

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*

阮双琛^{1,2} 于永芹^{1,2} 程超² 杜晨林² 刘承香² 林浩佳² 姚建铨¹

(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 采用波长可调光参量放大器作为泵浦源,对保偏光子晶体光纤的超连续谱的产生和非线性特性进行了实验研究. 将光参量放大器产生的中心波长为 $1.27 \mu\text{m}$,脉宽约为 250 fs ,重复频率为 250 kHz 和单脉冲能量只有 92 nJ 的光脉冲耦合进 0.2 m 长的保偏光子晶体光纤,实验中观察到了光谱展宽和非线性效应,在 $1.3 \mu\text{m}$ 波长区域获得了谱宽为 83 nm ($1.2486 \sim 1.3318 \mu\text{m}$) 的超连续谱.

关键词 光子晶体光纤;光参量放大器;超连续谱;非线性

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) 又称为多孔光纤 (holey fiber) 或微结构光纤 (micro-structured fiber). 自从 1996 年第一次制备出光子晶体光纤,就引起了人们的广泛关注并成为研究热点. 与传统光纤不同,光子晶体光纤是一种新型光纤,其包层是由波长量级的空气孔在二维方向上周期性紧密排列构成的. 光子晶体光纤中的这种微结构能够实现传统光纤中难以实现的许多传输特性,如:在极宽谱带内的单模传输^[1],强的非线性效应^[2],在可见光和近红外波段实现反常色散^[3],极强的双折射效应^[4]等. 光子晶体光纤在极宽谱带内支持单模传输,因而能够极大的降低单模状态下的辐射能量损失. 其独特的波导特性,使光纤具有高的非线性系数和可控的零色散波长^[5],因此光子晶体光纤被广泛用于非线性光学方面,如:频率变换、短脉冲的光谱展宽和超连续谱的产生等. 其中光子晶体光纤中超连续谱的产生具有广泛的应用前景. 超连续谱是由光纤中各种不同的非线性效应产生的^[6],它提供了一种在很宽的光谱范围内产生超短脉冲的非常经济的技术和方法. 最近研究表明采用光子晶体光纤使得产生超连续谱所需要的光强度大大降低. 光子晶体光纤能增强非线性光学过程的性能是由于其能把绝大部分光局限在纤芯里面,在较低脉冲能量下纤芯里光的强度可以达到很高. 为了在光子晶体光纤中有效的产生超连续谱,保偏特性^[7]对于稳定

的产生超连续谱是不可缺少的.

本文用光参量放大器 (OPA) 产生的飞秒光脉冲作为泵浦源,它的脉冲宽度约为 250 fs ,重复频率为 250 kHz ,单脉冲能量为 92 nJ . 飞秒脉冲经过显微物镜聚焦后,耦合进平均纤芯直径为 $1.8 \mu\text{m}$ 、长为 0.2 m 的保偏光子晶体光纤. 实验中观察到了光谱的非线性变化和光谱展宽,获得了谱宽为 83 nm ($1.2486 \sim 1.3318 \mu\text{m}$) 的超连续谱.

1 光子晶体光纤参数

实验中所用光子晶体光纤是由丹麦 Crystal Fiber 公司提供的,其端面显微图如图 1. 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. 因为空气孔包层和纤芯的比较大的折射率差,光纤的数值孔径约为 0.47 ,使得在保偏光子晶体光纤可以达到高的功率密度和强的非线性效应. 采用光子晶体光纤的纤芯面积近似作为有效纤芯面积 (A_{eff})^[5],计算了在波长 $1.3 \mu\text{m}$ 处光子晶体光纤的非线性系数 γ ($\gamma = n_2\omega/cA_{\text{eff}}$) 为 $57 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$.

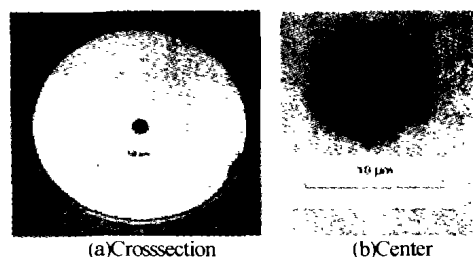


图 1 光子晶体光纤的端面显微图片
Fig. 1 The micrograph of the PM-POF

* 广东省自然科学基金 (No. 031809) 资助项目

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

收稿日期: 2004-02-09

2 实验装置

图 2 为实验装置示意图,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,这样可以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. 实验中,采用 OPA 输出波长为 1.269 μm 的脉冲作为泵浦光源,OPA 输出光脉冲的平均功率为 23 mW、重复频率为 250 kHz、脉冲宽度约为 250 fs^[8],经过聚焦耦合进 0.2 m 长的光子晶体光纤. 采用放大倍数为 25 \times 和数值孔径 $NA=0.4$ 的显微镜物镜作为聚焦系统,因为 0.4 的数值孔径比实验中所用的光子晶体光纤的数值孔径小,所以可以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. 采用红外光谱分析仪 (OSA) (AV6361) 测量光纤前后的光谱变化. 光纤后面输出的光斑图形是由 CCD 照相机拍摄得到的.

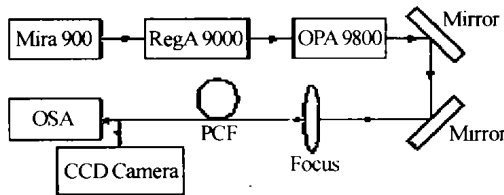


图 2 实验装置
Fig. 2 The schematic diagram of the experimental setup

3 实验结果和分析

图 3 是红外光谱仪测量得到的 OPA 系统输出的泵浦脉冲的光谱曲线. 在耦合进光纤之前,光脉冲的中心波长和光谱半宽 (FWHM) 分别为 1.269 μm

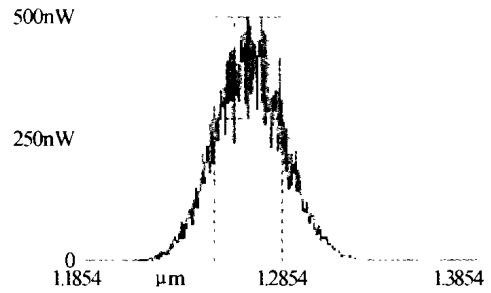


图 3 OPA 输出的泵浦脉冲的光谱曲线
Fig. 3 The profile of OPA output spectrum measured by OSA before injecting into the PM-PCF

和 34 nm. OPA 的平均输出功率为 23 mW,相应的单脉冲能量为 92 nJ.

图 4 是泵浦光经过光子晶体光纤输出后用 CCD 照相机拍摄到的光斑图象. 很显然,中间的最大和最亮的光点,形状也很圆,是从纤芯输出的. 而周围的那些小的光点,我们认为这是由于光在包层中的有周期性排列的空气孔的衍射造成的. 衍射斑点基本呈六角结构,这也与包层中空气孔排列是六角结构基本吻合.

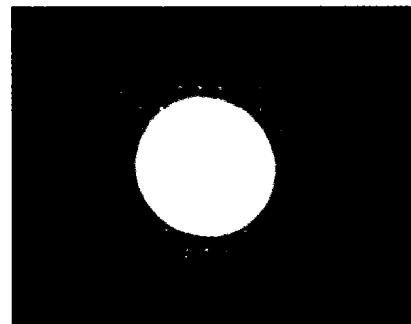
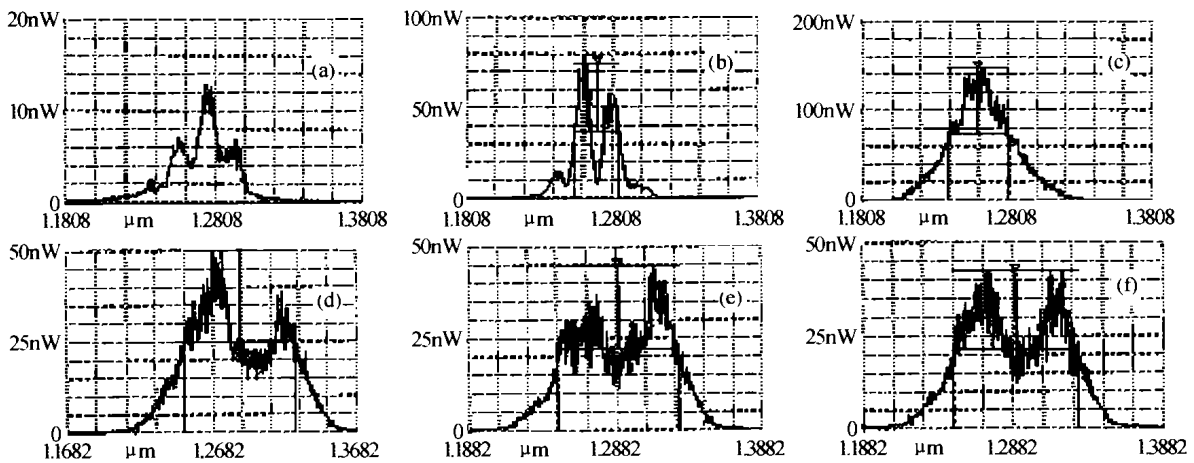


图 4 光子晶体光纤输出的光斑图象
Fig. 4 The output light spot from the PCF measured by the CCD camera

实验中观察到了光纤后的光谱展宽和超连续谱的产生过程,如图 5. 从图 5 (a) 可以看出有三个独立的峰,中心波长分别在 1.275 μm 、1.256 μm 和



(a)(b)The spectra output from the PM-PCF modulated by the microstructure cladding layer
(c)The broadened spectrum produced by SPM (d)(e)(f)The spectral broadening resulted from SRS

图 5 光纤后光谱的演变过程
Fig. 5 The spectral broadening process and the supercontinuum generation at the output of the PM-PCF

1.295 μm , 两个峰对称的分布在最强峰的两边, 通过轻微的调整六维调整架, 既调节泵浦光耦合进光纤, 三个峰的强度互相竞争, 如图 5(b). 这是由于泵浦光斑打在包层的空气孔上, 周期性排列的空气孔对泵浦光脉冲的调制, 形成了分离的各个峰. 继续调节光纤和聚焦光斑的相对位置, 光谱变成一个大的宽峰, 中心波长在 1.26 μm 、谱宽为 40 nm, 如图 5(c). 光纤后输出的谱宽比光纤前的谱宽稍有增加, 这是由于光子晶体光纤中的自相位调制引起的光谱展宽. 进一步调整光纤的耦合位置, 在长波方向出现了一个宽峰, 中心波长为 1.32 μm , 而且整个光谱的强度变弱, 如图 5(d). 能量分布在更宽的光谱范围内使得光谱的强度降低, 而 1.32 μm 处的谱峰是由于受激喇曼散射 (SRS), 因为同 OPA 输出光谱相比, 喇曼频移经过计算为 9.2 THz, 符合受激喇曼散射的特征. 而两个峰的宽化是由于光纤中的非线性效应, 如: 自相位调制、交叉相位调制以及四波混频等共同引起的. 进一步调整光纤的耦合位置, 如图 5(d)、(e) 和 (f), 两个宽峰的强度也是互相竞争的, 这说明光纤存在一个最佳的耦合位置达到优化耦合效率和光谱宽化. 从图 5 可以看出, 光纤后输出的光谱谱宽可达 80 nm (1.2486 ~ 1.3318 μm) 以上, 表明在泵浦单脉冲能量为 92 nJ 时, 保偏光子晶体光纤中的非线性效应就非常强了.

4 结论

采用光参量放大器产生的单脉冲能量只有 92 nJ 的 fs 光脉冲作为泵浦源经聚焦耦合进 0.2 m 长的保偏光子晶体光纤, 其平均纤芯直径为 1.8 μm , 数值孔径约为 0.47. 实验中观察到了光纤后的光谱展

宽和非线性效应, 在 1.3 μm 波长区域获得了谱宽为 83 nm (1.2486 ~ 1.3318 μm) 的超连续谱.

参考文献

- 1 Birks T A, Knight J C, Russell P st J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt Lett*, 1997, **22**(13): 961 ~ 963
- 2 Brodenck N G R, Monro T M, Bennell P J. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities. *Opt Lett*, 1999, **24**(20): 1395 ~ 1397
- 3 Knight J C, Arnaga J, Birks T A. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(7): 807 ~ 809
- 4 Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J. Highly birefringent photonic crystal fibers. *Opt Lett*, 2000, **25**(18): 1325 ~ 1327
- 5 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
Yan P G, Ruan S C, Du C L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1299 ~ 1301
- 6 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
Chen Y Z, Xu W C, Cui H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 148 ~ 151
- 7 Yamamoto T, Kuboya H, Kawanishi S. Supercontinuum generation at 1.55 μm in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber. *Optics Express*, 2003, **11**(13): 1537 ~ 1540
- 8 Murray K R, Michael K S S. Tunable infrared generation using a femtosecond 250 kHz Ti : Sapphire regenerative amplifier. *IEEE J Quantum Electron*, 1996, **32**(8): 1273 ~ 1276

Supercontinuum Generation and Nonlinear Characteristics in a Polarization-maintaining Photonic Crystal Fiber by Femtosecond Pulses of an Optical Parametric Amplifier

Ruan Shuangchen^{1,2}, Yu Yongqin^{1,2}, Cheng Chao², Du Chenlin², Liu Chengxiang², Lin Haojia², Yao Jianquan¹

1 College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072

2 School of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060

Received date: 2004-02-09

Abstract The nonlinearity and the supercontinuum of 83 nm (1.2486 ~ 1.3318 μm) in the 1.3 μm region were generated by the propagation of femtosecond pulses produced by an Optical Parametric Amplifier through a 0.2 m-long, polarization-maintaining photonic crystal fiber. Spectral broadening was observed in a photonic crystal fiber with an average core radius of 1.8 μm , pumped by optical pulses with a duration of 250 fs, a repetition rate of 250 kHz and an energy of 92 nJ.

Keywords Photonic crystal fiber; Optical Parametric Amplifier; Supercontinuum; Nonlinearity



Ruan Shuangchen was born on October 8, 1963, in Shaanxi province, China. He took the B. S. and M. S. degree in Optics in 1986 and 1989, respectively, at physics department, Northwest University. Since 1989 he had worked in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica. From 1993.5 to 1994.7, he studied in Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK, as a visiting scholar. He has worked in Shenzhen University since 1999. His research fields include solid state laser, fiber laser, generation of short pulse, ultrafast phenomena, application of short pulse. He has been a professor since 1994.