

光子晶体光纤超连续谱高阶孤子分裂的数值模拟

李 坤¹, 郑 义^{1,2}, 杜海龙¹, 傅修远¹, 闫 昕¹

(1. 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052; 2. 北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘 要: 基于高阶非线性薛定谔方程, 利用分布傅里叶方法(SSFM)数值模拟了高阶孤子在光子晶体光纤反常色散区中的传输。从脉冲形状和频谱两个方面分析讨论了三阶色散、自陡峭效应和脉冲内拉曼散射对高阶孤子传输的影响。计算结果表明: 高阶效应使高阶孤子的演化不再具有周期性特性。其中, 对高阶孤子分裂起主导作用的是三阶色散和孤子内拉曼散射。高阶效应均使最终频谱得到了不同程度的展宽。

关键词: 光子晶体光纤; 高阶孤子; 超连续谱; 色散; 自陡峭; 孤子内拉曼散射

中图分类号: O43

文献标识码: A

Numerically Simulate of the High-order Soliton Fission in the Experiment of Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fibers

LI Kun¹, ZHENG Yi^{1,2}, DU Hai-long¹, FU Xiu-yuan¹, YAN Xin¹

(1. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052; 2. Institute of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the high-order nonlinear Schrödinger equation, the propagation of high-order solitons in the anomalous dispersion region of photonic crystal fibers (PCF) is numerically simulated by making use of the split-step Fourier method (SSFM). From pulse shape and spectrum, the influences of the third-order dispersion, self-steepening and intrapulse stimulated Raman scattering on the propagation property of the high-order solitons are analysed. The results show that the high-order effects destroy the periodicity of high-order solitons evolution. Among them, the third-order dispersion and intrapulse stimulated Raman scattering play a leading role in the fission of the high-order solitons. And the high-order effects always broaden the ultima spectrum at different levels.

Key words: photonic crystal fiber; high-order soliton; supercontinuum; dispersion; self-steepening; intrapulse stimulated Raman scattering

1 引 言

空气孔呈周期性排列的并利用光子带隙效应或改进的全内反射效应传光的光纤, 称之为光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF)。由于 PCF 具有特殊的色散和非线性特性, 使它成为研究的热点。其中, 光子晶体光纤中超连续谱的产生已得到广泛的研究^[1-3]。试验和理论^[4-5]表明, 当入射的低平均功率飞秒脉冲位于反常色散区时, 在同样的强度下宽脉冲产生的超连续谱可以比窄脉冲更宽。这时产生超连续谱的机理被解释为高阶孤子裂变和四波混频。

本文利用数值方法模拟了光子晶体光纤中反常色散区内的高阶孤子裂变的过程。根据飞秒脉冲在光子晶体光纤中传输时高阶孤子的演变情况, 详细讨论了高阶色散和高阶非线性效应对高阶孤子裂变及超连续谱的产生的影响进行讨论。从而对在光子晶体光纤中产生超连续谱的实验在光纤参数选取及泵浦源的参数设定方面具有一定的指导意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 60478021) 资助。

作者简介: 李 坤 (1981 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为光子晶体光纤非线性光学特性。E-mail: likun0926@163.com

收稿日期: 2008-01-14

2 基本理论模型

飞秒光脉冲在光子晶体光纤中的传输所满足的广义非线性薛定谔方程经归一化和参量变换得^[6]:

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = -i \operatorname{sgn}(\beta_2) \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \delta \frac{1}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3} + iN^2 \cdot \left[|U|^2 U + is \frac{\partial}{\partial \tau} (|U|^2 U) - \tau_R U \frac{\partial}{\partial \tau} (|U|^2) \right] \quad (1)$$

上式引入了: $U = \frac{A}{\sqrt{P_0}}$, $\xi = \frac{z}{L_D}$, $\tau = \frac{T}{T_0}$ 。 A 为脉冲

慢变包络振幅; P_0 为输入脉冲峰值功率; z 为脉冲在 PCF 内的传输距离; β_k 为 k 阶色散系数; T 为以中心波长群速度移动的参考系的时间; ω_0 为脉冲中心角频率; τ_R 为脉冲内拉曼散射系数; T_0 是入射脉冲宽度; $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$ 为色散长度; $\operatorname{sgn}(\beta_2)$ 为 β_2 的符号, 在反常色散区等于 -1 ; N 为孤子阶数, 满足 $N^2 = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|}$, 其中 γ 为 PCF 的非线性系数。参量 δ, s 和 τ_R 分别描述高阶色散、自陡峭和非线性相应延迟效应, 它们的表达式为: $\delta = \frac{\beta_3}{|\beta_2| T_0}$, $s = \frac{1}{\omega_0 T_0}$, $\tau_R = \frac{T_R}{T_0}$ 。

其中, $T_R = f_R \times \int t \times h_R(t) dt$, $h_R(t)$ 是拉曼响应函数, f_R 表示延时拉曼响应对非线性极化的贡献。式(1)等号右边依次为群速度色散效应、高阶色散效应、自相位调制、自陡峭和脉冲内拉曼散射效应。选取初始的脉冲形状为双曲正割形:

$$U(0, T) = \operatorname{sech}\left(\frac{T}{\tau_0}\right) \exp\left(-\frac{iCT^2}{2\tau_0^2}\right) \quad (2)$$

式中, C 为啁啾参量, 本文考虑无啁啾脉冲, 即 $C=0$ 。

同时由于通常所用光纤长度在几厘米到几十厘米, 故式(1)忽略了光纤的损耗。

3 数值模拟分析

利用分布傅里叶方法, 采用 MATLAB 编程, 以四阶光孤子 ($N=4$) 为例, 模拟其在 PCF 反常色散区中的传输情况。

首先, 不考虑高阶效应, 即 $\delta = s = \tau_R = 0$, 公式(1)变为:

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = -i \operatorname{sgn}(\beta_2) \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + iN^2 [|U|^2 U] \quad (3)$$

利用 SSFM, 得到四阶光孤子的脉冲形状演化与最终频谱, 如图 1 所示。自相位调制和群速度色散之间的相互作用导致了脉冲在时域和频域的变化, 时域中, 如图 1(a) 所示, 在 $z/L_D = 0.2$ 处具有典型的振荡结构。脉冲的中间部分变窄, 形成了典型的三峰结构。最终的频谱脉冲得到压缩, 并且产生了旁瓣结构, 如图 1(b) 所示。

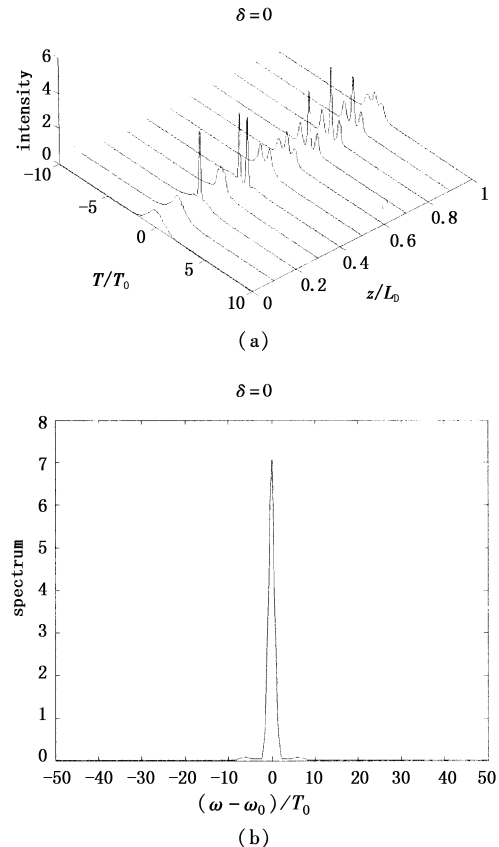


图 1 无高阶效应作用下四阶孤子传输情况及其终点处频谱

Fig. 1 fourth-order soliton transmission without the high-order effects effect, and the spectrum

3.1 三阶色散

为了突出三阶色散的影响, 设式(1)中 s 和 τ_R 均为 0。图 2 分别示出 $\delta = 0.1679$ 和 $\delta = 0.3358$ 时三阶色散效应下四阶孤子的传输情况以及传输终点处的信号频谱。主要特点是: 时域内, 初始孤子的脉宽一开始就很快地窄化, 并在两侧形成振荡结构。中间的主峰与两侧的振荡结构之间存在着相互排斥作用, 且随着传输距离而增加, 排斥作用主要体现在大孤峰和右小峰的延迟上, 左小峰反而比入射脉冲超前。不过, 左小峰很快又裂变成更小的孤峰群, 大孤峰却很稳定。另外, 还可看出随着归一化传输距离 z/L_D 的增大, 右小峰趋于消失, 左小峰却越加“明朗”起来。随着 δ 增大, 分布在中间大孤峰的能量部分转移到了左小峰中, 从而使左小峰分裂成更多的孤峰群。大孤峰及右小峰的时延量与传输距离和 δ 均成正比; 从最终的频谱看, 发生了明显的蓝移和微弱的红移, 导致频谱中心偏移, 偏移量与 δ 成反比, 且 δ 越大, 高频处能量分布越广泛。可见 δ 越大, 对形成超连续谱的平坦性越有利。但同时, 频谱的展宽程度和 δ 成反比, 限制产生超连续谱的频谱范围。

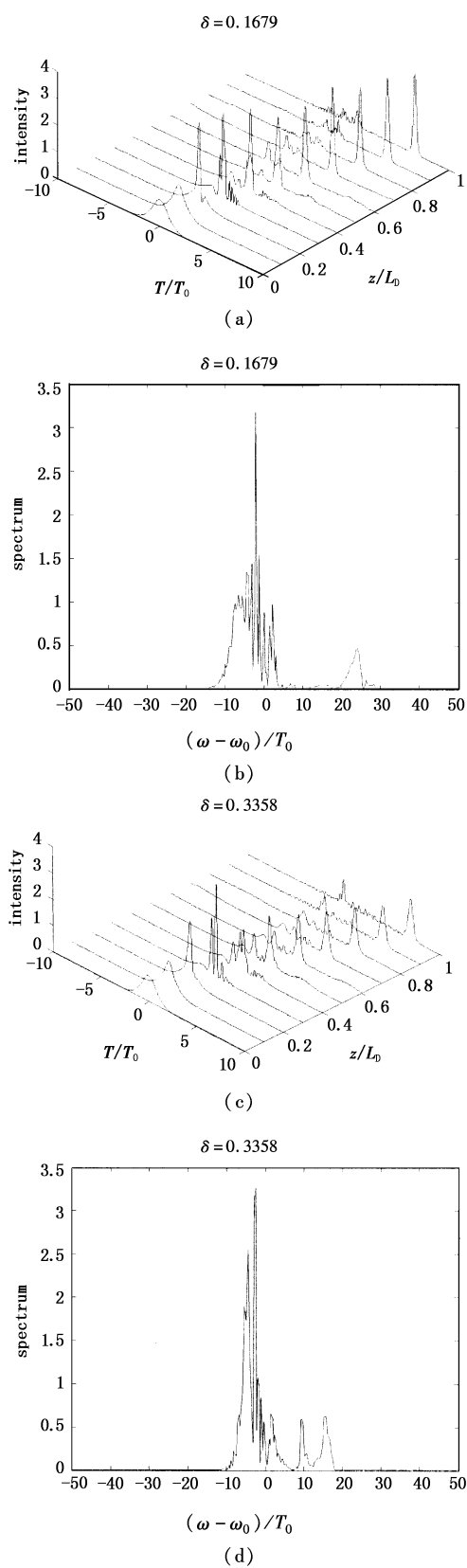


图2 三阶色散作用下四阶孤子传输情况及其终点处频谱

Fig.2 fourth-order soliton transmission including the effect of third-order dispersion, and the spectrum

3.2 自陡峭效应

设 δ 和 τ_R 为 0, 取 $s = 0.007, 0.014$, 得到图 3。

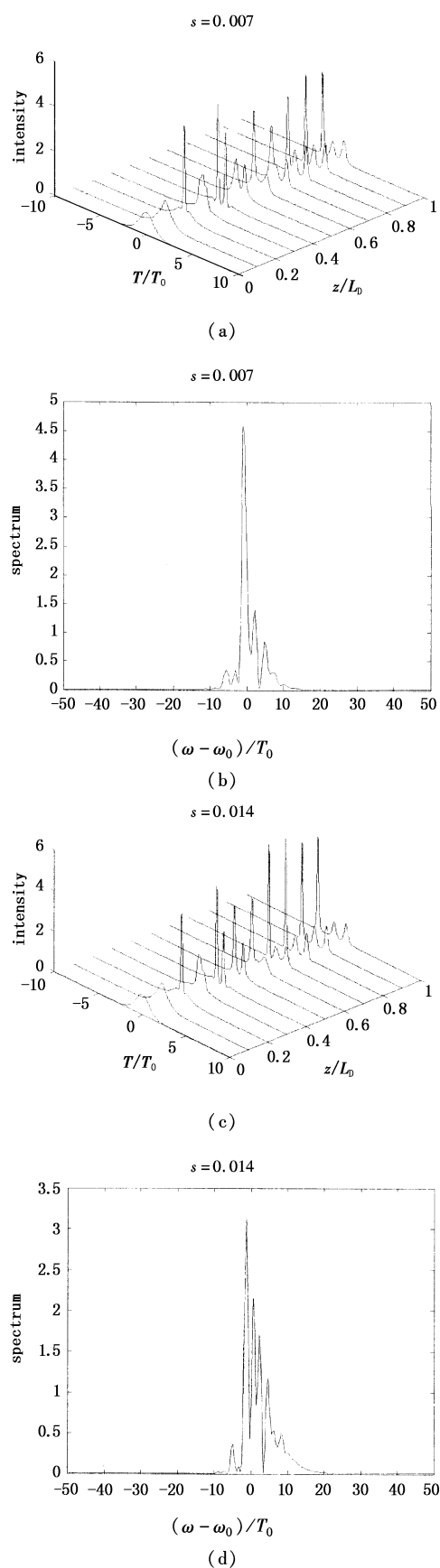


图3 自陡峭作用下四阶孤子传输情况及其终点处频谱

Fig.3 fourth-order soliton transmission including the effect of self-steepening, and the spectrum

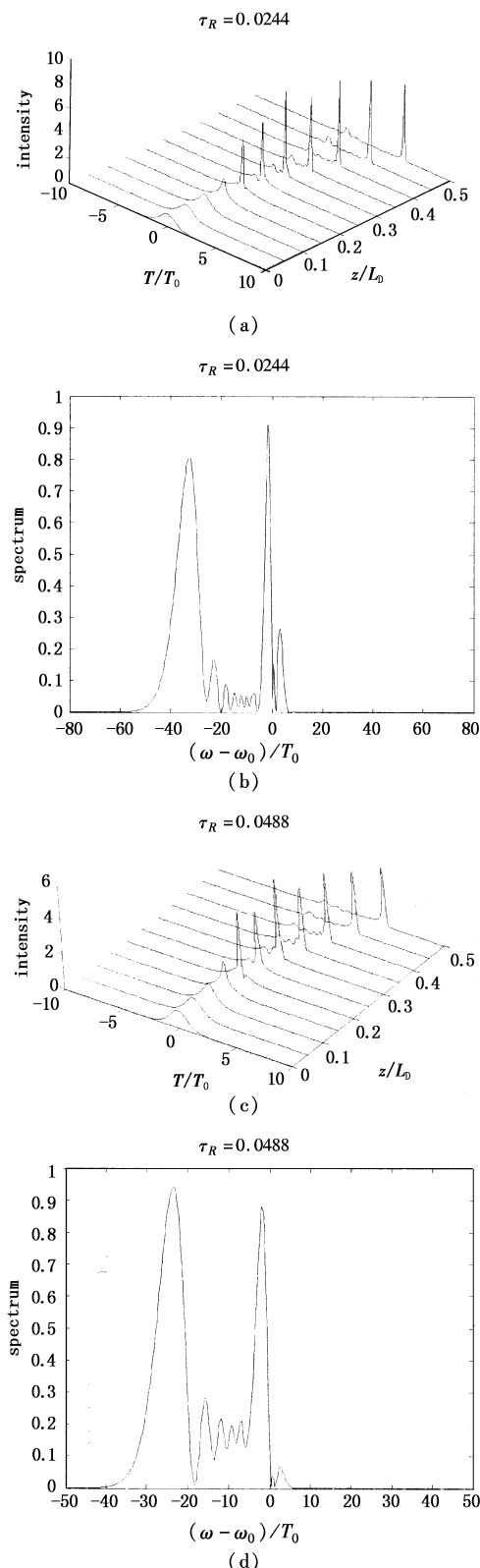


图4 孤子内拉曼散射作用下四阶孤子传输情况及其终点处频谱
Fig.4 fourth-order soliton transmission including the effect of intrapulse stimulated Raman scattering, and the spectrum

与图1比较得:在自陡峭效应的作用下,同样形成了类似的三峰结构,但是自陡峭效应使能量在三峰之间重新分布; s 较小时自陡峭效应并未使得频谱中心偏移,两侧均匀展宽,绝大部分能量分布在中心频

谱处。增大 s ,影响主要体现在蓝移部分。频谱高频带进一步发生分裂,并且频谱展宽范围也变大,从而使频谱中心发生偏移。

3.3 孤子内拉曼散射

将方程(1)中的 δ 和 s 设为0, τ_R 分别为0.0244和0.0488。孤子形状的演变分别如图4(a)、(c)所示。在归一化传输距离为0.3时,脉冲开始分裂,并分裂为两个部分。传输较快的是小的孤峰群结构,而且随着传输距离的增加,孤峰群还在不断的发生分裂,另一个较稳定的主峰发生了延迟,延迟量与传输距离成正比;由图4(b)和(d)可知:终点处频谱中心向低频方向发生较大的偏移,几乎整体都发生了红移,频谱得到展宽,且展宽程度与 τ_R 成反比。

4 结 语

本文从高阶非线性薛定谔方程出发,应用分布傅里叶方法数值模拟了高阶效应下四阶孤子脉冲在光子晶体光纤反常色散区的传输和演化,结果表明:①三阶色散导致光孤子三峰分裂,三峰之间存在着排斥作用,且随着传输距离而增加,三峰中处于中间的主峰较为稳定,并且占有大部分能量。频谱非对称展宽,蓝移多于红移,且展宽程度与 δ 成反比。②自陡峭效应对高阶孤子分裂的作用相对较弱。 s 较小时,频谱两侧得到均匀展宽,未使得频谱中心偏移。随着 s 增大,影响主要体现在蓝移部分,使得频谱高频带进一步分裂展宽。③孤子内拉曼散射使四阶孤子分裂为孤峰群和明显延迟的主峰两部分。随着传输距离的增加,主峰的延迟量也在增加,孤峰群还在不断的发生分裂。在频谱展宽方面,几乎只发生了红移,使得频谱中心有较大的偏移。偏移量与 τ_R 成反比。

参考文献:

- [1] Fedotov A B, Zheltikov A M, Tarasevitch A P, et al. Enhanced spectral broadening of short laser pulses in high-numerical-aperture holey fibers. [J]. Appl. Phys. B, 2001, 73: 181 - 184.
- [2] Nisoli M, Sansone G, Stagira S, et al. Ultra-broadband continuum generation by hollow-fiber cascading. [J]. Appl. Phys. B, 2002, 75: 601 - 604.
- [3] 李曙光, 冀玉领, 周桂耀, 等. 多孔微结构光纤中飞秒激光脉冲超连续谱的产生 [J]. 物理学报, 2004, 53 (2): 478 - 483.
- [4] Husakou A V, Herrmann J. Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers. [J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87 (20): 203901 - 1 - 4.
- [5] Herrmann J, Griebner U, Zhavoronkov N, et al. Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers. [J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 88 (17): 173901 - 1 - 4.
- [6] 张兴坊, 郑义, 李爱萍. 初始啁啾对光子晶体光纤中的飞秒脉冲压缩的影响 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (1): 56 - 58.