

文章编号 :1001-5078(2004)06-0408-04

色散渐减光纤及其应用

吴再华,曹文华

(五邑大学信息科学研究所,广东 江门 529020)

摘要:在叙述色散渐减光纤基本理论的基础上,详细地介绍了色散渐减光纤在光纤通信领域的若干应用及最新的研究进展。包括光脉冲产生与传输、光脉冲压缩、以及超连续谱的产生等。特别报道了我们最近的研究结果。

关键词:色散渐减光纤;光孤子;光脉冲压缩;超连续谱;非线性光纤环境

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A

Dispersion-decreasing Fiber and Its Applications

WU Zai-hua ,CAO Wen-hua

(Institute of Information Science ,Wuyi University ,Jiangmen 529020 ,China)

Abstract:After describing the basic theory of dispersion-decreasing fibers,we introduce several applications and research progress of dispersion-decreasing fibers in optical fiber communication systems,including optical pulse generation and transmission,compression of high bit rate ultrashort pulse,and supercontinuum generation. Some recent advance in these applications are also reported.

Key words:dispersion-decreasing fiber;optical soliton;pulse compression;supercontinuum;nonlinear optical loop mirror

1 引言

色散渐减光纤(DDF)的概念是日本学者 K. Tjima 于 1987 年首次提出的^[1],目的是用于补偿光孤子在传输过程中由于光纤损耗引起的脉冲展宽。其基本思想是,如果光纤的群速度色散(GVD)系数 $| \beta_2 |$ 沿孤子传输方向以适当的关系逐渐减小,则可抵消损耗引起的非线性自相位调制(SPM)效应的减弱,从而维持 SPM 和 GVD 之间的平衡,使得孤子在传输过程中尽管能量不断衰减但不至于被展宽。在此之后,人们逐渐意识到 DDF 的其它一系列应用,并于 1995 年成功拉制出首批 DDF^[2]。

本文在简要叙述 DDF 的有关原理和技术参数的基础上,较为详细地介绍了 DDF 在光孤子传输^[3,4]、脉冲压缩^[5-11]、以及超连续谱的产生^[12,13]等若干方面的最新应用及其进展情况,特别报道了我们最近的研究结果——用 DDF 构成非线性光纤环境(NOLM)产生无脉座、无频率啁啾的高质量超短光脉冲^[9-11]。

2 色散渐减光纤的基本理论

DDF 是指光纤色散系数($| \beta_2 |$)沿光脉冲传输方向逐渐减小的光纤。由于 β_2 依赖于光纤的芯径和纤芯—包层相对折射率差($\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$, n_1 、 n_2 分别为纤芯、包层折射率),DDF 可通过在制作过程中以某种可以控制的方式减小纤芯直径来实现。其色散可以表述为一个与距离有关的变量,即 $\beta_2(z) = \beta_2(0)h(z)$, $\beta_2(0)$ 为初始 GVD 系数, $\beta_2(z)$ 为光纤长度 z 处的 GVD 系数, $h(z)$ 为 GVD 系数沿光纤纵向的变化曲线表达式。随着制作工艺的提高,有望可以制造出各种色散渐减变化形式的 DDF。几种较典型的 DDF 有线性型、双曲型、指数

基金项目:国家自然科学基金(60277016)资助项目;广东省自然科学基金(021357)资助项目。

作者简介:吴再华(1971-),男,五邑大学光纤通信专业硕士研究生,主要从事非线性光学和光通信器件研究。

收稿日期:2004-04-23;修订日期:2004-07-12

型和高斯型和对数型等,如图1所示。

DDF的一个重要特点是,它能够等价成被动放大器以补偿光纤损耗。若DDF工作于负色散区,且入射脉冲初始脉宽大于5ps,则描述脉冲在DDF中传输的归一化非线性薛定谔(NLS)方程

$$i \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{h(z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + |u|^2 u = -\frac{i}{2} u \quad (1)$$

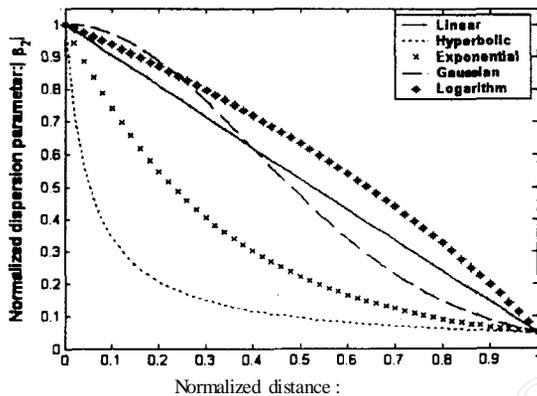


图1 几种典型的色散变化曲线

经过系列变换后,(1)式变成

$$i \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{e^{-\int h(z) dz}}{h(z)} |v|^2 v = 0 \quad (2)$$

其中, $v = u \exp(-i \int h(z) dz / 2)$, $\beta_2 = \beta_2(0) \exp(-\int h(z) dz)$ 。由(2)式可以看出,若取 $h(z) = \exp(-\int h(z) dz)$,也即GVD系数沿光纤长度以 $|\beta_2(z)| = |\beta_2(0)| \exp(-\int h(z) dz)$ 的形式指数减小,上述方程将成为标准NLS方程。这时DDF的增益刚好补偿光纤损耗而能维持光纤中SPM效应和GVD效应之间的平衡,使得脉冲能保形传输。过补偿时,脉冲宽度由于SPM效应的相对增强而能得到压缩。DDF的这个特点,对于光纤通信具有重要的意义。

3 色散渐减光纤的应用

3.1 利用DDF进行光脉冲长途传输

光脉冲在传输过程中,损耗使得其能量不断衰减,导致脉冲被逐渐展宽而造成系统误码率增大、性能下降。采用标准常数色散光纤的孤子通信系统,能工作在几十Gbit/s甚至更高的速率上。为补偿光纤损耗,需要在线路上周期性地加入放大器,这样就对系统中放大器间距和光脉冲的宽度带来了限制^[3]。研究表明,光脉冲的宽度 T_0 应满足 $T_0^2 \gg |\beta_2| L_A / (4 \gamma)$, L_A 为放大器间距;此外,在波分复用(WDM)系统中,为防止不同孤子间的相互作用而导致孤子畸变,孤子间的最大波长间隔应满足 $\Delta \lambda_{\max} < \sqrt{2 T_0 / (2 c |\beta_2| L_A)}$, λ_0 为中心波长。通过采用DDF光纤后,由于它在光脉冲传输中的作用相当于一个增

益,这样,当光纤的损耗导致光脉冲能量不断减小时,在SPM和GVD的相互作用下,脉冲可以通过调整其宽度,而使得光纤中孤子的阶数维持不变,很好地抵消了光纤损耗的影响。对于基阶孤子,它在时域和频域上的波形并不因为传输过程中存在损耗而随传输距离发生改变。这样就减轻了上述两个约束,使传输后的脉冲有更好的质量,改善了通信系统的性能。

据报道^[2,3],在拉制的过程中通过反馈控制方式对光纤尺寸进行精细的控制,已经制造出可与通信系统中常用光纤长度比拟的DDF光纤。该光纤中的GVD系数 $|\beta_2|$ 能以非常接近指数减小的规律变化。在一个40km长的这种DDF与同长度的常数色散光纤(CDF)中光脉冲传输对比实验中,由“8”字型光纤激光器发出宽为1.5ps,中心波长为1546nm的变换极限脉冲,经一掺铒光纤放大器(EDFA)放大后分别在同为40km的DDF和CDF中传输,通过DDF后的脉冲变为1.3ps,而经CDF传输后,脉宽约增加3倍。

1996年,Essiambre R.J和Agrawal G.P等人研究了利用DDF和参量放大器实现的超高比特率孤子通信系统^[4]。系统采用指数型色散渐减光纤(EDDF),很好补偿了SPM的减小。对基阶孤子,即使损失大部分能量,其宽度也不会发生改变。不过,当孤子宽度进一步减小,高阶非线性和色散效应变得相当重要,并最终限制了比特率。其中最重要的高阶效应是脉冲内拉曼散射,拉曼散射导致的频移在多个放大阶段被累积,使得各段光纤应有不同的色散曲线,这就增加了系统的复杂性,通过利用参量放大器可以对此进行抑制。在必须考虑拉曼效应和高阶效应时,2.7~1.2ps的超短光孤子以40~125Gbits/s速率在DDF中获得甚远距离传输,其放大器间距达120km。

3.2 利用DDF进行绝热孤子压缩

高速率、大容量光通信系统需要足够窄的超短光脉冲作为光源。如何获取超短光脉冲,一直是人们感兴趣的研究课题。在光纤脉冲压缩技术中,两种较常见的方法是孤子效应脉冲压缩和绝热孤子压缩。孤子效应压缩既能压缩高阶孤子,也能压缩高斯型等脉冲。但该技术存在一明显缺陷,即压缩后的脉冲总是伴随着很大的脉座和频率啁啾。尽管采用多种滤脉座技术,但用于飞秒脉冲脉座消除的效果均不够理想。

基于DDF的绝热孤子压缩可获得无脉座、无频

率啁啾的飞秒脉冲^[5-7]。其物理机制是:将一基阶孤子输入光纤,在忽略损耗的情况下,如果光纤的 GVD 系数 $|D_2|$ 沿脉冲传输方向缓慢减小,则脉冲可通过逐渐减小宽度而始终保持其基阶孤子特性。与孤子效应脉冲压缩相比,绝热孤子压缩的优点是,可获得更少脉座和更小频率啁啾的高质量压缩脉冲,且所需的输入脉冲峰值功率相对较低。但为了满足绝热条件,孤子压缩所需的 DDF 长度必须随输入孤子宽度的增大而指数规律增大。而所用 DDF 愈长,光纤损耗引起脉冲能量的衰减愈大,SPM 效应愈弱。当 SPM 效应减弱到一定程度时,孤子甚至会展宽。因此,绝热孤子压缩技术仅适用于初始宽度小于 5ps 的输入脉冲。

1999 年, Brian R 等人进行了绝热孤子压缩实验^[8]。先由增益开关激光器产生宽 30ps,带强负啁啾的脉冲,让其通过由一段正色散光纤(PDF)组成的线性压缩器压缩成 6.2ps 脉冲后,再通过由一个掺铒光纤放大器(EDFA)和一段长为 11km 的 DDF 组成的绝热压缩器进一步压缩,最后得到 1.3ps 脉冲。研究同时表明,对非孤子脉冲输入时,同样可以得到压缩,但入射脉冲幅度和相位对压缩后的脉冲会产生较大影响。

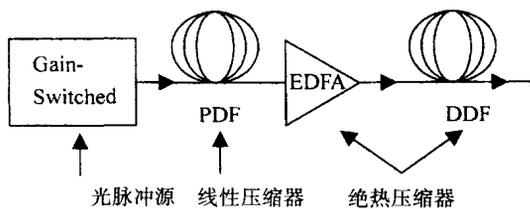


图 2 一种绝热压缩方案

2002 年,华南师大与清华大学的学者合作,利用类似上述方案进行了实验研究^[9]。在长为 500m 的 DDF(GVD 系数由 10ps/nm/km 渐减至 0.5ps/nm/km,中心波长为 1550nm)中,将 4.4ps 的输入脉冲很好地压缩成了 830fs 高质量压缩脉冲。

3.3 利用 DDF 产生超连续谱光源

超短脉冲在光纤中传输时,由于许多非线性效应如 SPM、XPM、SRS、FWM 等的共同作用,使得频谱可展宽至 10THz 甚至更宽,通常称这种被展宽后的频谱为超连续谱(SC)。利用基于光纤装置的超连续谱光源可作为 WDM/DWDM 系统较理想的多波长光源。超连续谱还在如光测量、光采样、自频率转换、全光解复用、光时分复用等方面得到广泛的应用。

近年来,国内学者对基于 DDF 的 SC 产生进行了许多研究^[12-13]。在一个由 DDF 和具有正常色散的色散平坦光纤(DFP)级联组合而成的 SC 产生系

统中,SC 的产生过程由两部分组成^[12]:第一部分用 DDF 的绝热放大对脉冲进行压缩与整形;第二部分由压缩脉冲耦合进入具有较小正常色散的 DDF,脉冲波形的演化诱导线性频率啁啾的积累最终形成平坦超连续谱。利用该系统得到了带宽达 240nm、谱强起伏小于 10dB 的平坦、超宽超连续谱。

基于 DDF 中 SC 产生的两个关键问题是,如何增加产生的频谱宽度以及如何提高所产生 SC 的平坦度。正如前所述,产生超连续谱的机制是 SPM 等非线性效应,GVD 效应本身不产生新的频率分量,但它对 SC 的产生有重要的影响。DDF 的不同色散变化形式对 SC 的产生到底有怎样的影响,还有待研究。另外,其他许多因素,如输入脉冲的波形、初始啁啾、峰值功率等,它们对 SC 的产生和性能的影响也需要进一步明确。

3.4 基于 DDF 环境的光脉冲压缩

如上所述,基于 DDF 的绝热孤子压缩虽然可获得高质量的压缩脉冲,但由于需要满足绝热条件,使得该技术能压缩的初始孤子宽度受限。我们最近的研究表明^[10,11],若用 DDF 构成非线性光纤环境(工作原理如图 3 所示),则可在无需满足绝热条件的情况下,使用短得多的 DDF 压缩绝热技术所不能压缩的宽脉冲。而且,不管输入脉冲是否偏离高阶孤子,均可获得接近基阶孤子的压缩脉冲。

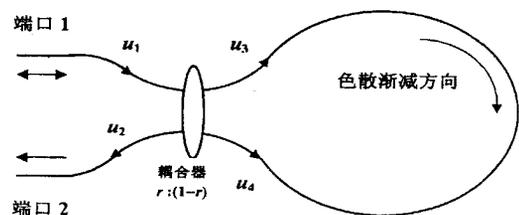


图 3 DDF 环境工作原理图

整个环境由一个四端口光纤耦合器连接一段 DDF 构成,其中 DDF 的 GVD 系数 $|D_2|$ 沿环境顺时针方向缓慢减小。待压缩脉冲由耦合器端口 1 输入,经耦合器分成沿环境顺、逆时针方向传输的两部分。由于环境色散的非对称性,沿环境顺、逆时针方向传输的两脉冲在经历各自的演化后获得不同程度的非线性相移,当它们重新返回耦合器端口时,两脉冲中央部分产生相位差,而两翼处的相位差近似为零(由于光强较弱,非线性相移很小)。干涉结果使得两翼处的脉座被反射(经环境端口 1 输出),与此同时,经环境端口 2 透射出无脉座的压缩脉冲。

如图 4 所示为由环境输出的压缩脉冲及其频谱。其中图 4(a)中用虚线表示一理想的双曲正割

脉冲,该脉冲具有与压缩脉冲相同的宽度(FWHM)和峰值强度。输入脉冲是宽度为30ps的6阶孤子,在波长1.55 μm 处DDF的参数值为: $\beta_2(0) = -20\text{ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 5\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$, $\beta_4 = 0.046\text{km}^{-1}$,构成环境的DDF长度为4.86km,DDF的输入、输出GVD系数之比为3。可见,压缩脉冲非常接近双曲正割脉冲;其频谱接近双曲正割形状,只是在中心频率处出现由脉座附近的微弱频率啁啾所致的轻微凹陷。压缩脉冲的时间-带宽积为0.33,非常接近双曲正割脉冲的变换极限值0.315;压缩脉冲的孤子阶数为1.45,接近基阶孤子。

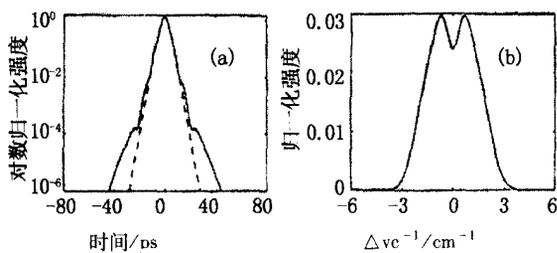


图4 经DDF环境输出的压缩结果

图5示出环境输出压缩脉冲在一段长22.7km无损耗的色散均匀光纤(其GVD系数 β_2 与上述环境的初始GVD系数 $\beta_2(0)$ 相同,非线性系数 β_3 也与环境相同)中的演化情况。可见,由于初始脉冲孤子阶数大于1,脉冲在演化的初始阶段出现压缩现象,然后又由于GVD的作用而展宽。SPM与GVD的共同作用使得脉冲在演化过程中逐渐调整自己的宽度并趋于稳定,最终演化成比初始输入脉冲稍窄的基阶孤子。整个演化过程表明,由环境输出的压缩脉冲在很大程度上具有基阶孤子特性。

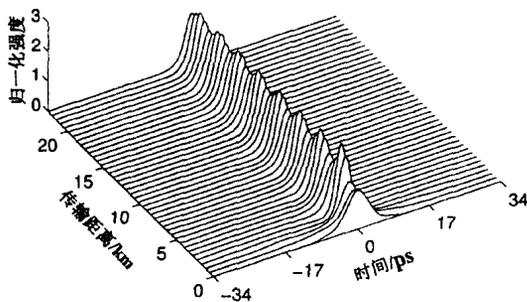


图5 压缩脉冲在均匀无损耗光纤中的演化情况

该技术也适合于超短光脉冲($T_{\text{FWHM}} \leq 1\text{ps}$)输入的情况,这时应考虑高阶效应(如TOD及RSS)对脉冲压缩的影响。研究表明,TOD引起的波形振荡得到有效抑制,由RSS效应引起的时延较绝热压缩法小得多,脉座能量较小。而且利用RSS可提高压缩比及压缩脉冲的峰值强度。研究同时表明,对于给

定的环境,存在一个最佳脉冲宽度,与之对应的压缩比最大。

4 结论

由于DDF具有独特的传输特性,因而越来越受到人们的高度重视。随着其制作工艺的不断改进和完善,其应用前景也愈来愈好。本文叙述了色散渐减光纤的基本理论,介绍了色散渐减光纤在光孤子传输、光脉冲压缩、以及超连续谱产生等方面的应用与最新研究进展,报道了我们最近的研究结果。

参考文献:

- [1] Tajima K. Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss[J]. Opt. Lett. 1987, 12(1): 54.
- [2] Bogatyryov, V A Bubnov, M M Dianov, E M et al. Advanced fibers for soliton systems[J]. Pure Applied Optics, 1995, 4(4): 345 - 347.
- [3] Andrew J Stentz, Robert W Boyd. Dramatically improved transmission of ultrashort solitons through 40km of dispersion decreasing fiber[J]. Opt. Lett. 1995, 20(17): 1770 - 1772.
- [4] Essiambre R J, Agrawal G P. Ultrahigh bit-rate soliton communication system using dispersion decreasing fibers and parametric amplifiers[J]. Opt. Lett. 1996, 21(2): 116.
- [5] Chernikov S V, Dianov E M, et al. Soliton pulse compression in dispersion decreasing fiber[J]. Opt. Lett. 1993, 18(7): 476 - 478.
- [6] Chan Kam-tai, Cao Wenhua. Enhanced compression of fundamental solitons in dispersion decreasing fibers due to the combined effects of negative third-order dispersion and Raman self scattering[J]. Opt. Commun. 2000, 184(5 - 6): 463 - 474.
- [7] Tamura K R, et al. Femtosecond soliton generation over a 32nm wavelength range using a dispersion flattened dispersion decreasing fiber[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 1999, 11(3): 319 - 321.
- [8] Brian R Washburn, Michael C Gross, et al. Amplitude and phase investigation of non-soliton pulse compression in dispersion decreasing fiber[J]. Opt. Soc. Am. 1999.
- [9] 徐文成, 张书敏, 伍剑, 等. 色散缓变光纤中超短光脉冲的绝热压缩[J]. 光学学报, 2002, 22(4): 389 - 392.
- [10] P K A Wai, Wenhua 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.
- [11] 曹文华, 刘颂豪. 基于色散渐减光纤环境的光脉冲压缩方法[J]. 中国科学(E辑), 2004, 34(1): 94 - 110.
- [12] 陈泳竹, 徐文成, 崔虎, 等. 基于特种光纤的级联组合产生超连续SC谱. 华南师范大学学报(自然科学版), 2003, (2): 49 - 53.
- [13] 陈泳竹, 徐文成, 崔虎. 光纤中超连续谱产生的频域分析[J]. 光子学报, 2003, 33(2): 148 - 151.