

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0245-05

大模场光子晶体光纤中超连续谱的产生与控制

赵磊 朱启华 隋展 张颖 左言磊 郝欣 周凯南 曾小明 王逍 黄征
谢旭东 邓武 黄小军

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 探索利用大模场光子晶体光纤产生大功率、高光束质量的超连续谱。采用分步傅里叶方法求解广义非线性薛定谔方程(GNLSE),模拟了光脉冲在大模场光子晶体光纤中非线性传输和超连续谱的产生过程。着重分析了光子晶体光纤长度和抽运脉冲的峰值功率、啁啾等对超连续谱产生的影响,讨论了大模场光子晶体光纤中光谱的非线性展宽机制。发现可将超连续谱产生过程分为初始展宽、剧烈展宽和饱和展宽三个阶段。合理选择光纤长度,使产生的超连续谱处于剧烈展宽阶段时输出,既能够得到较宽的光谱,又能够保证较高的效率。抽运峰值功率对超连续谱的产生有重要影响,当输入功率较小时,脉冲的频谱成对称展宽,仅有自相位调制(SPM)效应起作用,其他高阶效应的影响都很弱。随着脉冲功率的增加,频谱短波方向变化较小,光谱向长波方向展宽。同时,脉冲时域出现振荡调制,振荡的起因与光波分裂现象有关。抽运光初始啁啾对超连续谱的产生也有重要影响。当啁啾为正值时,啁啾量的大小对产生超连续谱的影响较小,蓝移方向基本没有影响,而红移部分能量随着啁啾量的增大向长波方向转移,超连续谱总的宽度变化较小;当啁啾为负且满足一定条件时,其中的非线性作用得到增强,有利于光谱展宽。

关键词 非线性光学; 大模场光子晶体光纤; 超连续谱; 非线性薛定谔方程

中图分类号 O437; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL200835s2.0245

Supercontinuum Generation and Control from Large-Mode-Area Photonic Crystal Fiber

Zhao Lei Zhu Qihua Sui Zhan Zhang Ying Zuo Yanlei Hao Xin Zhou Kainan
Zeng Xiaoming Wang Xiao Huang Zheng Xie Xudong Deng Wu Huang Xiaojun

(Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Large-mode-area photonic crystal fiber is used to generate high power, high beam quality supercontinuum. Propagation and supercontinuum generation process of laser pulse in large-mode-area (LMA) photonic crystal fiber (PCF) is simulated by solving the general nonlinear Schrödinger equation (GNLSE) using the split-step Fourier method. Effects of the pump pulse parameters (peak power and chirp) and the length of photonic crystal fiber used on supercontinuum generation are particularly estimated. Nonlinear spectral broadening mechanism of laser pulse in large-mode-area photonic crystal fiber is discussed. The results show that the process of supercontinuum generation can be divided into three stages: initial broadening, dramatic broadening and saturation broadening. The spectrum width and efficiency can be achieved by the optimized length of LMA PCF to insure output of the generated supercontinuum at the dramatic broadening stage. The pump peak power and chirp have important impact on supercontinuum generation. When a small peak power pump is input, the spectrum broadens symmetrically. When the pump peak power increases, it brings little changes with the shorter wavelength component but broader of the longer wavelength component. The time-domain shape of the pulse exhibits concussion modulation as the effect of pulse breakup. When the pump chirp is positive, little influence is shown, except a shift of longer wavelength power by increasing the chirp. But the full width of the supercontinuum has little changes. While the pump chirp is negative and satisfy certain condition, the nonlinear is enhanced to facilitate the supercontinuum generation.

Key words nonlinear optics; large-mode-area photonic crystal fiber; supercontinuum; nonlinear Schrödinger equation

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2008A0401017)资助课题。

作者简介: 赵磊(1984—),男,硕士研究生,主要从事超短激光技术方面的研究。E-mail:leizhao@nudt.edu.cn

导师简介: 隋展(1965—),男,研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。E-mail: suizhan@lfcenter.ac.cn

1 引 言

超连续谱产生 (Supercontinuum generation, SCG) 是指光波在透明介质中传播时光谱极大展宽的现象。强激光进入透明介质, 通过一系列非线性效应, 如自相位调制、四波混频、受激拉曼散射等, 产生新的频率成份, 频谱得到极大展宽。超连续谱光源在医学、生物、信息等领域应用前景非常广阔^[1,2]。如利用新型抽运超连续谱光源的时间分辨谱仪探测吸收光谱与受激光谱, 这种方法用来研究生物学、化学与固体物理学中的皮秒与飞秒反应过程; 超连续谱光源还可广泛应用在光纤衰减测量、光纤色散测量、干涉测量仪、光相干摄影术、光谱学分析等方面, 而且在光纤通信方面还可用作未来高速波分复用 (WDM)/时分复用 (OTDM) 系统的发射光源。另外, 它还可以应用在波长转换, WDM 光网的全光再生及光学采样等; 超连续谱光源优良的宽光谱特性还用于脉冲压缩、产生阿秒脉冲、可调谐超短脉冲等超短脉冲场合。除此之外, 在军事运用方面, 超连续谱光源为激光聚变、中红外激光以及电子对抗等方面提供了解决其中关键问题的新思路, 展现出非常重要的应用潜力。

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谱介质。由于普通非线性介质中产生超连续谱不好控制以及所需抽运脉冲功率太高等缺点, 人们逐渐将目光投向研究光纤波导中的超连续谱产生。近年来, 利用光纤, 特别是光子晶体光纤 (PCF) 来产生频谱极宽且平坦的超连续谱成为研究的热点^[3~13]。光子晶体光纤也称微结构光纤或多孔光纤, 其概念最早是由 St. J. Russell 等于 1992 年提出的, 世界上第一根 PCF 由 J. C. Knight 等^[14]于 1996 年研制成功。PCF 具有无截止单模特性和灵活的色散特性, 而且还有高的非线性和双折射特性。这些特性都有利于超连续谱的产生。超连续谱产生是 PCF 众多应用中最有价值的实例。

从研究现状可以看出, 目前对 PCF 中产生超连续谱的研究工作主要有以下几个方面, 一是利用不同设计特性的高非线性 PCF 产生超连续谱, 寻找产生高质量超连续谱的 PCF 的优化设计方法; 二是研究在各种不同条件下超连续谱的产生机制; 三是研究超连续谱的性质, 从初始脉冲的参数着手, 控制超连续谱的产生, 为超连续谱的应用奠定基础。但是 PCF 中超连续谱的产生仍有许多理论和技术问题亟待解决。本文探索利用大模场光子晶体光纤 (LMA-PCF) 产生大功率、高光束质量的超连续谱。利用分

步傅里叶方法求解广义非线性薛定谔方程 (GNLSE), 模拟了光脉冲在大模场 PCF 中非线性传输和超连续谱的产生过程。着重分析了光子晶体光纤长度和抽运光的功率、啁啾等对大模场光子晶体光纤中超连续谱产生的影响。讨论了大模场光子晶体光纤中脉冲光谱的非线性展宽机制, 提出了大功率、高光束质量超连续谱系统的优化设计与控制方法。

2 理论模型及数值方法

由 Maxwell 方程组可以得到描述光脉冲在光子晶体光纤中传输的非线性薛定谔方程, 采用最为精确的广义非线性薛定谔方程作为模型^[15]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A - i \sum_{k \geq 1} \frac{i^k \beta_k}{k!} \frac{\partial^k A}{\partial t^k} = i \gamma \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left[A(z, t) \int_{-\infty}^{\infty} R(t') |A(z, t-t')|^2 dt' \right], \quad (1)$$

式中 α 为 PCF 的损耗系数; ω_0 为脉冲的中心波长; $\beta_k = (d^k \beta / d\omega^k)_{\omega=\omega_0}$ 表示各阶色散 (k 为色散阶数); $\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}}$ 为非线性系数, 光纤的有效纤芯面积可以根据光场的横向分布函数 $F(x, y)$ 计算:

$$A_{\text{eff}} = \left(\iint |F(x, y)|^2 dx dy \right)^2 / \left[\iiint |F(x, y)|^4 dx dy \right],$$

n_2 为非线性折射率系数, 对石英 PCF 一般取为 $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。响应函数 $R(t)$ 包含电学的和振动的 (拉曼) 影响。假设电学的影响几乎是瞬时的, $R(t)$ 的函数形式可以写成

$$R(t) = (1 - f_R) \delta(t) + f_R h_R(t), \quad (2)$$

式中 f_R 为延时拉曼响应对非线性极化的贡献, 利用已知的峰值拉曼增益系数值可以算出 f_R 约为 0.18。拉曼响应函数 $h_R(t)$ 的一个有用形式为

$$h_R(t) = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{\tau_1 \tau_2} \exp(-t/\tau_1) \sin(t/\tau_2), \quad (3)$$

τ_1 和 τ_2 是两个可以调节的参数, 适当地选取以适合实际的拉曼增益谱线, 通常使用的数值是 $\tau_1 = 12.2 \text{ fs}$ 和 $\tau_2 = 32 \text{ fs}$ 。

广义非线性薛定谔方程没有解析解, 一般采用数值方法求解, 这里采用精度较高的对称分步傅里叶算法

$$A(z+h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2} \hat{D}\right) \exp(h \hat{N}) \exp\left(\frac{h}{2} \hat{D}\right) A(z, T), \quad (4)$$

式中 $\hat{D} = i \sum_{k \geq 1} \frac{i^k \beta_k}{k!} \frac{\partial^k}{\partial t^k}$ 是差分算符, 表示介质的色散

和吸收; \hat{N} 是非线性算符, 描述脉冲传输过程中的非线性效应。

3 模拟结果及分析

模拟中选用 Crystal Fiber A/S 公司的大模场光子晶体光纤 LMA-10, 其结构如图 1 所示, 内部空气孔为三角形排列, 空气孔直径 d 和孔间距 Λ 比近似为 0.5, 保证了从可见光到红外波段的单模特性。LMA-10 纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$, 有效模场面积约为 $40\ \mu\text{m}^2$, 对应的非线性系数约为 0.00345。图 2 为 LMA-10 光子晶体光纤的色散曲线。

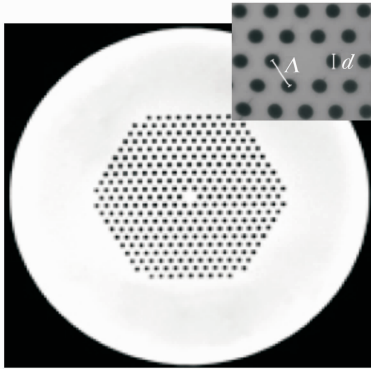


图 1 LMA-10 截面的扫描电镜图
Fig. 1 SEM of LMA-10

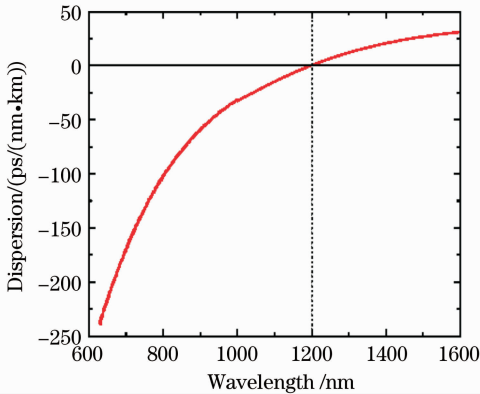


图 2 LMA-10 光子晶体光纤的色散曲线
Fig. 2 Dispersion profile of LMA-10

3.1 光子晶体光纤长度的影响

首先, 模拟分析了峰值功率为 10 kW, 脉宽 300 fs 的无啁啾高斯脉冲在长度为 9 m 的 LMA-10 光纤中产生超连续谱的情形, 其脉冲时域和光谱演化如图 3 所示。发现可将超连续谱产生过程分为初始展宽、剧烈展宽和饱和展宽三个阶段。传输距离小于 1 m 时即处于初始展宽阶段, 此时脉冲时域、频谱均对称展宽, 但展宽较小; 传输距离在 1 m 和 3 m 之间时抽运脉冲处于剧烈展宽阶段, 频谱剧烈加宽; 当

传输距离大于 3 m 后脉冲频谱却几乎不再展宽, 即处于饱和。因此, 合理选择光纤长度, 使产生超连续谱处于剧烈展宽阶段时输出, 既能够得到较宽的光谱, 又能够保证较高的效率。

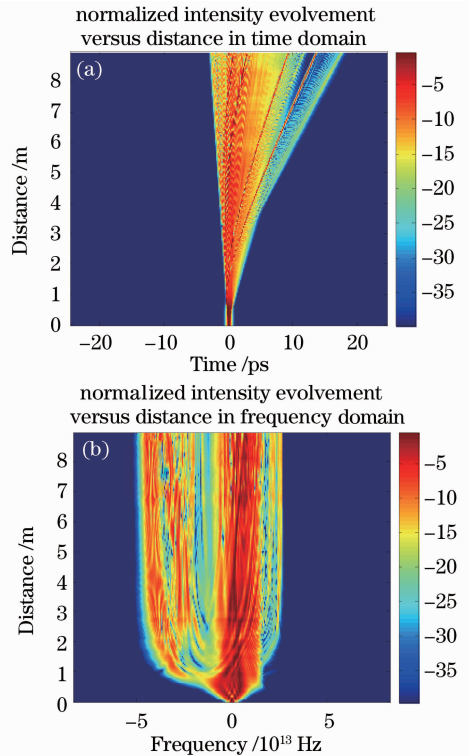


图 3 9 m 长 LMA-10 光子晶体光纤中产生超连续谱的时域和频谱及其演化图
Fig. 3 Time and frequency involvement of supercontinuum generated from 9 m LMA-10

3.2 抽运峰值功率、能量的影响

计算中选取长度为 3 m 的 LMA-10 光纤, 固定抽运光脉宽(半峰全宽)为 300 fs。图 4 是峰值功率分别为 1 kW, 5 kW, 10 kW, 30 kW 时产生超连续谱的时域和频谱。

当输入功率为 1 kW 时, 脉冲时域和频谱都成对称展宽。计算结果表明, 此时, 色散长度 $L_D = 10.7\ \text{m}$, 非线性长度 $L_{NL} = 0.28\ \text{m}$, 色散长度远大于非线性长度, 非线性作用特别是自相位调制 (SPM) 是光谱展宽的主要因素。随着脉冲功率的增加, 频谱短波方向变化较小, 光谱向长波方向展宽。同时, 脉冲时域出现振荡调制, 振荡的起因与光波分裂现象有关。当脉冲在光纤中传输时, 群速度色散 (GVD) 和 SPM 都使脉冲产生频率啁啾, GVD 引入的啁啾是线性的, 但 SPM 引入的啁啾在整个脉冲内却远非线性的。由于总啁啾的非线性特性, 脉冲的不同部分以不同的速度传输, 在正常色散情况下, 脉冲前沿附近的红移光传输较快, 超越了前面脉冲

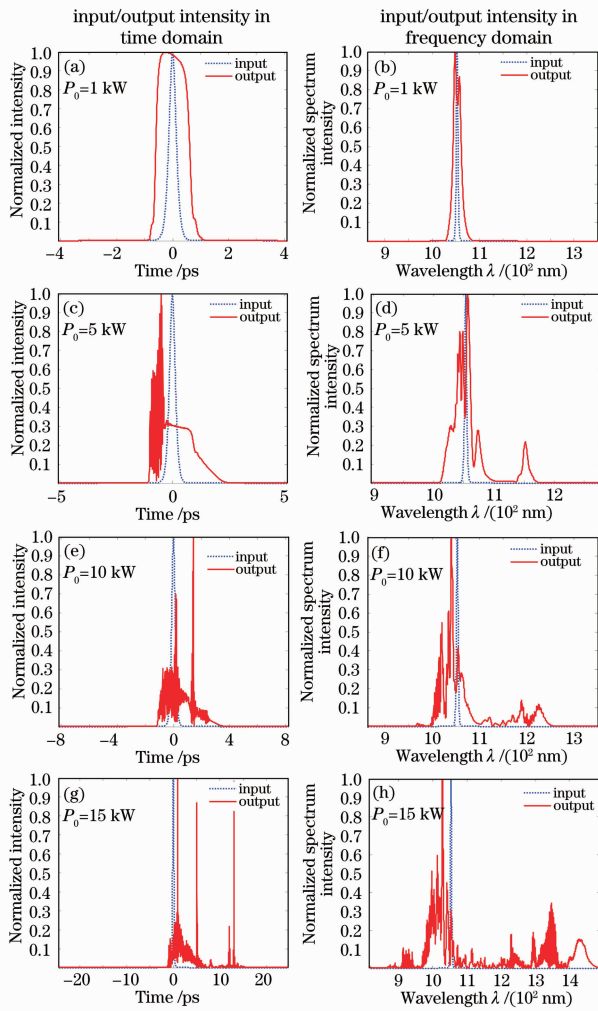


图4 峰值功率改变时产生超连续谱的时域和频谱

Fig. 4 Time and frequency feature of supercontinuum generated with different peak power

尾部的非红移光；脉冲后沿附近的蓝移光则正好相反。这样，脉冲前后沿附近两种不同频率的光之间发生干涉，脉冲的振荡正是这种干涉的结果。在光纤的反常色散区不发生光波分裂，原因是脉冲的红移部分赶不上传输快的前尾，而使脉冲尾部的能量发散，从而产生一个基座。可见大的峰值功率和能量对超连续谱产生是需要的，但是又会带来损伤（特别是端面损伤）等问题，需要特别注意。

3.3 抽运脉冲啁啾的影响

抽运脉冲的啁啾对超连续谱产生也有着非常重要的影响，下面模拟了抽运光的啁啾对大模场光子晶体光纤中超连续谱产生的影响。计算中仍然选取长度为3 m的LMA-10光纤，固定抽运光脉宽（半峰全宽）为300 fs，峰值功率为20 kW。图5是啁啾分别为 $C=0$ （无啁啾）， $C=1$ ， $C=3$ ， $C=-1$ ， $C=-3$ 时产生的超连续谱的时域和频谱。

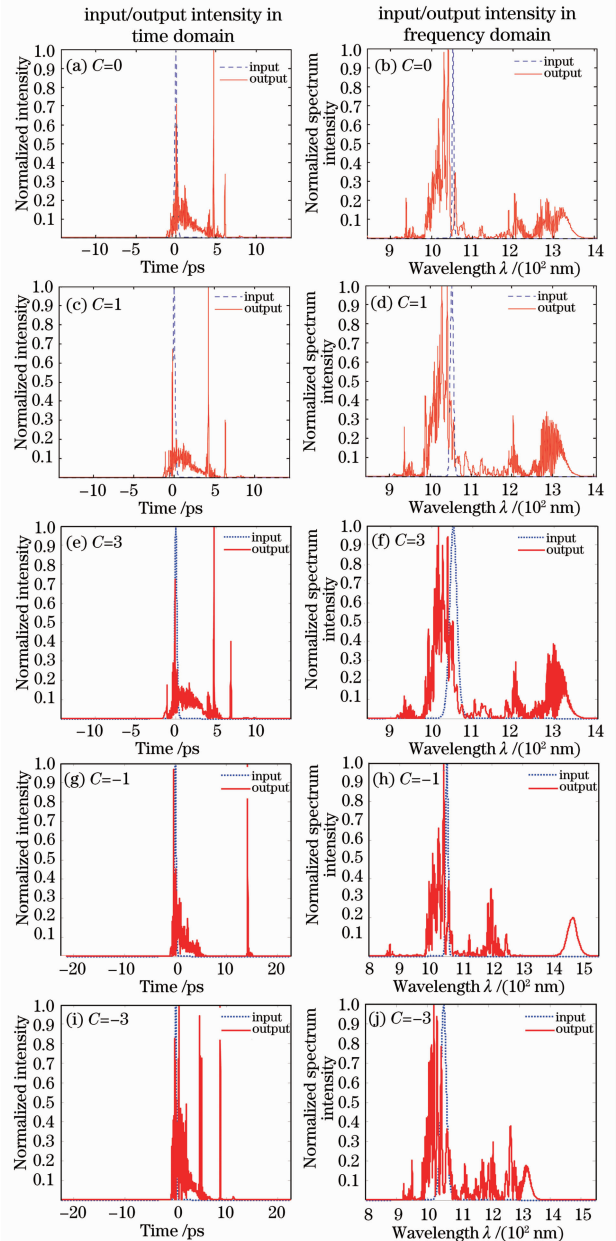


图5 抽运脉冲初始啁啾改变时产生的超连续谱的时域和频谱

Fig. 5 Time and frequency feature of supercontinuum generated with different initial chirp

从以上不同初始啁啾的脉冲产生的超连续谱时域和频谱特性可以看出，当啁啾为正时，啁啾量的大小对产生超连续谱的影响较小，蓝移方向几乎没有影响，而红移部分能量随着啁啾量的增大向长波方向转移，超连续谱总的宽度变化较小；当啁啾为负时，除 $C=-1$ 外，啁啾量的大小对产生超连续谱的影响也较小。抽运脉冲初始啁啾对超连续谱产生的影响可由群速度色散产生的啁啾对初始啁啾的依赖作用来解释^[15]。我们知道自相位调制产生的啁啾为

$$\delta\omega(T) = \frac{2T}{T_0} \frac{z}{L_{NL}} \exp\left(-\frac{T^2}{T_0}\right),$$

与脉冲的初始啁啾无关。而 GVD 的作用导致啁啾脉冲展宽后与展宽前的关系为

$$\frac{T_1}{T_0} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 \right]^{1/2}.$$

可见, GVD 对啁啾脉冲的作用依赖于啁啾参量 C 和二阶色散 β_2 的共同作用, 当 $C\beta_2 > 0$ 时脉冲单调展宽; 而当 $-2 < C\beta_2 z/T_0^2 < 0$ 时脉冲有一个初始窄化的阶段。由于计算中采用的 LMA-10 大模场光子晶体光纤在抽运波长 1053 nm 处是正常色散的 ($\beta_2 > 0$), 这样初始啁啾为负且绝对值越小的脉冲能够在更长距离上得到压缩, 其中的非线性作用得到增强, 有利于光谱展宽, $C = -1$ 即是这种情况。

4 结 论

采用广义非线性薛定谔方程描述光脉冲在大模场光子晶体光纤中的传输, 采用分步傅里叶方法进行求解, 模拟了光脉冲在大模场光子晶体光纤中非线性传输和超连续谱的产生过程, 探索利用大模场光子晶体光纤产生大功率、高光束质量的超连续谱。着重分析了光子晶体光纤长度和抽运光的功率、啁啾等对大模场光子晶体光纤中超连续谱产生的影响。讨论了大模场光子晶体光纤中脉冲光谱的非线性展宽机制。发现可将超连续谱产生过程分为初始展宽、剧烈展宽和饱和展宽三个阶段。合理选择光纤长度, 使产生超连续谱处于剧烈展宽阶段时输出, 既能够得到较宽的光谱, 又能够保证较高的效率。抽运峰值功率对超连续谱的产生有重要影响, 当输入功率较小时, 脉冲的频谱成对称展宽, 仅有 SPM 效应起作用, 其他高阶效应的影响都很弱。随着脉冲功率的增加, 频谱短波方向变化较小, 光谱向长波方向展宽。同时, 脉冲时域出现振荡调制, 振荡的起因与光波分裂现象有关。大的峰值功率和能量对超连续谱产生是需要的, 但是又会带来损伤(特别是端面损伤)等问题, 需要特别注意。抽运光初始啁啾对超连续谱的产生也有重要影响。由于抽运波长处于大模场光子晶体光纤 LMA-10 的正常色散区, 当啁啾为正时, 啁啾量的大小对产生超连续谱的影响较小, 蓝移方向基本没有影响, 而红移部分能量随着啁啾量的增大向长波方向转移, 超连续谱总的宽度变

化较小; 当啁啾为负且满足 $-2 < C\beta_2 z/T_0^2 < 0$ 时, 其中的非线性作用得到增强, 有利于光谱展宽。这些结论对大模场光子晶体光纤中超连续谱的产生与控制具有重要意义, 同时对普通光纤正常色散区的脉冲非线性传输也有一定的指导作用。

参 考 文 献

- 1 R. R. Alfano. The Supercontinuum Laser Source [M]. 2nd edition, New York: Springer-Verlag, 2006
- 2 J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**: 1135~1184
- 3 M. N. Islam, G. Sucha, I. Bar-Joseph *et al.*. Broad bandwidths from frequency-shifting solitons in fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**: 370~372
- 4 T. A. Birks, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell. Supercontinuum generation in tapered fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**: 1415~1417
- 5 J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**: 25~27
- 6 A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Pulse breaking and supercontinuum generation with 200-fs pump pulses in photonic crystal fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(11): 2567~2572
- 7 V. V. Ravi Kanth Kumar, A. K. George, W. H. Reeves *et al.*. Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(25): 1520~1525
- 8 S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt *et al.*. Whitelight supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**: 1356~1358
- 9 S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt *et al.*. Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 753~764
- 10 M. Dudley, L. Provino, N. Grossard *et al.*. Supercontinuum generation in air-silica microstructured fibers with nanosecond and femtosecond pulse pumping[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 765~771
- 11 P. A. Champert, S. V. Popov, J. R. Taylor *et al.*. Generation of multiwatt, broadband continua in holey fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(2): 122~124
- 12 T. Schreiber, J. Limpert, H. Zellmer *et al.*. High average power supercontinuum generation in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**: 71~78
- 13 J. C. Travers, R. E. Kennedy, S. V. Popov *et al.*. Extended continuous-wave supercontinuum generation in a low-water-loss holey fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(15): 1938~1940
- 14 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. Russell *et al.*. All silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 15 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics and Application of Nonlinear Fiber Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
Agrawal G P. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002