

文章编号: 0253-2239(2005)01-6-5

色散平坦渐减光纤中色散特性对超连续谱的影响*

金 伟 徐文成 陈昭喜 徐永钊 于丙涛 崔 虎 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

摘要: 从频域全场方程出发研究了色散平坦渐减光纤中超连续谱(SC)的产生。结果表明,色散平坦渐减光纤的初始色散和色散斜率对超连续谱的产生有重要影响,当超连续谱宽度小于某一特定阈值时,谱宽随初始色散或色散斜率显著变化;而当超连续谱谱宽大于此值以后,谱宽随这两个参量的变化较缓慢。并且发现色散递减曲线为凸型的光纤比色散线性递减的光纤更有利于产生宽的超连续谱;而色散递减曲线为凹型的光纤不利于形成宽的超连续谱。计算表明经过优化选择光纤的色散参量,可以得到谱宽达330 nm的超连续谱。

关键词: 导波与光纤光学; 超连续谱; 色散平坦渐减光纤; 群速度色散

中图分类号: TN25 文献标识码: A

Effects of Dispersion Characteristics on Supercontinuum Generation in Dispersion Flattened-Decreasing Fiber

Jin Wei Xu Wencheng Chen Zhaoxi Xu Yongzhao Yu Bintao Cui Hu Liu Songhao

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

Abstract: Generation of supercontinuum (SC) spectrum in the dispersion-flattened decreasing fiber has been studied by utilizing total field formation in the frequency. The initial dispersion and the fiber dispersion-decreasing rate have significant effects on the SC generation. SC bandwidth changes slowly when these two parameters are within certain threshold values, while it changes drastically when they exceed such values. The results also show that convex dispersion fiber is more favorable than the linear dispersion fiber in the generation of wide SC spectrum, while concave dispersion fiber is not suitable for the generation of wide SC spectrum. A 330 nm wide SC spectrum can be generated from a DFD fiber with optimal dispersion characteristics.

Key words: guided wave and fiber optics; supercontinuum; dispersion-flattened decreasing fiber; group-velocity dispersion

1 引 言

随着密集波分复用(DWDM)、光时分复用(OTDM)等大容量高速光纤通信技术的飞速发展,高重复率、多波长的超短光脉冲在通讯中的应用越来越广泛,而在光纤中产生超连续谱(Supercontinuum, SC)正是产生这种光脉冲的有效方法^[1~6]。光纤中的超连续谱是由强度较高的短光脉冲通过光纤后,通过自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混合(FWM)、受激拉曼散射(SRS)等非线性作用而产生的,其光谱中包含多种

频率成分。色散平坦渐减光纤(DFD)兼具色散平坦光纤和色散渐减光纤的特点,利用它产生超连续谱所需光纤长度较短,对抽运光的功率要求也较低,因而被广泛研究和应用^[7~11]。但色散平坦渐减光纤的色散特性对超连续谱产生的影响却未见报道,本文利用超连续谱的频域全场方程,研究了不同色散特性的色散平坦渐减光纤中超连续谱的产生情况。详细计算了色散平坦渐减光纤中不同初始色散和渐变斜率下产生的超连续谱,以及光纤的色散量随光纤距离的不同变化函数对超连续谱的影响。

* 广东省自然科学基金研究团队项目(20003061)和广东省“千百十工程”优秀人才培养基金(Q02085)资助课题。

作者简介: 金 伟(1977~),男,华南师范大学硕士研究生,主要从事光脉冲压缩,光孤子以及连续谱的研究工作。
E-mail: jinwei_sohu@sohu.com。

收稿日期:2003-12-22;收到修改稿日期:2004-08-16

2 理论模型

2.1 超连续谱的频域全场方程

时域的非线性薛定谔方程通常用来描述短光脉冲在光纤中的传输情况^[12]。但对于光谱范围通常可达几百纳米的超连续谱光脉冲的描述,采用频域的全场方程更为精确^[7,13]。假定超连续谱的范围是

$(\omega_0 - \delta\Omega, \omega_0 + \delta\Omega)$, 其中 ω_0 为和 λ_0 对应的中心频率。定义全场的复振幅为 $A_{\text{total}}(z, \tau)$, 其中 $\tau = t - z/V_g$, V_g 为 ω_0 处的群速度, 并且 $A_{\text{total}}(z, \tau)$ 是随传输距离的缓变量。 $A_{\text{total}}(z, \Omega)$ 是全场的频域谱, 由 $A_{\text{total}}(z, \tau)$ 进行傅里叶变换得到。得到描述光脉冲在光纤中传输的频域全场方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{\text{total}}(z, \Omega)}{\partial z} = & -i\Delta(\Omega)A_{\text{total}}(z, \Omega) - \Gamma(\Omega)A_{\text{total}}(z, \Omega) - \\ & i\left(1 + \frac{\Omega}{\omega_0}\right)Q_{\text{Kerr}}\mathcal{F}_{\Omega}[A_{\text{total}}(z, \tau)|A_{\text{total}}(z, \tau)|^2] - \\ & i\left(1 + \frac{\Omega}{\omega_0}\right)Q_{\text{Raman}}\mathcal{F}_{\Omega}\{A_{\text{total}}(z, \tau) \times \mathcal{F}_{\tau}^{-1}\{S_{\text{Raman}}\mathcal{F}_{\Omega}[|A_{\text{total}}(z, \tau)|^2]\}\}, \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式中右边第一项为色散项,第二项为光纤损耗项。第三、四项分别表示克尔效应和拉曼效应。其中

$$\begin{aligned} \Delta(\Omega) &= \sum_{k=2}^{\infty} \beta_0^{(k)} \frac{\Omega^k}{k!}, \\ \beta_0^{(k)} &= \frac{d^k \beta}{d\omega^k}(\omega_0), \\ Q_{\text{Kerr}} &= \frac{\omega_0}{c} \frac{3\chi_{1111}^{(3)}}{n_0} \frac{c\mu_0}{4n_0} \frac{P_{\text{scale}}}{A_{\text{eff}}}, \\ Q_{\text{Raman}} &= \frac{\omega_0}{c} G_{\text{Raman}} \frac{P_{\text{scale}}}{A_{\text{eff}}}, \end{aligned}$$

\mathcal{F}_{Ω} 表示离散傅里叶变换, \mathcal{F}_{τ}^{-1} 表示逆傅里叶变换。 $\Delta(\Omega)$ 为光纤色散, $\chi_{1111}^{(3)}$ 为(1,1,1,1)方向的克尔极化张量。 G_{Raman} 为拉曼增益系数, $A_{\text{eff}} = \pi\omega^2$, ω 为场 $\psi(r)$ 的光斑尺寸。利用分步傅里叶方法可以对(1)式进行求解^[12,13], 从而研究色散平坦渐减光纤中光脉冲的演化与超连续谱的产生。

2.2 光纤色散特性

色散平坦渐减光纤兼具色散平坦光纤和色散渐减光纤的特点,其色散值 $D(\lambda_0, z)$ 随传输距离 z 线性递减^[7]。为了研究色散沿不同递减曲线变化的光纤中超连续谱的产生,将光纤色散表示成下式:

$$D(\lambda, z) = k(\lambda - \lambda_{\text{peak}})^2 + A(z - R)^2 + B, \quad (2)$$

其中 k 表征了色散随波长的变化情况, λ_{peak} 为色散峰值波长,并假设抽运波长 $\lambda_0 = \lambda_{\text{peak}}$,

$$A = \frac{D_0}{R^2 - (L_0 - R)^2}, \quad B = \frac{-D_0(L_0 - R)^2}{R^2 - (L_0 - R)^2},$$

D_0 是色散峰值波长处光纤初始端的色散值 $D_0 = D(\lambda_{\text{peak}}, 0)$, L_0 定义为所有波长的色散均变为负值时的传输距离。图1表明了不同 R 对应的色散递减曲线。显然当 $|R|$ 越大, (2)式所表征的曲线越接近直线,其色散特性和文献^[7]叙述的色散平坦渐减

光纤光纤的色散特性也越接近。

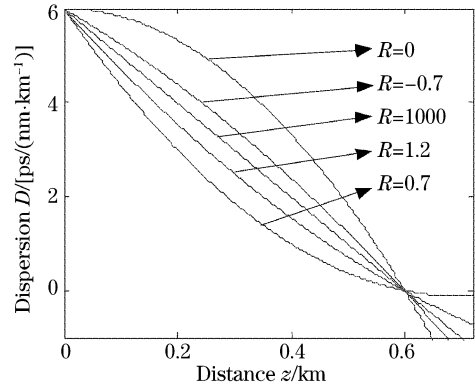


图1 参量 R 的不同取值对应的不同色散渐变曲线

Fig.1 The evolution of D with z in dispersion-flattened decreasing fiber (DFDF) fibers with different parameter R

考虑到 $\lambda_0 = \lambda_{\text{peak}}$, 在抽运波长处光纤的色散斜率 $s = dD/d\lambda$ 为零, 光纤具有较小的三阶色散, 因此须考虑更高阶色散的影响。利用关系式 $\beta_k = \frac{d^k \beta}{d\omega^k} \Big|_{\omega=\omega_c}$, $D = \frac{d\beta_1}{d\lambda}$, $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ 可求得抽运波长处各阶的群速度色散。

3 计算结果及分析

3.1 色散平坦渐减光纤中 D_0 和色散递减斜率 $1/L_0$ 对超连续谱的影响

对于参量 R 较大的色散平坦渐减光纤, 其色散值随距离线性递减, 色散初值 D_0 和色散递减斜率 (可以用 $1/L_0$ 表征) 对形成超连续谱有重要影响, 为此计算了 $R = 1000$, D_0 和 L_0 取不同值的色散平坦渐减光纤中产生的超连续谱。由于(1)式中拉曼效

应项和克尔效应项中的 Ω/ω_0 项(称为 Shock 项),对脉冲传输的影响很小,因此在计算中予以忽略^[7]。计算中采用的抽运光脉冲设为双曲正割型

$$A_{\text{total}}(z, \tau) = \sqrt{P_{\text{scale}}} \operatorname{sech}\left(\frac{\tau}{T_0}\right), \quad (3)$$

其他参量为:脉冲宽度 $T_{\text{FWHM}} = 4$ ps, 峰值功率 $P_{\text{scale}} = 2.23$ W, 中心波长 $\lambda_0 = 1550$ nm, 光纤非线性折射系数 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$ m²/W, 光场有效横截面积 $A_{\text{eff}} = 50$ μm^2 , 光纤的色散二阶微商常量 $k = -0.0001$ ps/(nm³ · km⁻¹)。 T_0 和 T_{FWHM} 的关系为: $T_0 = \frac{T_{\text{FWHM}}}{2\ln(1+\sqrt{2})}$, 计算结果如图 2 所示。

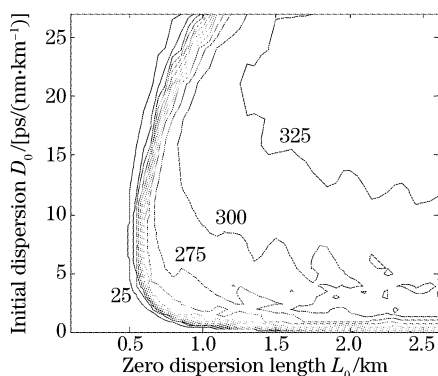


图 2 超连续谱宽随色散递减斜率和初始色散变化的等高图

Fig. 2 Contour map of supercontinuum spectra bandwidth as a function of D_0 and L_0

图 2 中横坐标为 L_0 , 即所有波长的色散均变为负值时的传输距离, 其倒数 $1/L_0$ 表征了光纤色散递减的斜率, 纵坐标为光纤的色散初值用 D_0 表示。图 2 中超连续谱宽为 -27 dB 谱宽, 其宽度从 25 nm 开始递增变化到 325 nm。从图 2 中可以看出, 当超连续谱宽小于 225 nm 时, 谱宽随 D_0 或 L_0 显著变化; 而当超连续谱宽大于此值以后, 谱宽随 D_0 和 L_0 变化都很缓慢。因此对于给定的 D_0 (或 L_0), 要得到宽的超连续谱, L_0 (或 D_0) 必须大于某一特定值。假设 $D_0 = 2$ ps/(nm · km⁻¹), 则 L_0 必须大于 0.8 km 才能形成超连续谱; 而如果 $L_0 < 0.5$ km, 则 D_0 无论取何值都不能形成超连续谱。这是因为在超连续谱形成过程中一般存在两个阶段: 第一, 反常色散光纤段的脉冲绝热孤子压缩过程, 这时脉冲的脉宽因反常色散的缓慢减小而被逐步压窄, 同时脉冲的峰值功率得到放大、频谱展宽; 第二, 正常色散光纤段的脉冲超连续谱产生过程, 这时被压缩后的高峰功率的窄脉冲进入正常色散光纤段, 由正常色散与较强的自相位调制相互作用引发线性频率

啁啾的积累而使频谱平坦展宽。因此如果光纤的色散初始值 D_0 太小或色散斜率即 $1/L_0$ 太大, 脉冲都不能得到很好的压缩^[14], 从而不能得到平坦的超连续谱。

3.2 参量 R 对超连续谱的影响

为了研究色散平坦渐减光纤的色散递减曲线的变化对超连续谱的影响, 计算了不同 R 参量的色散平坦渐减光纤中形成的超连续谱。为了便于比较, 取和上节相同的参量, 并且取 $D_0 = 6$ ps/(nm · km⁻¹), $L_0 = 0.6$ km, 同样忽略拉曼效应项以及 Shock 项。另外(2)式中, 当参量 $0 < R < 0.6$ 时, 递减曲线不是严格递减, 因而不考虑。经计算在光纤长度为 $1.05L_0$ 处输出的超连续谱如图 3 所示, 而其 -27 dB 带宽随参量 R 的变化如图 4 所示, 其中 $0 < R < 0.6$ 没有计算数据。

由图 3、图 4 可以看出, $R > 0.6$ 时, 色散递减曲线为凹型, 随着 R 的减小, 递减曲线弯曲度增加, 输出的超连续谱平坦度减小, 宽度变窄, 但抽运光中心波长附近的尖峰振荡结构消失了。 $R < 0$ 时, 色散递减曲线为凸型, 随着 R 的增大, 递减曲线的弯曲度增大, 形成的超连续谱的中心振荡结构加强了, 而且长波和短波两个方向的谱的强度都有所降低, 使得超连续谱的平坦度降低。对于参量 R 接近 0.6 的光纤, 在超连续谱形成的第一阶段, 传输初期色散递减很快, 脉冲还来不及充分压缩, 在传输后期, 色散递减变慢, 对脉冲压缩较小, 从而使得产生的谱较窄。而在第二阶段, 由于在正色散区色散随距离变化缓慢, 孤子阶数很高, 光波很快发生了分裂, 引发的线性频率啁啾的积累量不够, 所以最后输出的频谱平坦度较差。对 R 接近 0 的光纤, 色散递减曲线为凸型, 和色散线性递减光纤相比, 脉冲在色散先缓慢递减然后快速递减的光纤中能够得到更好的压缩, 因而超连续谱展得更宽。但在第二阶段, 正的二阶色散迅速增大, 孤子阶数很快减小, 同样造成线性频率啁啾的积累量不充分, 从而影响了最后输出超连续谱的平坦性。

综合考虑以上对色散平坦渐减光纤色散参量的讨论, 可以发现选择相对较大的初始色散和比较适中的递减斜率以及负的 R 参量有利于产生较宽的超连续谱。采用和以上相同的抽运光脉冲参数, 经过优化色散平坦渐减光纤的色散参量, 计算表明可以得到 -27 dB 谱宽达到 330 nm 的超连续谱, 如图 5 所示。其中 $D_0 = 18$ ps/(nm · km⁻¹), $L_0 = 1.8$ km, $R = -1.8$ 。

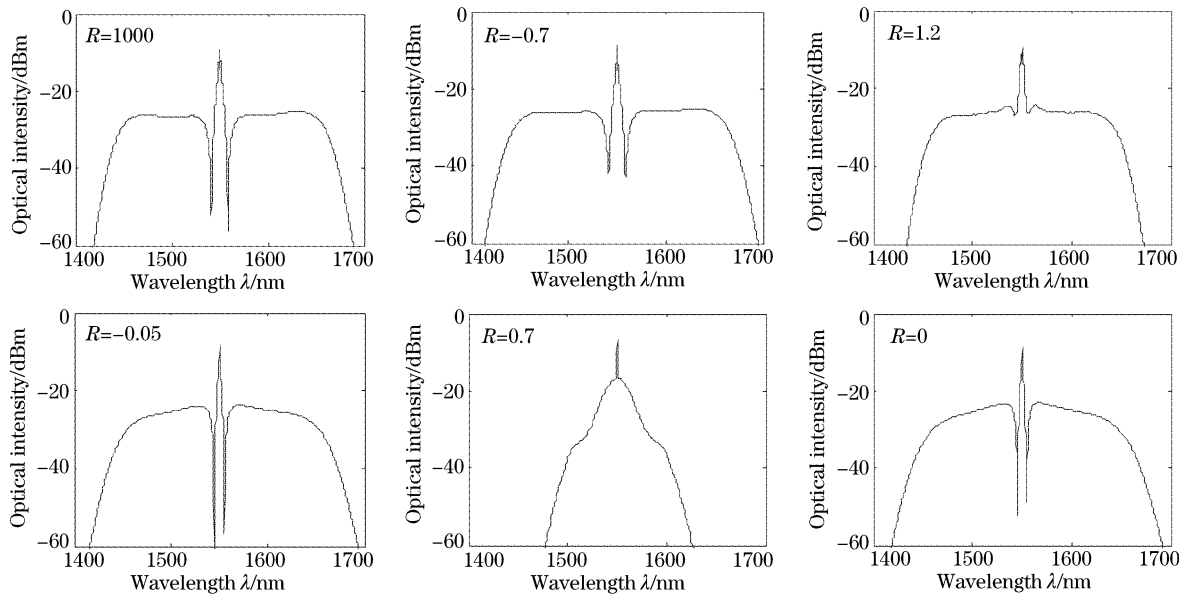
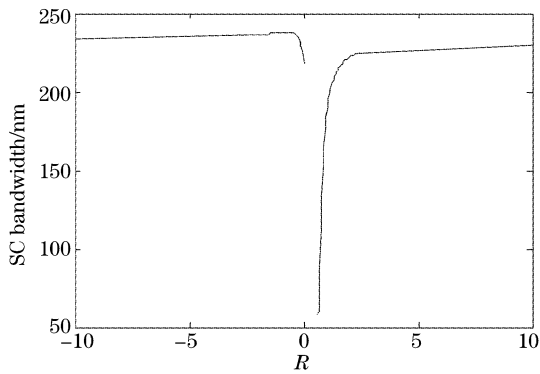
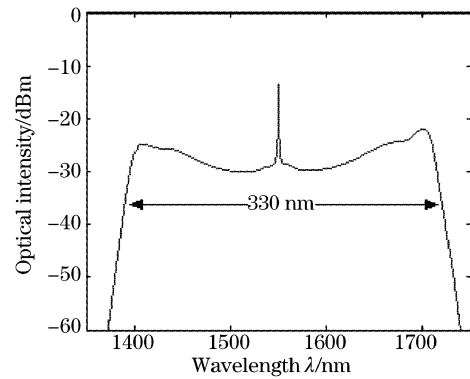
图 3 不同参量 R 的光纤中产生的超连续谱频谱Fig. 3 Supercontinuum spectra output from dispersion-flattened decreasing fiber fibers with different parameter R 图 4 27 dB 谱宽随参量 R 的变化曲线Fig. 4 Dependence of a 27 dB-bandwidth spectrum on parameter R 

图 5 经过优化选择光纤色散参量后产生的超连续谱

Fig. 5 Supercontinuum spectrum generated from dispersion-flattened decreasing fiber with optimal dispersion characteristics

4 结 论

色散平坦渐减光纤的色散初值和色散斜率的相关取值没有达到一定的阈值,则不能产生超连续谱。而且,由于在色散递减曲线为凸型的色散平坦渐减光纤中脉冲得到了更好的压缩,因而产生的超连续谱也更宽。计算表明经过优化选择光纤的初始色散,色散递减斜率以及 R 等色散参量,在相同抽运光脉冲条件下,可以得到谱宽达到 330 nm 的超连续谱。

参 考 文 献

1 B. Gross, J. T. Manassah. Supercontinuum in the anomalous

- group-velocity dispersion region[J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1992, **9**(10): 1813~1818
- 2 K. Mori, H. Takara, S. Kawanishi *et al.*. Flatly broadened supercontinuum spectrum generated in a dispersion decreasing fiber with convex dispersion profile[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(21): 1806~1807
- 3 Takushima Y, Futami F, Kikuchi K. Generation of over 140-nm wide supercontinuum from a normal dispersion fiber by using a mode-locked semiconductor laser source [J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 1998, **10**(11): 1560~1562
- 4 Nikola I. Nikolov, Thorkild Srensen, Ole Bang *et al.*. Improving efficiency of supercontinuum generation in photonic crystal fibers by direct degenerate four-wave mixing[J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2003, **20**(11): 2329
- 5 William J. Wadsworth, Arturo Ortigosa-Blanch, Jonathan C. Knight. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers; a novel light source[J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2002, **19**(9): 2148~2155
- 6 Wu Jian, Li Yuhua, Lou Caiyun *et al.*. Ultra-short pulse

- generation from supercontinuum source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 325~329 (in Chinese)
- 伍 剑,李玉华,娄采云 等. 利用超连续谱光源产生超短光脉冲 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 325~329
- 7 Kunihiro Mori, Hidehiko Takara, Satoki Kawanishi. Analysis and design of supercontinuum pulse generation in a single-mode optical fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2001, **18**(12): 1780~1792
- 8 Fumio Futami, Yuichi Takushima, Kazuro Kikuchi. Generation of wideband and flat supercontinuum over a 280-nm spectral range from a dispersion-flattened optical fiber with normal group-velocity dispersion[J]. *IEICE Trans. Electron.*, 1999, **E82-C**: 1531~1538
- 9 Toshiaki Okuno, Masashi Onishi, Masayuki Nishimura. Generation of ultra-broad-band supercontinuum by dispersion-flattened and decreasing fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1): 72~74
- 10 Liu Jianhui, Jia Dongfang, Ding Yongkui *et al.*. The optimal design of supercontinuum fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 684~688 (in Chinese)
- 刘俭辉,贾东方,丁永奎 等. 超连续谱光纤的优化设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 684~688
- 11 Xu Wencheng, Jin Wei, Xu Yongzhao *et al.*. Enhancement of supercontinuum spectrum generation in a dispersion-decreasing fibre with a concave dispersion profile[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **6**: 1089~1092
- 12 Agrawal G. P. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic Press, 1995
- 13 Pierre Luc Francois. Nonlinear propagation of ultrashort pulses in optical fibers: total field formulation in the frequency domain [J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(2): 276
- 14 Xu Wencheng, Zhang Shumin, Luo Aiping *et al.*. Adiabatic compression of ultra-short pulses in fibers with slowly decreasing dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 389~392 (in Chinese)
- 徐文成,张书敏,罗爱平等. 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