

色散管理光纤中超短光脉冲压缩效应研究

陈伟成, 徐文成, 罗爱平, 张书敏, 郭 旗, 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广东广州 510631)

摘 要: 本文研究了色散管理光纤中超短光脉冲的压缩效应. 对于两种不同的色散管理光纤, 分析了脉冲压缩机制和效果. 发现总色散为零和总色散不为零的色散管理光纤对超短光脉冲压缩都有较大的压缩比, 而后者比前者所需最佳纤长缩短一半. 当考虑高阶色散和高阶非线性项效应时, 发现脉冲压缩质量有所下降, 其中总色散不为零的色散管理光纤中脉冲压缩质量劣化更快.

关键词: 色散管理光纤; 脉冲压缩; 色散补偿; 三阶色散; 喇曼自频移

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 02-0218-03

Ultra short Pulse Compression in Dispersion Managed Fibers

CHEN Wei cheng, XU Wen cheng, LUO Ai ping, ZHANG Shu min, GUO Qi, LIU Song hao

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

Abstract: The effect on pulse compression in dispersion managed fibers is studied. The higher pulse compression ratios are obtained in both zero total dispersion fibers and nonzero total dispersion fibers. The optimum fiber length of the latter is about half of the former. When higher order dispersion and higher nonlinear effects are considered, the quality of compressed pulse becomes worse. The destructive effect in the dispersion managed fiber of nonzero total dispersion is more serious.

Key words: dispersion managed fiber; soliton pulse compression; dispersion compensation third order dispersion; Raman self frequency shift

1 引言

光纤中实现超短光脉冲的压缩, 主要是利用光纤的非线性效应与群速度色散效应相互作用. 只要恰当地选择纤长, 就可以获得较高压缩比的光脉冲. 然而这种压缩方法只能对高阶孤子有效. 基态孤子由于能量较低, 在常规光纤中引起的光纤非线性效应不足以超过色散效应, 因而利用常规光纤是无法实现超短光脉冲压缩的. 一种改进的方法是用色散缓变光纤代替常规光纤^[1~3]. 由于色散缓变光纤的二阶色散随着纤长的增加而逐渐减少, 使得色散缓变光纤等价于一个等效增益的放大器. 等效增益使基态孤子在传输时不断放大, 振幅增强, 从而达到压缩的效果. 另一种方法是用色散位移光纤代替常规光纤. 采用色散位移光纤替代常规光纤, 使 1.55 μ m 波长处群速度色散系数 $|B_2|$ 大大减少, 这样, 在不变的入射峰值功率下相应地提高了脉冲的孤子阶数, 从而使光脉冲得到压缩. 但是这两种方法存在一定的缺陷: 色散缓变光纤的拉制工艺复杂, 而且压缩时所需的光纤长度较长. 用色散位移光纤压缩零色散波长附近的光脉冲时由于三阶色散效应的影响, 使得脉冲压缩性能变坏, 脉冲变形, 压缩比下降, 最佳纤长增长. 鉴于此, 本文研究了色散管理光纤中超短光脉冲的压缩特性. 研究表明, 在 ps 量级的光脉冲在色散管理光纤中可以获得较大

压缩比. 但当初始脉宽为亚 ps 量级时, 高阶色散和高阶非线性将影响脉冲压缩质量, 而且对不同的色散管理组合, 影响程度不相同.

2 色散管理光纤与传输方程

色散管理光纤由一段段正负群速度色散光纤相间级联而成. 本文将研究超短光脉冲在总色散为零和不为零的两种色散管理光纤中的脉冲压缩特性. 其中, 总色散为零的色散管理光纤由群速度色散绝对值相等、正负色散光纤相间级联组成, 正负色散光纤段数目相等. 而总色散不为零的色散管理光纤由群速度色散值不相等的正负色散光纤级联组成, 总群速度色散值为正.

当 ps 量级的光脉冲在光纤压缩过程中, 脉冲传输归一化方程为^[4]:

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = \text{sgn}(B_2) \frac{i}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \delta \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3} - \Gamma U - N^2 [|U|^2 U - \tau_R U \frac{\partial |U|^2}{\partial \tau}] \quad (1)$$

式中, 等号右边各项分别为群速度色散(GVD)、三阶色散、损耗、自相位调制(SPM)、喇曼自频移. 其中 $N = (\frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|})^{1/2}$, 整

数 N 的物理意义表示为孤子阶数, δ 为归一化三阶色散系数, τ_R 为归一化喇曼响应时间, sgn 为符号函数, 当在正色散区时, $\text{sgn}(\beta_2) = +1$, 在负色散区 $\text{sgn}(\beta_2) = -1$. ξ 为归一化长度, τ 为归一化时间. 由于压缩脉冲所需光纤很短, 因而本文不考虑光纤中的损耗.

3 数值结果与讨论

3.1 总色散为零的管理光纤中脉冲压缩效应

在总色散为零的色散管理光纤中, 让光脉冲先经过一段正色散的光纤, 对脉冲进行预啁啾, 脉冲传输到正色散光纤末端时就被施予了正啁啾, 接着脉冲进入负色散区, 利用负群速度色散压缩正啁啾脉冲. 光脉冲在色散管理光纤中经过多次预啁啾和压缩过程, 得到了较高压缩比的压缩脉冲. 图 1 为 $1.55\mu\text{m}$ 基态孤子在这种色散补偿光纤中传输的演化图. 所演示的是在每个负色散区光纤末段的脉冲包络. 脉冲入射脉宽为 1ps , 每段级联光纤长为 50m . 脉冲传输经过 5 对正负色散光纤段, 相当于经过了 5 次压缩过程. 从图中可以了解到脉冲每经过一次压缩后的脉冲形状. 脉冲经过多次压缩后出现了

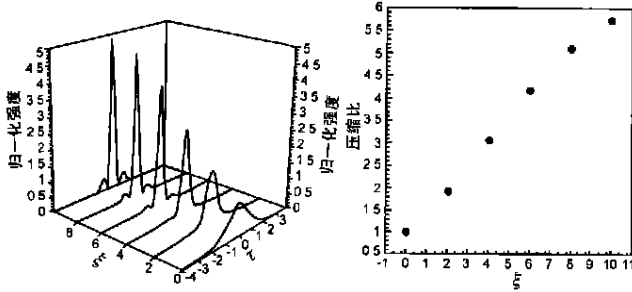


图 1 总色散为零的色散管理光纤 图 2 纤长与压缩比的关系图
基本孤子的压缩演化图

3.2 总色散不为零的色散管理光纤中的脉冲压缩效应

在实际色散管理中, 用于补偿负群速度色散的实用型光纤是色散补偿光纤 (DCF), 它的 GVD 系数绝对值与常规光纤 (G652) 不相等. 例如郎讯生产的用于补偿 G652 光纤线路负群速度色散的色散补偿光纤^[5], 在波长 $1.55\mu\text{m}$ 处的色散值 ($D \approx -100\text{ps}^2/\text{nm}\cdot\text{km}$) 比 G652 光纤 $1.55\mu\text{m}$ 处大五倍, 也就是说 20m 左右的 DCF 就可补偿 1km 的 G652 光纤色散.

本文的总色散不为零的色散管理光纤组合就是由色散补偿光纤与常规光纤相间级联组成. 此时正负色散光纤段因 GVD 系数不相等而纤长不等. 其中每段 DCF 选取 10m , G652 选取 100m . 总色散值不为零, 这是因为用 DCF 与 G652 光纤相间级联组成的色散管理光纤与 3.1 部分所说的色散管理光纤模型在压缩脉冲机理上不完全相同. 光脉冲在这种色散管理光纤中压缩时, 先在 DCF 中进行预啁啾, 然后在 G652 光纤中进行压缩. 光脉冲在 DCF 传输时以基态孤子形式出现, 但是在 G652 中却以二阶孤子形式出现. 研究发现, 在色散补偿光纤和常规光纤组成的色散管理光纤中, 只需要经过三次压缩过程就可达到 3.1 部分的压缩效果. 此时色散管理光纤总长为 280m , 约为 3.1 部分光纤总长的一半. 其中第一次压缩过程的压缩比就达到 4.18. 图 4 为 1ps 孤子脉冲在这种色散管

明显的次峰. 这是由于正色散区对整个脉冲预啁啾不足, 使脉冲在传输过程中在脉冲前后沿出现非线性啁啾的结果. 图 2 为图 1 压缩过程的压缩比随传输距离的示意图. 从图 2 可以看到, 压缩比几乎随传输距离线性增加. 当经过第五次压缩后, 脉冲压缩比为 5.75, 此时的脉冲脉宽为 0.17ps . 光纤总长度为 500m .

从脉冲啁啾的演化看, 脉冲经过正色散区预啁啾后, 整个脉冲几乎被施予了线性正啁啾. 而脉冲达到最佳压缩时啁啾应该为零. 图 3(a)、(b) 分别为图 1 脉冲压缩过程的第一次预啁啾过程和第五次压缩后的脉冲啁啾图. 在图 3(a) 中可以看到, 经过预啁啾后, 脉冲中心部分被施予了线性正啁啾, 由于 SPM 效应的影响, 脉冲前后沿仍有部分非线性啁啾, 这是压缩后脉冲出现底座的主要原因. 若正色散光纤再取长点, 可进一步削弱脉冲前后沿非线性啁啾. 图 3(b) 中脉冲中心部分线性啁啾较前四次压缩过程脉冲中心部分线性啁啾趋于零, 因而是本文选取五次压缩的理论依据. 研究更远的色散管理光纤中脉冲的时域演化, 发现脉冲脉宽增大, 压缩比下降, 与脉冲啁啾演化图所提供的信息相吻合.

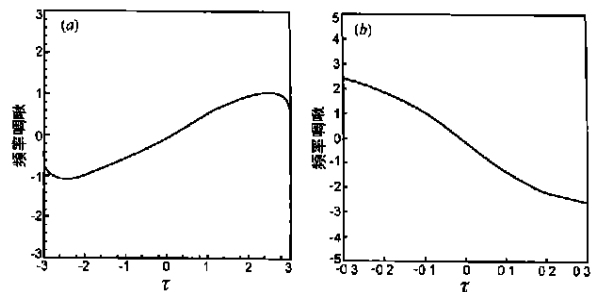


图 3 (a) 在第一段色散管理光纤中基本孤子的频率啁啾图;
(b) 在第十段色散管理光纤中基本孤子的频率啁啾图

理光纤中经过三次压缩后得到的压缩脉冲波形. 此时压缩比为 5.11, 脉冲脉宽为 0.196ps . 从图 4 中也可以清楚看到脉冲前后沿出现明显的底座.

与光纤光栅脉冲压缩技术^[6]相比, 本方法有以下的特点:

(1) 工作波长范围不同, 光纤光栅技术只对可见光、近红外光区有效, 而对 $1.55\mu\text{m}$ 的光通信波长无能为力. 色散管理光纤却能对波段的光脉冲产生压缩. (2) 压缩比高. 尽管光纤光栅技术对高阶孤子能有较大的压缩, 但对于基态孤子脉冲, 即使光栅对调节到最佳间距, 压缩比也只在 1 附近^[7]. (3) 操作简单, 省去大量精细的光学调节工作.

3.3 三阶色散与喇曼自频移效应的影响

由于脉冲在色散管理光纤中传输时, 脉冲压缩过程中脉宽已进入亚皮秒量级, 因而有必要考虑三阶色散效应与喇曼自频移效应对脉冲演化的影响. 通常, 光纤中三阶色散系数 $\beta_3 = 0.1\text{ps}^3/\text{km}$, 归一化三阶色散系数 δ 为 0.00083 , 喇曼响应时间 $T_R = 6\text{fs}$, 归一化喇曼自频移系数 τ_R 近似为 0.01 . 图 5(a) 和 (b) 为 1ps 基孤子脉冲在分别考虑了正负三阶色散和喇曼自频移效应的共同作用下, 在总色散为零的光纤组合中的脉冲演化图. 对比图 1, 三阶色散和喇曼自频移降低了脉冲压缩质量. 在三阶色散的影响下, 脉冲次峰变得不对称. 正三阶

色散使脉冲后沿次峰增大,削弱了前沿次峰.负三阶色散对脉冲压缩效果影响刚好相反.此时,图 5(a)、(b)图的压缩比为 4.6,比图 1 的压缩比略小.图 6 为孤子脉冲在正三阶色散和喇曼自频移效应的影响下在总色散不为零的光纤组合中的传输演化图.很明显,高阶色散和高阶非线性在总色散不为零的色散管理光纤中对脉冲压缩的影响远大于总色散为零的色散

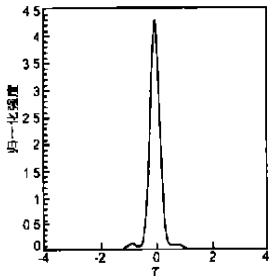


图 4 在总色散非零情况下色散管理光纤中经过三次压缩后的脉冲形状

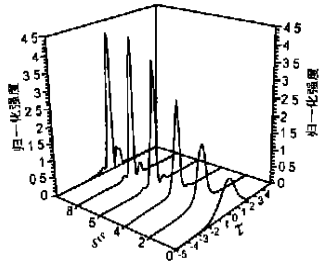


图 5 (a) 总色散为零的色散管理光纤中考虑了正三阶色散和喇曼自频移效应的脉冲演化图;
(b) 总色散为零的色散管理光纤中考虑了负三阶色散和喇曼自频移效应的脉冲演化图

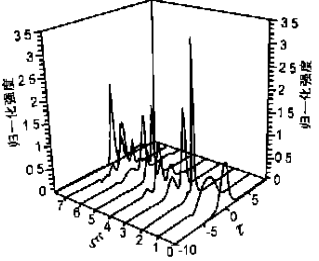
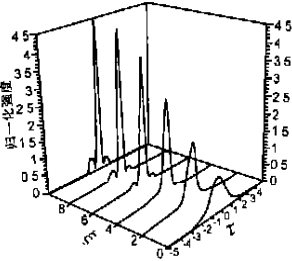


图 6 总色散不为零的色散管理光纤中考虑三阶色散和喇曼自频移效应的脉冲演化图

4 结论

本文研究了色散管理光纤中对基态孤子脉冲压缩特性.研究发现总色散为零和总色散不为零的色散管理光纤都具有较大的脉冲压缩比,但后者比前者所需最佳纤长缩短一半.若考虑高阶色散和高阶非线性项影响时,发现总色散不为零的色散管理光纤并不适用于压缩亚皮秒量级以下的脉冲.对脉宽较大的皮秒脉冲,采用色散管理光纤进行压缩是一种较好的选择方案.

参考文献:

- [1] Chemkov S V, Dianov E M, Richardson D J, et al. Soliton pulse compression in dispersion decreasing fiber [J]. Opt Lett., 1993, 18(7): 476-478.
- [2] 徐文成, 廖常俊, 郭旗, 等. 色散缓变光纤对皮秒光孤子的压缩效应 [J]. 光子学报, 1994, 23(4): 327-333.
- [3] XU Wen cheng, Guo Qi, Liu Song hao. Higher order dispersion and soliton pulse compression in the dispersion decreasing fibers [J]. Chin. Phys. Lett., 1997, 14(4): 298-301.

管理光纤.图 6 的最后一个脉冲与图 4 的脉冲都是经过相同光纤长度压缩后的脉冲波形,该脉冲压缩比为 2.5,是图 4 脉冲压缩比的一半.图 6 最后的脉冲压缩效果明显比图 4 的脉冲压缩效果差.进一步考虑负三阶色散和喇曼自频移的影响时,发现此时负三阶色散的影响效果与正三阶色散影响效果相当,输出脉冲形状基本一致.

- [4] Agrawal A P. Nonlinear Fiber Optics(2nd ed.) [M]. Boston: Academic, 1995: 134.
- [5] 杨邦湘. 光纤技术的进展与应用 [J]. 世界电信, 1998, (1): 24-27.
- [6] Treay E B. Optical compression with diffraction gratings [J]. IEEE J. Quant Electron., 1969, QE-5(1): 454.
- [7] Agrawal A P. Nonlinear Fiber Optics(2nd ed.) [M]. Boston: Academic, 1995: 207-213.

作者简介:



陈伟成 男. 1977 年生于广东佛山. 现为华南师范大学硕士研究生. 目前研究的领域范围是光纤中超短光脉冲的产生与光纤线路中偏振模色散的研究.