

# 马赫-曾德尔型色散渐减光纤干涉仪的孤子 效应脉冲压缩研究

曹文华<sup>1</sup> 徐平<sup>1</sup> 刘颂豪<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060  
<sup>2</sup> 华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510631)

**摘要** 对色散渐减光纤(DDF)构成的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)中的孤子效应脉冲压缩进行了数值研究,该方法同时利用了 DDF 中的高阶孤子压缩和 MZI 的非线性开关特性。计算结果表明,该方法不仅能获得比 DDF 绝热压缩大得多的压缩比,而且可以压缩 DDF 绝热压缩技术所不能压缩的宽脉冲。对于宽度为 20 ps 的输入脉冲,压缩比高达 76.4。研究还表明,压缩结果对于 MZI 的设计误差或输入脉冲峰值功率的波动不敏感;而 DDF 中的高阶效应(如拉曼自频移和三阶色散)对压缩结果的影响也只有当压缩脉冲短于 100 fs 时才变得不可忽略。

**关键词** 光通信;光孤子;光脉冲压缩;色散渐减光纤;马赫-曾德尔干涉仪;拉曼自频移;三阶色散

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0419001

## Soliton-Effect Pulse Compression in a Dispersion-Decreasing Fiber-Based Mach-Zehnder Interferometer

Cao Wenhua<sup>1</sup> Xu Ping<sup>1</sup> Liu Songhao<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China  
<sup>2</sup> School for Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University,  
Guangzhou, Guangdong 510631, China)

**Abstract** Soliton-effect optical pulse compression in a dispersion-decreasing fiber (DDF) based on Mach-Zehnder interferometer (MZI) is studied numerically. The scheme utilizes both the higher-order soliton compression and the nonlinear switching effects within the MZI. Numerical results show that the scheme cannot only permit much more efficient pulse compression than the DDF-based adiabatic soliton compression technique, but also compress wide pulse which will be impossible with the adiabatic soliton compression technique. For a 20-ps input pulse, the compression ratio by the present scheme is as high as 76.4. Results also show that the compression is quite tolerant of small variation of initial parameters such as the arm length of the MZI, the input to output dispersion ratios of the two arms, and the peak power of the input pulse. The influence of higher-order effects such as Raman self-frequency shift and the third-order dispersion on pulse compression is also investigated.

**Key words** optical communications; optical solitons; optical pulse compression; dispersion-decreasing fiber; Mach-Zehnder interferometer; Raman self-frequency shift; the third-order dispersion

**OCIS codes** 190.5530; 190.4370; 190.7110; 190.4360

## 1 引 言

单波长传输速率超过 1 Tb/s 的光时分复用(OTDM)技术<sup>[1]</sup>需要高质量飞秒光脉冲源。可直接产生皮秒或飞秒光脉冲的主要技术有锁模半导体

激光器<sup>[2]</sup>、同步抽运光纤拉曼激光器<sup>[3]</sup>、掺铒光纤激光器<sup>[4]</sup>以及增益开关分布反馈半导体激光二极管(GS-DFB-LD)<sup>[5,6]</sup>。从经济性、实用性和可靠性诸方面考虑,目前仍然认为 GS-DFB-LD 是高速光纤

收稿日期: 2010-09-06; 收到修改稿日期: 2010-10-28

基金项目: 广东省自然科学基金(06029820)资助课题。

作者简介: 曹文华(1963—),男,博士,教授,主要从事非线性光纤光学及高速光纤通信系统等方面的研究。

E-mail: wcao@szu.edu.cn

通信系统的首选光源<sup>[7,8]</sup>。但直接从 GS-DFB-LD 输出的脉冲较宽,通常在几十皮秒以上,而且带有较大的频率啁啾,必须经过消啁啾后再压缩。

基于色散渐减光纤(DDF)的绝热孤子压缩可获得高质量(无脉座、无频率啁啾)压缩脉冲<sup>[9~12]</sup>,技术简单实用。但该技术存在两个缺陷,1)可获得的脉冲压缩比受到 DDF 输入、输出端二阶色散系数比例(称为 DDF 首末色散比)的限制,一般在 20 倍以内;2)当输入脉冲宽度超过几个皮秒时,脉冲压缩所需的 DDF 很长。已有研究表明<sup>[13]</sup>,对于初始宽度为 10 ps 的脉冲压缩,所需 DDF 长达 20 km。光纤越长,损耗越大,压缩效果也越差。尽管已提出多种方法<sup>[13~16]</sup>试图弥补第二个缺陷,但在减小 DDF 长度方面的作用不甚明显。

利用 DDF 中高阶孤子的非绝热压缩可以大大减小 DDF 长度,但压缩后的脉冲质量很差,必须采用附加的光学元件如非线性光纤环镜(NOLM)消脉座<sup>[17]</sup>。另一种可显著减小 DDF 长度的压缩方法就是用 DDF 直接构成 NOLM<sup>[18]</sup>,它将 DDF 中的高阶孤子压缩和采用 NOLM 消脉座两个步骤合二为一。实验上<sup>[19]</sup>已采用该方法将 12 ps 的高斯脉冲压缩成为 3 ps 的无脉座孤子脉冲。但该技术能够获得的压缩比有限<sup>[18]</sup>,对于输入为 6~10 阶的高阶孤子,压缩比小于 10。根本原因是,DDF 的首末色散比不能太大,否则当 NOLM 中传输的顺、逆时针脉冲重回耦合器时,由于各自的脉座差异太大,叠加干涉效果不理想,脉座不能完全被消除。

本课题组提出了一种由 DDF 构成马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的脉冲压缩方法<sup>[20]</sup>,该方法同时利用了 DDF 中的高阶孤子压缩以及 MZI 的开关特性,不仅可压缩单根 DDF 不能压缩的宽脉冲,而且可获得比 DDF 绝热压缩以及 DDF-NOLM 高阶孤子压缩大得多的压缩比。因而,对于 GS-DFB-LD 的输出脉冲,经过消啁啾后,可采用该方法将其压缩成适合于高速 OTDM 系统的飞秒光脉冲。然而,文献<sup>[20]</sup>仅仅是初步研究,类似于快报形式,有些建议(如 MZI 两臂取不同长度以及采用非对称耦合器)也不尽合理。臂长不等会导致上下臂中传输的两脉冲到达 MZI 的第二个耦合器时产生时间差,不能发生叠加干涉;非对称耦合器也不利于脉座及背景光的消除。本文采用两段长度相等但色散渐减速度不等的 DDF 构成 MZI,同时采用对称耦合器,通过详细的数值计算,进一步研究了 MZI 参数及输入脉冲参数变化对压缩结果的影响;研究了 DDF 中的高阶

效应对窄脉冲压缩结果的影响,并提出了克服高阶效应影响的具体办法。应该说明的是,尽管国外在理论<sup>[21,22]</sup>和实验上<sup>[23,24]</sup>均已表明利用全光纤 MZI 中的非线性效应实现全光开关的可能,但有关 DDF-MZI 的光脉冲压缩的研究还未见报道。

## 2 基本方程

图 1 为 DDF-MZI 的结构图,由两个功率耦合比为 50:50 的对称耦合器以及两段长度相等但首末色散比不等的 DDF 构成。需要压缩的宽脉冲从第一个耦合器的端口 1 输入,压缩后的窄脉冲以及被分离的脉座分别从第二个耦合器的端口 3 和端口 4 输出。耦合器的耦合原理已有详细的方程组描述<sup>[25]</sup>;同时考虑群速度色散(GVD)、自相位调制(SPM)、拉曼自频移(RSS)和三阶色散(TOD)等因素后,皮秒光脉冲在 DDF 中传输满足下述方程<sup>[26]</sup>:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} p(\xi) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u + i \Gamma u = i \delta_3 \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3} + \tau_R u \frac{\partial |u|^2}{\partial \tau}, \quad (1)$$

式中  $\xi, \tau, u(\xi, \tau)$  分别为归一化距离,归一化时间和归一化脉冲包络复振幅,与参数  $\Gamma, \tau_R, \delta_3$  以及  $p(\xi)$  有关的项分别表示损耗, RSS, TOD 以及 GVD 沿 DDF 的变化情况。 $\xi, \tau, p(\xi), \Gamma, \delta_3$  以及  $\tau_R$  分别按以下形式归一化:

$$\xi = \frac{z |\beta_2(0)|}{T_0^2}, \quad \tau = \frac{t - z/v_g}{T_0}, \quad p(\xi) = \left| \frac{\beta_2(\xi)}{\beta_2(0)} \right|, \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{\alpha}{2} \frac{T_0^2}{|\beta_2(0)|}, \quad \delta_3 = \frac{\beta_3}{6 |\beta_2| T_0}, \quad \tau_R = \frac{T_R}{T_0}, \quad (3)$$

式中  $\beta_2(0)$  为 DDF1 及 DDF2 输入端(首端)的 GVD 系数,  $\beta_3$  为 TOD 系数(一般情况下<sup>[11,12]</sup>,  $\beta_3 > 0$  且沿 DDF 轴向恒定),  $v_g$  为脉冲包络的群速度,  $T_0$  为输入脉冲在 1/e 功率处的半峰全宽,  $T_R$  为拉曼常数,  $\alpha$  为损耗系数。(1)式未包括脉冲在传输过程中的自陡效应,因为对于皮秒输入脉冲,自陡效应相对于

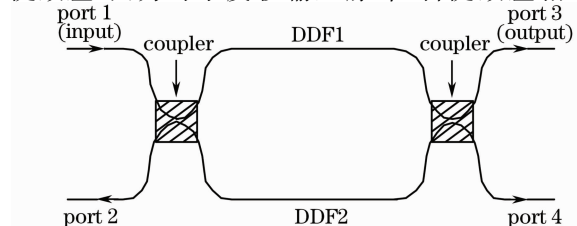


图 1 DDF-MZI 工作原理图

Fig. 1 Operation principle of the DDF-based Mach-Zehnder interferometer

RSS 或 TOD 效应对脉冲传输的影响很小<sup>[26]</sup>。

在基于 DDF 的光脉冲压缩技术中,输入脉冲既可以是孤子脉冲<sup>[9]</sup>,也可以是高斯脉冲<sup>[19]</sup>,甚至还可以是啁啾脉冲<sup>[18]</sup>。本文为了叙述方便,设输入脉冲为下式表示的高阶孤子:

$$u(0, \tau) = N \operatorname{sech} \tau, \quad (4)$$

式中  $N$  为孤子阶数,它与 DDF 及脉冲具体物理参数的关系为

$$N^2 = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2(0)|}, \quad (5)$$

式中  $\gamma$  为 DDF 的非线性系数,  $P_0$  为输入脉冲峰值功率。

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 高阶孤子在 DDF-MZI 中的压缩

设输入脉冲为 10 阶孤子,即  $u(0, \tau) = 10 \operatorname{sech} \tau$ , 初始宽度  $T_{\text{FWHM}} = 20$  ps ( $T_{\text{FWHM}}$  表示脉冲功率的半峰全宽,  $T_0 = T_{\text{FWHM}}/1.763$ )。对于组成 MZI 上下两臂的 DDF1 及 DDF2,在工作波长  $1.55 \mu\text{m}$  附近取下述典型参数值:  $\beta_2(0) = -10 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\alpha = 0.046 \text{ km}^{-1}$ ,  $\gamma = 5 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ ,  $T_R = 3 \text{ fs}$ ,  $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$ , 则由 (3) 式可得  $\Gamma = 0.296$ ,  $\delta_3 = 0.000147$ ,  $\tau_R = 0.000264$ ; 由 (5) 式可估算出输入脉冲峰值功率约  $1.554 \text{ W}$ 。暂时忽略 TOD 效应,相当于采用色散平坦 DDF<sup>[10~12]</sup>。全文假设 DDF1 及 DDF2 首端 GVD

系数  $[\beta_2(0)]$  相同,并且长度相等,则二者色散渐减速度(或首末色散比)不能相等,以利用 MZI 的开关特性。规定二者长度相等是为了保证 DDF1 及 DDF2 中传输的两脉冲能够同步到达 MZI 的第二个耦合器,以便叠加干涉。为获得最佳压缩,在规定 DDF1 及 DDF2 色散渐减速度的前提下,同步改变 DDF1 及 DDF2 的长度,使得从 MZI 端口 3 输出的压缩脉冲的脉座能量最小,此时对应的 DDF1 及 DDF2 长度就是 MZI 的最佳臂长。脉座能量定义为

$$E/(\%) = \frac{|E_{\text{total}} - E_{\text{sech}}|}{E_{\text{total}}} \times 100\%, \quad (6)$$

式中  $E_{\text{total}}$  是压缩脉冲的总能量,  $E_{\text{sech}}$  是假想的双曲正割脉冲能量,该双曲正割脉冲具有与压缩脉冲相同的宽度(FWHM)和相同的峰值强度(注:压缩脉冲有脉座,双曲正割脉冲无脉座,二者能量之差相对于压缩脉冲的总能量即为压缩脉冲的脉座能量)。任意双曲正割脉冲的能量可由下式计算:

$$E_{\text{sech}} = 2P_{\text{peak}} \frac{T_{\text{FWHM}}}{1.763}, \quad (7)$$

式中  $P_{\text{peak}}$  和  $T_{\text{FWHM}}$  分别代表该脉冲的峰值功率和半峰全宽。

在上述约定下,最终求得对应于最佳压缩的 DDF1 及 DDF2 长度(即 MZI 臂长)为  $2.0417 \text{ km}$ , 首末色散比分别为 10 和 6。图 2(a), (b) 中的实线

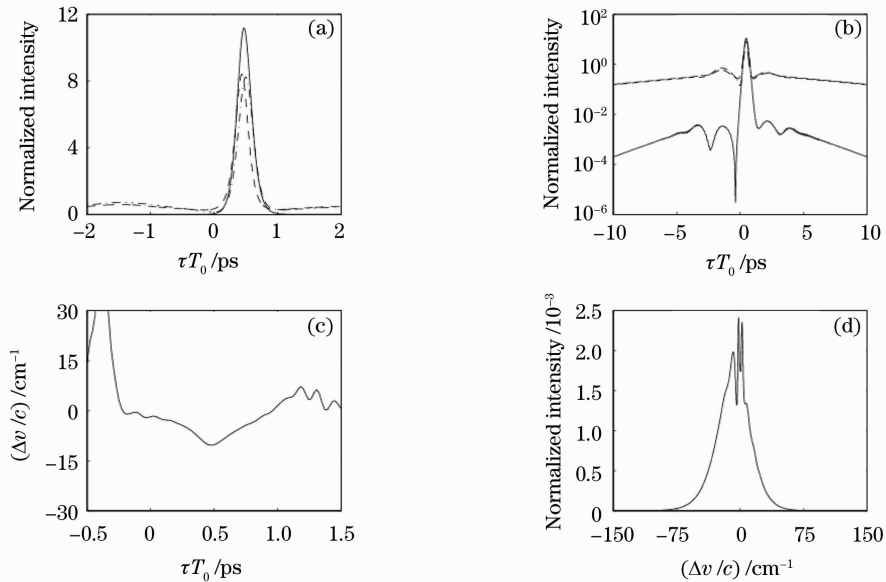


图 2 (a)线性归一化强度表示的压缩脉冲波形,(b)对数归一化强度表示的压缩脉冲波形,(c)压缩脉冲的频率啁啾和(d)压缩脉冲的频谱

Fig. 2 Temporal shapes of the compressed pulse in (a) linear normalized intensity, (b) logarithmic scale, (c) frequency chirp, (d) spectrum of the compressed pulse

分别以线性和对数归一化强度示出此时压缩脉冲的波形,虚线和点画线分别表示 DDF1 和 DDF2 末端两脉冲干涉前的波形。图 2(c),(d) 分别表示干涉后压缩脉冲的频率啁啾和频谱。这里压缩脉冲的波形和频谱已分别用输入脉冲波形和频谱的峰值强度归一化。结果表明,压缩脉冲脉座很小,脉座能量仅占 0.2%,故其形状非常接近双曲正割波形,压缩比为 76.4(定义压缩比为输入脉冲宽度与压缩脉冲宽度之比)。由图 2(a),(d) 算出压缩脉冲的时间-带宽积为 0.3,十分接近双曲正割脉冲的变换极限值 0.315。图 2(c) 示出其频率啁啾特性,可见压缩脉冲主体部分的频率啁啾确实很小。频谱主轮廓也接近双曲正割形状,只是 RSS 效应引起了中心频率向低频方向的少量移动。

上述高质量压缩脉冲的产生源于 MZI 的开关特性,基本原理如下:由于 MZI 两臂首末色散比不同,能量相同的输入脉冲分别经过上下臂传输后获得了不同的非线性相移,当它们到达 MZI 第二个耦合器时,由于 MZI 臂长选择合适,两脉冲中央部分会产生接近于  $\pi$  的相位差,脉座之间的相位差很小。相干叠加的结果是高质量压缩脉冲从 MZI 端口 3 输出,脉座从端口 4 输出。

为考察压缩脉冲的传输特性,将其耦合入一段色散均匀光纤,光纤的 GVD 系数  $\beta_2$  与 MZI 下臂 DDF2 的末端 GVD 系数相同(即  $\beta_2 = -1.67 \text{ ps}^2/\text{km}$ )。图 3 示出压缩脉冲在上述色散均匀光纤中的演化情况,演化距离为 2.02 km。若按该光纤输入端的脉冲宽度(约 262 fs)计算,上述传输距离相当于 97 个孤子周期(孤子周期  $z_0 = \pi t_0^2 / 2 |\beta_2|$ ,其中  $t_0 = T_0 / 76.4 \approx 0.148 \text{ ps}$  为输入脉冲半峰全宽)。图 3 表明,在初始传输阶段脉冲宽度和峰值功率均出现轻微起伏,但随着传输距离的增加,脉冲波形便很快稳定,只是由

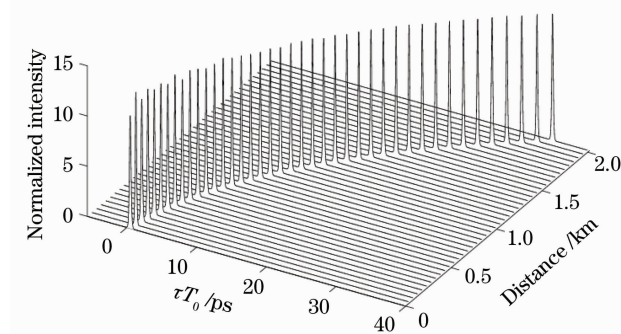


图 3 压缩脉冲在色散均匀光纤中的演化

Fig. 3 Evolution of the compressed pulse in a lossless fiber with constant dispersion

于 RSS 效应导致的频率移动使得其群速度不断减小,进而导致到达时间的逐渐滞后。整个演化过程表明,由 MZI 输出的压缩脉冲很大程度上具有基阶孤子特性,通常称这类脉冲为类孤子脉冲。

### 3.2 MZI 参数及输入脉冲参数变化对压缩结果的影响

上述结果是在一组确定的参数下取得的。实际上,无论是对 MZI 的设计还是输入脉冲的测量,所有参数的确定都很难做到十分准确。因此,有必要研究 MZI 参数及输入脉冲参数变化对压缩结果的影响。主要参数包括: MZI 臂长、两臂各自的首末色散比以及输入脉冲峰值功率。

图 4 示出压缩脉冲的归一化峰值强度、压缩比以及脉座能量与 MZI 臂长的关系。这里假设输入脉冲以及其余 MZI 参数均与计算图 2 时所设定的相同,仅仅是两臂(DDF1 及 DDF2)长度在 1.91~2.16 km 范围内变化。在整个变化过程中,始终保持两臂长度相等,而且两臂各自的色散渐减速度恒定(与计算图 2 时所设定的相同)。图 4 表明,即使 MZI 臂长在一个较大的范围内变化(1.96~2.09 km),都能获得高质量的压缩脉冲,在此范围内,脉冲压缩比大于 65,归一化峰值强度大于 13,脉座能量小于 5%,这意味着对于确定的输入脉冲,实际上很容易选取接近最佳压缩所需的两臂长度。

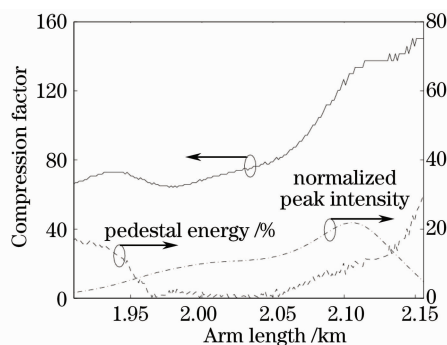


图 4 压缩脉冲的归一化峰值强度、压缩比以及脉座能量与 MZI 臂长的关系

Fig. 4 Normalized peak intensity, compression factor, and corresponding pedestal energy of the compressed pulse as a function of the arm length

图 5 给出了压缩脉冲的归一化峰值强度、压缩比以及脉座能量与 MZI 上臂 DDF1 首末色散比的关系。这里的输入脉冲以及其余 MZI 参数[包括臂长, DDF1 及 DDF2 的始端 GVD 系数  $\beta_2(0)$  以及 DDF2 的首末色散比]均与计算图 2 时所设定的相同,只是 DDF1 的首末色散比在 8~16 之间变化。可见,DDF1 首末色散比的变化对压缩结果的影响

比较缓慢。当 DDF1 首末色散比在 8~13.5 范围内变化时,可获得压缩比大于 70、归一化峰值强度大于 10 以及脉座能量小于 5% 的高质量压缩脉冲。

图 6 示出压缩结果与 DDF2 首末色散比的关系,这里的输入脉冲以及其余 MZI 参数也与计算图 2 时所设定的相同。结果同样表明,当 DDF2 首末色散比在较宽范围内变化时,仍然可获得较好的压缩效果。

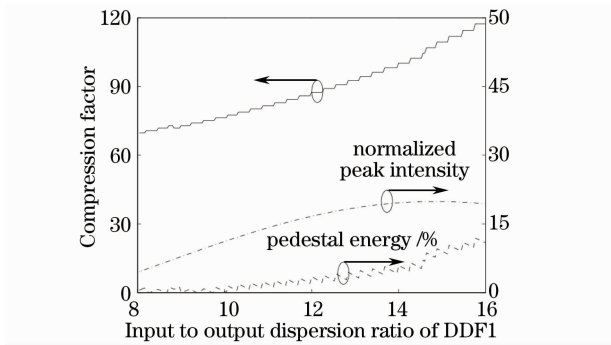


图 5 压缩脉冲的归一化峰值强度、压缩比以及脉座能量与 MZI 上臂 DDF1 首末色散比的关系

Fig. 5 Normalized peak intensity, compression factor, and corresponding pedestal energy of the compressed pulse as a function of the input to output dispersion ratio of DDF1

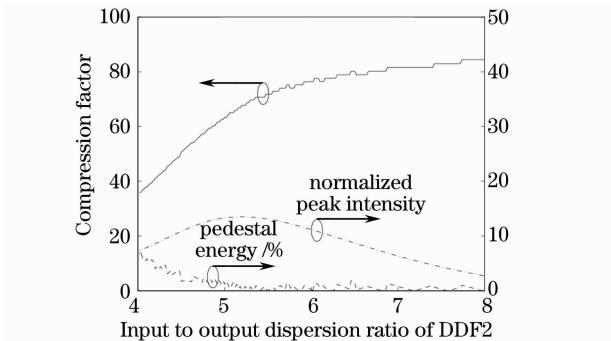


图 6 压缩脉冲的归一化峰值强度、压缩比以及脉座能量与 MZI 下臂 DDF2 首末色散比的关系

Fig. 6 Normalized peak intensity, compression factor, and corresponding pedestal energy of the compressed pulse as a function of the input to output dispersion ratio of DDF2

图 7 示出压缩结果与输入脉冲孤子阶数  $N$  的关系,其中输入脉冲宽度以及 MZI 参数均与计算图 2 时所设定的相同,只是  $N$  在 9.1~11.7 范围内变化。由(5)式知,这相当于输入脉冲峰值功率在 1.287~2.127 W 之间变化。结果表明,随着  $N$  的改变,压缩比、归一化峰值强度以及脉座能量均呈现振荡特性。当  $N$  在 9.6~10.2 范围内变化时(相当于峰值功率在 1.432~1.617 W 之间变化),可获得

压缩比大于 75 的高质量压缩脉冲。上述峰值功率变化范围相当于在 1.525 W 附近允许  $\pm 6\%$  的输入脉冲峰功率波动,对于 GS-DFB-LD 来说不难满足。值得注意的是,图 7 表明,高质量(脉座很小)压缩脉冲总是出现在压缩比的极小值附近,随着  $N$  的增大,脉座能量的极小值也增大,与此同时,对应的压缩比却减小。这意味着对于确定的 MZI,不能企望通过增大输入脉冲峰值功率来提高压缩比,这是由

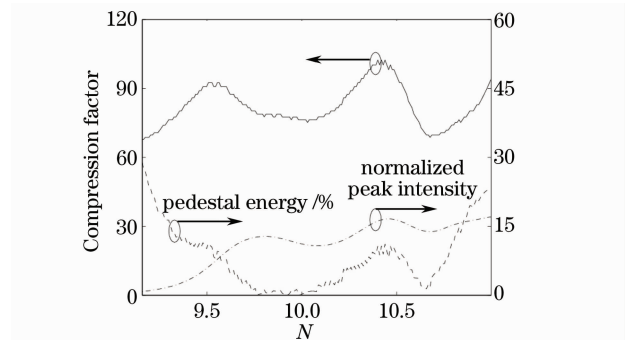


图 7 压缩脉冲的归一化峰值强度、压缩比以及脉座能量与输入脉冲孤子阶数的关系

Fig. 7 Normalized peak intensity, compression factor, and corresponding pedestal energy of the compressed pulse as a function of the input soliton order

于 RSS 效应的作用。由于 MZI 两臂的首末色散比不同,在上下臂中传输的两脉冲受到不同程度的压缩,RSS 效应对两脉冲的影响程度也不一样,结果导致二者在到达 MZI 第二个耦合器时产生了时间差。输入脉冲峰值功率越高,由 RSS 效应引起的时间差越大,干涉效果就越差。

图 8 示出当输入脉冲孤子阶数  $N$  在 5~7.4 范围内变化时的压缩情况,对应的输入脉冲峰值功率变化范围为 0.388~0.851 W。输入脉冲的半峰全宽仍为 20 ps,MZI 参数固定,上下臂的首末色散比分别为 10 和 6,但由于  $N$  值较小,MZI 臂长增大到 4.6898 km,

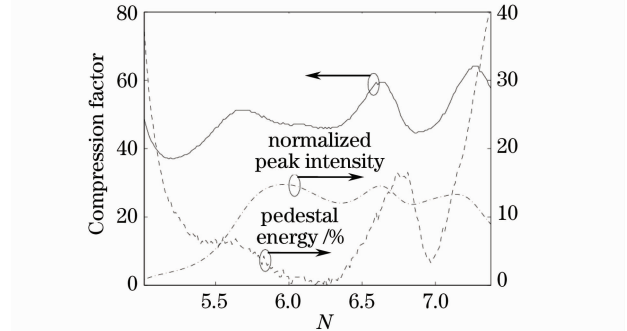


图 8 压缩结果与输入脉冲孤子阶数的关系

Fig. 8 Relation between the results of compression and the order of input pulse soliton

也就是 6 阶孤子最佳压缩所需的两臂长度。可见,当  $N$  在 5.7~6.5 范围内变化时(相当于输入脉冲峰值功率在 0.505~0.657 W 之间变化),可获得压缩比大于 46、脉座能量小于 5% 的高质量压缩脉冲。虽然曲线形式与图 7 相似,但仔细比较不难发现,这里的峰值功率变化范围(即 0.505~0.657 W)相当于在 0.581 W 附近允许  $\pm 13\%$  的输入脉冲峰功率波动,相对于图 7 中的  $\pm 6\%$  提高了一倍多。这意味着,如果从脉冲源输出的脉冲峰值功率起伏较大,可适当减小输入脉冲的峰值功率,以保证压缩脉冲质量。

总而言之,MZI 参数或输入脉冲参数在一定范围内的误差或起伏对压缩结果的影响很小,根本原因如下:在 MZI 两臂末端的压缩脉冲尽管在干涉前都带有较大的脉座(如图 2 中的虚线和点画线),但脉冲中间部分实际上近似于基阶孤子,这是由 DDF 的压缩特性决定的<sup>[17]</sup>;因为基阶孤子对于光纤参数的变化(或输入峰值功率的起伏)具有一定的抗干扰性,所以当 MZI 两臂末端的脉冲到达第二个耦合器叠加干涉时,干涉结果对于 MZI 参数或输入脉冲参数的变化同样具有一定的抗干扰性。

### 3.3 三阶色散(TOD)对压缩结果的影响

以上计算均是针对初始半峰全宽为 20 ps 的输入脉冲进行的,并假设 MZI 由色散平坦 DDF 构成,从而可以忽略 TOD 效应。对于更窄的输入脉冲,如果构成 MZI 的 DDF 不具有色散平坦特性,则 TOD 效应会随着输入脉冲宽度的减小(或压缩比的增大)变得越来越显著。已有研究表明<sup>[26,27]</sup>,正 TOD( $\beta_3 > 0$ )会导致脉冲波形的后沿出现振荡,不仅会恶化压缩脉冲质量,而且由于额外的能量损失,也会导致压缩比的减小。

图 9 示出当输入脉冲宽度分别为 20, 10 和 5 ps 时的压缩脉冲波形和频谱。其中虚线和实线分别表示计及和不计 TOD 效应后的压缩结果。所有情况下,输入脉冲均为 10 阶孤子,MZI 两臂的首末色散比也与计算图 2 所设定的相同。在不计 TOD 效应的情况下,求得对应于 20, 10 和 5 ps 输入脉冲的最佳臂长分别为 2.0417, 0.5013 和 0.1220 km。当计及 TOD 效应时,仍然使用上述臂长,尽管不是最佳,目的是为了考察 TOD 的影响。

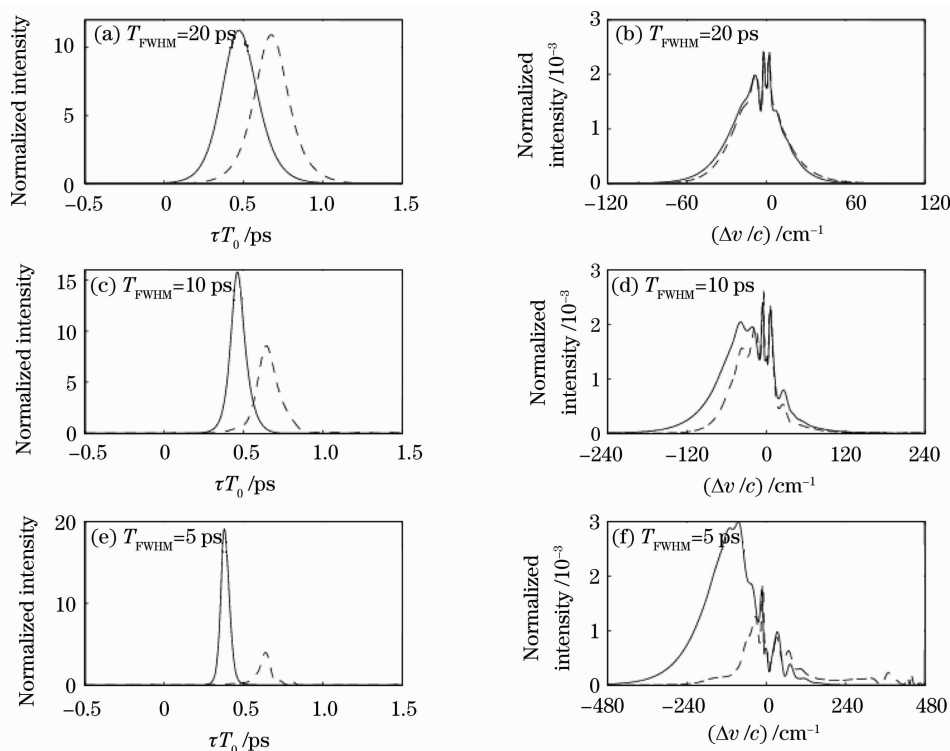


图 9 当输入脉冲为 10 阶孤子、宽度分别为 20, 10 和 5 ps 时, TOD 对压缩脉冲波形和频谱的影响  
Fig. 9 Influences of the TOD effects on the compressed pulse shapes and spectra for input pulse which is 10-order soliton and whose width (FWHM) of 20, 10, and 5 ps

图 9(a), (b) 表明, 当输入脉宽为 20 ps 时, TOD 对压缩脉冲波形和频谱的影响都很小, 仅仅导

致波形在时间上有一个较小的延迟。这是由于 TOD 效应引起脉冲波形后沿振荡形成的, 振荡使得

MZI 两臂末端脉冲波形的峰值向后沿倾斜(参考文献[26]),从而导致脉冲整体部分的时延。当两脉冲在 MZI 第二个耦合器发生干涉后,虽然沿振荡被当作脉座消除了,但压缩脉冲的时延依然存在。

图 9(c),(d)示出半峰全宽为 10 ps 的输入脉冲压缩结果。可见 TOD 对压缩脉冲波形和频谱的影响都比较明显。与不计 TOD 效应的压缩结果(实线)相比,TOD 使得压缩比由 96.3 减小到 68.8,归一化峰值强度降低了 46%,脉座能量由 3%增大到 10%。原因是,由于输入脉冲宽度的减小,TOD 使得 MZI 两臂末端脉冲后沿的振荡进一步增强,振荡形成的色散波使得脉冲主体部分能量损失较大,因而导致压缩脉冲宽度的增大和峰值功率的减小。与此同时,由于振荡增强,两脉冲的振荡部分会形成一定的非线性相位差,叠加干涉后满足(或部分满足)从 MZI 端口 3 直通的条件,直接导致压缩脉冲脉座的增大。图 9(d)还表明,TOD 导致压缩脉冲频谱的红移减小,是由于 TOD 导致了 MZI 两臂中的脉冲在传输过程中不断展宽,从而减小了脉冲拉曼自频移的速度。另外,计及 TOD 后,压缩脉冲的频谱表现出分裂的趋势[图 9(d)中的虚线],这是由 TOD 和 SPM 两种因素引起的,可理解如下:如上所述,在不计 TOD 情况下,MZI 两臂末端的脉冲近似为基阶孤子,因而当二者干涉叠加后,合成的压缩脉冲频谱分裂并不明显;但是,当 TOD 作用后,脉冲尾部强烈的振荡使得两脉冲主体部分不再是基阶孤子,而是出现严重的不对称性,这种情况下,由 SPM 引起的脉冲主体部分的频率啁啾不能被 GVD 效应完全补偿,从而发生频谱分裂。

总体来说,对于上述初始宽度为 10 ps 的脉冲压缩,TOD 效应对压缩结果的影响并不十分严重,一般情况下还是可以使用的。然而,随着输入脉冲宽度进一步减小,情况会随之恶化。图 9(e),(f)示出 5 ps 输入脉冲的压缩情况。与不计 TOD 的压缩结果相比,TOD 导致压缩比由 85.1 下降到 68.8,归一化峰值强度减小了 79%,脉座能量由 3%增大到 29%。压缩脉冲波形严重偏离双曲正割形状,其尾部出现较强的振荡。频谱分裂更加明显,说明 SPM 效应引起的脉冲主体部分的非线性频率啁啾很大。因此,在这种情况下,必须采用色散平坦 DDF 构成 MZI,以保证压缩效果。

应该注意的是,上述结果表明,在不计 TOD 效应的情况下,即使输入脉冲孤子阶数相同(均为 10 阶孤子),但如果脉冲宽度不同,通过 MZI 得到的最

佳压缩比也不相等。例如,对于 20 ps 输入脉冲,最佳压缩比为 76.4,而对于 10 ps 和 5 ps 输入脉冲,最佳压缩比分别为 96.3 和 85.1,造成这一差异的主因是 RSS 效应。如前面所述,MZI 两臂具有不同的色散渐减速度,在两臂中传输的脉冲获得的压缩效果不等,受 RSS 效应的影响程度也不同,导致两脉冲到达 MZI 第二个耦合器时出现时间差,因而两者的叠加区域减小,结果是输出后的压缩脉冲变窄,即适量的 RSS 效应对脉冲压缩具有一定的增强效果<sup>[18]</sup>。若输入脉冲太宽(如前述 20 ps),RSS 效应的影响很小,对脉冲压缩的增强效果并不明显;反之,若输入脉冲太窄(如前述 5 ps),RSS 效应引起的上述时间差太大,两脉冲在到达耦合器之前几乎完全分离,不仅造成干涉效果变差,也会导致输出脉冲压缩比的下降。因此,对于超短光脉冲压缩,除了有必要采用色散平坦 DDF 之外,还要考虑到 RSS 效应的作用。为了减小 RSS 引起的时间差,可在 MZI 其中一臂引入适量的时延,如插入合适的色散延迟线或适当增加其中一臂的长度。

## 4 结 论

通过数值计算,对 DDF-MZI 中的光脉冲压缩进行了详细研究,该方法同时利用了 DDF 中的高阶孤子压缩特性和 MZI 的非线性开关特性。不仅能获得比 DDF 绝热压缩以及 DDF-NOLM 高阶孤子压缩大得多的压缩比,而且可以压缩 DDF 绝热压缩技术所不能压缩的宽脉冲。数值计算表明,对于确定的输入脉冲,当 MZI 设计参数(如两臂长度以及两臂各自的首末色散比)在较大范围内变化时,都能获得高质量压缩脉冲;对于确定的 MZI,输入脉冲峰值功率的起伏对压缩结果的影响也较小。相对而言,如果输入脉冲过窄,DDF 中的高阶效应如 TOD 和 RSS 对压缩结果的影响较大。对于宽度小于 5 ps 的输入脉冲,需要采用色散平坦的 DDF 构成 MZI,以减小 TOD 的影响;与此同时,还有必要在 MZI 其中一臂引入适当的时延量,以缩小两干涉脉冲之间的时间差,保证压缩效果。

## 参 考 文 献

- 1 H. Weber, R. Ludwig, S. Ferber *et al.*. Ultrahigh-speed OTDM-transmission technology [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4616~4627
- 2 S. Arahira, Y. Ogawa. 160-Gb/s OTDM signal source with 3R function utilizing ultrafast mode-locked laser diodes and modified NOLM [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(5): 992~994

- 3 D. A. Chestnut, J. R. Taylor. Compact, synchronously diode-pumped tunable fiber Raman source of subpicosecond solitons around 1.6  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(3): 262~264
- 4 F. Tauser, F. Adler, A. Leitenstorfer. Widely tunable sub-30-fs pulses from a compact erbium-doped fiber source [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 516~518
- 5 Zhong Shan, Wu Jian, Lou Caiyun *et al.*. Study on dechirping of pulses from gain-switched semiconductor laser [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 1997, **18**(10): 741~747  
钟山, 伍剑, 娄采云等. 增益开关半导体激光器超短光脉冲消啁啾研究 [J]. *半导体学报*, 1997, **18**(10): 741~747
- 6 Wu Jian, Zhang Fan, Zuo Peng *et al.*. Study on optimal operating condition of gain-switched semiconductor laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 12~16  
伍剑, 张帆, 左鹏等. 增益开关半导体激光器最佳工作状态研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 12~16
- 7 P. M. Anandarajah, C. Guignard, A. Clarke *et al.*. Optimized pulse source employing an externally injected gain-switched laser diode in conjunction with a nonlinearly chirped grating [J]. *IEEE J. Selected Topics Quant. Electron.*, 2006, **12**(2): 255~264
- 8 R. Maher, P. M. Anandarajah, L. P. Barry *et al.*. Complete performance analysis of a 3.5 ps pulse source consisting of a gain-switched laser diode followed by a non-linearly chirped grating [C]. In Digest of the Conference on Quantum Electronics and Laser Science, OSA / CLEO/QELS 2008, San Jose, CA, USA, May 2008: 1~2
- 9 Jia Dongfang, Tan Bin, Wang Zhaoying *et al.*. Study of soliton pulse with small pedestal based on adiabatic soliton compression effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 166~170  
贾东方, 谈斌, 王肇颖等. 基于绝热孤子压缩效应的小基座孤子脉冲研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 166~170
- 10 K. R. Tamura, M. Nakazawa. Femtosecond soliton generation over a 32 nm wavelength range using a dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(3): 319~321
- 11 I. Morohashi, T. Sakamoto, H. Sotobayashi *et al.*. Widely repetition-tunable 200 fs pulse source using a Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator and dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1192~1194
- 12 I. Morohashi, T. Sakamoto, H. Sotobayashi *et al.*. Broadband wavelength-tunable ultrashort pulse source using a Mach-Zehnder modulator and dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(15): 2297~2299
- 13 M. D. Pelusi, H. F. Liu. Higher order soliton pulse compression in dispersion-decreasing optical fibers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(8): 1430~1439
- 14 S. V. Chernikov, D. J. Richardson, R. I. Laming *et al.*. 70 Gb/s fiber based source of fundamental solitons at 1550 nm [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(13): 1210~1212
- 15 A. V. Shipulin, D. G. Fursa, E. A. Golovchenko *et al.*. High repetition rate cw fundamental soliton generation using multisoliton pulse compression in a varying dispersion fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(16): 1401~1403
- 16 A. V. Shipulin, E. M. Dianov, D. J. Richardson *et al.*. 40 GHz soliton train generation through multisoliton pulse propagation in a dispersion varying optical fiber circuit [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(11): 1380~1382
- 17 M. D. Pelusi, Y. Matsui, A. Suzuki. Pedestal suppression from compressed femtosecond pulses using a nonlinear fiber loop mirror [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(6): 867~874
- 18 P. K. A. Wai, W. H. Cao. Ultrashort soliton generation through higher-order soliton compression in a nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion decreasing fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(6): 1346~1355
- 19 J. H. Lee, T. Kogure, D. Richardson. Wavelength tunable 10-GHz 3-ps pulse source using a dispersion decreasing fiber-based nonlinear optical loop mirror [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2004, **10**(1): 181~185
- 20 Liang Mantang, Cao Wenhua, Zhou Jiaqing. DDF-MZI-based higher-order soliton pulse compression [J]. *Study on Optical Communications*, 2009, **155**(5): 37~39  
梁满堂, 曹文华, 周佳庆. 基于 DDF-MZI 的高阶孤子脉冲压缩 [J]. *光通信研究*, 2009, **155**(5): 37~39
- 21 B. K. Nayar, N. Finlayson, N. J. Doran *et al.*. All-optical switching in a 200-m twin-core fiber nonlinear Mach-Zehnder interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 408~410
- 22 P. Elango, J. W. Arkwright, P. L. Chu *et al.*. Low-power all-optical broad-band switching device using ytterbium-doped fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(8): 1032~1034
- 23 J. E. Heebner, R. W. Boyd. Enhanced all-optical switching by use of a nonlinear fiber ring resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(12): 847~849
- 24 J. Li, L. Li, L. Jin *et al.*. All-optical switch and limiter based on nonlinear polarization in Mach-Zehnder interferometer coupled with a polarization-maintaining fiber-ring resonator [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(1): 318~323
- 25 Cao Wenhua, Liu Songhao. Amplification and compression of ultrashort solitons in an erbium-doped nonlinear amplifying fiber loop mirror. II. effects of loop and input pulse characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1253~1258  
曹文华, 刘颂豪. 非线性掺铒光纤环镜中超短光孤子的放大与压缩 (II. 环镜及输入脉冲特性对放大结果的影响) [J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1253~1258
- 26 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 4th ed., Singapore: Academic Press, 2009
- 27 Qu Kenan, Zhang Weigang, Liu Zhuolin *et al.*. Dispersion compensation in ultra-short optical pulse compressing system and transmitting system. [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 449~453  
屈柯楠, 张伟刚, 刘卓琳等. 超短光脉冲压缩系统和传输系统的色散补偿 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 449~453