

文章编号: 1001-3806(2010)01-0120-04

双零色散点光子晶体光纤中红移辐射的产生

成纯富^{1,2}, 王又青^{1*}, 别业广²

(1. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 湖北工业大学 理学院, 武汉 430068)

摘要: 为了研究双零色散点光子晶体光纤反常色散区中红移辐射的产生, 采用分步傅里叶方法数值模拟了飞秒脉冲在双零色散点光子晶体光纤反常色散区中的非线性传输和红移辐射的产生。分析了抽运脉冲的脉宽、抽运波长、入射峰值功率对红移辐射的影响。结果表明, 当超短脉冲靠近第2个零色散点的反常色散区进行抽运时, 喇曼孤子受高阶色散效应的影响产生了红移辐射现象; 当增大抽运激光的入射峰值功率或增大脉宽时, 红移辐射均增强, 而且发生了明显的分裂现象, 其起因可归结于喇曼孤子和红移辐射之间的交叉相位调制; 此外, 3阶色散效应对红移辐射也有重要的影响, 当增大3阶色散系数时, 红移辐射可得到进一步加强。

关键词: 光纤光学; 光子晶体光纤; 孤子自频移; 红移辐射

中图分类号: O437 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.034

Red-shifted radiation generated in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths

CHENG Chun-fu^{1,2}, WANG You-qing¹, BIE Ye-guang²

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to study the red-shifted radiation generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths in the anomalous dispersion region, the nonlinear propagation and red-shifted radiation generation of a femtosecond laser pulse in a photonic crystal fiber were simulated with the split-step Fourier algorithm. The effect of pulse width, center wavelength and input peak power of the pump pulse on the red-shifted radiation was analyzed. It is found the phenomenon of red-shifted radiation of Raman soliton caused by higher-order dispersion occurs when the pump wavelength is located in the anomalous dispersion region nearby the second zero dispersion wavelength. The intensity of red-shifted radiation components can be enhanced with the input peak power or pulse width increased. In addition, the three-order dispersion effect also has an important effect on the red-shifted radiation. The intensity of red-shifted radiation components can be further enhanced by increasing the three-order dispersion coefficient.

Key words: fiber optics; photonic crystal fibers; soliton self-frequency shift; red-shifted radiation

引言

光子晶体光纤(photonics crystal fiber, PCF)又称微结构光纤或多孔光纤^[1]。与普通光纤不同, 光子晶体光纤是由纤芯和含有微小周期性排列的空气孔的包层构成。光子晶体光纤中的这种微结构使得PCF与常规光纤相比具有许多奇异的特性。这些特性主要包括无休止的单模特性^[2], 不同寻常的色散特性(如零色散波长可移到短波长^[3], 可有两个零色散点波长^[4]及具有超平坦色散特性等^[5-10])和增强的非线性特

性^[11]。基于此, 光子晶体光纤极有可能成为比传统光纤更优异的新一代传输光纤。因此, 激光脉冲特别是超短激光脉冲在光子晶体光纤中的传输及其相互作用的研究, 已成为当前国际上的前沿热点研究领域。其中, 对于超短脉冲在单零色散点光子晶体光纤中的非线性传输及其相互作用, 目前已有大量的研究^[12-21]。但对其在双零色散点光子晶体光纤的传输特性, 研究得还较少。2003年, SKRYABIN等人研究了超短脉冲在双零色散点光子晶体光纤中的非线性传输^[22], 并首次观察到了因喇曼孤子产生红移辐射而出现的孤子自频移的消失现象。2004年, HILLIGSØE等人研究了双零色散点光子晶体光纤中的超连续谱现象^[23]。同年, GENTY等人研究了双零色散点光子晶体光纤中的蓝移辐射现象^[24], 在增大抽运光的峰值功率时, 也观察到了

作者简介: 成纯富(1976-), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤及其应用的研究。

* 通讯联系人。E-mail: YQWang13@163.com

收稿日期: 2008-10-13; 收到修改稿日期: 2008-12-11

红移辐射现象,但对红移辐射现象没有进行深入系统的研究。为此,作者模拟了超短光脉冲在双零色散点光子晶体光纤反常色散区中的非线性传输和红移辐射的产生。计算和分析了抽运脉冲的脉宽、中心波长、入射峰值功率对红移辐射的影响,并探讨其产生机制。

1 数值模型

为研究超短光脉冲在双零色散点光子晶体光纤中的非线性传输和红移辐射的产生,作者采用分步傅里叶方法数值求解了1维的非线性薛定谔方程^[25]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \sum_{m \geq 2} \frac{i^{m+1} \beta_m}{m!} \frac{\partial^m A}{\partial \tau^m} - \frac{\alpha}{2} A + i\gamma \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \times [A(z, \tau) \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau' R(\tau - \tau') |A(z, \tau')|^2] \quad (1)$$

式中, A 为脉冲包络振幅, z 为沿光纤方向的传输距离, β_m 为模传输常数 β 沿抽运光脉冲的中心频率 ω_0 处进行泰勒级数展开的 m 阶色散系数, $\tau = t - z/v_g$ 是以群速度为参考系的时间参量, α 为光纤传输损耗, $\gamma = n_2 \omega_0 / (c A_{\text{eff}})$ 为非线性系数, n_2 为光纤的非线性折射率, c 为光速, A_{eff} 为光纤有效模面积, 对于光纤, $n_2 \approx 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, 响应函数 $R(t) = (1 - f_R) \delta(t) + f_R h_R(t)$, f_R 表示延时喇曼响应对非线性极化的贡献, 其值约为 0.18, h_R 为喇曼响应函数, 其表达式为^[25]:

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

式中, 参量 τ_1 和 τ_2 是两个可调节的参量, 通常使用的数值分别是 12.2 fs 和 32 fs^[25]。

非线性薛定谔方程包含了色散效应、损耗、自相位调制、交叉相位调制、自变陡、受激喇曼散射效应等。

作者模拟了超短光脉冲在芯径为 1.67 μm 的双零色散点光子晶体光纤反常色散区中的传输情况, 其色散曲线如参考文献[24]中的图1所示, 由色散曲线可知, 光纤有两个零色散点, 一个位于 700 nm 处, 该处的色散斜率为正, 另一个位于 1400 nm 处, 该处的色散斜率为负, 两零色散点之间的区域为反常色散区。入射脉冲采用高斯型脉冲 $A(z=0, \tau) = \sqrt{P_0} \exp(-\frac{\tau^2}{2\tau_p^2})$,

式中, $P_0 = A_0^2$ 为入射脉冲的峰值功率, τ_p 为脉冲半峰全宽(在光强度峰值的 1/e 处), 对于高斯脉冲, 它与脉冲半峰全宽 T_{FWHM} 的关系为: $\tau_p = T_{\text{FWHM}} / 1.665$ 。其它参数取值如下: $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, 空气填充百分比为 63%, 有效纤芯面积 $A_{\text{eff}} = \pi r^2 = 2.19 \mu\text{m}^2$, 其中, r 为纤芯的半径。在波长 1030 nm 处, 非线性系数

$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = 0.083 (\text{W} \cdot \text{m})^{-1}$ 。由于色散效应较强,

在这里色散系数考虑到 12 阶, $\beta_2 = -5.2588 \times 10^{-5} \text{ fs}^2/\text{nm}$, $\beta_3 = 7.44631 \times 10^{-5} \text{ fs}^3/\text{nm}$, $\beta_4 = 1.2353 \times 10^{-4} \text{ fs}^4/\text{nm}$, $\beta_5 = 1.3361 \times 10^{-3} \text{ fs}^5/\text{nm}$, $\beta_6 = 8.6962 \times 10^{-3} \text{ fs}^6/\text{nm}$, $\beta_7 = -8.0923 \times 10^{-2} \text{ fs}^7/\text{nm}$, $\beta_8 = 7.1537 \times 10^{-1} \text{ fs}^8/\text{nm}$, $\beta_9 = -2.4341 \text{ fs}^9/\text{nm}$, $\beta_{10} = -68.902 \text{ fs}^{10}/\text{nm}$, $\beta_{11} = 1.3193 \times 10^3 \text{ fs}^{11}/\text{nm}$, $\beta_{12} = -1.6857 \times 10^4 \text{ fs}^{12}/\text{nm}$ 。由于所用光纤的长度较短, 所以忽略了光纤的损耗。在实际计算中, 不但将色散系数考虑到了 12 阶, 而且对脉冲的抽样取点选取为 2^{13} (即 $d\tau = 2.44 \text{ fs}$, $dz = 10 \mu\text{m}$), 在奔 IV(CPU 为 2.80GHz)PC 机上即可获得可靠的模拟结果。

2 计算结果与分析

首先模拟了初始脉宽为 200 fs ($T_{\text{FWHM}} = 200 \text{ fs}$)、中心波长为 1030 nm(位于反常色散区即 $\beta_2 < 0$)的光脉冲在双零色散点光子晶体光纤中的传输情况。由图 1

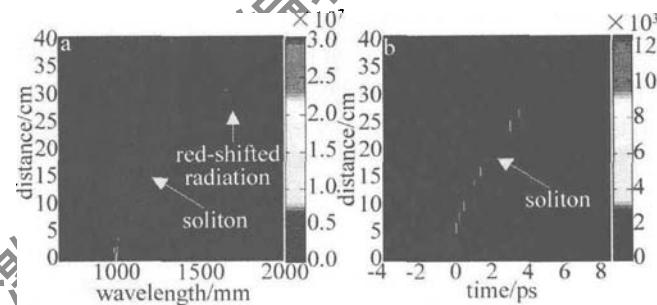


Fig. 1 Evolution of a femtosecond pulse along the propagation distance, pump wavelength $\lambda_p = 1030 \text{ nm}$, input peak power $P_0 = 2 \text{ kW}$
a—spectrum b—temporal intensity

可以看出, 在功率较低(2 kW)、传输距离较短时, 光脉冲由于受色散和非线性效应的影响逐渐被压缩, 随后, 产生了明显的分裂现象, 并形成了多个喇曼孤子。随着传输距离的增加, 喇曼孤子受受激喇曼散射效应的影响逐渐红移。当频移最大的喇曼孤子(如图 1 的箭头所示)靠近光纤的第 2 个零色散点波长时, 喇曼孤子受高阶色散效应的影响产生了红移辐射(如图 1 的箭头所示), 由于红移辐射较弱, 特将其提取出来, 见图 2), 且红移辐射位于长波长的正常色散区, 随后喇曼

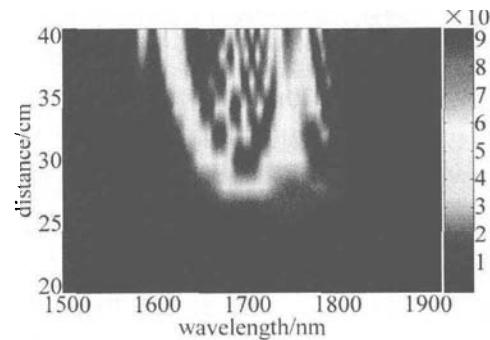


Fig. 2 Evolution of the red-shifted radiation along the propagation distance, pump wavelength $\lambda_p = 1030 \text{ nm}$, input peak power $P_0 = 2 \text{ kW}$

孤子不再继续红移(见图1a),而保持稳态向前传输,这与SKRYABIN等人观察到的实验结果符合得很好^[22],其起因主要是由于PCF具有不同寻常的色散特性所造成的。由参考文献[24]图1中的色散曲线可知,在第2个零色散点附近的色散曲线的斜率为负,正是这种负的色散斜率造成了喇曼孤子的红移辐射。由动量守恒可知,喇曼孤子的这种红移辐射必定反过来对喇曼孤子产生影响,使得喇曼孤子产生蓝移,但与此同时,喇曼孤子受激喇曼散射效应的影响要产生红移。所以当这两种作用达到平衡时,喇曼孤子将不再继续红移(见图1a),而保持稳态向前传输。上述现象在传统光纤中是无法观察到的,因为传统光纤中的色散曲线的斜率通常为正,喇曼孤子受色散效应的影响通常只产生蓝移辐射现象^[25-27]。随着传输距离的进一步增加,喇曼孤子和红移辐射之间的交叉相位调制使得红移辐射谱产生了分裂现象,而且新分裂出的红移辐射成分产生了轻微的蓝移(见图2)。

图3中给出了在其它条件一定的情况下(光纤长度为28cm,抽运脉冲的脉宽为200fs、中心波长为1030nm),抽运脉冲入射峰值功率对红移辐射的影响。

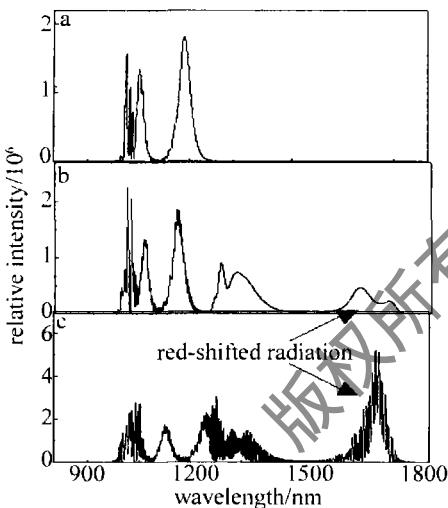


Fig. 3 Effect of the input peak power on the red-shifted radiation
a— $P_0 = 1\text{ kW}$ b— $P_0 = 2\text{ kW}$ c— $P_0 = 4\text{ kW}$

由图3可以看出,当抽运脉冲的入射峰值功率增大时,红移辐射越来越强,而且出现了明显的光谱分裂现象。当只改变抽运脉冲的脉宽时(光纤长度为28cm,抽运脉冲的中心波长为1030nm、入射峰值功率为2kW),由图4可以看出,当脉宽增大时,红移辐射也越来越强。当只改变抽运波长时,抽运波长越靠近第2个零色散点,红移辐射也越来越强,且其频域和时域的演变变得更为复杂。图5为抽运波长为1400nm(位于第2个零色散点,峰值功率为2kW,脉宽为200fs)的光脉冲在双零色散点光子晶体光纤中的传输情况。由图5可以看出来,光谱分裂成两部分,长波长的那部分在正常色

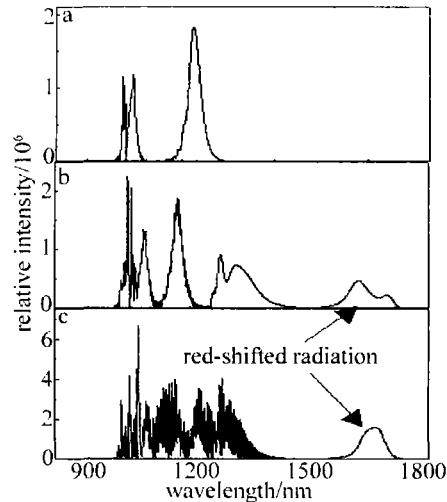


Fig. 4 Effect of the pump pulselength on the red-shifted radiation
a—100fs b—200fs c—500fs

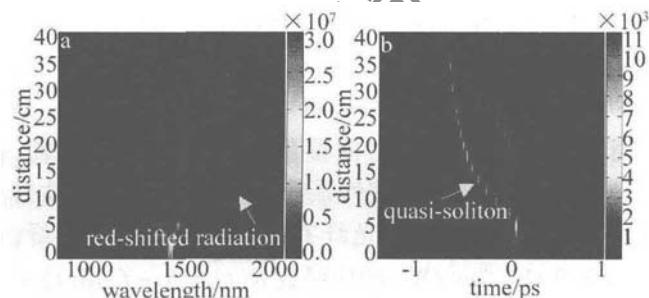


Fig. 5 Evolution of a femtosecond pulse along the propagation distance, pump wavelength $\lambda_p = 1400\text{ nm}$, input peak power $P_0 = 2\text{ kW}$
a—spectrum b—temporal intensity

散区传输,短波长那部分在反常色散区传输。随着传输距离的增加,在反常色散区,逐渐出现了准孤子脉冲(如图5的箭头所示)。由于强烈的色散效应,准孤子脉冲也产生了红移辐射现象(如图5的箭头所示,由于红移辐射较弱,特将其提取出来,见图6)。这种红

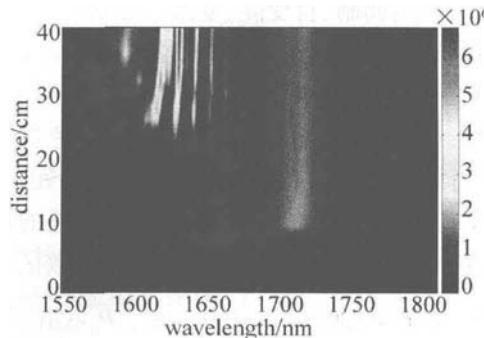


Fig. 6 Evolution of the red-shifted radiation along the propagation distance, pump wavelength $\lambda_p = 1400\text{ nm}$, input peak power $P_0 = 2\text{ kW}$

移辐射反过来对准孤子产生影响,使其产生蓝移,随着传输距离的进一步增加,受激喇曼散射效应的影响逐渐增强,使得准孤子产生红移,所以,当这两种作用达到平衡时,准孤子的蓝移逐渐饱和(见图5)。随着传输距离的进一步增加,喇曼孤子和红移辐射之间的交叉相位调制使得红移辐射谱产生了明显的分裂现象。此外,3阶色散效应对红移辐射也具有重要影响。当增

大3阶色散系数时,也即增大第2个零色散点处的色散斜率时,红移辐射可得到进一步加强。因此,通过适当地改变包层中空气孔的构造和尺寸使得PCF中产生较大的负色散,将可使红移辐射得到进一步加强。

3 结 论

采用分步傅里叶方法数值求解了1维的非线性薛定谔方程,模拟了超短光脉冲在双零色散点光子晶体光纤反常色散区中的非线性传输和红移辐射的产生。计算和分析了抽运激光参量对红移辐射的影响。研究发现,当抽运激光靠近第2个零色散点的反常色散区进行抽运时,双零色散点光子晶体光纤中产生了红移辐射现象。研究表明,其产生机制主要是喇曼孤子受高阶色散效应(特别是3阶色散效应)的影响所造成的。当增大抽运激光的入射峰值功率或增大脉宽时,红移辐射均有所增强,而且发生了明显的分裂现象,其起因可归结于喇曼孤子和红移辐射之间的交叉相位调制。此外,3阶色散效应对红移辐射也具有重要影响。当增大3阶色散系数时,也即增大第2个零色散点处的色散斜率时,红移辐射可得到进一步加强。因此,在适当的激光条件下,可以通过适当地改变包层中空气孔的构造和尺寸使得PCF中产生较大的负色散,将可使红移辐射得到进一步加强。

参 考 文 献

- [1] RUSSELL P St J. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, 299 (5605):358-362.
- [2] BIRKS T A, KNIGHT J C, RUSSELL P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 1997, 22 (13), 961-963.
- [3] RANKA J K, WINDELER R S, STENTZ A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800nm [J]. *Opt Lett*, 2000, 25 (1), 25-27.
- [4] ANDERSEN T V, HILLIGSØE K M, NIELSEN C K, et al. Continuous-wave wavelength conversion in a photonic crystal fiber with two zero-dispersion wavelengths [J]. *Optics Express*, 2004, 12 (17): 4113-4122.
- [5] FERRANDO A, SILVESTRE E, MIRET J J, et al. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Opt Lett*, 2000, 25 (11):790-792.
- [6] REEVES W H, KNIGHT J C, RUSSELL P St J, et al. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2002, 10 (14):609-613.
- [7] FERRANDO A, SILVESTRE E, ANDRE P, et al. Designing the properties of dispersion flattened photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2001, 9 (13), 687-697.
- [8] WANG J Y, GAO M Y, JIANG C, et al. Design and parametric amplification analysis of dispersion-flat photonic crystal fibers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3 (7):380-382.
- [9] GUO L X, WU Y R, XUE W R, et al. Dispersion properties of photonic crystal fiber with composite hexagonal air hole lattice [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27 (5): 935-939 (in Chinese).
- [10] SUN T L, LI Q H, LIU J H, et al. Study on photonic crystal fibers with high nonlinearity and flattened dispersion [J]. *Laser Technology*, 2008, 32 (3): 330-333 (in Chinese).
- [11] BRODERICK N G R, MONRO T M, BENNET P J, et al. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities [J]. *Opt Lett*, 1999, 24 (20): 1395-1397.
- [12] HUSAKOU A V, HERRMANN J. Supercontinuum generation of high-order solitons by fission in photonic crystal fibers [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 87 (20): 03901/1-203901/4.
- [13] WASHBURN B R, RALPH S E, WINDELER R S. Ultrashort pulse propagation in air-silica microstructure fiber [J]. *Optics Express*, 2002, 10 (13): 575-580.
- [14] GENTY G, LEHTONEN M, LUDVIGSEN H. Spectral broadening of femtosecond pulses into continuum radiation in microstructured fibers [J]. *Optics Express*, 2002, 10 (20): 1083-1098.
- [15] GAETA A L. Nonlinear propagation and continuum generation in microstructured optical fibers [J]. *Opt Lett*, 2002, 27 (11), 924-926.
- [16] CRISTIANI I, TEDIOSI R, TARTARA L, et al. Dispersive wave generation by solitons in microstructured optical fibers [J]. *Optics Express*, 2003, 12 (1): 124-135.
- [17] SUN X W, WANG Q Y, HU M L, et al. numerical analysis of nonlinear propagation in photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32 (11): 1478-1484 (in Chinese).
- [18] TAN X L, CRNG Y F, WANG P, et al. Propagation properties of the octagonal photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35 (5): 729-733 (in Chinese).
- [19] LIU B W, HU M L, SONG Y J, et al. 39 fs, 16W all photonic crystal fiber laser system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35 (6): 811-814 (in Chinese).
- [20] WANG R X, DOU Ch Sh, YUE X Ch. Numerical study on a femtosecond laser pulse in a photonic crystal fiber [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (5): 555-557 (in Chinese).
- [21] ZHANG X F, ZHENG Y, LI A P, et al. Effect of picosecond pulse compression in photonic crystal fibers [J]. *Laser Technology*, 2007, 31 (3): 268-270 (in Chinese).
- [22] SKRYABIN D V, LUAN F, KNIGHT J C, et al. Soliton self-frequency shift cancellation in photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, 301 (5640): 1705-1708.
- [23] HILLIGSØE K M, ANDERSEN T V, KEIDING S, et al. Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths [J]. *Optics Express*, 2004, 12 (6): 1045-1054.
- [24] GENTY G, LEHTONEN M, LUDVIGSEN H. Effect of cross-phase modulation on supercontinuum generated in microstructured fibers with sub-30fs pulses [J]. *Optics Express*, 2004, 12 (19): 4614-4624.
- [25] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. 3rd ed. New York: Academic Press, 2001:34-35.
- [26] AKHMEDIEV N, KARLSSON M. Cherenkov radiation emitted by solitons in optical fibers [J]. *Phys Rev*, 1995, A51 (3): 2602-2607.
- [27] WAI P K A, CHEN H H, LEE Y C. Radiations by “solitons” at the zero group dispersion wavelength of single-mode optical fibers [J]. *Phys Rev*, 1990, A41 (1): 426-439.