

# 全正色散光子晶体光纤中超连续谱的产生及其相干性研究

李 荧 侯 静\* 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 从实验和数值仿真两方面研究了不同宽度的脉冲抽运情况下,全正色散光子晶体光纤中超连续谱(SC)产生的物理机制,并比较超连续谱的相干性。当抽运源为高功率短脉冲时,光谱展宽的主要非线性效应为自相位调制,因此,数值仿真得到的超连续谱相对于抽运波长呈对称展宽的趋势,超连续谱相干性较好。当抽运源为 600 ps 的长脉冲时,产生超连续谱的主要非线性效应是受激拉曼散射,因此,超连续谱相对于抽运波长向长波方向展宽。

**关键词** 光纤光学;全正色散光子晶体光纤;超连续谱;脉冲抽运;相干性

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.s105009

## Research on Generation and Coherence of Supercontinuum in All-Normal Dispersion Photonic Crystal Fiber

Li Ying Hou Jing Jiang Zongfu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Generation and coherence of the supercontinuum (SC) in all-normal dispersion photonic crystal fiber are numerically and experimentally investigated. Different pumping pulses are used in the investigation. In the case of high power short pulse, self-phase modulation plays a crucial role in the SC generation. Spectra are symmetrically spreading at both sides of the pump wavelength, and the SC is highly coherent. When the width of the pump pulse is as large as 600 ps, stimulated Raman scattering is the main nonlinear effect, so supercontinuum is transferred towards the longer wavelengths with respect to pumping wavelength.

**Key words** fiber optics; all-normal dispersion photonic crystal fiber; supercontinuum; pulse pumping; coherence

**OCIS codes** 190.4370; 190.5650; 060.2310

## 1 引 言

超连续谱(SC)以其超宽光谱的优势在诸多领域已经得到广泛的应用,如频谱分析,相干测量,光传感,生物医学成像等<sup>[1-2]</sup>。光子晶体光纤(PCF)

的色散及非线性可控的特性使其成为产生超连续谱的理想介质。为了在 PCF 中产生宽谱的 SC,人们通常利用高功率的短脉冲(如飞秒量级)作抽运源,在 PCF 的反常色散区并靠近零色散点进行抽

收稿日期: 2013-07-17; 收到修改稿日期: 2013-10-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235008)

作者简介: 李 荧(1986—),女,博士研究生,主要从事光纤激光与光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: li\_ying\_zzz@hotmail.com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术、光束控制、气动光学等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu7@163.com

\* 通信联系人。E-mail: houjing25@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

运<sup>[3-4]</sup>。在这种情况下,孤子的产生及分裂是产生宽谱 SC 的一个主要的因素。入射脉冲分裂的同时会放大噪声,得到的 SC 相干性较差,表现为各频域的振幅抖动和时间上的不一致。而随着 SC 在频率测量、光学相干断层成像等方面的应用,SC 的稳定性及相干性显得越来越重要<sup>[5]</sup>,因此,高相干性的 SC 的产生成为 SC 研究领域的热点之一。将抽运光源更换为长脉冲或者连续光进行抽运时<sup>[6]</sup>,光谱展宽初期,调制的不稳定性非常容易被激发,非线性效应会放大抽运源中的基底噪声,也不利于产生高相干度的 SC<sup>[7]</sup>。后来,研究人员就将注意力转移到了非线性光纤上,通过合理设计高非线性的结构光纤来产生高相干度 SC。先后设计出了色散递减光纤、两个零色散点非常靠近的双零色散点光纤、全正色散光子晶体光纤(ANDi PCF)<sup>[2]</sup>。ANDi PCF 的色散值在整个波段都小于零,因此所有波长都位于此光纤的正常色散区。近来,对 SC 在此种光纤中的产生研究较多<sup>[8]</sup>,但抽运条件对光纤中产生的 SC 相干特性的影响还没有比较详细的分析。本文从 ANDi PCF 中 SC 的产生出发,从实验和理论上研究了抽运脉冲的宽度对 SC 的相干性的影响。

## 2 实验装置及光纤特性

光子晶体光纤的纤芯直径为 2.3 μm,孔间距  $\Lambda=1.44 \mu\text{m}$ ,占空比  $d/\Lambda=0.39$ 。光纤截面的电子显微镜(SEM)图如图 1(a)所示。利用文献[9]中的经验公式法理论计算得到的光子晶体光纤色散曲线如图 1(b)所示,色散最大值位于 1 μm 处,最大色散值为 -14 ps/(nm·km)。实验中抽运激光器为 Teem Phononics 公司的 Nd:YAG 调 Q 微晶片激光

器,该激光器工作波长为 1064 nm,脉冲半峰全宽为 600 ps,重复频率为 7.2 kHz 时的峰值功率为 15 kW,激光器空间输出平均功率约为 65 mW。利用空间耦合系统将光源输出的激光耦合到光子晶体光纤中。由于 PCF 的纤芯较小,耦合进 PCF 的功率小于 10 mW。

## 3 数值仿真及实验结果分析

正如文献[10-12]中所述,ANDi PCF 中产生的 SC 具有高相干性的特点。这里,同样在数值仿真中得到类似的结果。仿真 ANDi PCF 中产生 SC 时,用到了自适应分步傅里叶法来求解延时系中的广义非线性薛定谔方程<sup>[13]</sup>:

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

式中  $\alpha$  是吸收系数,由于光纤长度只有 10 m,所以在计算中损耗项可以忽略不计; $\beta_k$  是各阶色散系数,为了精确计算,取到六阶色散;非线性系数  $\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{\text{eff}}}$ ,  $n_2$  是非线性折射率系数,对于 SiO<sub>2</sub> 材料  $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $\lambda_0$  是抽运波长,  $A_{\text{eff}}$  是光纤的有效模面积;响应函数  $R(T) = (1 - f_R)\delta(T) + f_R h_R(T)$ ,  $f_R$  是延时拉曼响应对非线性极化的贡献,而拉曼响应函数  $h_R(T)$  可以近似地表达为  $h_R(T) = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{\tau_1 \tau_2} \exp(-T/\tau_2) \sin(T/\tau_1)$ , 对于 SiO<sub>2</sub> 材料,  $\tau_1 = 12.2 \text{ fs}$ ,  $\tau_2 = 32 \text{ fs}$ 。傅里叶变换的采样点数为  $N = 2^{16}$ , 时间步长  $dt = 1.5 \text{ fs}$ 。

这里将入射脉冲设为半峰全宽 150 fs,峰值功率 120 kW 的无啁啾高斯脉冲。当光纤长度为 50 cm 时,产生的 SC 如图 2(a)所示。图中用线性坐标和对数坐标两种方式给出光谱的相对强度,可以看出,在此种抽运情况下产生的光谱非常平坦,而且整个光谱相对于抽运波长(1064 nm)对称展开。这是因为抽运波长 1064 nm 处于正常色散区,占主导地位的非线性效应为自相位调制,使其光谱的展宽在长波方向和短波方向都比较均衡。同时相干性在整个 SC 光谱范围都比较好[如图 2(a)所示]。在光纤长度为 50 cm 时脉冲在时域上都还没有出现分裂的迹象[如图 2(b)所示]。这种 SC 在频谱测量等方面的应用具有显著优势。

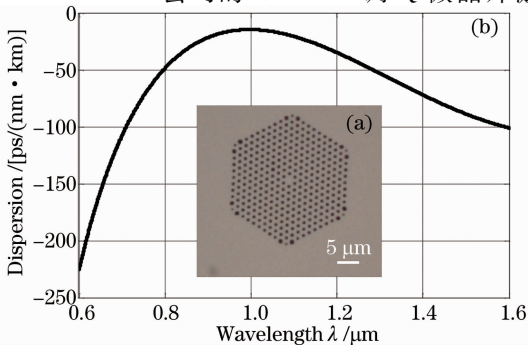


图 1 (a) 光纤截面的电子显微镜图和 (b) 光纤的色散曲线

Fig. 1 (a) Scanning electron microscope picture of the respective fiber cross section and (b) calculated dispersion of the fiber

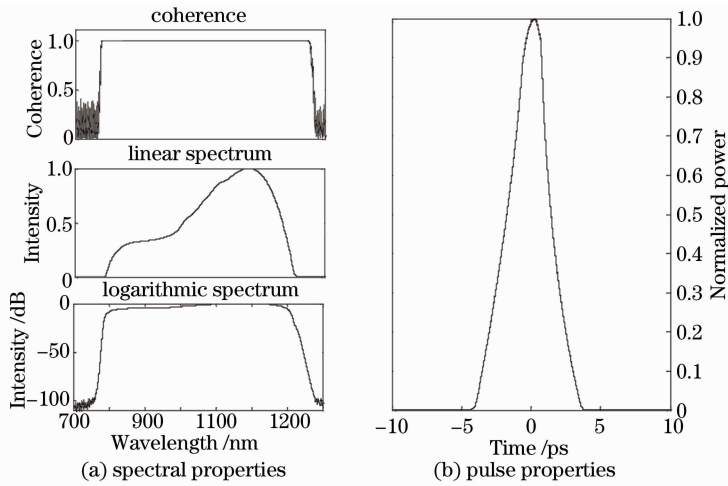


图 2 (a) 光纤长度为 50 cm 时数值仿真得到的光谱和相干性；(b) 相应的时域波形

Fig. 2 (a) Simulated spectra and coherence at the fiber length of 50 cm; (b) corresponding pulse profile in time domain

接下来研究当抽运脉冲较宽,产生 SC 的非线性效应种类不同时 SC 的特性。图 3(a)给出了当抽运脉冲宽度为 600 ps,光纤长度为 10 m 时,光谱展宽随抽运功率的变化。可以看出,受激拉曼散射是促使光谱展宽的主要因素。同时,图 3(b)还从数值仿真上给出了脉冲随光纤长度的演化。实验中用到的抽运脉冲宽度为 600 ps,如果设仿真的最小波长为 400 nm,那么时域步长应小于 1.0 fs,采样点数至少为  $2^{22}$ 。直接用于仿真会对计算电脑的性能要求很高,目前还没有合适的条件。为了解决此问题,一些学者提出采用合适脉宽的脉冲去近似极宽的长脉冲。例如 2006 年 Rääkkönen 等<sup>[14]</sup>采用脉宽为 125 ps 的高斯脉冲去近似实验中的 3 nm 脉冲,模拟

结果与实验观察吻合非常好。文献[13]中用半峰全宽为 30 ps 的脉冲来近似模拟 600 ps 脉冲在光纤中的传输,仿真结果与文献[15]中的实验结果吻合较好,验证了 30 ps 脉冲模拟 600 ps 脉冲的可靠性。由此,借鉴此方法,采用 30 ps 的脉冲进行仿真。峰值功率为 1400 W,对应平均功率约为 6 mW。仿真中光谱的展宽趋势与实验中一致,级联受激拉曼散射将光谱向长波方向展宽。光纤长度为 10 m 时的时域情况和相干性如图 4 所示。脉冲已经从一个单独的脉冲分裂为多个短脉冲,相干性也只在抽运波长附近很小的范围内较好。与短脉冲抽运情况下得到的 SC 特性比较发现,长脉冲抽运情况下得到的 SC 相干性较差,不适合用于频谱测量。

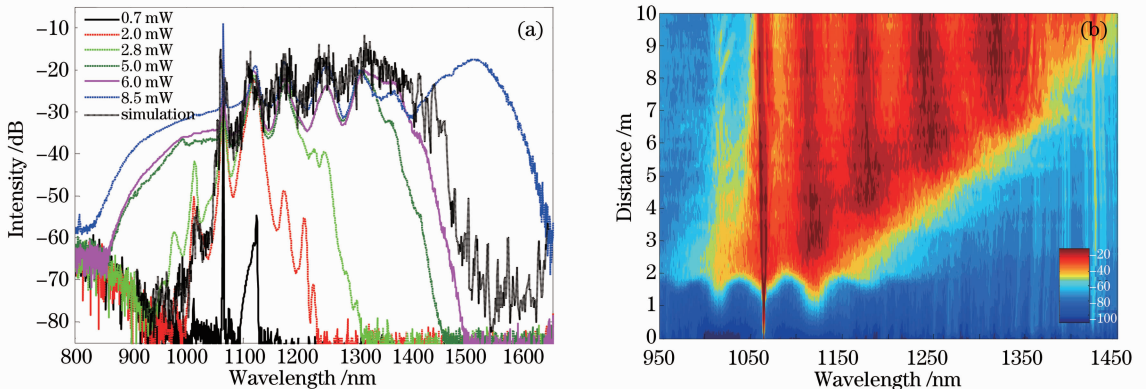


图 3 (a) 黑色虚线表示仿真结果,其他曲线表示实验中

SC 展宽随抽运功率的变化;(b) 数值仿真抽运脉冲在 ANDi PCF 中的演化结果

Fig. 3 (a) Dashed black line shows the simulated result and other lines display the measured spectra at different power levels; (b) simulated results of the pumping pulse evolution in ANDi PCF

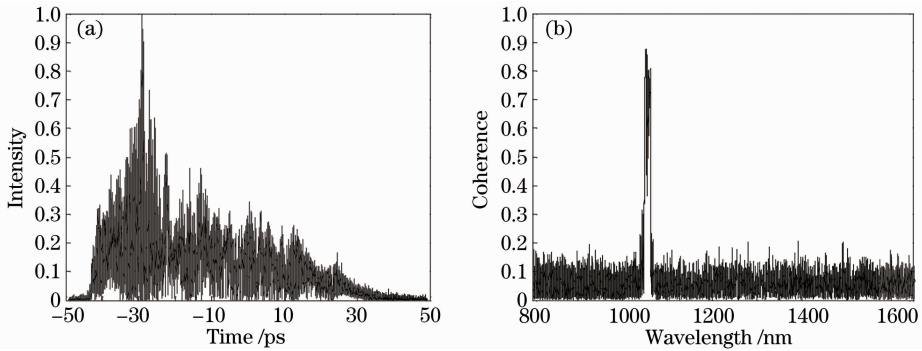


图 4 长脉冲抽运情况下 SC 的(a)时域情况和(b)相干度

Fig. 4 (a) Temporal result and (b) coherence of the SC pumped by long pulse

## 4 结 论

从实验和数值仿真两个方面研究了 ANDi PCF 中超连续谱的产生及其相干性。研究发现 ANDi PCF 中超连续谱的产生及其特性与抽运脉冲的宽度密切相关。这是因为在不同脉冲宽度抽运情况下, SC 产生的非线性效应的机制有所不同。当抽运源为高峰值功率短脉冲时, 自相位调制占主导地位, 光谱相对于抽运波长向长、短波方向对称展宽, 超连续谱相干性较好。当抽运源为长脉冲时, 受激拉曼散射占主导地位, 光谱向长波方向展宽, 实验中光谱展宽趋势与数值仿真中的情况吻合较好, 也从理论上证明了此情况下得到的超连续谱相干性较差。

## 参 考 文 献

- 1 Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Rev Mod Phys*, 2006, 78(4): 1135–1184.
- 2 Heidt A M, Hartung A, Bosman G W, *et al.*. Coherent octave spanning near-infrared and visible supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(4): 3775–3787.
- 3 Takashi Hori, Norihiko Nishizawa, Goto T, *et al.*. Experimental and numerical analysis of widely broadened supercontinuum generation in highly nonlinear dispersion-shifted fiber with a femtosecond pulse[J]. *J Opt Soc Am B*, 2004, 21(11): 1969–1980.
- 4 Hermam J, Griebner V, 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.
- 5 Povazay B, Bizheva K, Unterhuber A, *et al.*. Submicrometer axial resolution optical coherence tomography[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(20): 1800–1802.
- 6 Coen S, Chau A H L, Leonhardt R, *et al.*. Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-

- 7 Dudley J M, Coen S. Coherence properties of supercontinuum spectra generated in photonic crystal and tapered optical fibers [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(13): 1180–1182.
- 8 Tu Haohua, Lin Yuan, Lin Xiaomin, *et al.*. Nonlinear polarization dynamics in a weakly birefringent all-normal dispersion photonic crystal fiber: toward a practical coherent fiber supercontinuum laser[J]. *Opt Express*, 2012, 20(2): 1113–1128.
- 9 Saitoh K, Koshiba M. Empirical relations for simple design of photonic crystal fibers[J]. *Opt Express*, 2005, 13(1): 267–274.
- 10 Li Ying, Hou Jing, Wang Yanbin, *et al.*. Theoretical research on the generation of coherent supercontinuum[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(9): 094212.
- 李 荧, 侯 静, 王彦斌, 等. 高相干度超连续谱产生的理论研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(9): 094212.
- 11 Hartung A, Heidt A M, Bartelt H. Design of all-normal dispersion microstructured optical fibers for pulse-preserving supercontinuum generation[J]. *Opt Express*, 2011, 19(8): 7742–7749.
- 12 Hartung A, Heidt A M, Bartelt H. Pulse-preserving broadband visible supercontinuum generation in all-normal dispersion tapered suspended-core optical fibers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(13): 12275–12283.
- 13 Wang Yanbin, Xiong Chunle, Hou Jing, *et al.*. Modeling of four-wave mixing and supercontinuum with long pulses in photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(1): 014201.
- 王彦斌, 熊春乐, 侯 静, 等. 长脉冲抽运光子晶体光纤四波混频和超连续谱的理论研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(1): 014201.
- 14 Räikkönen E, Genty G, Kimmelma O, *et al.*. Supercontinuum generation by nanosecond dual-wavelength pumping in microstructured optical fibers[J]. *Opt Express*, 2006, 14(17): 7914–7923.
- 15 Wadsworth W J, Joly N, Knight J C, *et al.*. Supercontinuum and four-wave mixing with Q-switched pulses in endlessly single-mode[J]. *Opt Express*, 2004, 12(2): 299–309.

栏目编辑: 史 敏