

文章编号:1004-4213(2010)03-0446-4

亚纳秒光脉冲抽运光子晶体光纤产生的瓦级超连续谱*

方平^{1,2}, 杨直¹, 王屹山¹, 赵卫¹, 张挺^{1,2}, 李成²

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:研究了亚纳秒脉冲抽运光子晶体光纤产生高功率超连续谱的机理. 采用掺镱锁模光纤激光器产生的脉宽 570 ps 光脉冲, 抽运 1.8 m 光子晶体光纤, 得到了平均功率为 1.15 W、光谱覆盖范围为 750 nm 的超连续谱. 通过实验和模拟结果的对比和分析, 证实了亚纳秒脉冲抽运 1.8 mPCF 产生超连续谱时, 调制不稳定性效应起了重要作用. 在研究了不同抽运功率下输出的超连续谱变化后, 发现随着抽运功率的提高, 输出功率也更高且超连续谱覆盖波段也更宽, 在瓦级输出功率下依然未达到饱和展宽状态, 还有进一步提高功率和展宽光谱的空间.

关键词:亚纳秒; 超连续谱; 调制不稳定性; 光子晶体光纤

中图分类号: TN25

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103903.0446

0 引言

超连续谱(Supercontinuum, SC)是一种新型光源,其高亮度和宽波段的特点在光纤测量、光谱分析、干涉测量等领域有非常重要的应用价值^[1]. 近年来,超连续谱的产生是一个研究热点,相关的试验和理论报道很多^[2-11]. 这些报道中抽运光通常为飞秒和皮秒脉冲^[3-6],而纳秒和连续光较少^[7-10]. 虽然飞秒脉冲在非线性光纤中比皮秒和纳秒脉冲容易展宽,但飞秒脉冲激光器比较复杂,而且造价非常高;其次飞秒脉冲激光器的输出平均功率不够高,一般在几十毫瓦至 300 mW 之间^[3-6]. 近几年,连续光激光器发展很快,输出功率达到几千瓦,为超连续谱产生提供了新的抽运方式,已经有用连续光抽运产生 SC 的试验报道^[8-10]. 但是,连续光抽运产生的 SC 太窄,虽然功率可能做到更高,但要产生较宽的光谱,需要很长的光纤(上千米),造价也很高. 因此用皮秒和纳秒脉冲抽运得到较高输出功率和合适覆盖波长的 SC,是经济又可行的. 2008 年 Malay Kumar 等人使用 2 ns 脉冲抽运 1.5 mPCF 得到 740 mW 平均功率,覆盖波段为 450~1 200 nm 的超连续谱^[7]. 高非线性光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF),它独特的色散特性、超强的非线性和理想的单模特性是产生 SC 的优良材料,且实验搭建简单,容易实现全光纤化.

本文中使用的掺镱锁模光纤激光器产生的 570 ps 光脉冲注入 1.8 m 丹麦 Crystal Fiber 公司生产的光子晶体光纤,产生了功率为 1.15 W 光谱覆盖范围为 750 nm 的超连续谱. 对实验和模拟结果进行了理论分析和验证. 另外还研究了不同抽运功率下超连续谱的变化情况.

1 试验装置

实验采用的超短脉冲激光种子源为“8”字型腔掺镱锁模光纤激光器,产生重复频率为 4 MHz 的锁模激光脉冲,中心波长锁定在 1 062 nm. 激光器出来的脉冲经过多级放大后注入 PCF,通过 PCF 中的非线性效应和色散效应展宽光谱,实验装置如图 1.

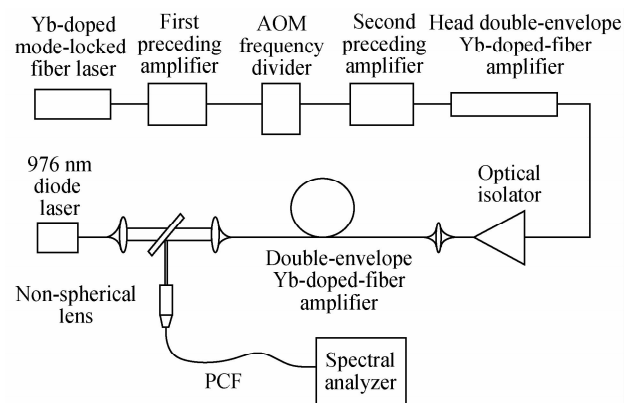


图 1 亚纳秒脉冲抽运 PCF 产生 SC 的实验装置
Fig. 1 The experimental setup for SC generation by sub-nanosecond pumping in PCF

放大系统包括作为一二级预放大系统的单模掺镱光纤激光放大器,前置双包层光纤激光放大器,双包层掺镱光纤主放大器. 一级预放大输出的

* 国家自然科学基金(60537060)资助

† Tel: 029-888887613 Email: pingfang121212@163.com

收稿日期: 2009-04-02

修回日期: 2009-04-21

120 mW、4 MHz 脉冲由分频电路分频为 1 MHz,并经二级预放放大至 75 mW,然后通过前置双包层放大器放大至 1.5 W. 双包层掺镱光纤主放大器采用 Nufern 公司生产的 LMA-YDF-25/250 型大模场小纤芯光纤,工作波长在 1 030~1 115 nm 范围. 主放大器的抽运源输出 976 nm 的连续光反向抽运主放大器. 从放大系统输出的光脉冲平均功率达到 5 W,重复频率 1 MHz,经 6 G 带宽高速数字示波器结合 45 G 高速光电探测器,测得脉宽 570 ps.

实验所用 PCF 为丹麦 Crystal Fiber 公司生产,其零色散波长 (Zero Dispersion Wavelength, ZDW) 在 1 040 nm,抽运光波长 1 062 nm 在光纤的反常色散区,且离零色散波长不远,这样是为了产生较平坦和覆盖宽波段的 SC^[11]. 光纤长度为 1.8 m. 注入 PCF 的光谱如图 2,中心波长在 1 062 nm,谱宽不超过 5 nm.

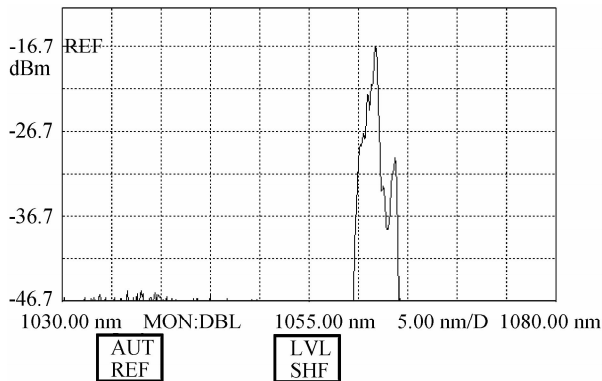


图 2 注入 PCF 的光谱

Fig. 2 The spectrum injected into PCF

2 实验结果

2.1 1.15 W 的 SC 及形成机理分析

实验所得 SC 平均输出功率达到 1.15 W,相应的 SC 光谱如图 3. 由图可见光谱较平坦,没有太多的起伏变化. 光谱分布在抽运波长两边,覆盖了 740~1 490 nm 的 750 nm 波长范围,相对光强变化在 30 dB 以内. 图中光强最大的峰值是抽运峰,靠近抽运峰两边的小峰,位置分别在 1 037 nm 和 1 106 nm,是调制不稳定性 (Modulation Instability, MI) 的最大增益峰. 抽运峰左边的短波部分是四波混频作用区,右边是喇曼散射作用区. 可以看出长波部分比短波部分的光强高一点,是因为在反常色散区,自相位调制 (Self-Phase Modulation, SPM) 所形成的频率啁啾和色散形成的频率啁啾同号,使光强增强^[11];而在短波部分是正常色散区,情况相反,这也是光谱容易展宽到长波,不容易展宽到短波的原因. 这种不对称在抽运功率更高时将表现的更加明显.

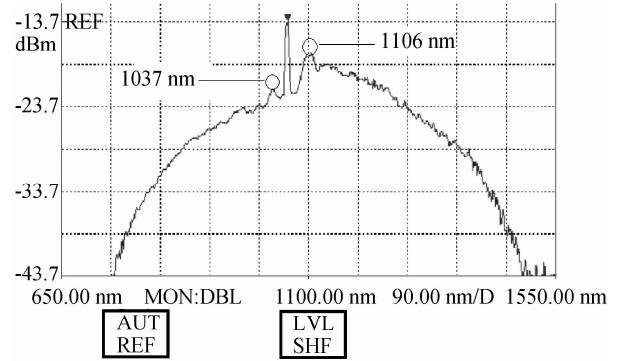


图 3 1.8 mPCF 得到的平均功率 1.15 W 的 SC

Fig. 3 SC of 1.15 W time averaged power from 1.8 m PCF

图 4 是相同条件下的模拟结果,由图可见其与实验符合很好. 1 062 nm 处的最高峰是抽运峰,在它两边的两个峰是 MI 最大增益峰 (图中小圈标出). 长波部分的强度比短波部分强度高一些.

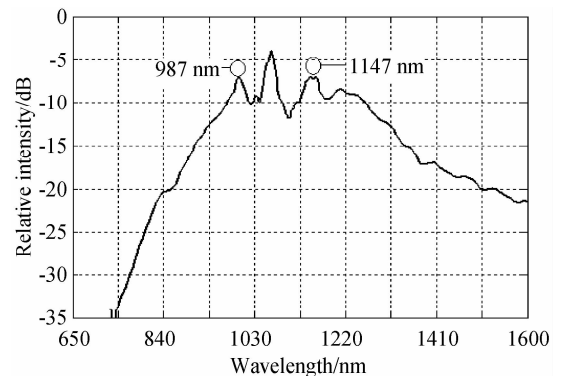


图 4 相同参数下模拟所得 SC

Fig. 4 SC from simulation under the same parameters

由本文的模拟和实验可知,亚纳秒脉冲抽运 1.8 m PCF 产生 SC 时, MI 效应起了重要作用. MI 的增益为

$$g(\Omega) = 2\text{Im}(K) = |\beta_2 \Omega| (\Omega_c^2 - \Omega^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$\Omega_c^2 = 4\gamma P_0 / |\beta_2| \quad (2)$$

它的增益谱关于频率 $\Omega = 0$ 对称,在此处 $\Omega = 1 062$ nm. 增益谱在下式给出的两个频率处具有最大值

$$\Omega_{\max} = \pm \frac{\Omega_c}{\sqrt{2}} = \pm \left(\frac{2\gamma P_0}{|\beta_2|} \right)^{1/2} \quad (3)$$

增益为

$$g_{\max} = g(\Omega_{\max}) = \frac{1}{2} |\beta_2| \Omega_c^2 = 2\gamma P_0 \quad (4)$$

由实验中的非线性系数 $\gamma = 11 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$, 和峰值功率 $P_0 = 2 018$ W, 以及二阶色散 $\beta_2 = -2.543 9 \text{ ps}^2/\text{km}$, 计算出它的最大增益峰值在 987 nm 和 1 147 nm 处,与模拟结果位置一样,但它们离抽运峰的距离却比实验中的距离远一点,这是因为模拟时忽略了损耗影响,但在实际传输中,随着传输距离的增加,损耗会使峰值功率逐渐降低,导致 MI 增益减小,且最大增益峰的波长位置向抽运峰移动^[11]. 损耗的影响

可以由式(5)给出

$$\Omega'_{\max} = \Omega_{\max} \times \exp(-az/2) \quad (5)$$

式中 $z = 1.8 \text{ m}$, 损耗系数 a 选择较大的 0.3 dB/m (300 dB/Km), 代入的损耗导致 24% 的频移, 相应的波长移动约 20 nm . 另外喇曼效应也会使增益峰有 9.9% 的频移, 相应的波长位置移动约 8 nm . 抽运峰的强度比其它谱段强度高很多, 说明抽运光没有完全激发非线性效应, 这是光纤太短的原因, 另外如果增加抽运功率也能激发更多的非线性效应.

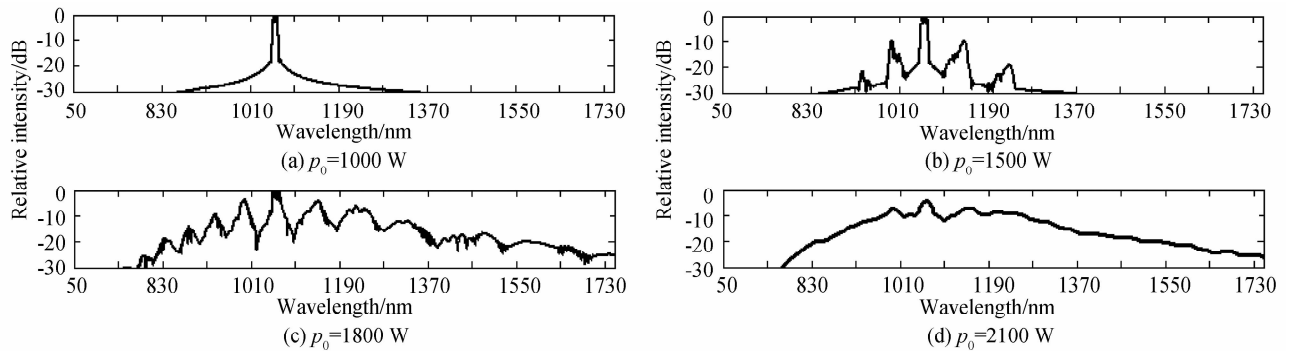


图 5 不同峰值功率下 1.8 m PCF 输出的 SC

Fig. 5 SC from 1.8 m PCF under different peak power

2.2 不同功率下 SC 的变化

在不同抽运功率下, 超连续谱的变化如图 6. 图中标记功率是 SC 的输出功率, 从 $0.3 \sim 1 \text{ W}$, 每 0.1 W 记录一次. 输出功率随抽运功率的增加而增加, 1 W 输出功率对应的是 4.8 W 的输入功率, 转换效率在 20% 以上. 可以看出超连续谱的覆盖波段随着功率的增加而变宽. 在低功率时, 光谱宽度变化不太显著, 而 $700 \text{ mW} \sim 1 \text{ W}$ 输出时的光谱宽度变化较为明显, 尤其是 1 W SC 的光谱比 900 mW SC 光谱宽度增加了 240 nm . 这是因为当抽运功率提高时, 激发了更强的 MI 等非线性效应, 使 MI 效应导

致.

为了更好的了解 MI 效应对 SC 产生的影响, 图 5 给出了不同峰值功率下产生 SC 的模拟图. 由图可以看出, 在功率增加的过程中, 出现了许多对称的旁瓣, 这是 MI 增益峰, 旁瓣的出现使光谱增加了新的频率成分, 在功率增加到一定程度后, 这些新的频率成分越来越多, 并且随着其它非线性效应的作用连成一片, 得到展宽的平滑光谱.

致的脉冲分裂更早进行, 分裂后的窄脉冲 (飞秒级)^[7] 其光谱更容易展宽, 因此会有大幅度的增宽现象. 另外, 随着功率的提高, 抽运峰强度与其他波段强度的差值越来越小, 这说明有更多的抽运光能量通过非线性效应转移到了其它波段, 转化效率提高. 随着抽运功率的提高, SC 输出功率一直增加, 其光谱也一直在变宽, 说明还未达到饱和展宽阶段^[4], 还有进一步提高功率和展宽光谱的空间. 因此如果能进一步提高输入功率, 用亚纳秒脉冲抽运 PCF 产生更高功率的 SC 是完全可能的.

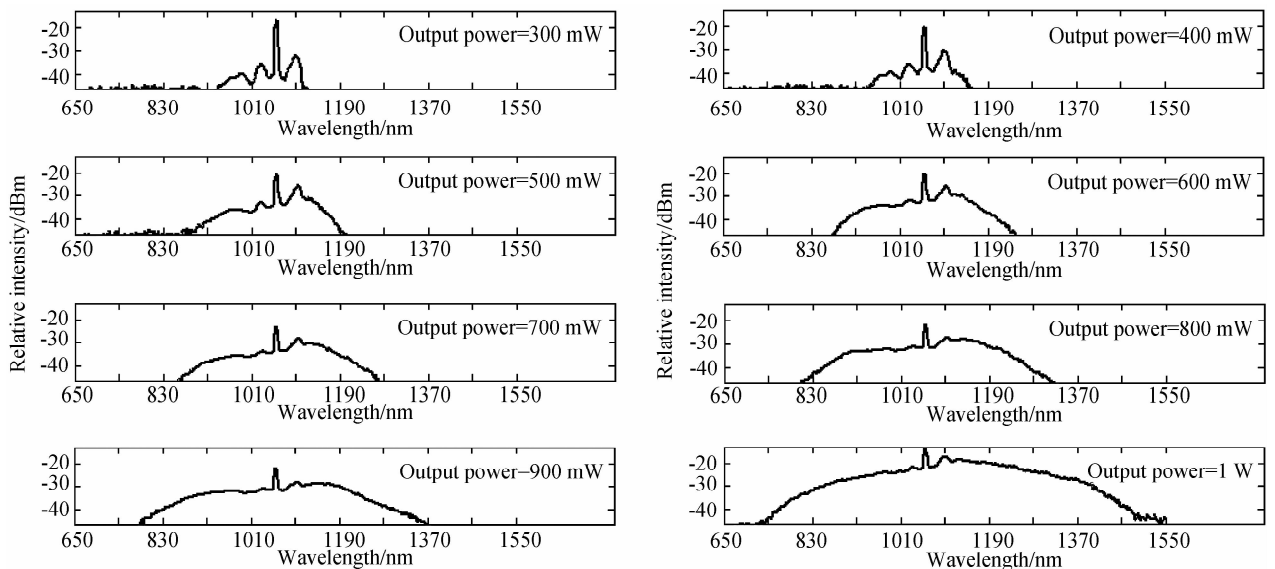


图 6 不同抽运功率下 1.8 m PCF 输出的 SC

Fig. 6 SC from 1.8 m PCF under different pump power

3 结论

使用掺镱锁模光纤激光器产生并经过多级放大的 570 ps 脉冲注入 1.8 m PCF 光纤,得到功率为 1.15 W 覆盖波段为 750 nm 的超连续谱.通过实验结果和模拟结果的比较,发现亚纳秒脉冲抽运 1.8 m PCF 产生 SC 时,MI 效应起了重要作用.

在研究了不同抽运功率下输出的 SC 变化后,发现随着抽运功率的提高,输出功率也更高且 SC 覆盖波段也更宽,一直未达到饱和展宽状态,因此还有进一步提高功率和展宽光谱的空间.

参考文献

- [1] WANG Zhi-guang, ZENG Zhi-nan, LI Ru-xin, *et al.* Measurement of Gouy Phase Shift by Supercontinuum Spectral Interference [J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, **27**(10): 1905-1908.
王之光,曾志男,李儒新,等.超连续谱干涉方法测量古依相移 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1905-1908.
- [2] GENTY G, KIBLER B, Kinsler P, *et al.* Harmonic extended supercontinuum generation and carrier envelope phase dependent spectral broadening in silica nanowires [J]. *Opt Express*, 2008, **16**(15): 10886-10893.
- [3] HILLIGSØE K M, PAULSEN H N, THØGERSEN J, *et al.* Initial steps of supercontinuum generation in photonic crystal fibers [J]. *JOSA B*, 2003, **20**(9): 1887-1893.
- [4] LIU Wei-hua, SONG Xiao-zhong, WANG Yi-shan, *et al.* Experimental re search of supercontinuum generation by femto second pulse in highly nonlinear photonic crystal fiber [J].

Acta Phys Sin. 2008, **57**(2): 917-922.

刘卫华,宋啸中,王屹山,等.飞秒激光脉冲在高非线性光子晶体光纤中产生超连续谱的实验研究 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 917-922.

- [5] LI Xiao-qing, ZHANG Shu-min, LI Dan, *et al.* Experimental and numerical study of supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1805-1809.
李晓青,张书敏,李丹,等.光子晶体光纤中超连续谱产生的理论与实验研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1805-1809.
- [6] YU Yong-qin, RUAN Shuang-chen, DU Chen-lin, *et al.* Spectral broadening in the 1.3 μm region using a 1.8-m-long photonic crystal fiber by femtosecond pulses from an optical param etric amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 481-484.
- [7] KUMAR M, XIA C, MA X, *et al.* Power adjustable visible supercontinuum generation using amplified nanosecond gain-switched lase diode [J]. *Opt Express*, 2008, **16**(9): 6194-6201.
- [8] MUSSOT A, BEAUGEOIS M, BOUAZAOUI M, *et al.* Tailoring CW supercontinuum generation in microstructured fibers with two-zero dispersion wavelengths [J]. *Opt Express*, 2007, **15**(18): 11553-11563.
- [9] MOSELUND P M, FROSZ M H, THOMSEN C L, *et al.* Back-seeding of higher order gain processes in picosecond supercontinuum generation [J]. *Opt Express*, 2008, **16**(16): 11954-11968.
- [10] ROY A, LEPROUX P, ROY P, *et al.* Supercontinuum generation in a nonlinear Yb-doped, double-clad, microstructured fiber [J]. *JOSA B*, 2007, **24**(4): 788-791.
- [11] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. 3rd ed. America: Academic Press, 2001.

Watt Level Supercontinuum Generated by Sub-nanosecond Pulse Pumping in Photonic Crystal Fiber

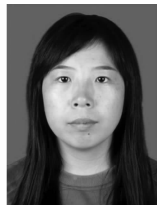
FANG Ping^{1,2}, YANG Zhi¹, WANG Yi-shan¹, ZHAO Wei¹, ZHANG Ting^{1,2}, LI Cheng¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To research the mechanism of high power supercontinuum generation by sub-nanosecond pulse pumping photonic crystal fiber (PCF), a 1.8 m PCF is pumped by 570 ps pulses from a Yb-doped mode-locked fiber laser, and it puts out SC (supercontinuum) with 1.15 W power and 750 nm spectral coverage. It is verified that when SC is generated by sub-nanosecond pulse pumping 1.8 m PCF, the modulation instability (MI) takes an important part in expanding spectrum via comparing and analyzing the experiment with simulation. After researching the change of SC under different pump power, it is found that the power of SC increases and the spectral coverage expands with the pump power. Under watt power output, it still does not reach saturated section, and be probable to get higher power and broader spectrum.

Key words: Sub-nanosecond; Super-continuum; Modulation instability; Photonic crystal fiber



FANG Ping was born in 1983. Now she is working towards the M. S. degree at State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her research interests focus on nonlinear optics in photonic crystal fibers and supercontinuum generation by sub-nanosecond pulse.