

文章编号: 0258-7025(2005)04-0481-06

色散渐减光纤环形镜的一种改进方法

陈昭喜, 徐文成, 金 伟, 于丙涛, 徐永钊, 崔 虎, 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广东 广州 510631)

摘要 提出了一种由常规光纤和色散渐减光纤构成的新的非线性光纤环形镜(NOLM)。研究了该结构的动力学特性,并与色散渐减光纤(DDF)构成的环形镜进行了比较。数值结果表明,该类型光纤环形镜能产生无基座高品质超短光脉冲,压缩脉冲的啁啾小,在脉冲中心处呈线性,而且获得的脉冲能在无损耗的常规光纤中长距离稳定传输。压缩脉冲的压缩因子和基座能量与输入脉冲的初始脉宽和峰值功率有关,当输入脉冲的宽度增加时,所需的光纤长度变长,压缩因子和基座能量有所下降;当输入功率增加时,所需光纤长度变短,压缩因子和基座能量增加。研究结果还显示,在较大的输入脉冲峰值功率范围内,当脉冲获得最佳压缩时,与色散渐减光纤环形镜相比,新的光纤环形镜所用光纤长度短,压缩因子高。

关键词 非线性光学; 光纤环形镜; 色散渐减光纤; 光脉冲压缩

中图分类号 O 437 **文献标识码** A

Improved Method for the Nonlinear Optical Loop Mirror Constructed from the Dispersion Decreasing Fiber

CHEN Zhao-xi, XU Wen-cheng, JIN Wei,
YU Bing-tao, XU Yong-zhao, CUI-Hu, LIU Song-hao

(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China)

Abstract A new nonlinear optical loop mirror (NOLM) constructed from a dispersion decreasing fiber (DDF) and a normal fiber is proposed. Numerical simulation shows that a ultra-short pulse with pedestal suppression and little chirp can be generated in the new optical loop mirror and the ultra-short pulse can steadily propagate over a long lossless fiber. The compression factor and pedestal energy of the compressed pulse are related to the width and peak power of the initial pulse. The compression factor and the pedestal energy are decreasing but the optimum fiber length is increasing with the growing initial optical pulse width. In the other case, the compression factor and the pedestal energy are increasing but the required optical fiber length is decreasing with the growing input peak power. When the pulse is in optimum compression, the bigger compression factor is obtained and the optical fiber used becomes shorter comparing to the nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion-decreasing fiber.

Key words nonlinear optics; optical loop mirror; dispersion-decreasing fiber; ultra-short pulse compression

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^[1,2],它是“8”字型环形光纤激光器的重要组成部分^[3]。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^[4~6]。目前,用于光脉冲压缩的光纤环有多种结构,比较理想的是由色散渐减光纤构成的光纤环^[7]。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。本文对这种光纤环形镜进行了改进,提出了一种由

收稿日期:2003-12-05; 收到修改稿日期:2004-03-10

基金项目:广东省自然科学基金(980030)和广东省“千百十工程”优秀人才培养基金(Q02085)资助项目。

作者简介:陈昭喜(1979—),女,湖南省桂东县人,华南师范大学量子电子学研究所硕士研究生,研究方向为非线性导波光学和光通信技术。E-mail:chenzhaoxi0505@yahoo.com.cn

常规光纤和色散渐减光纤构成的新的光纤环形镜。研究表明,在常规光纤与色散渐减光纤长度之比选择合适时,可以获得更大的压缩因子,而所用光纤长度更短。

2 光纤环结构及动力学特性

光纤环的基本结构如图 1 所示,它由一个 3 dB 耦合器,一段常规光纤 AB 和一段色散渐减光纤 BC 构成,色散值沿顺时针方向减小。

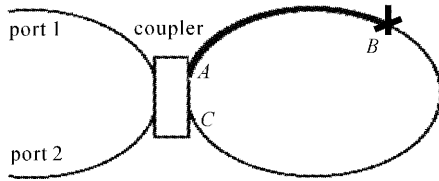


图 1 光纤环形镜结构图

脉冲由端口 1 输入,压缩脉冲由端口 2 输出

Fig. 1 Schematic of NOLM

input pulses are launched into port 1, and compressed pulses are obtained from port 2

光纤耦合器的传输矩阵为^[8]

$$\begin{pmatrix} u_3 \\ u_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho} & i\sqrt{1-\rho} \\ i\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 ρ 为耦合系数, u_1, u_2 分别为端口 1 和端口 2 的输入脉冲, u_3, u_4 为经过耦合器后,分别沿顺时针方向和逆时针方向传输的脉冲,跨过耦合器的脉冲比直通的脉冲的相位滞后了 $\pi/2$ 。本文只考虑脉冲仅由端口 1 输入,在端口 2 输出,而且输入脉冲为双曲正割脉冲

$$u_1 = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}(T), \quad (2)$$

其中 T 为脉冲宽度, P_0 为输入脉冲的峰值功率,它满足关系式 $N^2 = \gamma P_0 T_0^2 \nu / |\beta_2(0)|$ 。 N 为孤子阶数, T_0 为初始脉冲宽度, γ 为非线性系数, $\beta_2(0)$ 为色散渐减光纤的初值。脉冲经过耦合器后,分成相向传输的两个脉冲 u_3, u_4 , 由(1)式可得

$$u_3 = u_1 \sqrt{\rho}, \quad u_4 = u_1 i \sqrt{1-\rho}, \quad (3)$$

在不考虑高阶项的影响时,脉冲在光纤中的传输满足非线性薛定谔方程^[1]

$$i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{i}{2} \alpha u - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + r |u|^2 u = 0, \quad (4)$$

其中 α 为损耗项,在常规光纤中 β_2 为常量,在线性色散渐减光纤中,色散值可以描述为

$$\beta_2(Z) = \beta_2(0) + \beta_2(0) \left(\frac{1-K}{LK} \right) Z, \quad (5)$$

其中 $K = \beta_2(0)/\beta_2(L)$ 是放大系数, L 为色散渐减光纤的长度, Z 为脉冲传输距离。色散渐减光纤的非绝热放大特性可以对光脉冲进行等价放大,使传输光脉冲得到较大的压缩^[9],但是非绝热压缩效应使脉冲具有较大的基座^[10]。利用光纤环的开关特性可将基座消去。由于光纤环的不对称性, u_3, u_4 在重新到达耦合器时,产生的非线性相移不同。在脉冲中心处,功率高,相移差大;在脉冲两翼,功率小,相移差小。当选择合适的光纤长度,可以使脉冲中心处相移差达到 π ,而两翼处的相移差还很小。这样在通过耦合器时,脉冲中心处的总相移差为 2π (两次通过耦合器产生相移 π),相干相长;两翼处相移近似为 π ,相干相消。这样在端口 2 可得到无基座高质量的超短脉冲。为了衡量脉冲的品质,定义两个参量^[7]

$$F_c = \frac{T_{fwhm}}{T_{comp}},$$

$$E_{p,e}(\%) = \frac{|E_{total} - E_{sech}|}{E_{total}} \times 100\%, \quad (6)$$

其中 F_c 为压缩因子, T_{comp} 为压缩后脉冲的脉宽, T_{fwhm} 为输入脉冲的脉宽, $E_{p,e}$ 为基座能量, E_{total} 为压缩脉冲的总能量, E_{sech} 与该脉冲具有相同峰值功率和脉冲宽度的双曲正割脉冲的能量。

3 数值模拟结果及分析

3.1 最佳光纤环结构

由图 1 可知,光纤环中 AB 和 BC 段光纤类型不同,组成的结构也不同,对光脉冲压缩效果也不同。在研究中,提出了三种环的结构。为了比较,用这三种光纤环压缩峰值功率为 0.5 W,脉冲宽度为 17 ps 的孤子脉冲。第一种: AB 是色散值为正的常规光纤, BC 为色散渐减光纤。其中色散渐减光纤的放大系数为 $K = 3$,初值为 $\beta_2(0) = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$,光纤非线性系数均为 $\gamma = 5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,损耗系数均为 $\alpha = 0.046 \text{ km}^{-1}$ ^[1]。我们选取了三个不同的常规光纤的色散值作为比较,结果如图 2(a) 所示。由图可知,从该结构获得的压缩脉冲均带有很大的旁瓣,且输出功率较小。其中实线对应常规光纤色散值 $\beta_2 = 20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ^[1]时获得的压缩脉冲。所用常规光纤为 1.3 km,色散渐减光纤为 3.0 km 时,获得的压缩因子为 18,基座能量为 69%。第二种: AB 为色散渐减光纤而 BC 为常规光纤,结果如图 2(b) 所示。利用该结构获得的压缩脉冲,虽输出功率有所增大,但仍有很大的基座。其中实线对应常规光纤的色散值 $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ 时,获得的压缩脉冲。其他参

数与第一种光纤环所用的参数一致。当常规光纤为 0.8 km, 色散渐减光纤为 2.6 km 时, 脉冲获得最佳压缩, 压缩因子为 10.7, 基座能量为 44%。第三种: AB 为常规光纤, BC 为色散渐减光纤, 如图 1 所示。其中常规光纤的色散值为 $\beta_2(0) = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$, 其他参数与第一种光纤环所用的参数一致。当常规光纤的长度为 1.5 km, 色散渐减光纤的长度为 2.2 km 时, 脉冲获得最佳压缩, 压缩因子为 14, 基座能量为 10%, 结果如图 3 所示。

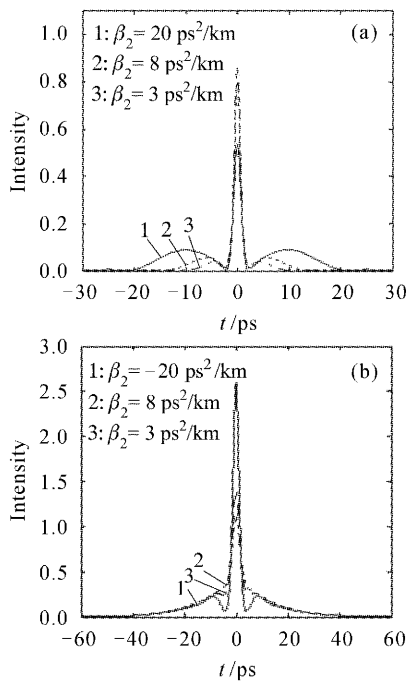


图 2

- (a) 第一种光纤环结构获得的最佳压缩脉冲;
(b) 第二种光纤环结构获得的最佳压缩脉冲

Fig. 2

- (a) Results got from the first construction;
(b) Results got from the second construction

图 3(a)中, 虚线为输入的脉冲, 实线是压缩后的脉冲。从图中可知, 经光纤环形镜传输后, 脉冲得到较大压缩。图 3(b)中实线是压缩后的脉冲, 虚线表示与该脉冲具有相同峰值功率和脉宽的双曲正割脉冲。从图中可看出, 压缩后的脉冲非常接近双曲正割脉冲。通过比较, 发现第一种结构压缩的脉冲, 获得的压缩比大, 同时基座也大, 脉冲质量较差, 不利于传输。这是因为: 无啁啾的脉冲进入正色散区时, 脉冲展宽并产生正啁啾, 而 BC 段为负色散区, 有利于脉冲获得更大的压缩, 但是因为脉冲的展宽, 使得峰值功率变小, 不能很好地满足相位关系, 光纤环的开关特性性能下降, 导致压缩后的脉冲带有较

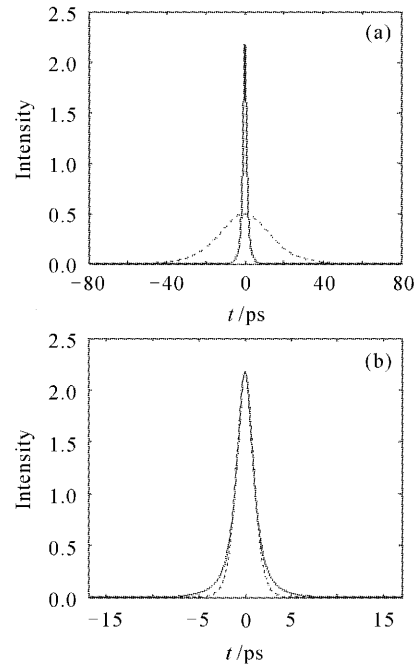


图 3 (a) 压缩脉冲(实线)与输入脉冲(虚线)的波形图;
(b) 压缩脉冲(实线)和与该脉冲具有相同峰值功率及脉宽的双曲正割脉冲(虚线)的波形图

Fig. 3 (a) Compressed pulse (solid curve) and the input pulse (dashed curve); (b) Comparison between the compressed pulse (solid curve) and the ideal hyperbolic-secant pulse (dashed curve) with the same width and the peak power

大的基座。第二种结构, 获得的压缩比较小, 基座较大, 也不利于传输。第三种结构有利于脉冲压缩, 得到的压缩比较大, 基座小。为了验证压缩脉冲的稳定性, 图 4 给出了该脉冲在无损耗的色散为 $\beta_2(0) = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的常规光纤中传输的演化图, 图 4(a) 为脉冲传输 3 km 的演化图, 可以看出脉冲在开始传输时, 稍有展宽, 这是因为压缩后的脉冲带有一定的啁啾。由于脉冲对应的不是基孤子, 所以它在光纤中呈现周期性演化。图 4(b) 为压缩脉冲传输 30 km 的演化图, 可以看出脉冲传输 30 km 后, 仍保持完好的脉冲形状, 证明压缩后的脉冲稳定性好, 可以长距离传输。

3.2 峰值功率和脉冲宽度对压缩效果的影响

图 5 给出了初始孤子阶数与脉冲最佳压缩时光纤长度的关系曲线。输入的脉冲宽度均为 17 ps, 其他参数与前面给出的一致。由图可知, 随着孤子阶数的增加, 在获得最佳压缩时, 所需光纤长度逐渐变短。这主要是因为当脉冲宽度一定时, 脉冲峰值功率随着孤子阶数的增加而增加, 从而使得脉冲在光

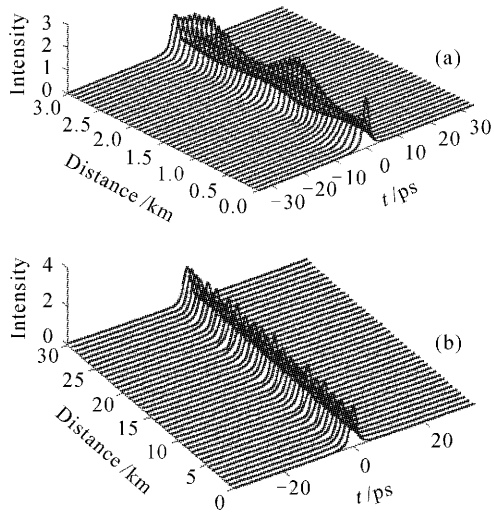


图 4 压缩脉冲在无损耗的常规光纤中的演化图
Fig. 4 Evolution of the pulse of compressed pulse in a lossless fiber

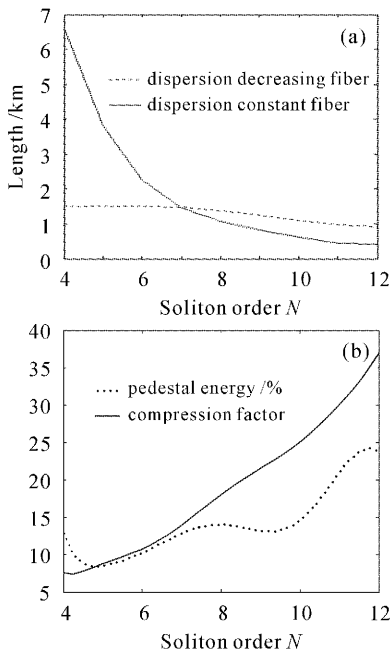


图 5 孤子阶数对光纤环压缩脉冲的影响
Fig. 5 Effect of the initial soliton order on the optimum fiber length for the compressed pulse

纤环内传输时更容易满足相位关系,使所需要的光纤变短。压缩因子随着孤子阶数的增加快速增长,当孤子阶数为 12 时,获得的压缩因子为 36。脉冲的基座随着孤子阶数的增加也逐渐变大,孤子阶数为 5 时,脉冲的基座最小,但所需的光纤长度太长。所以在本文中采用 6 阶孤子来压缩。

图 6 给出了初始脉冲宽度与最佳光纤长度的关

系。输入的脉冲为 6 阶孤子,其他参数与前面给出的一致。从图中可看出,随着脉冲宽度的增加,在获得最佳压缩时,所需的光纤长度增加。这是因为,当孤子阶数一定时,脉冲越宽,峰值功率越低,因而需要更长的光纤来产生合适的相位差。而压缩因子和基座能量随着脉冲宽度的增加而减小。当脉冲宽度大于 17ps 后,基座能量变化很小。

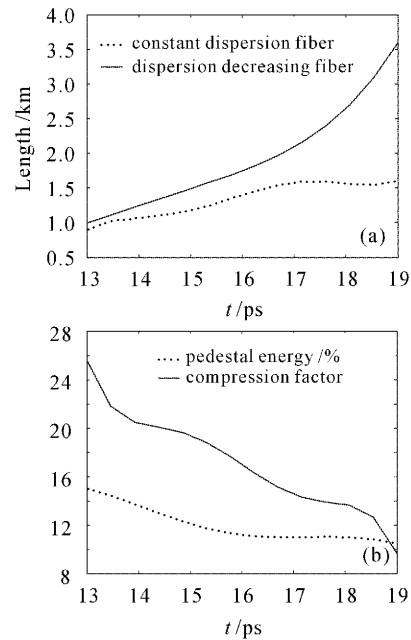


图 6 初始脉宽对光纤环压缩脉冲的影响
Fig. 6 Effect of the initial pulse width on the optimum fiber length for the compressed pulse

3.3 与色散渐减光纤环压缩脉冲的比较

为了同色散渐减光纤环比较,表 1 中列出了两光纤环同时压缩脉冲宽度为 17 ps 的各阶孤子,在获得相同的基座能量时的结果。A 代表新的光纤环形镜,B 代表色散渐减光纤环形镜。所用参数与前一致。从表中可以看出,对于 4~12 阶孤子,用新的光纤环形镜获得的压缩因子始终要大于色散渐减光纤环形镜,而所用的总的光纤长度却小于色散渐减光纤环镜。

图 7 给出 6 阶孤子的具体结果。在获得最佳压缩时,新的光纤环用的常规光纤为 1.5 km,色散渐减光纤长度为 2.2 km,总长度为 3.7 km,色散渐减光纤环所用光纤长度为 4.8 km。图 7(a)中,实线表示利用新的光纤环压缩的脉冲,虚线是用色散渐减光纤环形镜获得的最佳压缩脉冲。从图中可看出,在光纤环中加入常规光纤后,用更短的光纤,脉冲获

表 1 新的光纤环和色散渐减光纤环的比较

Table 1 Compare between the NLOM constructed from the DDF and the new NOLM

N (soliton order)	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pedestal energy / %	12.8	7.6	10.1	12.2	14.0	13.8	13.2	22.3	24.5
Compression factor (A)	5.5	8.6	14.0	15.0	18.8	21.5	25.0	30.1	37.0
Compression factor (B)	4.0	4.1	4.2	13.9	15.0	16.3	16.2	22.5	24.0
The length of A	8.1	5.3	3.7	3.1	2.4	2.0	1.7	1.5	1.3
The length of B	10.4	6.2	4.8	3.2	2.6	2.3	1.9	1.7	1.5

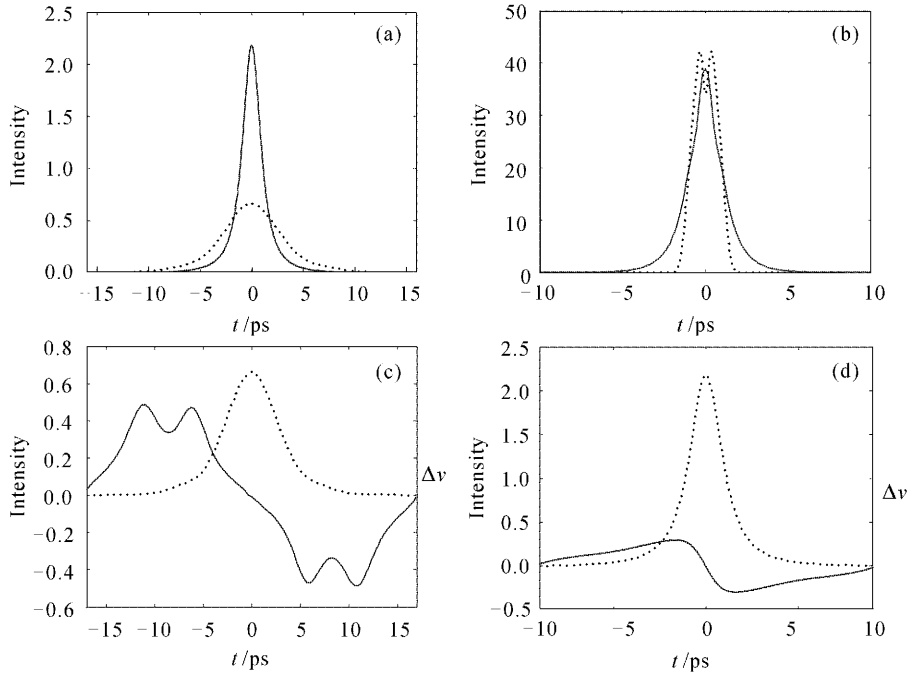


图 7

(a) 压缩脉冲(实线)与用色散渐减光纤获得的最佳压缩脉冲(虚线)比较;(b) 压缩脉冲(实线)与用色散渐减光纤获得的最佳压缩脉冲(虚线)频谱比较;(c) 利用色散渐减光纤获得的最佳压缩脉冲(虚线)和它的啁啾(实线)曲线;(d) 压缩脉冲(虚线)和它的啁啾(实线)曲线

Fig. 7

(a) the compressed pulse (solid curve) and the compressed pulse (dashed curve) obtained from the new NOLM constructed from DDF, respectively; (b) the frequency of the compressed pulse (solid curve) and the compressed pulse (dashed curve) obtained from the new NOLM constructed from DDF, respectively; (c) the compressed pulse obtained from the NOLM constructed from DDF (dashed curve) and its chirp (solid curve); (d) the compressed pulse(dashed curve) obtained from the new NOLM and its chirp (solid curve)

得了更大的压缩。压缩因子由 4.2 提高到 14。图 7 (b)为两压缩脉冲的频谱比较图。由色散渐减光纤环压缩的脉冲的频谱中央有一小的凹陷,而用本文提出的光纤环压缩的脉冲的频谱与双曲正弦脉冲的频谱非常相似。图 7(c)中,虚线为利用色散渐减光纤环形镜获得的最佳压缩脉冲,实线为其啁啾,图中显示该脉冲具有较大的啁啾,特别是在脉冲两翼处。图 7(d)为利用新的光纤环压缩的脉冲和脉冲啁啾的曲线图,图中显示,在脉冲两翼处啁啾很小,在脉冲中心啁啾是线性的。在色散渐减光纤环中加入常规光纤后,用更短的光纤获得了更大的压缩因子。这主要是因为,高阶孤子在色散值为负的常规光纤

中,利用孤子效应压缩脉冲,获得较大的压缩,在色散渐减光纤中继续压缩的结果。同时由于在常规光纤中得到大的压缩,峰值功率增加,缩短了获得最佳压缩所需的色散渐减光纤的长度。

4 结 论

提出了一种由常规光纤和色散渐减光纤构成的光纤环形镜,能产生无基座超短光脉冲,该脉冲具有类孤子的形状,在常规光纤中能稳定传输。在获得最佳压缩时,与色散渐减光纤环形镜相比较,所用光纤要短,压缩因子要大,啁啾要小。

参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. New York: Academic Press, 1995
- 2 J. L. S. Lima, A. S. B. Sombra. Soliton and quasi-soliton switching in nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion decreasing fiber [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **163**:292~300
- 3 Huang Zhijian, Sun Junqiang, Huang Dexiu. Study on nonlinear amplifying compound loop mirror and passively mode locked erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9):774~780
黄志坚,孙军强,黄德修. 非线性放大复合环形镜及被动锁模掺铒光纤激光器的研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(9):774~780
- 4 N. J. Doran, David Wood. Nonlinear-optical loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **13**(1):56~58
- 5 A. L. Steele, J.-P. Hemingway. Nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion decreasing fibre [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **123**:487~491
- 6 Jian Wu, Yuhua Li, Caiyun Lou *et al.*. Optimization of pulse compression with an unbalanced nonlinear optical loop mirror [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **180**:43~47
- 7 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
- 8 Nie Qiuhua. The Technology of the Optical Fiber Laser and Amplifier [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997
聂秋华. 光纤激光器和放大器技术[M]. 北京:电子工业出版社,1997
- 9 Xu Wencheng, Zhang Shumin, Lou Aiping *et al.*. Adiabatic enhanced compression of ultrashort pulses in fibres with slowly decreasing dispersion [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(10):1360~1362
- 10 Zhang Shumin, Xu Wencheng, Luo Aiping *et al.*. Enhanced compression of femtosecond soliton in fibers with slowly decreasing dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(7):599~602
张书敏,徐文成,罗爱平等. 色散缓变光纤中飞秒光脉冲的增强压缩[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(7):599~602

(上接封四)

7. 图表 图要设计美观,大小适中,尺寸一般为 8cm×10cm 以内,线条均匀,主辅线分明,粗线一般为 0.25~0.5mm,细线一般为粗线的 1/2,图中主线用粗线,如函数曲线等,辅线用细线,如坐标轴线、指示线等;照片要求对比度高,层次清晰。推荐使用三线表。**图表文字:**图题、表题须中英文对照,图面、表面一律用英文。

8. 参考文献 应引用公开出版物,并仔细核对;欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献的原文献为英文,请用英文表示,如原文献为其他语种,请译成英文,在该文献最后用括号注明,如原为日文,则用(in Japanese),如原文献为中文,则给出中文和相应的英文译文。每条文献的顺序和标点如下:

专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名). 文献题名. 版本(专著用), 出版地:出版者, 出版年. 起止页码;

期刊[J]——作者(三名). 论文题目[J]. 刊名, 出版年, 卷(期):起止页码;

专利[P]——专利申请者. 专利题目[P]. 专利国别, 专利文献种类, 专利号, 出版日期;

文集[C]——作者(三名). 论文题目[C]. 编者, 论文集名, 出版地:出版者, 年. 起止页码。

标准[S]——标准编号, 标准名称[S]。

电子文献——作者, 电子文献题目[电子文献及载体类型标识]. 电子文献的出处, 发表日期, 其中[电子文献及载体类型标识]为:联机网上数据库[DB/OL], 磁带数据库[DB/MT], 光盘图书[M/CD], 磁盘软件[CP/DK], 网上期刊[J/OL], 网上电子公告[EB/OL]。

详细的论文排版格式请参见近期的《中国激光》。

9. 基金资助 论文如获省、部级以上的基金资助, 须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。

10. 版面费 遵照中国科协和中国科学院有关文件精神, 向录用稿作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

11. 版权 录用稿件一经刊出, 论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 1 册, 抽印本 10 份。

12. 本刊 已入编《中国学术期刊(光盘版)》和万方数据库, 著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者, 请事先声明, 本刊将作适当处理。

特别声明:凡在国内外正式出版的刊物上登载过的稿件, 本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者, 本刊三年内不接受其稿件, 并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者, 均视作接受上述各项规定, 本刊不再另行声明。

《中国激光》编辑部

2005 年 4 月