

# 泵浦波长对光子晶体光纤产生超连续谱的影响\*

于永芹<sup>1,2</sup> 阮双琛<sup>2\*\*</sup> 曾剑春<sup>2</sup> 姚建铨<sup>1</sup>

(1 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2 深圳大学工程技术学院 深圳, 广东 518060)

**摘 要** 采用钛宝石光参量放大器作为泵浦源, 利用其输出波长可调谐性, 研究了不同泵浦波长对光子晶体光纤中产生超连续谱的影响, 结果表明光子晶体光纤中零色散点处的群时延和  $1.4 \mu\text{m}$  处的 OH 根离子的吸收对超连续谱的平坦度影响很大, 并且泵浦波长离光纤的零色散点越远, 产生的超连续谱平坦度越差, 甚至在可见光区产生的各个频率峰还只是分离的, 没有形成超连续谱. 当泵浦波长为  $1.2 \mu\text{m}$  时, 获得了带宽为  $300 \text{ nm} \sim 1350 \text{ nm}$  的超连续谱, 谱宽超过了两个倍频程.

**关键词** 光子晶体光纤; 光参量放大器; 超连续谱

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

光子晶体光纤 (Photonic crystal fiber, PCF), 也称微结构光纤 (Micro-structured fiber), 其概念最早是由 ST. J. Russell 等人于 1992 年提出的. 1996 年, 英国南安普敦大学科学家 Knight 等人利用光子晶体的原理, 研制成功了世界上第一根 PCF<sup>[1]</sup>. PCF 与传统光纤在结构上有着根本的区别, 它是在石英光纤中沿轴向均匀排列着波长量级的空气孔, 从光纤端面看, 存在一个周期性的二维结构, 如果其中一个孔遭到破坏, 则会出现缺陷, 光能够在该缺陷内传播<sup>[2]</sup>. 根据导光机制的不同, 光子晶体光纤可分为两类, 一是全内反射导光的 PCF, 其纤芯折射率比包层有效折射率高, 其导光机理和常规阶跃折射率光纤类似. 另一种是基于光子禁带导光的 PCF, 这一导光原理和常规光纤有本质的不同, 它允许光在折射率比包层低的纤芯 (如空气芯) 中传播<sup>[3]</sup>. PCF 的出现引起了各国研究机构的浓厚兴趣, 《Nature》和《Science》杂志也曾多次报道<sup>[3~5]</sup>. 光子晶体光纤独特的结构特性和波导特性为研制高非线性光纤器件提供了一种新的途径.

超连续光谱 (SC) 是指当一束强度极大的超短脉冲通过非线性材料后, 出射光谱中产生许多新的频率成分, 光谱宽度远远大于入射光脉冲的谱宽, 一般光谱展宽可达几十 nm 到几百 nm. 而利用 PCF 产生 SC 是一种新型的光源, 它具有高的输出功率、平坦的宽带光谱、高度的空间相干性 (聚焦) 等特性, 能大大提高信噪比、减小测量时间以及加宽光谱测量范围. 光纤 SC 光源的应用前景非常广阔<sup>[6~10]</sup>,

可应用在光纤衰减测量、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<sup>[2, 11~13]</sup>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, 近年来又开始研究用作 WDM 光源. 另外, 它还可以应用在波长转换、WDM 光网的全光再生、光纤的色散测量及光学采样等.

研究表明采用 PCF 使得产生 SC 所需要的光强度大大降低. 在标准光纤中, 产生超连续谱需要的光强度至少比 PCF 中需要的光强度高两个数量级, 因此采用较低能量的飞秒种子光脉冲即可产生宽带的超连续光谱. 到目前为止, 大部分超连续光谱是利用脉宽为 fs 量级的超短脉冲在熔石英 PCF 中得到的<sup>[4, 7~9, 14]</sup>, 光源可以为钛宝石飞秒激光器、Cr: LiSAF 飞秒激光器, 还有利用 ps 或者 ns 量级的脉冲在 PCF 中产生超连续光谱<sup>[15, 16]</sup>. 本文利用钛宝石激光器的光参量放大系统 (OPA) 作为泵浦源, 利用其输出波长的可调谐性研究了不同泵浦波长对 PCF 中产生超连续谱的影响.

## 1 光纤参数和实验装置

所用光子晶体光纤是由丹麦 Crystal Fiber A/S 公司提供的, 其端面显微图如图 1. 光纤设计的是类椭圆纤芯, 使得光纤具有双折射率效应 (存在快、慢轴), 这样光脉冲在光纤中传输时, 会保留脉冲的偏振态, 所以称这种光纤为保偏光纤 (PM-PCF), 保偏特性有利于在光子晶体光纤中产生有效和稳定的超连续谱. 其包层和被覆层的直径分别为  $127 \mu\text{m}$  和  $235 \mu\text{m}$ , 平均纤芯尺寸为  $1.8 \mu\text{m}$ , 包层中的空气孔间距为  $1.6 \mu\text{m}$ , 气孔直径与平均孔间距之比为 0.8, 这些参数的设计可以获得低的色散系数和高的非线性效应. 该光纤在  $780 \text{ nm}$  处光纤的数值孔径约为

\* 广东省自然科学基金项目 (No. 031809) 资助项目

\*\* Tel: 0755-26536215 Email: scruan@szu.edu.cn

收稿日期: 2005-02-23

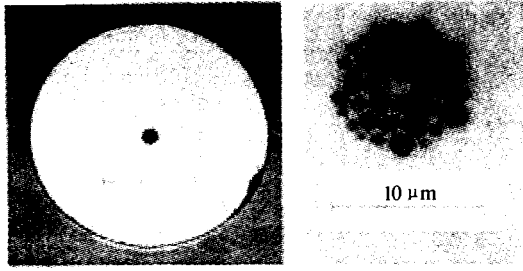


图1 光子晶体光纤的端面显微图片(左边是横截面、右边是纤芯)

Fig.1 The micrograph of the crosssection (left) and the center (right) of the PM-PCF

0.46. 光纤长度为 2.5 m. 基于非线性效应的 PCF 折射率在特定功率下可以表示为

$$n = n_L + n_2 |E|^2 \quad (1)$$

$n_L$  是线性折射率部分,  $n_2$  是 PCF 的非线性折射率系数, 对于飞秒脉冲在光子晶体光纤中传输时,  $n_2$  可以取为  $2.4 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}^2$ . 采用纤芯面积近似作为纤芯有效面积<sup>[5]</sup>  $A_{\text{eff}}$ , PCF 在 1.2 μm, 1.4 μm 处的非线性系数  $\gamma$  ( $\gamma = n_2 \omega / (cA_{\text{eff}})$ ) 分别计算为  $49 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ,  $42 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ , 式中  $\omega$  为中心角频率,  $c$  为真空中的光速.

图2是实验装置示意图, 光参量放大器 (Coherent OPA 9800) 是由再生放大锁模钛宝石激光器 (Coherent RegA 9000 and Mira 900F) 产生的重复频率为 250 kHz、脉宽约为 200 fs、中心波长在 800 nm 的超短脉冲泵浦的. OPA 系统产生的脉冲频率是可调谐的, 可选择不同的泵浦波长对光子晶体光纤的光谱展宽特性进行研究, OPA 输出光脉冲的重复频率为 250 kHz、脉冲宽度约为 250 fs, 经过聚焦耦合进 2.5 m 长的保偏光子晶体光纤. 采用放大倍数为 25×和数值孔径  $NA=0.4$  的显微镜物镜作为聚焦系统, 因为 0.4 的数值孔径比所用的光子晶体光纤的数值孔径小, 所以可有效的将泵浦功率耦合进光子晶体光纤. 将光子晶体光纤放置在六维微移平台上, 这样光纤调节可以具有很高的精度. 实验中输出光谱采用两种光谱仪进行测量, 一种是 Oceanoptics OOIBaseS2000, 测量波长范围为 300 nm 到 950 nm, 另一种为 EPP2000 红外光谱仪 (900 nm~1750 nm).

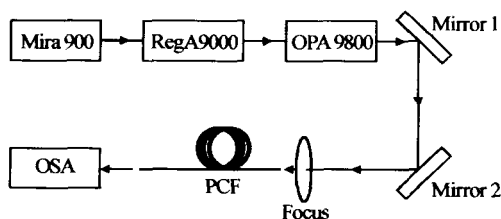


图2 实验装置示意图

Fig.2 The schematic diagram of the experimental setup

## 2 实验结果与讨论

利用 OPA 具有波长可调性, 采用输出波长分别为 1.2 μm 和 1.4 μm 的脉冲作为泵浦光源, 输出功率分别为 35 mW 和 20 mW, 泵浦波长处于 PCF 的反常色散区, 将泵浦光通过显微镜物镜耦合进光子晶体光纤, 输出超连续谱如图 3.

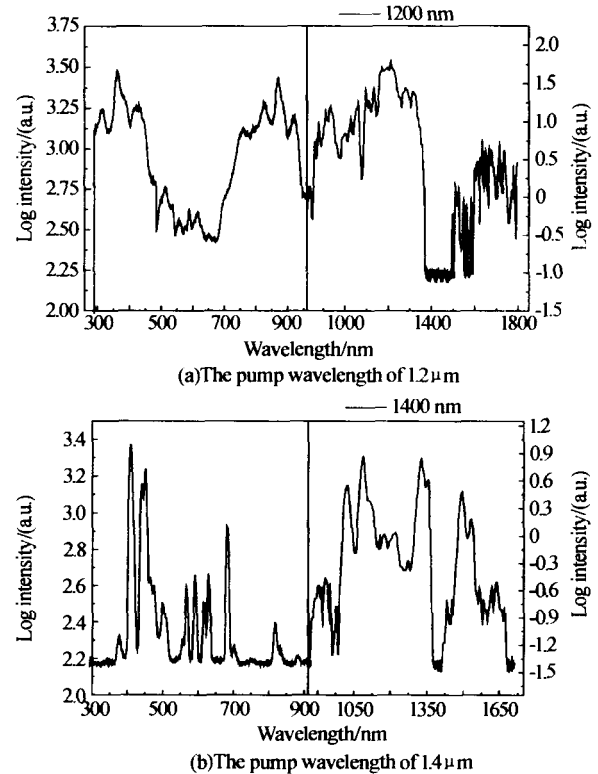


图3 PCF 产生的超连续谱

Fig.3 SC generated in the PCF

PCF 中 SC 的产生机理涉及到许多非线性效应<sup>[9,17]</sup>, 如: 自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM)、高阶孤子、受激喇曼散射 (SRS) 及四波混频 (FWM)、双折射以及自陡效应以及群速度色散、三阶色散等效应. 目前普遍认为<sup>[17~19]</sup>, 当泵浦光 fs 脉冲处在 PCF 的反常色散区时, 超连续光谱的产生机理被解释为高阶孤子裂变 (fission) 和四波混频. 首先因为泵浦超短脉冲本身有一个光谱宽度而且处于 PCF 的反常色散区, PCF 中的群速度色散和自相位调制相互抵消, 形成孤子传输, 在脉宽较宽时, 孤子的阶数  $N$  就越大. 由于高阶色散的影响,  $N$  阶孤子裂变为  $N$  个脉冲, 同时每个脉冲会发出对应的蓝移而且相位匹配的非孤子波, 这  $N$  个脉冲最终稳定并形成红移的  $N$  个一阶孤子, 同时由于四波混频效应, 光谱相互兼并形成超连续谱.

当泵浦波长在 1200 nm 处时, 在可见光波段, 光谱的展宽范围已经超出了光谱的测量范围, 展宽的光谱波长低于 300 nm. 获得了从 300 nm 至 1350 nm

的超连续谱如图 3(a), 谱宽超过了两个倍频程, 而在 700 nm 左右出现了一个光谱的凹陷, 这是由于零色散点波长两边正常色散区和反常色散区的脉冲传输的群速度不同引起的, 根据文献[19], 泵浦波长离 PCF 的零色散点越远, 形成相位匹配的四波混频效应就越弱, 零色散点附近的光谱带隙就越明显. 实验中的泵浦波长距离 PCF 的零色散点比较远, 所以也观察到了可见光区的光谱带隙. 而在 1.4  $\mu\text{m}$  左右的光谱带隙是由于光纤中的 OH 根离子的吸收造成的, 在 1.5  $\mu\text{m}$ ~1.8  $\mu\text{m}$  范围内观察到了弱的光谱峰, 说明孤子能量足够高并越过了 OH 离子吸收区. 当泵浦中心波长为 1.4  $\mu\text{m}$  时, 在可见光光谱范围内, 由于泵浦光波长远离光纤的零色散点波长, 而且泵浦功率也较低, 使得四波混频效应不是很强, 可见光区的各个蓝移峰之间还是分离的, 没有形成连续谱. 在长波区, 1.4  $\mu\text{m}$  左右也存在光谱带隙, 在 1.42~1.67  $\mu\text{m}$  范围内也观测到了谱峰, 如图 3(b).

为了验证 1.4  $\mu\text{m}$  处 OH 根离子的吸收, 在相同的实验条件下, 研究了不同光纤长度产生 SC 的对比情况, 如图 4. 长度为 11 cm 的 PCF 产生的超连续谱在 1.4  $\mu\text{m}$  处没有观察到光谱的凹陷, 如图 4(a), 而长度为 2.5 m 的 PCF 产生的超连续谱在 1.4  $\mu\text{m}$  处有明显的光谱凹陷, 如图 4(b). 说明在光纤中 OH 根离子的浓度一定的情况下, 光纤的长度越长, 对光谱的吸收越强, 形成的 1.4  $\mu\text{m}$  左右的光谱凹陷就越明显, 与实验得到的结果是一致的.

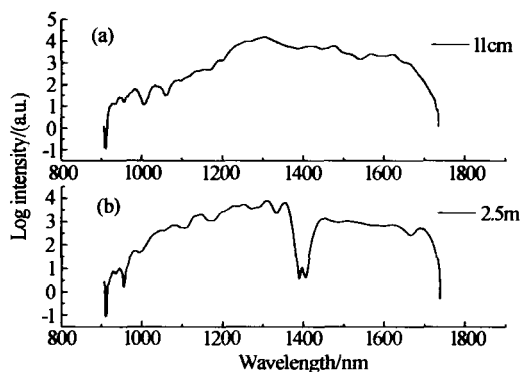


图 4 光纤不同长度对超连续谱产生的影响

Fig. 4 The generation of SC in PCFs with different lengths

### 3 结论

采用光参量放大器的不同输出波长, 实验研究了不同泵浦波长对光子晶体光纤产生超连续谱的影响, 表明当泵浦波长从 1.2  $\mu\text{m}$  变到 1.4  $\mu\text{m}$  时, 波长远离了 PCF 的零色散点, PCF 中的四波混频效应减弱, 产生的超连续谱的平坦度降低. 实验中还验证了 PCF 纤芯中残存的 OH 根离子对产生超连续

谱的影响. 当泵浦波长为 1.2  $\mu\text{m}$  时, 获得了带宽为 300 nm~1350 nm 的超连续谱, 谱宽超过了两个倍频程.

### 参考文献

- 1 Knight J C, Birks T A, Russell P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Opt Lett*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt Lett*, 1997, **22**(13): 961~963
- 3 Cregan R, Mangan B, Knight J, *et al.* Single-mode photonic bandgap guidance of light in air. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
- 4 Skryabin D V, Luan F, Knight J C. Soliton self-frequency shift cancellation in photonic crystal fibers. *Science*, 2003, **301**(5640): 1705~1708
- 5 Reeves W H, Skryabin D V, Biancalana F, *et al.* Transformation and control of ultrashort pulses in dispersion-engineered photonic crystal fibres. *Nature*, 2003, **424**(7): 511~515
- 6 闫培光, 阮双琛, 杜晨林, 等. 飞秒光脉冲作用下光子晶体光纤超连续谱的产生. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1299~1301
- 7 Yan P G, Ruan S C, Du C L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1299~1301
- 8 Yu Y Q, Ruan S C, Cheng C, *et al.* Spectral broadening in a polarization-maintaining photonic crystal fibre by femtosecond pulses from an optical parametric amplifier. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**(2): 380~383
- 9 Yu Y Q, Ruan S C, Cheng C, *et al.* Supercontinuum generation using a polarization-maintaining photonic crystal fibre by a regeneratively amplified Ti:Sapphire laser. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**(2): 384~387
- 10 Yan P G, Ruan S C, Lin H J, *et al.* Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber. *Chin Phys Lett*, 2004, **21**(6): 1093~1095
- 11 陈泳竹, 徐文成, 崔虎. 光纤中超连续谱产生的频域分析. *光子学报*, 2003, **32**(2): 148~151
- 12 Chen Y Z, Xu W C, Cui H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 148~151
- 13 Yu Y Q, Ruan S C, Cheng C, *et al.* Supercontinuum generation at 1.6  $\mu\text{m}$  region using a polarization-maintaining photonic crystal fiber. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1301~1303
- 14 阮双琛, 于永芹, 程超. OPA 泵浦保偏光子晶体光纤产生超连续谱和非线性特性的研究. *光子学报*, 2004, **33**(7): 789~792
- 15 Ruan S C, Yu Y Q, Cheng C. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 789~792
- 16 Monro T M, Richardson D J, Bennett P J. Developing

- holey fibres for evanescent field devices. *Electronics Letters*, 1999, **35**(14):1188~1189
- 14 Ravi Kanth Kumar V V, George A K, Reeves W H, *et al.* Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation. *Opt Express*, 2002, **10**(25):1520~1525
- 15 Coen S, Chau A H L, Leonhardt R, *et al.* Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers. *J Opt Soc Am B*, 2002, **19**(4): 753~764
- 16 Champert P A, Popov S V, Taylor J R. Generation of multiwatt broadband continua in holey fibers. *Opt Lett*, 2002, **27**(2):122~124
- 17 Husakou A V, Herrmann J. Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers. *Phys Rev Lett*, 2001, **87**(20):203901-1~4
- 18 Herrmann J, Griebner U, Zhavoronkov N, *et al.* Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**(17):173901-1~4
- 19 Lehtonen M, Genty G, Ludvigsen H. Supercontinuum generation in a highly birefringent microstructured fiber. *Appl Phys Lett*, 2003, **82**(14):2197~2199

## Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fibers Depends on Pump Wavelengths

Yu Yongqin<sup>1,2</sup>, Ruan Shuangchen<sup>2</sup>, Zeng Jianchun<sup>2</sup>, Yao Jianquan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072

<sup>2</sup> School of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060

Received date:2005-02-23

**Abstract** The Ti:sapphire Optical Parametric Amplifier was applied as the pump source with the output wavelength tuning. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers was researched with different pump wavelengths. It was concluded that the SC generation was depended on the pump wavelength, and the difference group velocities in the two sides of the zero dispersive wavelength of the PCF and the OH absorption at about 1.4  $\mu\text{m}$  in the PCF affected the flatness of the generated supercontinuum. When the pump wavelength lied further away from the zero dispersive wavelength, the flatness was reduced, even in the visible region the blue-shift peaks were separated and didnot come into being supercontinuum. Supercontinuum with a broad bandwidth of 300 nm to 1350 nm was generated with the pump wavelength of 1.2  $\mu\text{m}$ , and the generated spectral bandwidth was beyond two octaves.

**Keywords** Photonic crystal fiber; Optical parametric amplifier; Supercontinuum



**Yu Yongqin** was born in 1976 and received her Ph. D. degree in State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University in 2003. At present, she is working as a postdoctor in Shenzhen University. Her research interests include nonlinear optics in photonic crystal fibers and femtosecond laser micromachining.