

双波长抽运拉锥光子晶体光纤产生超连续谱研究

奚小明¹ 陈子伦¹ 孙桂林^{1,2} 湛鸿伟¹ 李志鸿¹ 黄值河¹ 侯 静¹

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
² 海军航空工程学院基础部, 山东 烟台 264001)

摘要 利用 1064 nm 抽运光在总长度为 1 m 的光子晶体光纤(PCF)的前半段(77 cm)通过四波混频产生 747 nm 短波信号光,并对光纤的后半段进行拉锥处理,拉锥光纤具有 707 nm 和 1177 nm 两个零色散点(ZDW)。利用 1064 nm 抽运光和产生的 747 nm 信号光共同在两个零色散点之间的反常色散区抽运拉锥光子晶体光纤,在长度大约 27 cm 的拉锥光子晶体光纤中产生了谱宽大于 600~1700 nm(带宽 20 dB 以内)的超连续谱输出。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;熔融拉锥;四波混频;超连续谱

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0206001

Dual-Wavelength Pumped Supercontinuum Generation in Tapered Photonic Crystal Fibers

Xi Xiaoming¹ Chen Zilun¹ Sun Guilin^{1,2} Chen Hongwei¹ Li Zhihong¹
Huang Zhihe¹ Hou Jing¹

(¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
² Institute of Systems and Mathematics, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract By using 1064 nm pulsed laser the front section (77 cm) of photonic crystal fiber (PCF) is pumped and 747 nm signal light is got by four-wave mixing. The end part of the PCF is tapered and has two zero-dispersion wavelengths (ZDW). The 747 nm signal light and 1064 nm pulsed laser which locate in the anomalous dispersion regime between two zero-dispersion wavelengths are pumped into the tapered PCF. Supercontinuum with more than spectral width of 600~1700 nm (at 20 dB level) is generated in the tapered PCF which has 25 μm outer diameter and 27 cm length.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; fusion tapering; four-wave mixing; supercontinuum

OCIS codes 060.5295; 060.2310

1 引 言

超连续谱(SC)在干涉测量、光相干摄影术和光谱学分析等领域具有重要的应用价值,但是在普通光纤中由于零色散点的限制,很难产生短波长的超连续谱。由于光子晶体光纤(PCF)的强非线性效应和色散的可控性,利用 PCF 产生超连续谱成为 PCF 研究的热点之一^[1~8]。之前人们在高非线性 PCF

中产生短波长超连续谱主要是利用飞秒或者皮秒脉冲激光来抽运^[3~5],对于纳秒脉冲激光抽运产生超连续谱,光谱展宽的转化效率比较低,所以一般需要 PCF 的长度较长^[6]。

利用双波长抽运 PCF 可以产生更宽更平坦的超连续谱输出^[7~9]。一般实现双波长抽运的方法是通过一个透镜将两束不同波长的激光耦合进光

收稿日期: 2010-05-14; 收到修改稿日期: 2010-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(61007037)和教育部新世纪优秀人才计划(NCET-08-0142)资助课题。

作者简介: 奚小明(1987—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤方面的研究。E-mail: exixiaoming@163.com

导师简介: 侯 静(1975—),女,博士,副教授,主要从事光子晶体光纤方面的研究。E-mail: houjing25@sina.com

(通信联系人)

纤^[7,8],但由于透镜色差的影响,两个波长通过透镜后的焦点不在同一位置,所以很难达到对两个波长同时高效耦合,对透镜的要求也比较高。本工作利用与拉锥光纤相连的未拉锥光纤通过四波混频产生双波长抽运光,很好地解决了双波长抽运光耦合进光纤的问题。同时这种方法将前面产生双波长抽运光和后面产生超连续谱结合在一根光纤中完成,避免了熔接和空间耦合引入的损耗,提高了系统的稳定性。C. Xiong 等^[9]提出了在膨胀拉锥 PCF 中产生超连续谱的方法,但是该方法需要对 PCF 进行两步处理:膨胀和拉锥。本文工作经过改进,只需要对 PCF 进行拉锥一次处理,而无需对 PCF 充气加热膨胀,降低了实现的难度。同时通过拉锥同样实现了改变光纤的色散特性和增大光纤中的光强密度,从而达到增强非线性效应和提高超连续谱转化效率的目的,在产生较宽超连续谱的同时,大大缩短了所需的 PCF 长度。

2 理 论

2.1 PCF 中的四波混频

在 PCF 中一个重要的非线性过程是相位匹配的四波混频(FWM)。四波混频效应会在抽运光左右等频率间隔的位置出现两个新的频率。四波混频过程的相位匹配条件和能量守恒条件可以表示为^[10]

$$2k_{\text{pump}} = k_{\text{signal}} + k_{\text{idler}} + 2\gamma P, \quad (1)$$

$$2\omega_{\text{pump}} = \omega_{\text{signal}} + \omega_{\text{idler}}, \quad (2)$$

式中 $k_{\text{pump}}, k_{\text{signal}}, k_{\text{idler}}$ 分别为抽运光,信号光和闲频光的波矢, $\omega_{\text{pump}}, \omega_{\text{signal}}, \omega_{\text{idler}}$ 分别为抽运光,信号光和闲频光的频率。 P 为抽运光的功率, γ 为非线性效应常数

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}. \quad (3)$$

式中 $n_2 = 2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, 是二氧化硅的非线性折射率系数, A_{eff} 为光纤模场面积, λ 为抽运光的波长。

在满足相位匹配条件时,会出现对应的四波混频效应,产生短波方向的信号光和长波方向的闲频光。四波混频产生的信号光和闲频光与抽运光同样是激光,可以利用比抽运光波长更短的信号光来抽运合适的 PCF,获得波长更短的超连续谱。

2.2 PCF 拉锥

PCF 的熔融拉锥可以改变很多光纤参数,例如空气孔的直径 d 、孔间距 Λ 以及纤芯直径等,充分利用 PCF 空气孔的变化可实现一些 PCF 的特殊应

用^[11,12]。如果利用四波混频效应产生的短波信号光抽运 PCF 产生超连续谱,光纤的零色散点必须位于信号光附近,否则产生超连续谱的效率不会很高。而 PCF 的熔融拉锥可以很好地调节光纤的色散曲线和零色散点的位置,从而满足短波抽运产生超连续的要求。

在光子晶体光纤熔融拉锥时,空气孔的表面张力将使空气孔塌缩。在光子晶体光纤拉锥过程中,为了实现空气孔直径和孔间距同时变小,但两者之比 d/Λ 不变,采用的方法是“快速低温”拉锥方法^[13],拉锥效果如图 1 所示。在这种方法中,光纤拉伸台相对高速移动,加热火苗的温度相对较低,使 PCF 在较大的拉力下变细。同时为了实现低损耗的拉锥,拉锥得到的 PCF 需要有过渡区,且过渡区必须满足渐变条件^[14],即保证过渡区域各个位置的拉锥倾角 θ_t 小于相应位置纤芯导模的衍射角 θ_0 。具体可表示为

$$\theta_t < \theta_0 = \frac{\lambda \sqrt{\ln V_{\text{eff}}}}{\pi \rho}, \quad (4)$$

$$V_{\text{eff}} = (2\pi\rho/\lambda) \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2}, \quad (5)$$

式中 $\rho = 0.64\Lambda$, n_{co} 是 PCF 的基质折射率, n_{cl} 是 PCF 包层有效折射率。

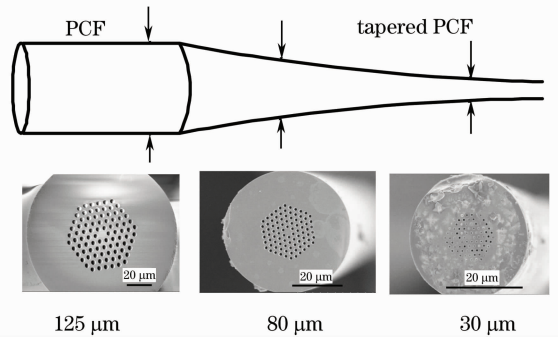


图 1 拉锥 PCF 不同区域截面电子显微照片(SEM)

Fig. 1 Scanning electron micrographs(SEM) for different segments of tapered PCF

通过拉锥的 PCF 零色散点的位置会向短波方向移动,如图 2 所示。同时由于纤芯和模场直径的减小,光纤中的光强密度将显著增大,非线性效应将显著增强。而且由于拉锥光纤两端都连有较大芯径的未拉锥 PCF,所以与高非线性 PCF 相比,无论是空间光耦合还是与普通光纤熔接都具有很大优势。

3 实验结果和分析

实验装置如图 3 所示,纳秒脉冲抽运光通过 $25\times$ 显微镜耦合进光子晶体光纤,出射端接功率

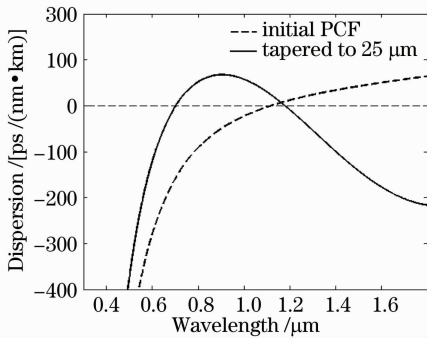


图2 拉锥 PCF 和原始光纤的色散曲线

Fig.2 Dispersion curves of tapered PCF and initial PCF

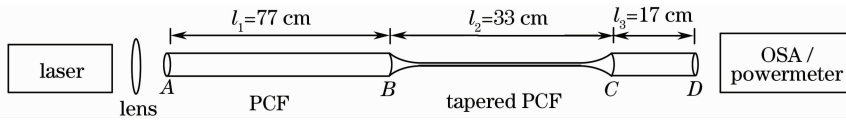


图3 实验装置示意图

Fig.3 Schematic setup for super continuum experiment

如图3所示,实验中对总长度为1 m的PCF的BC段进行拉锥处理。各段的长度如图3所示。原先BC段长度为6 cm,通过快速低温拉锥法将外直径拉锥到 $25\ \mu\text{m}$,拉锥区包括约27 cm均匀区和两端各3 cm过渡区。空气孔的直径和孔间距等比例减小,但两者之比 d/Λ 保持不变。由于拉锥的光纤过渡区满足渐变条件,所以拉锥引入损耗基本可以忽略,实验测得1550 nm处的损耗小于0.1 dB。此时拉锥区均匀段的色散曲线如图2所示,色散曲线在可见光区域出现两个零色散点,分别为707 nm和1177 nm。将1064 nm激光通过透镜耦合进光子晶体光纤,在输出端得到了23 mW的超连续谱输出,输出光谱和输出光斑如图4,5所示。实验所用的光谱仪为Agilent 86142B,标定量程为600~1700 nm,拓展量程为340~2000 nm(部分波长强度未标定)。

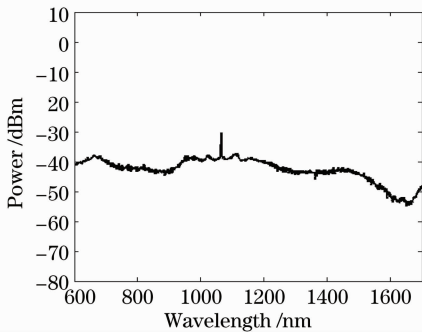


图4 拉锥 PCF 产生的超连续谱

Fig.4 Spectrum of super continuum generated by tapered PCF

计或者光谱仪(OSA)测量光功率和出射光谱。实验中采用的光子晶体光纤的参数为 $d=3.54\ \mu\text{m}$, $\Lambda=5.42\ \mu\text{m}$,纤芯直径 $d_{\text{core}}=7.01\ \mu\text{m}$,其截面的电子显微镜(SEM)照片如图1所示。利用文献[15]经验公式法理论计算的色散曲线如图2虚线所示,零色散点的位置在1117 nm。在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,脉冲宽度为0.6 ns,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。1064 nm抽运光在PCF的正常色散区。

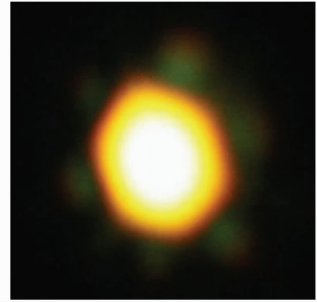


图5 超连续谱输出光斑图

Fig.5 Output pattern of super continuum

为了研究AB段光子晶体光纤中的非线性效应,在光纤拉锥段前(B点)剪断,只留下前面未拉锥的77 cm PCF(AB段),测量入射进拉锥PCF的光谱。测量此时在输出端B点的光谱和功率,如图6所示。光谱中出现了3个峰:747,1064和1848 nm。必须说明的是实验所用光谱仪标定的量程范围是600~1700 nm,所以1848 nm位置显示的强度是不可信的,但是波长的位置是可以确定的。通过计算可知,三个峰的位置恰好满足四波混频的能量守恒(2)式。747 nm和1848 nm激光分别为1064 nm抽运光四波混频效应产生的信号光和闲频光。测量得到出射光的总功率为26 mW。将出射光通过1064 nm全反镜,测得出射功率为5.74 mW,由于1848 nm闲频光位于光纤的高损耗区,出射功率很小,所以在闲频光的功率忽略不计。最后在靠近光纤入射端A点处剪断,测得抽运功率为27.3 mW,计算得到信号光的转换效率约为21%。

因此,实验中通过77 cm的PCF产生四波混频

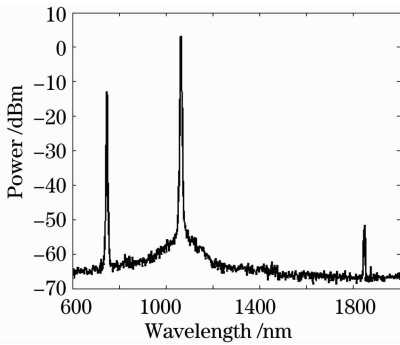


图 6 AB 段光子晶体光纤产生的四波混频效应

Fig. 6 Spectrum of FWM generated by PCF of segment AB

效应,得到 747 nm 的信号光。然后利用信号光和未转化的 1064 nm 抽运光共同抽运拉锥 PCF。由于拉锥 PCF 的两个零色散点分别位于 707 nm 和 1177 nm,所以抽运的双波长同时位于反常色散区,有利于调制不稳定性,产生光孤子等非线性效应和超连续谱。拉锥 PCF 减小了光纤纤芯和模场直径,提高了光纤中的光功率密度,从而增强非线性效应。利用 CUDOS 软件计算可得拉锥前后的模场面积分别为 $28.913 \mu\text{m}^2$ 和 $1.819 \mu\text{m}^2$,由(3)式得到拉锥前后的非线性系数分别为 $4.085 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 和 $64.93 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$,拉锥后的非线性系数约为原来的 16 倍。另一方面,拉锥 PCF 改变了光纤的色散曲线,使得零色散点从 1177 nm 向短波方向移动。通过双波长同时在两个零色散点附近抽运大大提高了抽运效率,使超连续谱在有限的光纤长度内展的更宽,提高了超连续谱的转化效率,减小了所需光纤的长度。如果利用未拉锥的 PCF 产生相同谱宽的超连续谱,光纤的长度至少需要十几米^[6],而在实验中光纤的总长度只有 1 m,大大提高了效率。

4 结 论

利用纳秒脉冲光抽运 PCF,在光纤中由于四波混频效应产生了 747 nm 信号光,并利用熔融拉锥机对 PCF 的后半段进行拉锥处理,调整 PCF 的色散曲线和零色散点的位置,使得四波混频产生的信号光和原先的 1064 nm 抽运光共同在反常色散区抽运拉锥 PCF。实验在约 27 cm 的拉锥 PCF 中得到了光谱范围大于 600~1700 nm(带宽 20 dB 以内)的超连续谱输出。

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22** (13): 961~963
- 2 T. A. Birks, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell. Supercontinuum generation in tapered fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1415~1417
- 3 S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt *et al.*. Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in a photonic crystal fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 753~764
- 4 J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 25~27
- 5 Wang Qiuguo, Zhang Hu, Zhang Xia *et al.*. Supercontinuum generation using 120 fs femtosecond pulse laser in a dispersion flattened photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 353~355
王秋国,张虎,张霞等.飞秒脉冲在光子晶体光纤中的超连续谱产生[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 353~355
- 6 Wang Yanbin, Hou Jing, Liang Dongming *et al.*. Study of supercontinuum generation in normal-dispersion regime of photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1073~1077
王彦斌,侯静,梁冬明等.光子晶体光纤正常色散区超连续谱产生的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1073~1077
- 7 V. Tombelaine, P. Leproux, V. Couderc *et al.*. Visible supercontinuum generation in holey fibers by dual-wavelength subnanosecond pumping [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(23): 2466~2468
- 8 Hansen, S. C. Buchter. Supercontinuum generation by nanosecond dual-wavelength pumping in microstructured optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(17): 7914~7923
- 9 C. Xiong, A. Witkowska, S. G. Leon-Saval *et al.*. Enhanced visible continuum generation from a microchip 1064 nm laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 6188
- 10 W. J. Wadsworth, N. Joly, J. C. Knight *et al.*. Supercontinuum and four-wave mixing with Q-switched pulses in endlessly single-mode photonic crystal fibres[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(2): 299~309
- 11 S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, W. J. Wadsworth *et al.*. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(13): 2864~2869
- 12 P. Nandi, Z. Chen, A. Witkowska *et al.*. Characterization of photonic crystal fiber mode converter using low coherence interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 1123~1125
- 13 Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Post-processing techniques of photonics crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 020602
陈子伦,侯静,姜宗福.光子晶体光纤的后处理技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 020602
- 14 G. E. Town, J. T. Lizier. Tapered holey fibers for spot-size and numerical-aperture conversion [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14): 1042~1044
- 15 Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Empirical relations for simple design of photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1): 267~274