

光脉冲在不同色散光纤环形镜中传输特性*

于丙涛 徐文成 徐永钊 崔虎 陈泳竹 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

摘要 研究了三种不同色散递减类型光纤构成的环形腔对光脉冲传输特性的影响(指数递减、线性递减与抛物线递减),发现其色散曲线为指数递减的环形腔最有利于皮秒光脉冲的传输与压缩;而对于飞秒脉冲,在高阶效应的影响下,情况恰恰相反,色散曲线为抛物线递减的光纤构成的光纤环最有利于脉冲传输与压缩.并且对于飞秒脉冲,环形腔的光开关特性只是在一定条件下存在.

关键词 光纤环形镜;色散参量;光开关;高阶非线性效应

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

在当今高码率光通信系统中,亚皮秒甚至飞秒光脉冲是一个必不可少的重要条件.虽然色散渐减光纤中高阶孤子非绝热压缩可以得到皮秒或亚皮秒脉冲,但是利用此压缩技术获得的脉冲往往伴有较宽的基座^[1-3].带有基座的脉冲在高码率光通信系统中传输时会导致相邻脉冲之间的干扰.一些措施,如滤谱技术、光纤中受激非线性双折射强度区别技术^[4]等可以用来抑制压缩脉冲的基座,然而这些技术比较复杂,并且难以起到十分有效的抑制效果.利用非线性光纤环形腔镜的孤子整形可以实现脉冲压缩与消基座作用^[3,5,6],而且非线性光纤环形镜作为等效快速饱和吸收体,在光纤激光器,尤其是在掺铒光纤激光器中广泛应用于被动锁模技术^[7-9]中.因此,对光脉冲在非线性光纤环形镜中传输的动力学特性研究也显得极为重要.

本文分别研究了光纤环光纤色散曲线分别为线性递减、抛物线形递减与指数递减三种情况下皮秒及飞秒光脉冲的传输特性.对于飞秒光脉冲的传输,由于三色散(TOD)、脉冲内喇曼散射(SRS)及自稳陡(SS)高阶非线性效应的影响,环形镜的开关特性只在一定条件下存在,当光纤环长度大于一定值后,反向传输的两脉冲在到达耦合器时不同步,致使腔的开关特性消失.

1 皮秒脉冲在环形腔中传输特性

DDF-NOLM 根据光纤的 Sagnac 干涉原理制成^[10],它由一个 2×2 耦合器与连接耦合器两输出端口的色散渐减光纤构成,耦合器分束比为 50:50.

将 $1.55 \mu\text{m}$ 的孤子脉冲从耦合器的一个输入端入射,经过耦合器后光波分成两路信号在环形腔中反向传输.孤子脉冲在 DDF-NOLM 腔中传输时,存在两种效应:一种是色散渐减光纤中的孤子非绝热压缩,另外一种是非绝热的开关特性.因为在光纤环中两反向传输的光脉冲经历的光纤色散是不同的(色散渐减光纤的光纤色散是非互逆的),因此耦合传输的两脉冲压缩程度存在差异,由此带来的非线性相移不同.选择合适的光纤环长度,可以使反向传输的两脉冲峰值中心处由光纤环带来的相移差达到 π ,脉冲两翼处在环中传输带来的相移差却远小于 π ,即脉冲中心峰值处恰好满足 NOLM 腔开关的输出条件,而脉冲两翼及其基座的输出条件得不到满足.这样反向传输的两光脉冲再次经过耦合器时,脉冲中心干涉相长、两翼干涉相消,因此可以获得无基座高质量超短光脉冲.

脉冲在色散渐减光纤中传输所满足的非线性薛定谔方程为^[4]

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \beta_1(z) \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{a}{2} u = i\gamma |u|^2 u \quad (1)$$

式中 u 为孤子脉冲慢变包络振幅, $\beta_1 = d\beta/d\omega = 1/v_g$, v_g 为中心频率 ω_0 处的群速度, $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$ 为群速度色散; γ 为非线性系数, a 表示光纤中损耗因子.无啁啾双曲正割脉冲的数学表达式为

$$u(z, \tau)_{z=0} = N \text{sech}(\tau/T_0) \quad (2)$$

式中 u 表示脉冲的复振幅, $N^2 = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2(0)|}$, P_0 为脉冲的峰值功率, T_0 是脉冲的半宽度(在振幅的 $1/e$ 处),它与脉冲的半高宽 ΔT 的关系为 $\Delta T = 2 \ln(1 + \sqrt{2}) T_0$.若作如下变换

$$\tau = \frac{t - \beta_1 z}{T_0} \quad \xi = \frac{z |\beta_2(0)|}{T_0^2} \quad p(\xi) = \frac{\beta_2(\xi)}{\beta_2(0)}$$
$$\Gamma = \frac{a}{2} \frac{T_0^2}{|\beta_2(0)|}$$

* 广东教育厅“千百十工程”优秀人才培养基金项目
Tel: 020-85216077 Email: chinaxiaoyan@eyou.com
收稿日期: 2003-08-11

则得到色散渐减光纤中归一化非线性薛定谔方程

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

方程(3)描述了光脉冲在光纤中传输的非线性动力学过程.

图1给出了三种色散参量沿光纤长度的变化曲线. 曲线a为抛物线形递减, 对应函数关系式为: $D(z) = -1.5(1.6z)^2 + 16$; 曲线b为线性递减, 对应函数关系式为: $D(z) = 16 - 9.15z$; 曲线c为指数递减, 对应函数关系式为: $D(z) = 15 \exp(-1.2z) + 1$. 对于 $1.55 \mu\text{m}$ 光波, 由二阶色散与色散参量的关系式

$$\beta_2(\lambda_0, z) = (-\lambda_0^2 / 2\pi c) D(z) \quad (4)$$

可以得到光纤环始端的二阶色散值 $\beta_2(0) = -20.4 \text{ ps}^2/\text{km}$, 式(4)中 λ_0 为输入光波波长, c 为真空中光速; 光纤损耗 $a = 0.2 \text{ km}^{-1}$, 光纤非线性系数 $\gamma = 2.6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. 输入孤子脉冲的峰值功率为 $P_0 = 2.2 \text{ W}$, 脉冲全高半宽为 10 ps . 图2(a)、(b)分别给出了三种不同色散递减参量下, 输出能量及脉冲压缩比与光纤环长度之间的关系曲线.

图中点线为色散成抛物线递减的光纤构成的环

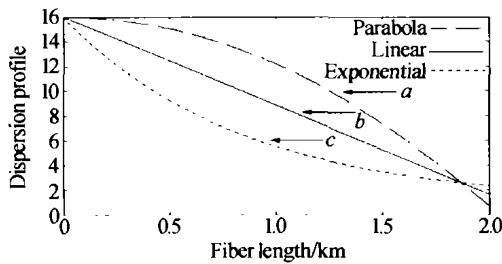


图1 色散参量沿光纤长度的变化曲线, a 抛物线, b 线性, c 指数形式
Fig. 1 Variation in dispersion along the fiber: (a) parabola, (b) linear, (c) exponential

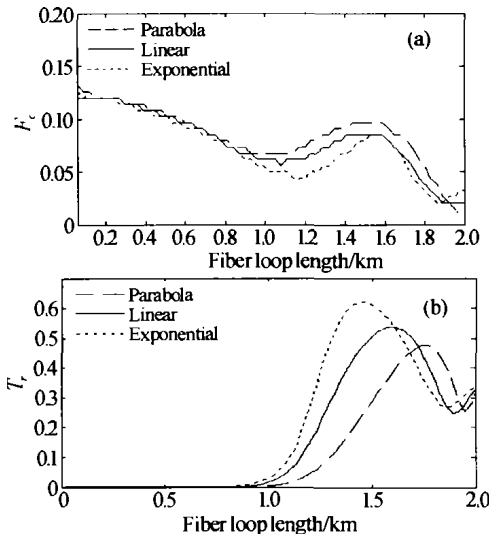


图2 (a)、(b)分别为输出脉冲压缩比倒数与输出能量与光纤环长度的关系图
Fig. 2 (a), (b) Compression factor and energy transmission as a function of fiber loop length

形镜得到的脉冲压缩比倒数及输出能量与光纤环长度的关系曲线, 实线与虚线分别为线性递减与指数递减光纤构成的环形镜得到脉冲的特性. 从上面两图形可以看出, 当光纤环长度小于 1 km 时, 三种色散类型的光纤环输出的脉冲随光纤环长度的增加逐渐变窄, 但是因为环内反向传输的两脉冲的非线性相移差远小于 π , 所以输出能量极小, 三种光纤对脉冲传输基本没有差别; 而光纤环长度大于 1 km 后, 色散为指数递减的光纤较线性与抛物线递减光纤构成的光纤环输出脉冲有着更高的压缩比, 并且从其输出能量图形可以发现, 此种光纤环更有利于脉冲能量输出. 因此由色散参量沿光纤长度指数递减的光纤构成的光纤环更有利于光脉冲压缩与传输.

分析图2(a)、(b)还可以发现, 三种色散类型的光纤环在最大能量输出前后得到的脉冲具有更大的压缩比. 这是因为在极大能量输出前, 反向传输的两脉冲在光纤中传输带来的相移差小于 π , 仅有部分能量能够输出; 在极大能量输出后, 光纤环中反向传输的两脉冲产生了更大的基座, 由于腔镜的输出特性基座被滤掉, 所以只有部分能量能够输出, 也就是说在最大能量输出前后, 更窄脉冲的获得是以损失压缩脉冲能量为代价的.

图3(a)为三种不同色散类型光纤构成的光纤环长度分别为: 指数色散光纤 1.34 km 、线性色散变化 1.65 km 、抛物线色散递减光纤 1.76 km 时输出

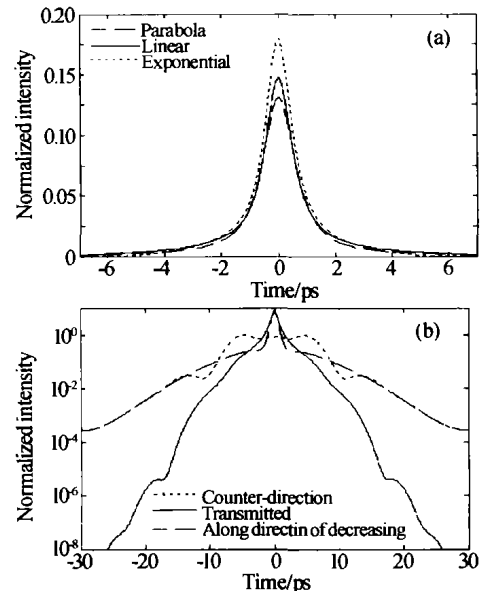


图3 (a)为分别用三种不同色散类型光纤环形腔获得的最佳输出脉冲, (b)为 1.34 km 指数色散递减光纤构成的环形腔反向传输及输出脉冲强度的对数图
Fig. 3 (a) Output pulse (dotted line) with 1.34 km exponential fiber, (solid line) with 1.65 km linear fiber and (dashed line) with 1.76 km parabola fiber. (b) Clockwise and counterclockwise traveling pulses before recombination and transmitted pulse in logarithmic scale with 1.34 km exponential fiber

脉冲的波形图. 可以看出, 其中由指数色散递减的光纤构成的环形腔输出脉冲有着更高的峰值功率, 更有利于脉冲能量输出. 并且图 3 (b) 给出了指数色散递减环形腔中反向传输的两脉冲在到达耦合器之前与输出脉冲的对数图形, 环内反向传输的两脉冲所包含的基座在耦合器干涉相消, 因此输出脉冲为无基座高质量脉冲.

2 飞秒脉冲在环形腔中传输特性

飞秒光孤子在环形腔中传输, 需考虑脉冲内喇曼散射效应 (SRS)、三阶色散 (TOD) 及自变陡效应 (SS) 的影响, 此时, 超短光脉冲在色散渐减光纤中传输所满足的非线性薛定谔方程为^[4]

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{a}{2}u + \frac{i}{2}\beta_2(z)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{1}{6}\beta_3\frac{\partial^3 u}{\partial t^3} = i\gamma[|u|^2u + i\frac{\lambda_0}{2\pi c}\frac{\partial}{\partial t}(|u|^2u) - T_{r,u}\frac{\partial |u|^2}{\partial t}] \quad (5)$$

方程(5)中 β_3 为三阶色散 (TOD) 系数 (文中 $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$), λ_0 为脉冲中心波长, c 为真空中光速, T_r 为内脉冲喇曼散射系数 (与喇曼增益的斜率有关, 通常为 3 fs), 其余参量同方程(1). 同样考虑输入飞秒脉冲孤子阶数为 $N=3$, 脉冲全高半宽为 500 fs.

图4 (a) 给出了线性色散递减光纤环长度从 30 ~ 120 m 时输出脉冲的演化图形. 随着光纤长度的增加, 光纤环内反向传输的两脉冲的非线性相移差逐渐接近于 π , 因此输出脉冲能量逐渐增大; 而当光纤长度大于 90 m 后, 可以看出输出脉冲开始变得不规则; 并且随着光纤长度的增加, 输出脉冲由双峰结构分裂为两个脉冲. 为了解释这一现象, 文中给出了光纤环长度为 120 m 时, 环内反向传输的两脉冲到达耦合器前的波形图, 如图 4 (b), 从图中可以发现, 反向传输的两脉冲由于在光纤中经历的色散变化情况不同, 到达耦合器有一定的相对时间差, 沿光纤递减方向传输的光脉冲较反方向传输的脉冲先到达耦合器. 随着光纤长度的增加, 它们到达耦合器的时

间差也逐渐增大, 当其差值超过其脉冲宽度后, 便不能在耦合器中发生干涉, 两脉冲各自有百分之五十的能量从输出端输出, 剩余能量从输入端反射回去. 因此环形腔的光开关特性消失.

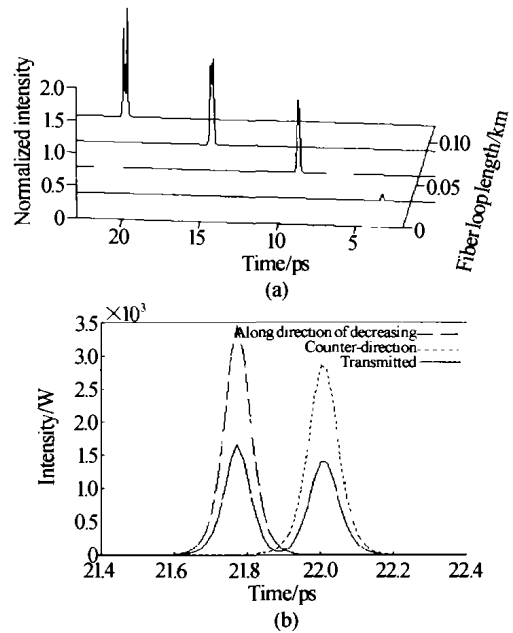


图 4 (a) 不同长度的线性递减光纤环输出脉冲的演化图; (b) 为光纤环长度 120 m 时正反两脉冲到达耦合器前及输出脉冲图形

Fig. 4 (a) Evolution of the transmitted pulse with different loop length, (b) Clockwise and counter-clockwise before recombination and transmitted pulse with Loop length 120 m

图 5 (a)、(b) 给出了用三种不同色散类型光纤构成的环形腔输出脉冲的归一化时域图形. 对应光纤长度为抛物线递减光纤 133 m, 输出脉冲宽度为 85 fs, 占输入脉冲能量比为 80.8%; 线性递减光纤 67 m, 脉冲宽度为 210 fs, 输出能量比 55.9%; 指数递减光纤长度 40 m, 输出脉冲宽度为 225 fs, 输出能量比为 49.5%. 从输出脉冲图形可以看出, 利用抛物线色散递减光纤构成的环形腔最有利于飞秒脉冲的压缩传输. 从其色散曲线 (图 1) 可以看出, 抛物线色散递减光纤在初始阶段色散变化十分缓慢, 这样光纤环内反向传输的脉冲不会迅速展宽, 其峰值

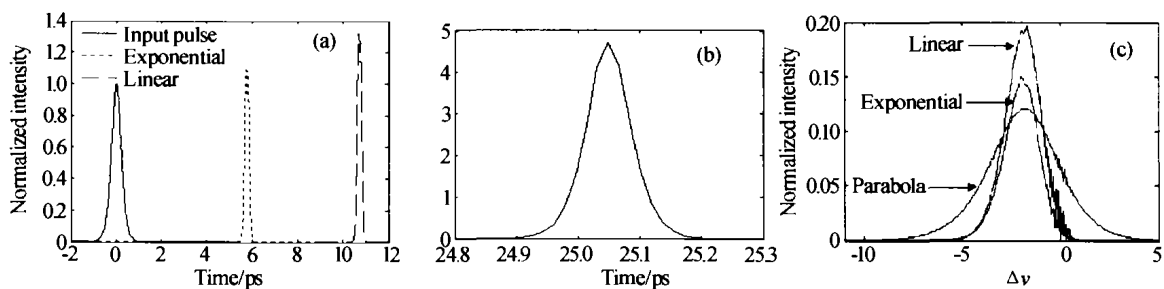


图 5 (a) 不同色散曲线光纤环形腔为最佳长度时输出脉冲归一化波形图, 图中实线为输入的 500 fs 脉冲, 点线为 40 m 指数色散光纤环获得的脉冲; 虚线为 67 m 线性递减光纤获得的输出脉冲; (b) 为 133 m 抛物线色散递减光纤环得到的脉冲归一化波形图; (c) 为对应脉冲频谱图

Fig. 5 (a) Output pulse (dotted line) with 40m exponential fiber, (dashed line) with 67m linear fiber and (solid line) input 500fs pulse; (b) Transmitted pulse with 133m parabola fiber; (c) Spectrum of the corresponding pulses

功率不会急剧降低,这样正反方向传输的光脉冲到达耦合器,由高阶非线性效应引起的相对时延有所减缓,从而更有利于超短脉冲在腔中传输压缩.但是可以看出,随着光纤长度的增加,输出光脉冲的相对时延也逐渐增大,由图 5(a)中不到 6 ps 逐渐增大到了图 5(b)25 ps. 图 5(c)为对应输出脉冲的频谱图,由于喇曼自频移的影响,输出脉冲的频谱整体都向低频方向偏移.三种光纤环形腔虽然长度差别很大,但是对于输出脉冲频移量基本相同,由抛物线色散递减光纤环得到的脉冲频谱展的更宽.

3 结论

本文研究了光脉冲在三种不同色散递减类型(抛物线递减、线性递减、指数递减)光纤构成的环形腔中传输的特性,发现其色散曲线为指数递减,有利于皮秒光脉冲的传输与压缩;而对于飞秒脉冲,由于三阶色散(TOD)、脉冲内喇曼散射(SRS)及自稳陡(SS)高阶非线性效应的影响,情况恰恰相反,色散曲线为抛物线递减的光纤构成的光纤环最有利于脉冲传输与压缩.并且在高阶效应的影响下,环形镜的开关特性只在一定条件下存在,当光纤环长度大于一定值后,反向传输的两脉冲在到达耦合器时不同步,致使腔的开关特性消失.

参考文献

- 1 Xu Wencheng, Zhang Shumin, Luo Aiping, *et al.* Adiabatic Enhanced compression of ultrashort pulse in the fibers with

slowly decreasing dispersion. *Chin Phys Lett*, 2001, **18**(10): 1360 ~ 1362

- 2 徐文成,廖常俊,刘颂豪.色散缓变光纤对皮秒光孤子的压缩效应. *光子学报*, 1994, **123**(4): 327 ~ 333
Xu W C, Liao C J, Liu S H. *Acta Photonica Sinica*, 1994, **123**(4): 327 ~ 333
- 3 Pelusi M D, Matsui Y, Suzuki A. Pedestal suppression from compressed femtosecond pulse using a nonlinear fiber loop mirror. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, **35**(6): 867 ~ 874
- 4 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic Press, 1995. 247 ~ 258
- 5 Chusseau L, Delevaque E. 250 fs optical pulse generation by simultaneous soliton compression and shaping in a nonlinear optical loop mirror including a weak attenuation. *Opt Lett*, 1994, **19**(10): 734 ~ 736
- 6 Steele A L, Hemingway J P. Nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion decreasing fiber. *Opt Commun*, 1996, **123**: 487 ~ 491
- 7 Seong N H, Kim D Y. Experimental observation of stable bong solitons in a figure-eight fiber laser. *Opt Lett*, 2002, **27**(15): 1321 ~ 1323
- 8 Ilday F O, Wise F W, Sosnowski T. High-energy femtosecond stretched-pulse fiber laser with a nonlinear optical loop mirror. *Opt Lett*, 2002, **27**(17): 1531 ~ 1533
- 9 Richardson D J, Laming R I, Payneetal D N. 320 fs soliton generation with passively modelocked erbium fiber laser. *Electron Lett*, 1991, **27**(9): 730 ~ 732
- 10 Doran N J, Wood D. Nonlinear-optical loop mirror. *Opt Lett*, 1988, **13**(1): 56 ~ 58

Analysis of Transmitted Pulse Using Nonlinear Optical Loop Mirror Constructed From Different Dispersion Profile Fiber

Yu Bingtao, Xu Wencheng, Xu Yongzhao, Cui Hu, Chen Yongzhu, Liu Songhao

Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631

Received date: 2003-08-11

Abstract The effect of dispersion profile on the performance of pulse transmission has been investigated in a nonlinear optical loop mirror constructed from three shaped profiles. Parabola, linear, and exponential have been considered. The exponential dispersion profile fiber loop is optimal for picosecond pulse transmission and compression. On the contrary the parabola dispersion profile fiber loop is optimal for femtosecond pulse transmission and compression. The optic switching is valid only under some condition for femtosecond.

Keywords Nonlinear optical loop mirror; Dispersion profile; Optical switching; Higher order nonlinear effects



Yu Bingtao was born in 1977 in Shandong Province. Now he is a master student of Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou. His major research focuses on physics of ultrashort pulses, optical soliton, ultrashort pulse laser source.