

文章编号:1001-5078(2007)05-0457-04

高阶孤子在色散渐减光纤环中的传输特性研究

袁书琼, 徐文成, 陈伟成

(华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006)

摘 要:研究了高阶孤子在对称结构和不对称结构的色散渐减光纤环形镜的脉冲传输特性, 比较了不同耦合系数下的色散渐减光纤环形镜的开关性能及脉冲压缩性能。得出了使色散渐减光纤环具有良好脉冲输出的耦合器系数范围, 对实验中参数的选取有一定的指导意义。发现不对称结构光纤环形镜亦能产生无基座超短脉冲。

关键词:光纤环形镜; 脉冲压缩; 脉冲基座

中图分类号: O437 **文献标识码:** A

Propagation Characteristics of High-order Pulse in a Nonlinear Optical Loop Mirror Contrusted From a Dispersion Decreasing Fibre

YUAN Shu-qiong, XU Wen-cheng, CHEN Wei-cheng

(Lab of Photonic Information Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The performance of a nonlinear optical loop mirror composed of a dispersion decreasing fibre (DDF - NOLM) is investigated numerically. The switching characteristics and the pulse compression effect of the DDF - NOLM is simulated. Results show that ultrashort pedestaleless pulse can also be generated when an asymmetric coupler is used, with shorter fibre needed. When proper coupler ratio is chosen, output pulse with little pedestal can be generated.

Key words: nonlinear optical loop mirror; pulse compression; pulse pedestals

1 引 言

近年来,非线性光纤环形镜(NOLM)已被广泛研究。由于它具有高功率信号透射、低功率信号反射的特性,在光开关、锁模激光脉冲输出和波长解复用等方面得到了广泛的应用,它是“8”字形环形光纤激光器的重要组成部分^[1-2]。在光脉冲压缩方面,非线性光纤环形镜的开关特性能够消除压缩脉冲的基座,从而大大提高压缩脉冲的质量。目前,用于光脉冲压缩的光纤环有多种结构,比较理想的是色散渐减光纤构成的光纤环(简称DDF-NOLM)。因为用它来压缩高阶孤子时,可获得基座较小的压缩脉冲,但是该种光纤环所需的光纤很长,而且脉冲压缩比小。目前,由等比耦合器和色散渐减光纤环构成的DDF-NOLM已由国内外研究人员广泛研

究^[5-6]。本文用数值分析的方法研究了由不同功分比的耦合器组成的色散渐减光纤环的脉冲透过特性,并详细研究了在不同耦合系数下的NOLM输出脉冲的各方面特性。结果表明:耦合器的耦合系数在一定范围内时,NOLM会有良好的开关性能和稳定的输出脉冲。在NOLM结构不对称时亦能产生无基座超短脉冲,且需要的光纤环长度更短。

2 理论模型

色散渐减光纤环的结构如图1所示,由一个

基金项目:广东省自然科学基金资助(04010397)。

作者简介:袁书琼(1982-),女,华南师范大学信息光电子科技学院硕士研究生,主要从事非线性光学方面的研究工作。E-mail:ba_yi_sisi@126.com

收稿日期:2006-10-23; **修订日期:**2006-11-27

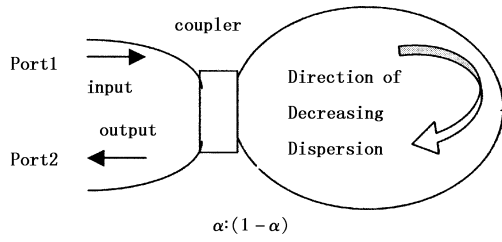


图1 色散渐减光纤环结构示意图

3dB 的耦合器一端用一段色散渐减光纤连接而成，色散减小的方向如图所示。耦合器的传输矩阵为：

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} & i\sqrt{1-\alpha} \\ i\sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中，耦合器的功分比为 $\alpha:(1-\alpha)$ ， α 为耦合器系数； u_0 和 v_0 分别为端口 1 和端口 2 的输入脉冲； u_1 和 v_1 分别为经过耦合器后沿顺时针方向和逆时针方向传输的脉冲。一般情况下，只考虑端口 1 的输入脉冲和端口 2 的输出脉冲。输入脉冲可表示为：

$$u_0 = \sqrt{p_0} \operatorname{sech}(t) \quad (2)$$

其中， p_0 为脉冲的峰值功率，与孤子阶数 N 有如下关系：

$$N^2 = \frac{\gamma p_0 T_0^2}{|\beta_2|} \quad (3)$$

皮秒脉冲在 NOLM 中传输时满足在移动坐标系中的 NLS 方程^[4]：

$$i \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\beta_{2(z)}}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + \gamma |u|^2 u + \frac{ia}{2} = 0 \quad (4)$$

其中， u 为光场振幅； γ 为光纤的非线性系数； a 为光纤损耗系数； z 为光脉冲在移动坐标系中的位置。 $\beta_{2(z)}$ 代表光纤中的群速度色散。脉冲每次经过耦合器时引入 $\frac{\pi}{2}$ 的相移，由于顺时针和逆时针方向传输的脉冲经历了不同的色散，由此在再次到达耦合器之前产生不同的相移，当相移为 π 的偶数倍时，干涉相长；当相移为 π 的奇数倍时，干涉相消。为了衡量输出脉冲质量，定义脉冲基座为一个衡量指标^[5]，基座能量 η 可表示为：

$$\eta = \frac{|E_{\text{total}} - E_{\text{sech}}|}{E_{\text{total}}} \times 100\% \quad (5)$$

其中， $E_{\text{sech}} = 2p_{\text{peak}} \frac{T_{\text{FWHM}}}{1.763}$ ； p_{peak} 是输出脉冲的峰值功率； E_{total} 是输出脉冲能量； T_{FWHM} 是输出脉冲的全宽度半极大脉宽。

3 数值模拟及结果分析

本文采用的光纤为色散线性渐减光纤，始端色

散值为 $-20\text{ps}^2/\text{km}$ ，长度为 z 处的色散值为 $\beta_2 = \beta_0 + A \cdot z$ ，其中 $A = 2.7778\text{ps}^2/\text{km}^2$ ，非线性系数 $\gamma = 5\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ，光纤损耗 $\alpha = 0.2\text{dB}/\text{km}$ 。

图 2 分别比较了 $\alpha = 0.45$ ， $\alpha = 0.5$ ， $\alpha = 0.55$ 三种情况下的输出能量与输入能量之比，以及输出脉冲的压缩比。初始输入脉冲为无啁啾双曲正割脉冲，全宽度半极大脉宽 $T_{\text{FWHM}} = 30\text{ps}$ ，孤子阶数 $N = 6$ 。图 2(a) 中显示当 $\alpha = 0.55$ 时输出能量第一极大值处最大，这是因为在 $\alpha > 0.5$ 的情况下，能量较大的顺时针方向传输脉冲由于是沿着色散渐减的方向，获得了良好的非绝热压缩，因此在再次到达耦合器时与逆时针方向传输的脉冲在脉冲的中心部分得到了更好的干涉，获得了更大的脉冲透射率。

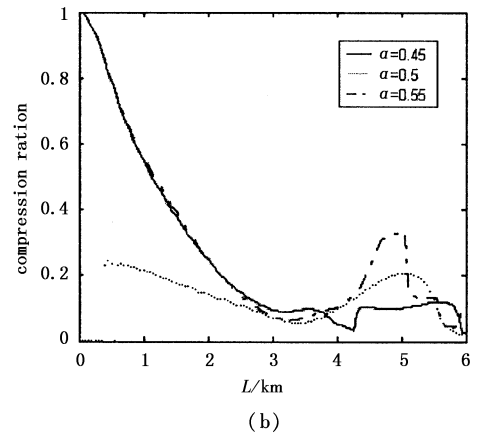
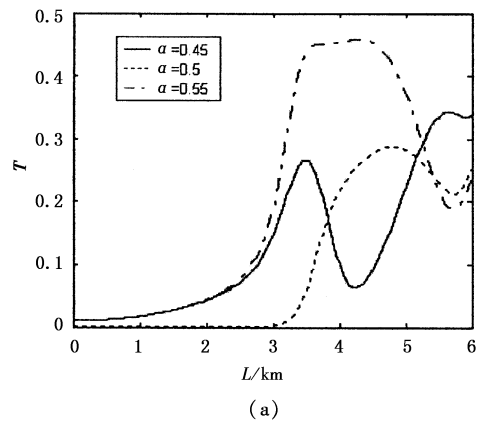


图2 当耦合器系数 $\alpha = 0.45$ ， $\alpha = 0.5$ ， $\alpha = 0.55$ 时，(a) 端口 2 输出能量与端口 1 输入能量之比 T 随光纤环长度 L 变化的关系；(b) 输出脉冲压缩比(输出脉冲宽度与输入脉冲宽度之比)随光纤环长度的变化

3.1 对称结构的色散渐减光纤环

当 $\alpha = 0.5$ 时，NOLM 呈对称结构，输入脉冲经过耦合器时分束为功率相等的两个光场，在光纤环长取 4.8km 时达到第一输出能量极大值，取得最佳压缩，脉冲宽度为 5.92ps ，压缩比为 0.20 ，基座能量为 1.3% ^[5]。图 3(a) 显示输出脉冲与和它相同峰

值功率、相同脉冲宽度的双曲正割脉冲波形非常吻合,图3(b)中输出脉冲频率啁啾在脉冲中心部分呈线性。

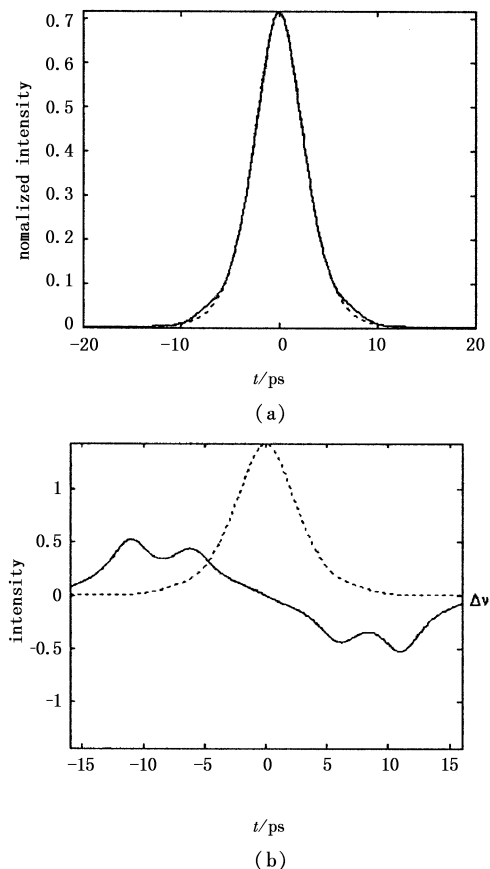


图3 对称结构 DDF-NOLM 在 $L=4.8\text{km}$ 时的输出脉冲情况

(a) 输出脉冲与和它相同峰值功率、相同脉冲宽度的双曲正割脉冲时域图; (b) 输出脉冲的波形(虚线)与频率啁啾(实线)

3.2 不对称结构 NOLM 的开关情况

经过多次数值模拟发现,在耦合器系数取值介于 0.4 与 0.6 之间时 DDF-NOLM 才具有基座小于 20% 的输出脉冲。因此,本文比较了典型值 $\alpha = 0.45$ 和 $\alpha = 0.55$ 时的脉冲传输情况。

当 $\alpha = 0.45$ 时, NOLM 在环长取 3.35km 时取得最佳压缩,脉冲基座仅为 1.05%,压缩比为 0.096。图 4 表明了,在 $\alpha = 0.45$ 的情况下当环长取 3.35km 时输出脉冲的形状及频谱和频率啁啾,与对称结构 DDF-NOLM 相比最佳压缩处所需环长更短,且得到了脉宽 $T_{\text{FWHM}} = 2.88\text{ps}$ 的无基座脉冲。图 4(c) 给出了输出脉冲的波形图和频率啁啾,与对称结构的 DDF-NOLM 的最佳输出脉冲相比,在脉冲的中心部分啁啾的线性更好。图 4(d) 给出了在环长取 3.35km 时输出脉冲在 36km 常规光纤中的传输情况,脉冲在长距离常规光纤中可保持良好的无畸变传输。

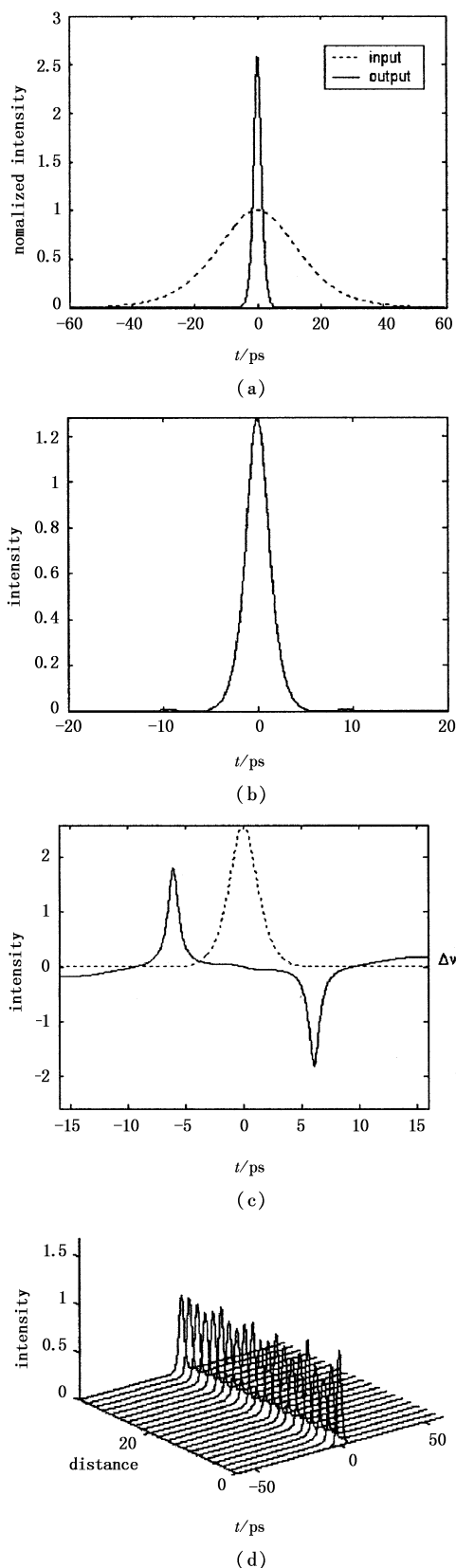


图4 当 $\alpha=0.45$, 脉冲最佳压缩处的脉冲输出情况

(a) NOLM 的输入与输出时域; (b) 输出脉冲(实线)及与它相同峰值功率和相同脉冲(虚线)宽度的双曲正割脉冲; (c) 输出脉冲的波形(虚线)与频率啁啾(实线); (d) 输出脉冲在常规光纤中的传输情况

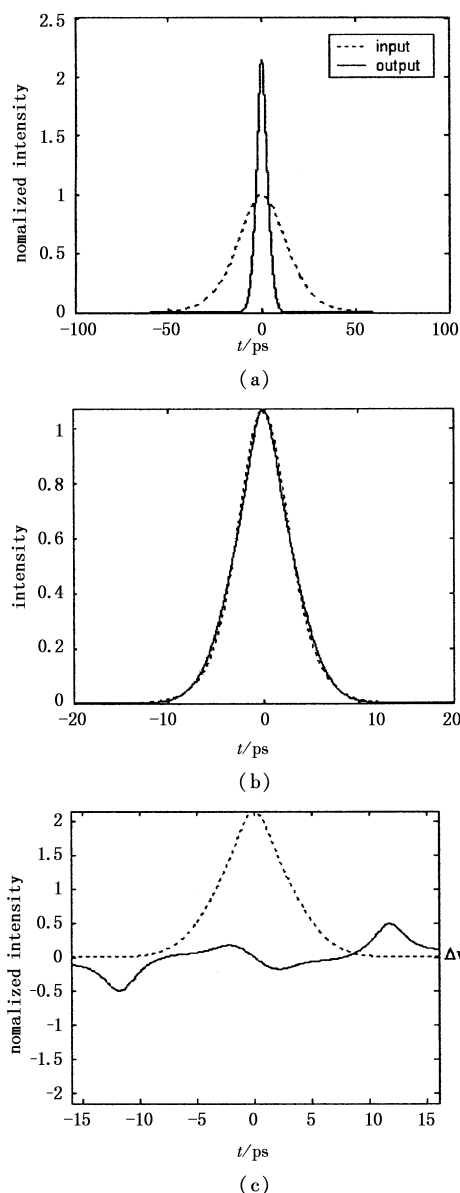


图5 当 $\alpha = 0.55$ 时在脉冲最佳压缩处的输出脉冲情况

(a)输入与输出脉冲时域图;(b)输出脉冲(实线)以及它与它同峰值功率、相同脉冲(虚线)宽度的双曲正割脉冲;(c)输出脉冲的波形(虚线)与频率啁啾(实线)

当 $\alpha = 0.55$ 时,NOLM在环长取4.47km时取得最佳压缩,得到了基座仅为0.85%,压缩比为0.21的输出脉冲,输出脉冲被压缩到6.3ps,与对称结构DDF-NOLM相比,脉冲得到最佳压缩需要的光纤长度更短,基座更小,输出脉冲与相同峰值功率、相同脉冲宽度的双曲正割脉冲形状非常吻合,当 $\alpha = 0.55$ 时在脉冲最佳压缩处的输出脉冲情况如图5所示。为了考察脉冲从DDF-NOLM中输出后在常规光纤中传输的情况,本文给出了输出脉冲在36km的常规光纤中的演化图(见图6)。

图6显示输出脉冲在传输过程中依然遵循孤子周期演化,在传输了36km后仍保持良好形状。

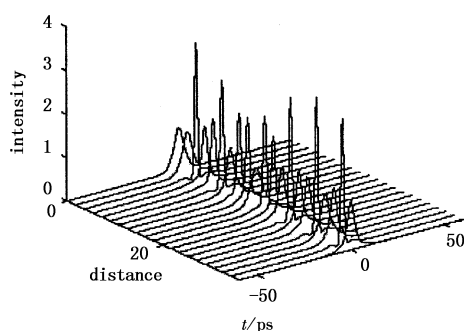


图6 当 $\alpha = 0.55$ 时在光纤环长 $L = 4.47\text{km}$ 时输出脉冲在36km的常规光纤中的传输情况

比较以上三种情况,DDF-NOLM在耦合器功分比 $\alpha = 0.45, \alpha = 0.55$ 时取得良好的压缩脉冲,且需要的光纤环长度更短,输出脉冲的基座更小,脉冲时域形状与同脉宽同峰值功率的双曲正割脉冲非常吻合。

经过多次数值模拟计算发现:只有当 α 值处于0.4~0.6之间时,输出脉冲才能有小于20%的基座。当耦合器耦合系数取值大于0.6或小于0.4时,NOLM虽然有更大的能量转换,但是输出脉冲带有很大基座。

4 结论

本文讨论了不同耦合器系数下的色散渐减光纤环形镜的脉冲能量透过率和脉冲压缩性能。发现耦合器的耦合系数在一定范围内时,NOLM会有良好的开关性能和稳定的输出脉冲。在NOLM结构不对称时亦能产生无基座超短脉冲,且需要的光纤环长度更短,结果对实验参数选择具有指导意义。

参考文献:

- [1] N J Doran, D Wood. Nonlinear optical loop mirror[J]. Opt. Lett., 1988, 13: 56-58.
- [2] A L Steele, J P Hemingway. Nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion decreasing fiber[J]. Opt. Commun., 1996, 123: 487-491.
- [3] S V Chernikov, E M Dianov, D J Richardson, et al. Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber[J]. Opt. Lett., 1993, 18: 476-478.
- [4] G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics[M]. New York: Academic, 1995.
- [5] P K A Wai, Wen-hua 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.
- [6] M D Pelusi, Y Matsui, A Suzuki. Pedestal suppression from compressed femtosecond pulses using a nonlinear fiber loop mirror[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1999, 35: 867-874.