

色散缓变光纤中飞秒高阶孤子脉冲的增强压缩*

张书敏^{1,2} 吕福云¹ 董法杰¹ 王文倩¹ 王健¹

(1 南开大学物理科学学院, 天津 300071)

(2 河北师范大学物理学院, 石家庄 050016)

摘要 提出了一种利用孤子绝热放大效应与高阶孤子脉冲压缩效应相结合来压缩飞秒高阶孤子的新方法. 通过数值模拟方法证明, 采用三阶色散为负的色散缓变光纤压缩高阶孤子, 可利用喇曼散射效应与负三阶色散的相互作用, 消除正三阶色散对光脉冲压缩产生的不利影响, 增加压缩比, 提高压缩后光脉冲的质量. 研究表明, 在色散缓变参量一定的情况下, 孤子阶数越高, 所需最佳光纤长度越短、光脉冲的压缩比越大; 对于相同功率的孤子光脉冲, 光脉冲的压缩比随着色散缓变参量的增大而增大; 无论是孤子脉冲还是高斯脉冲都适合于色散缓变光纤中的高阶孤子脉冲压缩.

关键词 色散缓变光纤; 高阶孤子压缩; 负三阶色散; 飞秒光脉冲

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

高重复频率超短光脉冲的产生技术是高速光时分复用(OTDM)系统的关键技术之一, 超短光脉冲在光存储、光计算、激光加工等方面也有着潜在的应用前景, 而目前许多高重复频率超短光源产生的光脉冲宽度往往不能满足要求, 在实际应用中还需进一步压缩. 在众多基于光纤非线性效应产生超短光脉冲的方法中^[1], 利用高阶孤子效应^[2-4]及色散缓变光纤(DDF)对光脉冲的绝热放大^[5-10]来产生短脉冲是两种很有前景的脉冲压缩技术. 前者虽可利用较短的光纤产生压缩比较大的光脉冲, 但压缩后光脉冲的脉座较大; 后者虽可提高光脉冲的压缩质量, 但压缩因子较小且所需光纤长度较长. 为了克服这些缺点, 人们提出了DDF中的高阶孤子脉冲压缩技术^[11], 即将绝热放大效应与高阶孤子压缩效应相结合, 以实现在获得较大脉冲压缩比的同时缩短所需光纤的长度. 尽管该方法可改善压缩后皮秒光脉冲的质量, 但在DDF中压缩飞秒高阶孤子时, 发现正三阶色散及高阶非线性效应对光脉冲的压缩产生较大的不利影响^[11]. 本文通过数值模拟方法证明, 若采取三阶色散为负的色散缓变光纤压缩高阶孤子($1 < N < 2$), 则可利用喇曼散射效应与负三阶色散的相互作用, 增加压缩比, 提高压缩后光脉冲的质量. 研究表明, 在色散缓变参量一定的情况下, 孤子阶数越高, 所需最佳光纤长度越短、光脉冲的压缩

比越大; 对于相同功率的孤子光脉冲, 光脉冲的压缩比随着色散缓变参量值的增大而增大. 研究同时发现, 无论是孤子脉冲还是高斯脉冲都适合于DDF中的高阶孤子脉冲压缩.

1 理论模型

在忽略光纤损耗并计及三阶色散和喇曼散射效应的影响时, 飞秒光脉冲在色散缓变光纤中传输所满足的归一化的非线性薛定谔方程为^[12]

$$i \frac{\partial}{\partial \zeta} u + \frac{1}{2} p(\zeta) \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} u - i \delta \frac{\partial^3}{\partial \tau^3} u + |u|^2 u - \tau_R u \frac{\partial}{\partial \tau} (|u|^2) = 0 \quad (1)$$

式中, $\tau = (t - \int \beta_1(z') dz') / T_0$, $u = (\gamma L_D)^{1/2} q$, $\zeta = z / L_D$, $p(\zeta) = \beta_2(\zeta) / \beta_2(0)$, $\delta = \beta_3 / 6 T_0 |\beta_2(0)|$, $\tau_R = T_R / T_0$. 式中, q 为慢变包络振幅, $\beta_1 = d\beta/d\omega = 1/v_g$, 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, $\beta_3 = d^3\beta/d\omega^3$ 为三阶色散, γ 为非线性系数, T_0 为孤子脉冲的初始宽度, T_R 与喇曼增益的斜率有关, $L_D = T_0^2 / |\beta_2(0)|$ 为光纤的色散长度. 因本文中所需光纤的长度较短, 故我们忽略了光纤的损耗.

式(1)即为用于描述和计算飞秒光脉冲在色散缓变单模光纤中传输的理论模型, 其中的参量 δ, τ_R 分别代表三阶色散项及喇曼自频移项对孤子脉冲传输的影响. 对于给定的初始条件 $u(0, \tau)$, 可用分步傅里叶变换方法对其进行数值求解^[12]. 研究对象选为高阶孤子脉冲 $U(0, \tau) = N \text{sech}(\tau)$. 其中, N 为孤子阶数.

2 计算结果及分析

2.1 正、负三阶色散与喇曼自频移的作用

*国家自然科学基金重点项目(No. 60137010)、国家自然科学基金(No. 69977012)和河北省教育厅科研计划课题(2001241)

Tel: 022-23509856 Email: zhangsm_sd@eyou.com

收稿日期: 2003-10-08

作为比较,我们同时研究了正、负三阶色散分别与喇曼自频移效应相互作用时,高阶飞秒光孤子的压缩效应. 首先假定光纤色散是线性减少的,即 $p(\zeta) = 1 - \theta\zeta$, θ 是光纤色散变化参数,并选取中心波长为 $1.55 \mu\text{m}$,脉宽为 100 fs , (由 $T_{\text{FWHM}} = 1.76T_0$ 得 $T_0 \approx 57 \text{ fs}$), $N = 1.6$ 的高阶孤子作为研究对象. 利用 $1.55 \mu\text{m}$ 处 $|\beta_2(0)| \approx 20 \text{ ps}^2/\text{km}$ 及 $|\beta_3| \approx 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$, 得到 $|\delta|$ 近似为 0.015 , 若参量 T_R 选取为 $6 \text{ fs}^{[13]}$, $\tau_R = \frac{T_R}{T_0}$ 近似为 0.1 . 图 1(a) 给出了光脉冲在色散缓变参量 $\theta = 0.38$, 三阶色散分别为正、负的 DDF 中传输时,光脉冲的最佳压缩比^[14]的倒数随归一化距离的变化曲线. 图 1(b) 给出了此两种情况下,光脉冲分别达到最佳压缩 ($\beta_3 > 0$ 时 $\zeta = 1.224999$, $\beta_3 < 0$ 时, $\zeta = 1.204999$) 时的强度演化谱. 从图 1(a)、图 1(b) 可以看出,与光脉冲在正三阶色散的 DDF 中传输相比,负三阶色散与喇曼效应的相互作用不仅使光脉冲的压缩比由 2.8 增大到 7.5 , 同时使光脉冲达到最佳压缩时,所传输的归一化距离由 1.224999 缩短到 1.204999 , 更重要的是负三阶色散与喇曼效应的相互作用使压缩后光脉冲的频移量及脉座减小,亦即提高了光脉冲压缩质量.

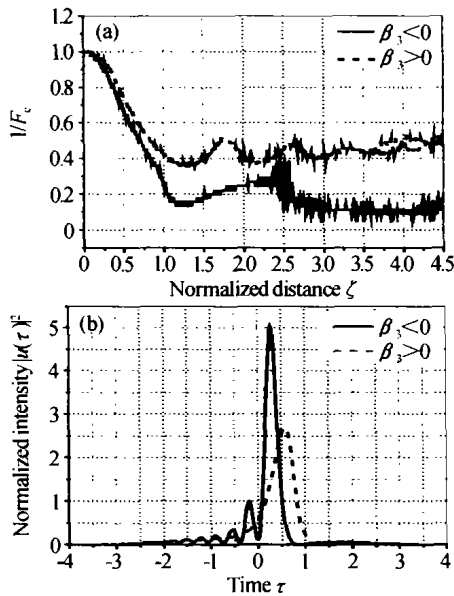


图 1 (a) 最佳压缩比的倒数随归一化距离的变化曲线
(b) 光脉冲达到最佳压缩时的强度演化谱
Fig. 1 (a) Variation of compression factor F_c with the normalized distance when $\beta_3 > 0$ and $\beta_3 < 0$; (b) Pulse output from DDF with $\beta_3 > 0$ and DDF with $\beta_3 < 0$

我们可以从三阶色散的定义式出发对上述现象进行理论解释:众所周知,喇曼效应对光脉冲传输的作用是使谱红移,即随着传输距离的增加,使光脉冲的中心波长向频率较低的方向移动,即 $d\omega < 0$. 由三阶色散的定义式^[12]

$$\beta_3 = d\beta_2/d\omega \quad (2)$$

可知,当三阶色散为正 ($\beta_3 > 0$) 时, $d\beta_2 < 0$. 因我们研究的工作波长在负色散区, $d\beta_2 < 0$ 就相当于 $|\beta_2|$ 增大,即随着传输距离的增加,群速度色散效应增强,自相位调制效应相对减弱,作为高阶非线性效应的喇曼作用相对增强,因而在正三阶色散和喇曼项的共同作用下,脉冲压缩比降低,达到最佳压缩时脉宽变宽,频移量增大,压缩后光脉冲的脉座增大;而当 $\beta_3 < 0$ 时,情况正好相反,故在负三阶色散和喇曼项的共同作用下,压缩比增强,达到最佳压缩时脉宽变窄,频移量减小,压缩后光脉冲的脉座减小.

2.2 不同阶孤子的演化情形

为了研究阶数不同的光脉冲在负三阶色散的 DDF 中的传输情形,图 2 给出了色散缓变参量 $\theta = 0.38$, 阶数 N 从 1.0 变化到 2.0 的高阶孤子各自达到最佳压缩时,脉冲的最佳压缩比(曲线 a)及最佳光纤长度(即脉冲压缩到最窄时的压缩比及所传输的归一化距离)(曲线 b) 随孤子阶数的变化曲线. 从图中可以清楚地看出,在色散缓变参量一定的情况下,孤子阶数越高,所需最佳光纤长度越短,光脉冲的最佳压缩比越大. 对这一现象可以这样理解,由于色散缓变参量一定,故阶数不同的光脉冲传输到相同的归一化距离时所受到的群速度色散效应相同. 而由关系式^[15] $N^2 = \frac{\gamma P T_0^2}{|\beta_{20}|}$ 可知,在光脉冲的初始脉宽 T_0 相同的条件下,孤子阶数 N 越高,光脉冲的初始峰值功率 P 越大,即光脉冲所受到的自相位调制效应越强,进而导致光脉冲压缩比越大,所需最佳光纤长度越短. 这与利用孤子效应压缩光脉冲时所得结论一致.

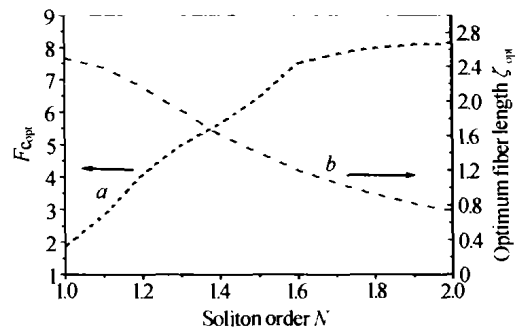


图 2 光脉冲的最佳压缩比(曲线 a)及最佳光纤长度(曲线 b)随孤子阶数的变化曲线
Fig. 2 Optimum compression factor F_c (curve a) and optimum fiber length (curve b) as a function of soliton order

2.3 色散缓变参量的影响

上述结论均是在色散缓变参量取定值的情况下得到的. 图 3 给出了 1.6 阶的高阶孤子光脉冲,在色散缓变参量 θ 取不同数值的负三阶色散的 DDF 中传输,分别达到最佳压缩时所得光脉冲的压缩比随色散缓变参量的关系变化曲线. 从图中可以看

出,对于相同功率的孤子光脉冲,光脉冲的最佳压缩比随着色散缓变参量 θ 值的增大而增大. 这一结果可以作如下解释:由关系式 $\beta_2(\zeta) = \beta_2(0)(1 - \theta\zeta)$ 可知, θ 值越大, $|\beta_2(\zeta)|$ 沿光纤的减小速度越快,即当传输到相同的归一化距离时,具有较大 θ 值的 DDF 具有较小的 $|\beta_2(\zeta)|$, 光纤非线性效应相对于群速度色散效应对脉冲起支配地位的程度较大,进而导致光脉冲的最佳压缩比增大,这与利用绝热放大效应压缩光脉冲时所得结论一致.

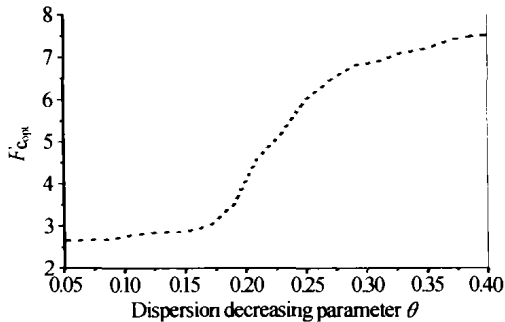


图3 光脉冲的最佳压缩比随色散缓变参量的关系变化曲线
Fig. 3 Optimum compression factor as a function of dispersion decreasing parameter

2.4 初始输入条件的影响

上述结论均是以无初始啁啾的理想高阶孤子作为研究对象的,考虑到实际激光器所输出的光脉冲大多为含有啁啾的高斯脉冲,图4(a)同时给出了初始啁啾为零、阶数均为 $N = 1.6$, 脉宽均为 100 fs 的高斯脉冲 ($U(0, \tau) = N \exp(-\tau^2/2)$) 和孤子脉冲在色散缓变参量为 $\theta = 0.38$ 的负三阶色散的 DDF 中传输时,所得光脉冲的压缩比随归一化距离的变化关系曲线. 图4(b)给出了此两种情况下,光脉冲分

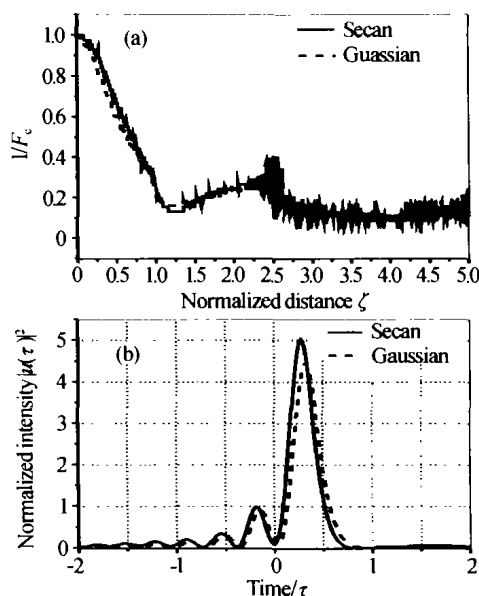


图4 (a) 光脉冲的压缩比随归一化距离的变化关系曲线;
(b) 光脉冲达到最佳压缩时的强度演化谱

Fig. 4 (a) Compression factor F_c of a Gaussian and secant pulse as a function of normalized distance; (b) Output of Gaussian and secant pulse from DDF with $\beta_3 > 0$

别达到最佳压缩时的波形图. 从图中可以看出,在初始峰值功率、色散缓变参量、初始脉冲宽度均相同的情况下,孤子脉冲无论在压缩比还是在压缩后光脉冲的形状上都略优于同等条件下的高斯脉冲. 但因为高斯脉冲和孤子脉冲的波形相似,因而在传输过程中脉冲的谱较为近似,传输特性相近,因而在相同的条件下,两者差别不大. 由此可见,无论是孤子脉冲还是高斯脉冲都适合于 DDF 中的高阶孤子脉冲压缩,上述对孤子脉冲所得结论对激光器输出的高斯脉冲同样成立.

3 结论

本文提出了一种利用孤子绝热放大效应与高阶孤子脉冲压缩效应相结合的技术压缩飞秒高阶孤子的新方法. 通过数值模拟方法,首次对飞秒高阶孤子在三阶色散为负的色散缓变光纤的压缩特性进行了理论计算和分析. 结果表明,利用喇曼散射效应与负三阶色散的相互作用,可消除正三阶色散对光脉冲的压缩产生的不利影响,增加光脉冲的压缩比,提高压缩后光脉冲的质量. 研究同时发现,不同阶数的光孤子压缩效果不同,孤子阶数越高,所需最佳光纤长度越短、光脉冲的压缩比越大;相同阶数的孤子光脉冲,光脉冲的压缩比随着色散缓变参量的增大而增大;在相同的条件下,无论是孤子脉冲还是高斯脉冲都适合 DDF 中的高阶孤子脉冲压缩.

参考文献

- 刘宏展,袁明辉,曹文华. 光纤中基于互相位调制效应的超短光脉冲的产生. 光子学报,2003,32(6):731~734
Liu H Z, Yuan M H, Cao W H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(6): 731~734
- Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P. Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers. *Phys Rev Lett*, 1980, 45(13): 1095~1098
- Ong J L, Takahashi R, Tsuchiya M, et al. Subpicosecond soliton compression of gain switched diode laser pulses using an erbium-doped fiber amplifier. *IEEE J Quantum Electron*, 1993, 29(6): 1701~1707
- 李智红,姜彩云,王桐,等. 利用半导体光放大器进行光脉冲消基座的理论研究. 光子学报,2002,31(3):285~292
Li Z H, Lou C Y, Wang T, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(3): 285~292
- Ivanov L M, Branzalov P P, Pavlov L I. Efficient compression of fundamental solitons in fibers with decreasing dispersion. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, 24(3): 565~573
- Chernikov S V, Dianov E M, Richardson D J, et al. Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber. *Opt Lett*,

- 1993, **18**(7) : 476 ~ 478
- 7 徐文成, 廖常俊, 郭旗, 等. 色散缓变光纤中飞秒孤子的压缩效应. 光子学报, 1994, **24**(3) : 233 ~ 238
Xu W C, Liao C J, Guo Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1994, **24**(3) : 233 ~ 238
- 8 曹文华, 姚爱民, 廖常俊, 等. 色散缓变光纤中皮秒脉冲的孤子压缩效应. 光学学报, 1994, **14**(2) : 206 ~ 212
Cao W H, Yao A M, Liao C J, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(2) : 206 ~ 212
- 9 Pelosi M D, Matsui Y, Suzuki A. Design of short dispersion decreasing fiber for enhanced compression of higher-order soliton pulses around 1550 nm. *Electron Lett*, 1999, **35**(1) : 61 ~ 63
- 10 曹文华, 刘颂豪. 光纤中孤子效应脉冲压缩三阶色散的抑制. 中国激光, 1999, **26**(1) : 220 ~ 223
- Cao W H, Liu S H. *Chinese J Lasers*, 1999, **26**(1) : 220 ~ 223
- 11 Pelosi M D, Liu Hai-feng. Higher order soliton pulse compression in dispersion-decreasing optical fiber. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, **33**: 1430 ~ 1439
- 12 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. Second Edition (Academic, Boston, Mass.), 1995. Chap. 2
- 13 Agrawal G P. Effect of intrapulse stimulated Raman scattering on soliton-effect pulse compression in optical fiber. *Opt Lett*, 1990, **15**(4) : 224 ~ 226
- 14 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. Second Edition (Academic, Boston, Mass.), 1995. Chap. 6
- 15 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. Second Edition (Academic, Boston, Mass.), 1995, . Chap. 5

Enhanced Compression of Higher Order Femtosecond Soliton in Fibers with Slowly Decreasing Dispersion

Zhang Shumin^{1,2}, Lü Fuyun¹, Dong Fajie¹, Wang Wenqian¹, Wang Jian¹

¹ Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071

² Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016

Received date: 2003-10-08

Abstract An improved method to compress higher order femtosecond solitons is proposed, which combines the soliton-effect compression and adiabatic compression. Numerical simulations show that the enhanced compression of higher order femtosecond solitons can be obtained through the interaction of negative third-order dispersion and Raman self-scattering in the fibers. Based on the results of the numerical simulation, it is concluded that, given a dispersion decreasing parameter, the higher the soliton order, the shorter the optimum fiber length, and the greater the optimum compression factor. For a certain input pulse, the compression factor will increase with the increase of the dispersion decreasing parameter. It is also shown that both the Gaussian pulses and solitons are favorable for highest quality compression in fibers with slowly decreasing dispersion.

Keywords Fibers with slowly decreasing dispersion; Higher order soliton compression; Negative third-order dispersion; Femtosecond pulse



Zhang Shumin was born in 1965. She received her B. S. degree from Hebei Normal University in 1987 and M. S. degree from South China Normal University in 2000, respectively. Now, she is a Ph. D. candidate at Institute of Physics, Nankai University. Her current research interests include optical pulse compression in fibers and fiber laser.