

文章编号: 0253-2239(2003)06-0684-5

超连续谱光纤的优化设计*

刘俭辉 贾东方 丁永奎 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要: 比较了三种不同色散光纤用于超连续过程时的频谱展宽特性,在此基础上对产生宽带、平坦超连续谱超连续谱的普通色散位移光纤的参量进行模拟设计,并提出优化设计应遵循的原则。

关键词: 光纤光学; 超连续; 色散位移光纤; 自相位调制

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

目前,密集波分复用(DWDM)使用的成熟光源是不同波长的多个分离的半导体激光二极管,但随着信道数的增加,波长间隔控制越来越困难,使系统出现了可靠性、成本等问题,而超连续谱(Supercontinuum)超短光脉冲源能在很宽的光谱范围内同时产生超短光脉冲,所以它将在未来的波分复用/光时分复用(Tbit/s WDM/OTDM)系统中扮演重要角色^[1~3],而产生高质量超连续谱脉冲的关键是合适的抽运光源和超连续光纤。迄今,研究人员已尝试用各种不同的光纤来产生超连续谱。Lou 等提出利用色散渐减光纤展宽频谱^[4];Okuno 等提出利用色散从正值减小到负值的色散平坦光纤可以产生更宽的频谱^[5];Takushima 和 Kikuchi 提出利用具有恒定正色散的色散平坦光纤可以产生超连续谱^[6,7],并进行了实验验证;Mori 等提出利用具有凸色散曲线的色散渐减光纤可以产生超连续谱^[8],并进行了数值模拟;最近,一些研究人员还提出利用光子晶体光纤^[9~11](多孔光纤)和保偏高非线性色散位移光纤^[12](PM-HNL-DSF)来产生超连续谱。

在以上几种超连续光纤中,Mori 所提方案的综合性能似乎更好一些,并在著名的 3 Tbit/s 波分复用/光时分复用混合传输系统中得到应用。然而,关于这种超连续光纤更具体的参量特性,文献[8]并未给出。本文就这种光纤作了进一步研究,并与其他几种光纤进行比较,以期对超连续光纤进行优化设计。

2 各种超连续光纤(SCF)的比较

根据文献[8]的结论,能产生宽带、平坦超连续谱的光纤应具备以下两个特性:

- 1) 抽运波长处的色散 D 沿光纤从正值(反常色散)减小为负值(正常色散);
- 2) 色散是波长的凸函数,即在整体或部分光纤长度上有两个零色散波长。

根据这两个特征,我们可用下式来表征这种光纤的色散:

$$D(\lambda, z) = D_0 \left(1 - \frac{z}{L_0}\right) + \frac{D_2}{2} (\lambda - \lambda_{\text{peak}})^2, \quad (1)$$

式中, D_0 是入射端的色散值,有效长度 L_0 定义为所有波长的色散均变为负值时的传输距离, $D_2 = [\partial^2 D(\lambda_0, L_0) / \partial \lambda^2]$,且在凸色散曲线条件下是负值。图 1 给出了方程(1)描述的色散曲线,在这一模型中,抽运波长 λ_0 处的色散 $D(\lambda_0, z)$ 随传输距离 z 线性减小,从正值变为负值,同时保持恒定峰值波长 λ_{peak} 不变。

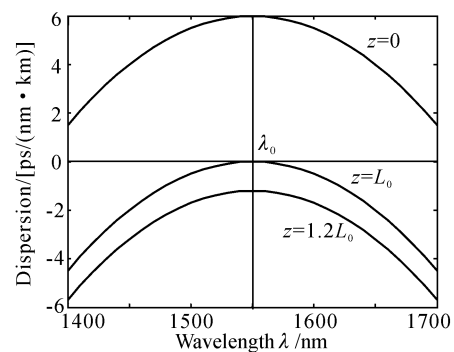


Fig. 1 Dispersion profile of DDF with convex function dispersion

图 2 给出了在以上色散特性的光纤中超连续谱

* 国家自然科学基金(69877012)、教育部博士点基金(1999005615)资助课题。

E-mail: tdljh@21cn.com

收稿日期:2002-09-27; 收到修改稿日期:2002-12-24

的演变过程,参量选取同文献[8]给出的值:抽运脉冲中心波长 $\lambda_0=1550\text{ nm}$,脉宽 $\Delta t=4\text{ ps}$,峰值抽运功率 $P_0=3\text{ W}$,非线性系数 $\gamma=2.6\text{ km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$, $D_0=9\text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$,光纤损耗系数 $\alpha=0.2\text{ dB}/\text{km}$, $D_2=-0.00023\text{ ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$, $L_0=450\text{ m}$ 。从图中可以看出,脉冲在初始阶段处于光纤反常色散区,靠孤子压缩效应导致频谱展宽;在传输距离超过 $z=0.95L_0$ 以后,频谱边缘部分将因为处于正常色散区而停止展宽,而频谱中心部分由于仍处于反常色散区而继续展宽,结果频谱边缘部分变强,整个频谱变

得更加平坦,频谱形状向矩形演变;当传输距离超过 L_0 (即全部波长均处于正常色散区)时,频谱仍继续变化,因为此时传输场仍然非常强,可以产生自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)等非线性效应;在 $z=1.05L_0$ 处,频谱已足够平坦,形状不再改变。因此,整个频谱的演变从总体上可分为两个过程:首先是由于绝热孤子压缩造成的频谱展宽(反常色散区),然后是由类孤子的非线性波向色散波转变过程中带来的光谱平坦化(正常色散区)。

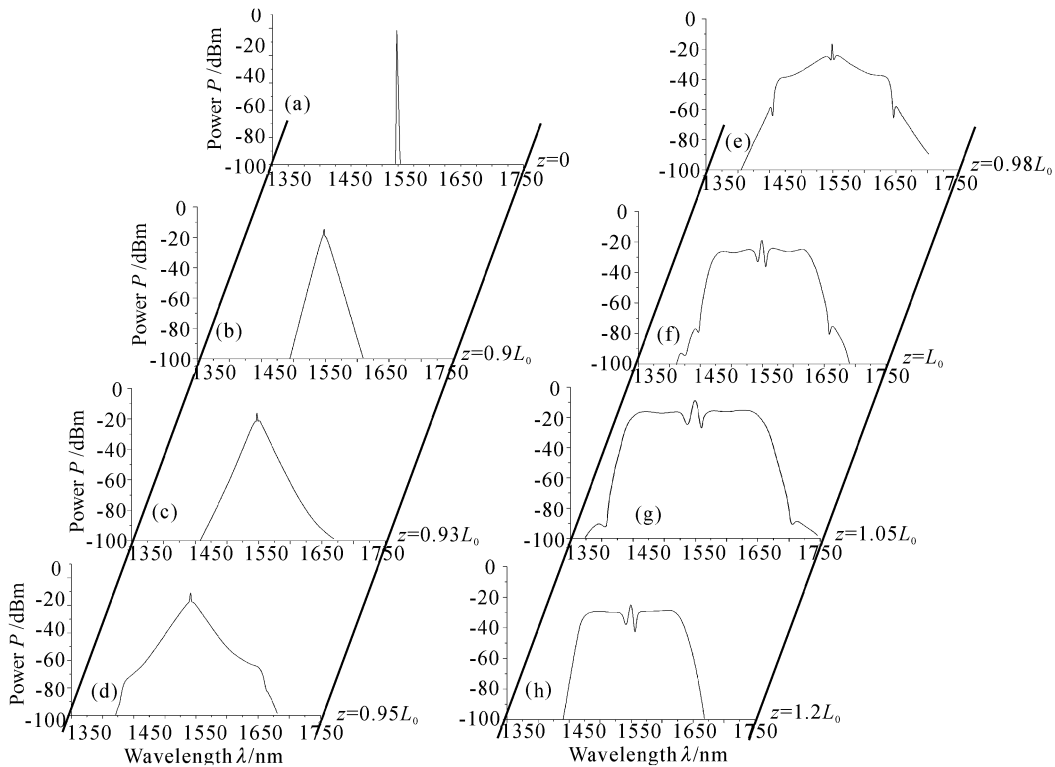


Fig. 2 Evolution of supercontinuum spectrum in DDF with convex function dispersion

从图 2 还可看到,这种光纤产生的超连续谱是对称的,平坦性也非常好,因此可以判断在以上超连续谱的产生过程中,自相位调制效应占主要地位。

超连续谱的大部分是由自相位调制产生的,因而谱表现的非常对称,也很光滑。

若光纤的色散特性仅满足条件(2),即色散曲线

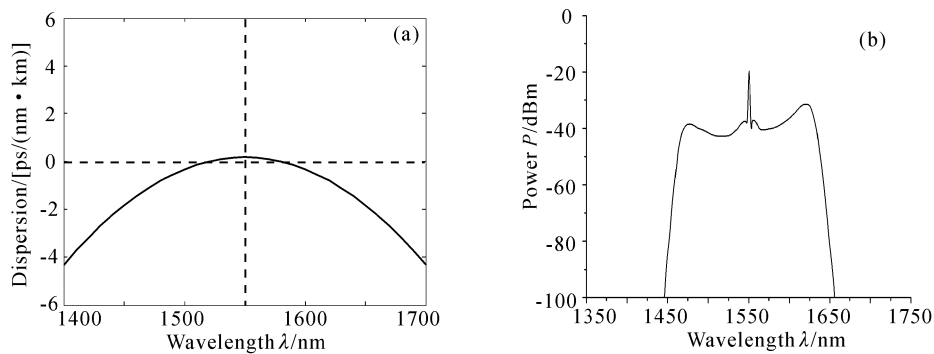


Fig. 3 Dispersion profile of non-DDF with convex function dispersion (a) and its evolution of supercontinuum spectrum (b)

是波长的凸函数,但色散值并不随光纤长度减小,则光纤的色散特性可以用下式表示:

$$D(\lambda) = D_0 + (D_0/2)(\lambda - \lambda_{\text{peak}})^2. \quad (2)$$

若取抽运波长处的色散 $D_0 = 0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, $D_2 = -0.00023 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 则色散曲线如图 3(a)所示。由式(2)可以求得该曲线的两个常数零色散点的位置分别为 1520 nm 和 1580 nm。在光纤长度取 2 km、其余参量同图 2 采用值的条件下,输出的超连续谱如图 3(b)所示。与图 2 相比,超连续谱虽然是对称的,但其平坦性和宽度都要差一些。

如果光纤的色散特性仅满足条件(1),即只有一个零色散波长,这也是典型的色散渐减光纤的色散特性,其色散曲线如图 4(a)所示。将光纤输入端在抽运波长处的色散值取 $6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 输出端色散值为 $-2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 光纤长 3 km, 其余参量同图 2 中采用值, 则输出的超连续谱如图 4(b)所示。与图 2 相比,频谱不但失去对称性,而且平坦性和宽度都要差一些,这可能是因为能量仅仅聚集在谱的短波带的原因。

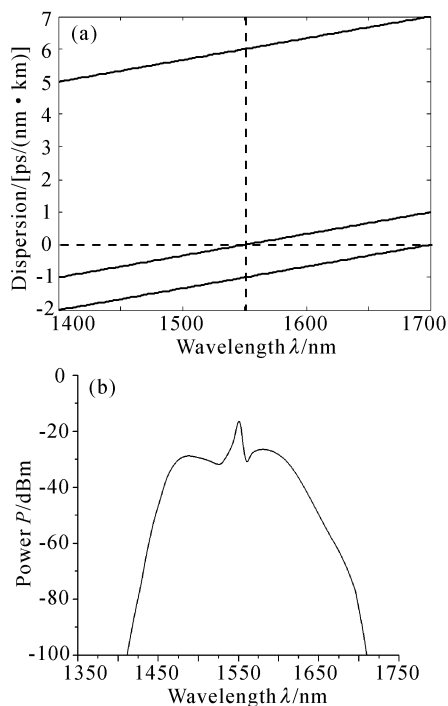


Fig. 4 Dispersion profile of normal DDF (a) and its evolution of supercontinuum spectrum (b)

文献[6]给出的具有常数正色散的色散平坦光纤(DFP)也能产生超宽带、平坦的超连续谱,其主要优点是会在抽运波长处出现采用其他方法不可避免的残余抽运成分,另外由于此时自相位调制在超连续的产生过程中起主导作用,所产生的超连续谱

相干性较好;但其最大缺点是需要的抽运功率太高,原因在于抽运脉冲在传输过程中只在正常色散区展宽,不能产生孤子压缩效应。

图 3 具有凸色散特性的色散非渐减光纤的色散曲线(a)和产生的超连续谱(b)通过以上分析,证明具有凸色散曲线的色散渐减光纤确实是最佳的超连续光纤,不过其制造成本显然也更高;如果有功率足够高的光放大器和合适的抽运光源,具有常数正色散的色散平坦光纤也是一种较好的选择。

3 超连续光纤的优化设计

以上提到的超连续光纤都是一些特种光纤,制作成本高,也不易买到。因此,在输入脉冲参量给定的情况下,如何对普通色散位移光纤的参量进行合理设计,是产生宽带、平坦超连续谱的关键。

如前所述,光纤色散、色散斜率、非线性系数、光纤长度等参量决定了超连续谱的特性,实际中必须考虑到这些参量的限制作用,但对于典型的抽运光源,这种限制又不能过于严格。根据文献[13]的研究结论,石英光纤中超连续谱的产生依赖于两个连续过程:脉冲压缩和谐整形,前者主要是自相位调制和二阶色散起作用,后者主要是通过三阶色散对超连续谱的性能如平坦度等进行修饰。下面,我们就按照这两个过程对超连续光纤的参量进行优化。

3.1 脉冲压缩级所用光纤的优化

利用全光纤进行脉冲压缩主要基于两种机制:孤子效应压缩(SEC)和绝热孤子压缩(ASC)^[14]。前者需要向光纤中注入高阶孤子,当其在光纤反常色散区传输时,脉冲就会出现周期性的压缩和展宽,若将光纤在脉冲达到最小宽度时的位置切断,就会得到对应此压缩脉冲的宽带谱。而后者是由于基态孤子在色散渐减光纤中传输时,为保持孤子常数面积而具有的自行减小脉宽的能力,其压缩比依赖于色散渐减光纤入端和出端的色散比值。由于孤子效应压缩可以利用常规色散位移光纤来实现,而用于绝热孤子压缩的光纤需要特殊的制作工艺,因此我们主要考虑前者。

在压缩级,色散位移光纤光纤参量的选择取决于入射脉冲能量和脉宽,而这又是由脉冲源和放大器的输出特性决定的。用于压缩级的色散位移光纤的色散值应符合以下要求:在可能的峰值功率和脉宽下能维持高阶孤子(要求低 D 值),同时在较短的光纤长度内实现最大程度的压缩(高 D 值)。对于 $0.3 \sim 3 \text{ ps}$

的典型脉宽值,若光纤色散 $D \geq 2$ ps/(nm·km),就可利用一级压缩实现 4.5~9 倍的压缩因子。同时,压缩级光纤的长度应和入射到光纤中的孤子的最佳压缩点位置相对应。在维持孤子阶数不变的情况下,通过提高光纤的非线性系数,可以使 D 值增大同样的倍数,从而使达到最佳压缩效果所需要的光纤长度也可减小同样倍数,而产生超连续谱所用的光纤越短,超连续的稳定性和相干性就越好。另外,为减小压缩脉冲基座部分的能量,一般要求孤子阶数 $N \leq 4$ 。

3.2 谱整形所用光纤的优化

谱整形级光纤的选择依赖于从最后一个压缩级出射的脉冲特性,如脉宽、峰值功率和啁啾等,具体说来,要注意以下几个方面:

首先,用于谱整形的光纤应具有反常色散特性,以保证入射脉冲能继续利用孤子效应压缩,而不会被展宽。

其次,三阶色散的符号和大小对超连续谱的整形起决定作用:对于反常群速度色散,正(负)三阶色散 $dD/d\lambda$ 将使频谱向入射脉冲的反斯托克斯(斯托克斯)一侧非对称地展宽,图 5 给出了三阶色散对超连续谱展宽的影响;三阶色散的大小对超连续谱宽也有影响,图 6 为理论计算所得不同色散值下超连续的展宽因子随三阶色散的变化曲线。对于极低的 $dD/d\lambda$ 值 [≤ 0.005 ps/(nm²·km)],频谱将被对称地展宽,三阶色散于整形无益,而对 $0.01 \leq dD/d\lambda \leq 0.03$ ps/(nm²·km) 范围内的值,可以得到很宽的超连续谱,并且随着 $dD/d\lambda$ 的增大,不对称展宽的区域会更平坦;但对于更高的值,脉冲可能无法达到最佳压缩效果,从而使超连续谱变窄。

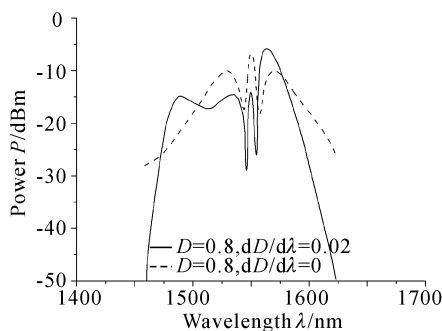


Fig. 5 Effect of third order dispersion (TOD) on supercontinuum spectrum used parameters: $P_0 = 3$ W, $\Delta t = 2$ ps, $L = 3$ km

第三,构成谱整形的光纤的长度应保证恰好在脉冲分裂之前提取出宽带超连续谱,目的是为了减小频谱不同部分之间的干扰。

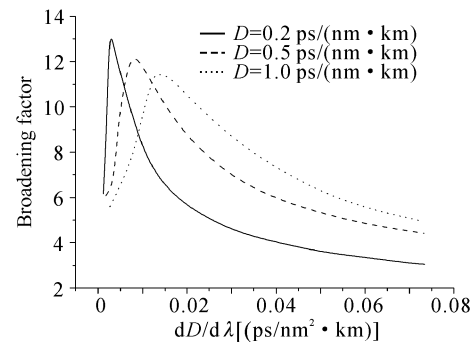


Fig. 6 Variation of broadening factor with the second and third order dispersions. Used parameters: soliton orders $N = 3$, fiber length $L = 0.28z_0$ (z_0 is soliton period), the initial pulse width is 2 ps

结论 总之,利用普通色散位移光纤作为超连续光纤时,必须满足:(i)二阶色散必须为负值,以在整段光纤上能实现高阶孤子压缩。(ii) D 值要适当,太小会使实现最佳压缩所需要的光纤过长,影响超连续谱的稳定性和相干性;而其允许的最大值又受限于维持一定阶数孤子所能提供的脉冲能量。(iii)所有压缩级的孤子阶数应低于 4,以减小脉冲基座的能量。(iv) $dD/d\lambda$ 的符号决定了频谱不对称展宽的方向,而其绝对值决定了频谱的宽度和平坦度,并且对于给定的 D 值, $dD/d\lambda$ 存在一最佳值。

参 考 文 献

- 1 Morioka T, Takara H, Kawanishi S *et al.*. 1 Tbit/s (100 Gbit×10 channel) OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(10):906~907
- 2 Kawanishi S, Takara H, Uchiyama K *et al.*. 1.4 Tbit/s (200 Gbit×7 channel WDM) 50 km optical transmission experiment. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(20):1716~1717
- 3 Kawanishi S, Takara H, Uchiyama K *et al.*. 3 Tbit/s (160 Gbit/s×19 ch) OTDM/WDM Transmission experiment. OFC '99, Paper PD1, San Diego, USA, 1999
- 4 Lou J W, Xia T J, Boyraz O *et al.*. Broader and flatter supercontinuum spectra in dispersion tailored fibers. OFC '97, Dallas, TX, 1997. 32~34, TuH6
- 5 Okuno T, Onishi M, Nishimura M. Generation of ultra-broad-band supercontinuum by dispersion-flattened and decreasing fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1):72~74
- 6 Takushima Y, Futami F, Kikuchi K. Generation of over 140-nm wide super-continuum from a normal dispersion fiber by using a mode-locked semiconductor laser source. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11):1560~1562
- 7 Futami F, Takushima Y, Kikuchi K. Generation of 10 GHz, 200 fs Fourier-transform-limited optical pulse train

- from modelocked semiconductor laser at 1.55 μm by pulse compression using dispersion-flattened fiber with normal group-velocity dispersion. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(22): 2129~2130
- 8 Mori K, Takara H, Kawanishi S *et al.*. Flatly broadened supercontinuum spectrum generated in a dispersion decreasing fiber with convex dispersion profile. 1997, **33**(21):1806~18071
- 9 Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):25~27
- 10 Birks T A, Wadsworth W J, Russel P S J. Supercontinuum generation in tapered fibers. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(9):1415~1417
- 11 Hansen K P, Jensen J R. Pumping wavelength dependence of supercontinuum generation in photonic crystal fibers. OFC '02., 622 ~ 624, Paper ThGG8, Anaheim, USA, 2002
- 12 Nishizawa N, Goto T. Widely broadened supercontinuum generation using highly nonlinear dispersion shifted fibers and femtosecond fiber laser. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(4B):L365~L367
- 13 Nowak G A, Kim J, Islam M N. Stable 200 nm TDM/WDM source based on continuum generation in 2 m of fiber. OFC '99, Paper TuB3, San Diego, USA, 1999
- 14 Xu Wencheng, Zhang Shumin, Luo Aiping *et al.*. Adiabatic compression of ultra-short pulses in fibers with slowly decreasing dispersion. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4):389~392 (in Chinese)

The Optimal Design of Supercontinuum Fiber

Liu Jianhui Jia Dongfang Ding Yongkui Li Shichen

(Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Education Ministry of China, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 27 September 2002; revised 24 December 2002)

Abstract: The spectral broaden characteristics of three supercontinuum (SC) fibers with different dispersion properties are compared. Then parameters of standard dispersion shifted fiber (DSF) are optimized from aspects of pulse compression and spectrum reshaping demands respectively to generate broadband and flattened SC spectrum. At the same time, principles of parameter optimization in DSF design are also proposed.

Key words: fiber optics; supercontinuum; dispersion shifted fiber; self-phase modulation (SPM)