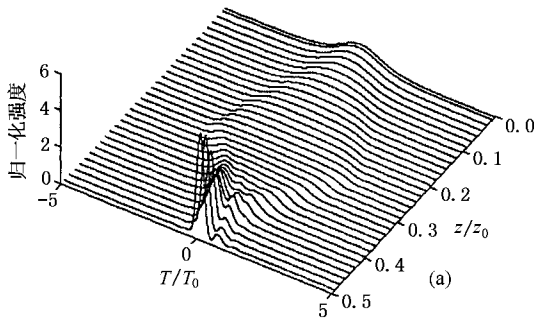
三阶色散, 这样, 脉冲在 DSF 光纤中传播由下面的非线性 Schrödinger 方程来描述:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = i\gamma|A|^2A, \quad (4)$$

式中 β_3 为三阶色散参量.

图 5(a) 为当三阶色散 $\beta_3 = 0.1\text{ps}^3/\text{km}$ 时, 无啁啾 Sech 脉冲在 DSF + SMF 压缩光纤中的传播过程中脉冲形状的变化情况, 图 5(b) 为压缩因子和基座

能量随 β_3 变化的情况,计算中其他参数同图 3. 可见由于三阶色散的作用,压缩后的脉冲形状不对称,后沿产生了振荡结构;基座能量增大,当 $|\beta_3|$ 从 0 增大到 $1\text{ps}^3/\text{km}$ 时,基座能量从 23.1% 增大到 47%,



压缩质量变得很差, $\beta_3 > 0$ 的情况比 $\beta_3 < 0$ 时要差. 同时,三阶色散还降低了压缩比,但减小的程度不是很大. 可见三阶色散不利于 DSF + SMF 压缩,可以预见,对于脉宽 $< 0.1\text{ps}$ 的脉冲,这种影响会更大一些.

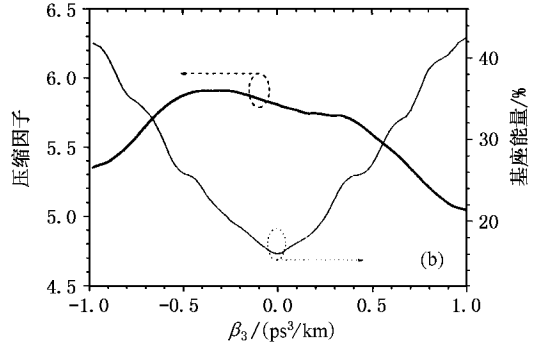


图 5 脉冲形状在传播过程中的变化,压缩因子和基座能量随三阶色散的变化

3. 实验研究

实验装置如图 6 所示. 主动谐波锁模光纤激光器 (HMFL) 主要由以下部分组成: 调制器 (LN-MOD) 为 SDL 公司的 10GHz MZI 型 LiNbO_3 调制器, 插入损耗小于 5dB, 它为主动锁模提供损耗调制; 由于调制器是偏振相关器件, 在其前端放置了偏振控制器 (PC); 掺铒光纤放大器 EDFA1 (IPG 公司, EAD60) 用于提供腔增益, 其内部包含的光隔离器保证 HMFL 的单向振荡; 射频调制信号源 (RF-synthesizer) 是 HP 公司的 83752B 型频率合成器, 射频驱动信号通过射频放大器 (RF Amp) 驱动调制器. 经 10:90 输出耦合器输出的锁模脉冲再由一个 3dB 耦合器分为两路: 一路由 Agilent 公司的 86100B 型数字通信分析仪 (DCA, 光电模块 86109A 光口的取样带宽为 30GHz, 电口为 50GHz) 来观测光脉冲波形; 另一路经 EDFA2 放大后进入 DSF + SMF 压缩器, 它是由 4.58km 的 DSF 光纤和 0.8km 的 SMF 光纤构成, SMF 长度是根据 DSF 长度和 HMFL 输出脉冲参数进行数值计算得到的. DSF 零色散波长为 $\lambda_0 = 1559.59\text{nm}$, 色散斜率为 $S_0 = 0.0797\text{ps}(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 损耗为 $\alpha = 0.22\text{dB}/\text{km}$; SMF 光纤零色散波长为 $\lambda_0 = 1314.78\text{nm}$, 色散斜率为 $S_0 = 0.0855\text{ps}(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 损耗为 $\alpha = 0.19\text{dB}/\text{km}$. 压缩后的光脉冲送入 Femtochrome Research 公司的 FR-103MN 型二次谐波相关仪测量脉宽, 并用 Ando

公司的 AQ6315A 型光谱仪观测光谱, 光谱仪的最小分辨率为 0.05nm.

调节可调谐滤波器和射频调制频率, 使 HMFL 输出中心波长为 1536.56nm, 9.964951780GHz 的锁模序列脉冲, 脉冲的谱宽 (FWHM) 为 0.29nm, 脉冲的波形、光谱和自相关曲线如图 7 所示; 自相关曲线图中的点为测量曲线, 实线为用高斯函数拟合曲线, 拟合得到的脉宽 (FWHM, 图中的 w 参数) 为 12.77ps. 从图中可以看出 HMFL 输出脉冲形状非常接近高斯形脉冲, 0.471 的时间带宽积也证实了这一点.

压缩后脉冲的自相关曲线和光谱如图 8 所示, 用双曲正割函数拟合得到的脉宽 (FWHM, 图中的 w 参数) 为 4.69ps, 压缩比达到了 2.72. 压缩后脉冲的时间带宽积为 0.334, 非常接近于变换限 sech 脉冲. 从自相关曲线可以看到, 压缩后脉冲存在一定的基座, 正如前面分析和计算的一样.

实验中, EDFA2 的平均输出功率为 30mW, 对于输入脉冲, 其峰值功率约为 $N \approx 5.68$, 若 DSF 光纤的非线性参量取 $\gamma = 2.4\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$, 那么, DSF 的长度约为 $0.18z_0$. 用以上参数进行数值模拟, 结果如图 8 (c) 所示. 自相关曲线与计算得到的脉冲形状非常一致. 此外, 计算得到的压缩因子为 4.19, 与实验测得的 2.72 有偏差, 原因可能是: 1) 计算中估算的峰值功率和 DSF 光纤的非线性系数与实际值有偏差; 2) 计算中没有考虑三阶色散的影响, 如果考虑三阶色散, 那么, 根据图 5 的结果, 计算出的压缩因子将减小, 趋近于实验结果.

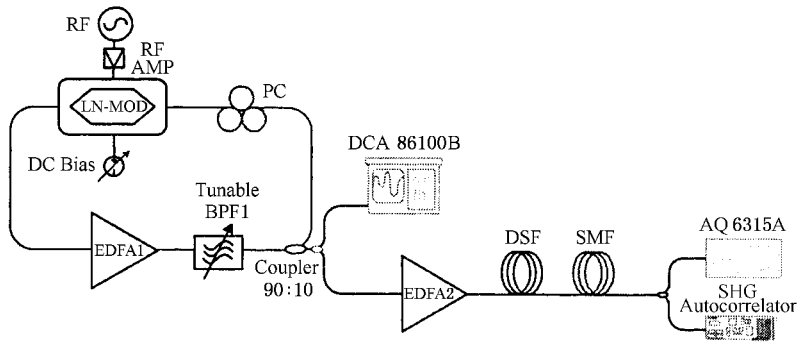


图 6 主动锁模光纤激光器输出脉冲的啁啾-色散脉冲压缩实验装置

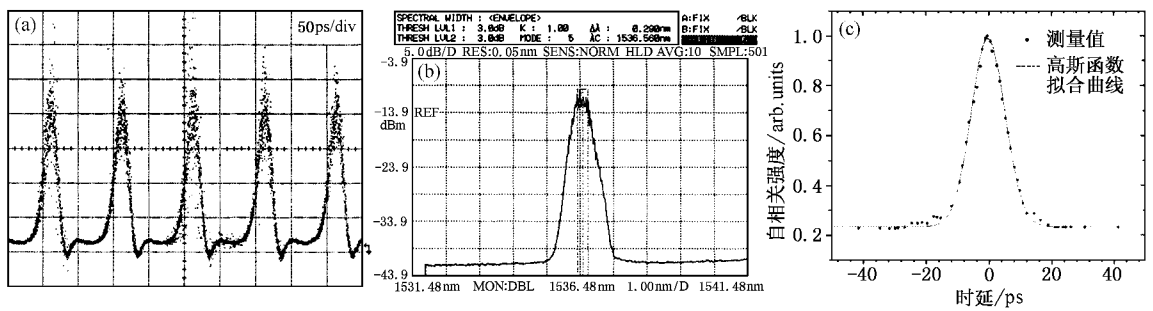


图 7 主动锁模光纤激光器输出脉冲的波形、光谱和自相关曲线

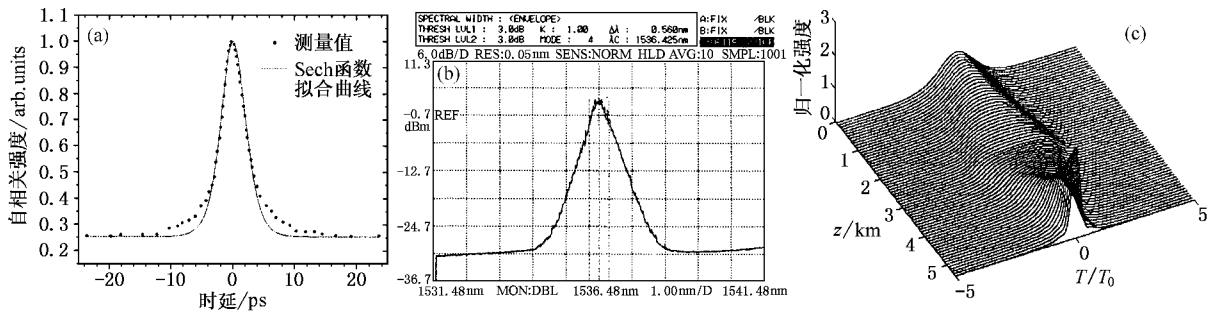


图 8 压缩后脉冲的自相关曲线、光谱和数值模拟结果

通过调节可调谐滤波器和射频驱动频率,使 HMFL 输出中心波长分别为 1543nm, 1548.48nm, 1552.41nm 和 1556.36nm 的锁模脉冲, 然后进行压缩(光纤长度等参数同上), 调整 EDFA2 的输出功率使各波长的输入脉冲具有大约相同的 N (约为 5.5), 压缩前和压缩后脉冲的自相关曲线如图 9 所示, 得到的最短脉宽为 3.73ps.

图中 HMFL 输出的脉冲均是用高斯函数拟合的, 而压缩后的脉冲都是用 sech 函数拟合的. 可见, 各波长脉冲在压缩后都非常接近 sech 脉冲, 得到的

压缩因子如图 10 所示. 当 HMFL 运转在不同波长处时, 输出脉冲的脉宽及所对应的色散长度也不同, 图 10 中给出了 4.5km DSF 与相应孤子周期的比值 z_{DSF}/z_0 . 可以看出, 在 DSF 的正常色散区, 输入锁模脉冲的中心波长越远离零色散波长 ($\lambda_0 = 1559.59\text{nm}$), 对应的色散值 β_2 越大, 相应的 z_{DSF}/z_0 越接近于最佳光纤长度 $z_{opt} = 0.252z_0$, 脉冲得到的压缩比越大. 由于条件限制, 对于压缩各波长的输入脉冲的情况而言, 4.5km 的 DSF 均小于各自相应的 z_{opt} .

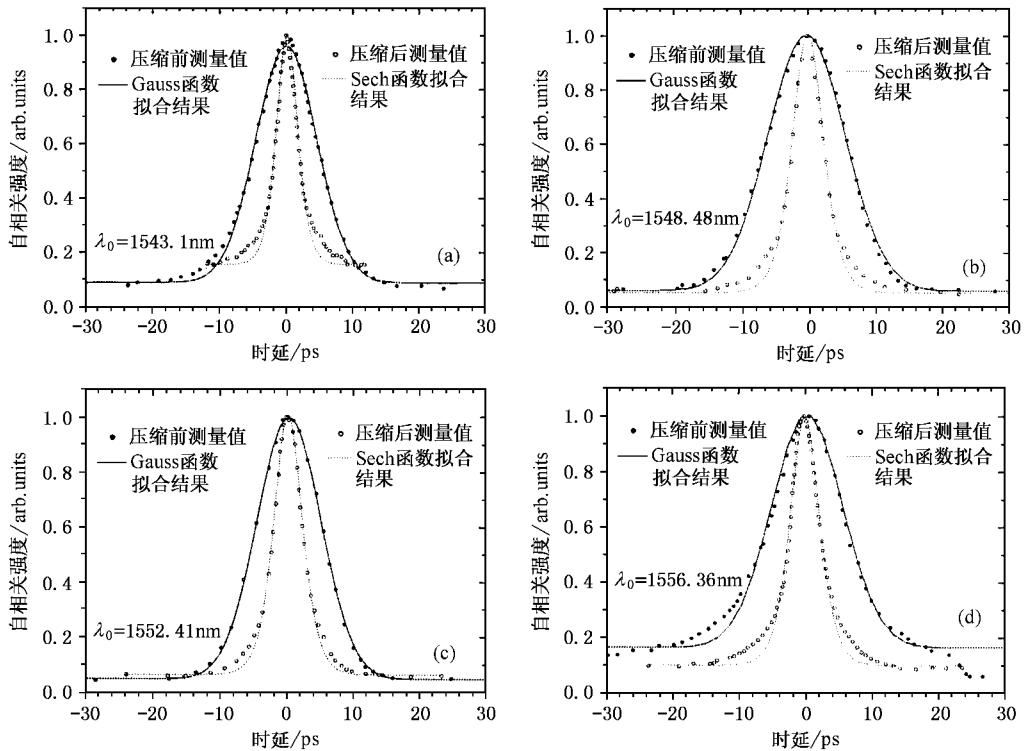


图9 不同波长光脉冲压缩前、后的自相关曲线

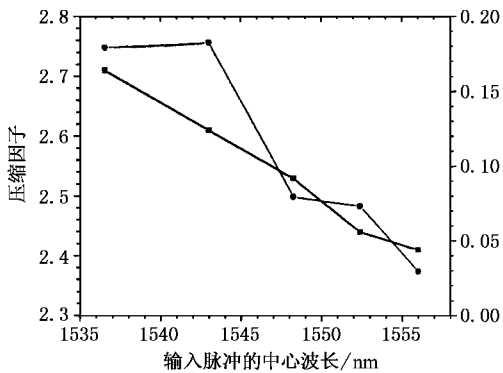


图10 不同波长输入脉冲所得到的压缩因子及对应的光纤长度

4. 结 论

本文通过数值计算较为详细地研究了 DSF + SMF 全光纤脉冲压缩器,分析了压缩效果与光纤参数(光纤长度、色散值比、三阶色散、损耗)及输入脉冲参数(功率、啁啾)的关系;实验上,将不同中心波长和脉宽的主动锁模光纤激光器输出脉冲压缩到了近变换限 sech 脉冲. 研究表明,此压缩器可以使脉冲以较低功率入射得到高质量的压缩效果,是一种简单实用的光脉冲压缩技术,与高阶孤子脉冲压缩、绝热脉冲压缩等技术结合可以满足未来高速光传输通信系统的要求.

[1] Agrawal G P *Nonlinear Fiber Optics* (Publishing House of Electronics Industry) Agrawal G P 著,胡国缙、黄超译 1992 非线性光纤光学(天津:天津大学出版社)]

[2] Chemikov S V *et al* 1993 *Opt. Lett.* **18** 476

[3] Pelusi M D *et al* 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 1430

[4] Ouellette F 1991 *Opt. Lett.* **16** 303

[5] Krug P A *et al* 1995 *Electron. Lett.* **31** 1091

[6] Agrawal G P *et al* 1989 *Opt. Lett.* **14** 137

[7] Ellis A D *et al* 1993 *Electron. Lett.* **29** 149

[8] Agrawal G P 1991 *Phys. Rev. A* **44** 7493

[9] Nakazawa M *et al* 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 653

[10] Reeves-Hall P C *et al* 2000 *Electron. Lett.* **36** 622

[11] Betts R A *et al* 1991 *Electron. Lett.* **27** 858

[12] Serkland D K *et al* 1998 *Opt. Lett.* **23** 795

[13] Agrawal G P *Nonlinear Fiber Optics and Application of Nonlinear Fiber Optics* [Agrawal G P 著,贾东方、余震虹译 2002 非线性光纤光学原理及应用(北京:电子工业出版社)]

Generation of high-quality soliton pulses using all-fiber optical compressor^{*}

Ding Yong-Kui[†] Li Zhi-Yong Ni Wen-Jun Ge Chun-Feng Li Shi-Chen

(*College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 1 August 2003)

Abstract

In this paper, optical pulse compression using a dispersion shift fiber and a standard single-mode fiber is demonstrated both analytically and experimentally. The effects of fiber and input pulse parameters on the compressing quality are discussed through numerical simulation. Experimental results of compressing pulses generated from a harmonically mode-locked fiber laser verify that high-quality pulses can be obtained using this compression method.

Keywords : all-fiber pulse compressor, compression factor, pedestal, harmonically mode-locked fiber laser

PACC : 4280M, 4281D, 4280W

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

[†] E-mail: ykding@263.net