

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^{*}

刘卫华^{1,2)†} 宋啸中²⁾ 王屹山²⁾ 刘红军²⁾ 赵 卫²⁾
刘雪明²⁾ 彭钦军³⁾ 许祖彦³⁾

1) 武汉工业学院数理科学系, 武汉 430023)

2) 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)

3) 中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

(2007 年 5 月 9 日收到, 2007 年 6 月 7 日收到修改稿)

使用钛宝石激光器抽运一根长 1 m 的高非线性光子晶体光纤, 获得的超连续谱波长覆盖范围为 420—1700 nm, 输出功率为 170 mW, 转换效率在 20% 以上, 对实验结果给出了详细的分析, 并与理论模拟结果相比较, 认为超连续谱产生的主要原因是高阶孤子的分裂和四波混频效应. 同时研究了不同抽运功率和不同抽运波长下超连续谱产生的情况, 发现对同一根光纤, 抽运功率由小到大变化时, 可将输出的光谱分为初始展宽, 剧烈展宽和饱和展宽三个阶段, 当输出的光谱处于初始展宽和饱和展宽阶段时, 都会存在一定的抽运残留, 当输出的光谱处于剧烈展宽时, 转换效率最高, 当抽运波长位于光纤的反常色散区时, 得到的超连续谱要远宽于位于零色散波长处的情况, 但光谱形状却很相似. 这些结论对于超连续谱系统的优化设计与控制具有重要意义.

关键词: 光子晶体光纤, 超连续谱, 高阶孤子, 反常色散区

PACC: 4265, 4280M, 4265S

1. 引 言

超连续谱(supercontinuum, SC)是一种非常重要的光源, 相对于其他白炽灯、ASE 等光源来说具有亮度高、光谱宽等特点, 广泛应用于生物医学、光计量学、光通信等诸多领域. 1970 年 Alfano 等人^[1]使用倍频锁模皮秒激光脉冲抽运 BK47 玻璃, 首次获得了 400—700 nm 的 SC, 1994 年 Morioka 等人^[2]首次在光纤中获得了约 200 nm 宽的 SC, 由于光纤与其他介质相比具有作用长度易控制, 产生 SC 阈值功率低等优点, 引起了人们的广泛关注. 与此同时, 光纤技术也在迅速发展, 1996 年诞生了第一根光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)^[3], 它不仅支持全波段的单模传输, 而且可使零色散波长(zero dispersion wavelength, ZDW)向短波方向移至 500—700 nm 处, 同时还可以具有很高的非线性系数和双折射特

性^[4—8], 这些特性都有利于 SC 的产生. 2000 年 Ranka 等人^[9]使用钛宝石激光器输出的超短脉冲, 输入到一段 75 cm 长的 PCF 中, 首次观察到了 400—1600 nm 的 SC, 其宽度远远超过了以往所有光纤和其他介质, 此后越来越多的报道显示 PCF 在 SC 产生方面具有良好的研究前景^[10—13]. 但由于 PCF 中产生 SC 是一个非常复杂的过程, 研究 SC 产生机理与动态特性并进行有效谱控制(如实现超宽带、高平坦度)是目前研究的热点之一^[14, 15].

本文使用美国光谱物理公司的 Maitai 钛宝石可调谐激光器抽运一根长 1 m 的高非线性保偏光子晶体光纤, 获得了输出功率为 170 mW, 波长覆盖范围为 420—1700 nm 的 SC, 其光谱强度变化在 10 dB 以内的光谱宽度约 900 nm, 转换效率为 20% 以上, 对实验结果给出了详细的分析, 并与理论模拟结果相比较. 同时还研究了不同抽运功率及反常色散区不同抽运波长下 SC 产生情况.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60408002, 60537060)资助的课题.

[†] E-mail: liuwshy@126.com

2. 实验装置及基本理论

飞秒光脉冲在高非线性 PCF 中产生 SC 的实验装置如图 1 所示, 钛宝石激光器经光隔离器后, 使用一个偏振片调节其偏振态, 然后采用非球面镜耦合到 PCF 中, 最后输入到光谱分析仪中检测, 光脉冲在进入光纤前后的功率可用功率计测出.

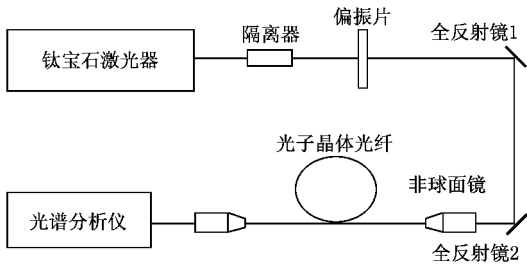


图 1 实验装置示意图

实验所用的激光器是美国光谱物理公司的 Maitai 钛宝石可调谐激光器, 输出脉冲为高斯型, 脉冲宽度为 80 fs, 光谱带宽 12 nm, 可调谐范围为 750—850 nm, 输出最大功率为 1.1 W, 脉冲的重复频率为 80 MHz. 所用的 PCF 由丹麦 Crystal Fibre 公司生产, 是一种非线性保偏 PCF, 纤芯直径为 1.8 μm , 长度为 1 m, 具有两个 ZDW, 分别为 750 nm 和 1260 nm, 其色散和损耗曲线如图 2 所示, 在 780 nm 处的非线性系数为 $95 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 损耗小于 0.05 dB/m, 但在 1400 nm 左右和 1500 nm 左右损耗较大. 实验时必须将 PCF 放在三维精密调整架上, 这样便于调节以获得最高的耦合效率. 光谱分析仪的测量范围是 350—1750 nm, 测量精度最高达 0.06 nm.

PCF 中产生的 SC 比传统光纤中要宽得多, 其形成机理与传统光纤也有很大不同^[16], 目前普遍认为

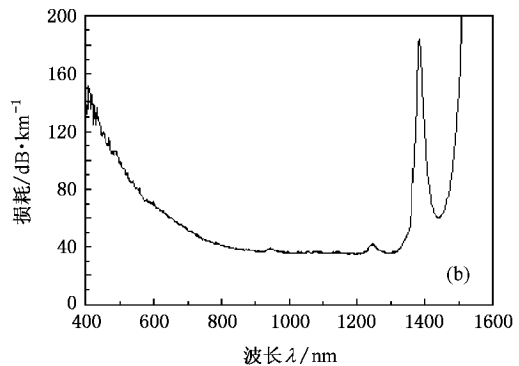
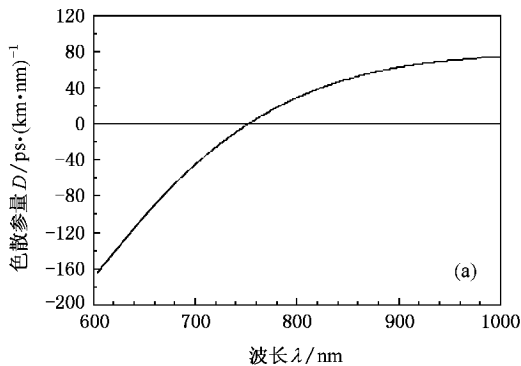


图 2 实验中所用 PCF 的色散曲线 (a) 和损耗曲线 (b)

SC 形成的主要原因是高阶孤子的分裂和四波混频效应^[17,18], 二阶色散与自相位调制产生的啁啾异号, 能够形成高阶孤子, 但由于高阶色散及高阶效应的影响, 这些高阶孤子并不稳定, 很快就发生分裂, 形成几个基孤子辐射 (SR), 此时将会有多余的能量放出, 这些多余的能量将会形成一些峰值, 即蓝光非孤子辐射 (NSR), 二者之间有着相位匹配关系^[19]:

$$\Delta\phi = \phi_{\text{SR}} - \phi_{\text{NSR}} = 0,$$

其中

$$\phi_{\text{SR}} = \frac{n(\omega_{\text{S}})\omega_{\text{S}}}{c}z - \frac{\omega_{\text{S}}}{v_{\text{S}}}z + \frac{n_2 I_0 \omega_{\text{S}}}{c}z, \quad (1)$$

$$\phi_{\text{NSR}} = \frac{n(\omega_{\text{NSR}})\omega_{\text{NSR}}}{c}z - \frac{\omega_{\text{NSR}}}{v_{\text{S}}}z, \quad (2)$$

这里 $n(\omega)$ 为折射率系数, z 是传播距离, v_{S} 为孤子抽运波的群速度, I_0 为抽运光强 (1) 式中右边第三项表示由抽运脉冲引起的自相位调制.

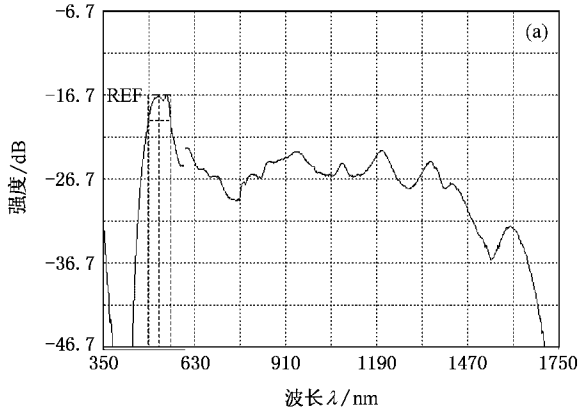
3. 实验结果及分析

3.1. 典型的实验及模拟结果

图 3(a) 是一个典型的实验结果, 选取抽运波长为 800 nm, 抽运功率为 870 mW 的光脉冲, 输入到前文给出的 PCF 中, 得到的 SC 波长覆盖范围为 420—1700 nm, 超过了 2 个倍频程, 输出功率为 170 mW, 转换效率约为 20%. 从图 3(a) 中可以看出在 500 nm 左右有几个非常明显的峰, 即是非孤子辐射, 其强度超过了其他所有的频谱分量, 而在 1080, 1200, 1350 和 1420 nm 左右存在 4 个峰值, 就是孤子分裂后的基孤子辐射峰, 由于在分裂后会发生四波混频效应, 能量已向其他频谱分量上转移, 所以其强度并不是特别高. 如果要更好地观察孤子辐射与非孤子辐射, 必须

使 SC 在没有发生四波混频效应前就输出。

从图 3(a)中还可以观察到,在 750 和 1260 nm 左右分别有两个较大的下陷,这刚好是 PCF 的两个



ZDW 由于在 ZDW 两边脉冲传输的群速度不同,使得零色散附近两边存在一定的光谱带隙,抽运波长离 PCF 的 ZDW 越远 ZDW 附近的光谱带隙就越明显。

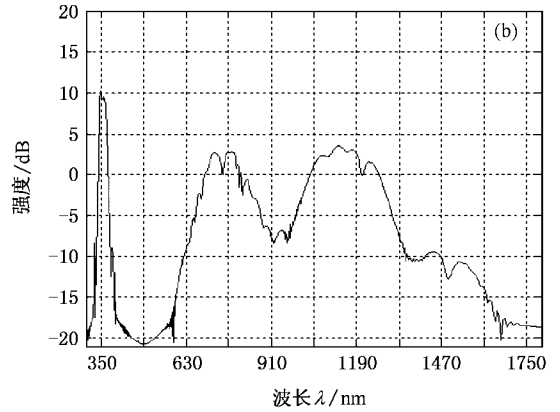


图 3 典型的 SC 产生的实验结果(a)和模拟结果(b) 抽运波长为 800 nm 脉冲宽度 80 fs 输入功率为 850 mW 输出功率为 170 mW

图 3(b)是采用分步傅里叶的方法数值求解广义非线性薛定谔方程,得出的模拟结果,与实验结果相比较,基本特征峰值个数相符,位置也基本对应,在 350 nm 处有一个相对强度为 30 dB 的非孤子峰,700—800 nm 处是抽运峰,其中在 750 nm ZDW 处存在一个下陷,这与实验结果一致,在 1060,1120,1180 和 1220 nm 左右有 4 个不太明显的基孤子峰,这些基孤子峰的波长比实验结果都要小些.此外模拟结果相对实验结果平坦度较差,在 500 和 900 nm 周围有 2 个很大的凹陷,这主要是因为,在计算时没有考虑四波混频效应,而在实际中,由于四波混频效应的作用,会使能量向低能量的频谱分量上转移,最终使 500 和 900 nm 两处下陷变得很平坦。

总之,该实验所得的光谱宽度超过了 1400 nm,光谱的平坦度也很好,强度变化在 10 dB 以内,光谱约占 900 nm,转换效率也较高,超过了 20%,理论模拟能够反映其基本特征,但也存在一定缺陷。

3.2. 不同抽运功率下 SC 的产生

本文还研究了不同抽运功率下 SC 产生的情况,结果如图 4 所示,在文献[20]中,根据光纤长度将 SC 的展宽分为初始展宽、剧烈展宽和饱和展宽三个阶段,对于同一根光纤,在不同的抽运功率下,也可以将其输出情况分为初始展宽、剧烈展宽及饱和展宽三个阶段,这能够很好地解释我们的实验结果。

当抽运功率较小时,输出的 SC 处于光谱的初始展宽阶段,实验发现当输入抽运功率为 240 mW,输出功率为 90 mW,而当输入抽运功率为 260 mW

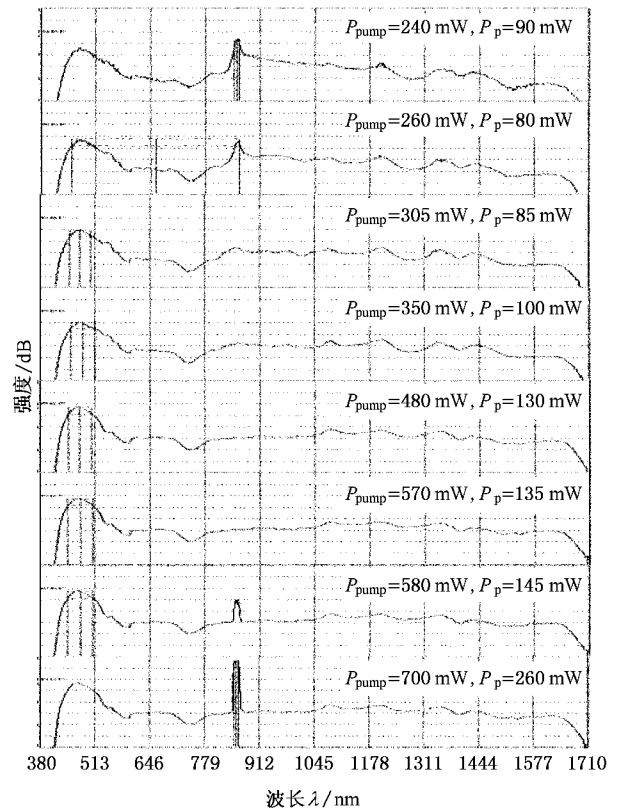


图 4 不同抽运功率下的实验结果 输入脉冲光的中心波长为 850 nm 脉冲宽度为 80 fs 重复频率 80 MHz

时,输出功率却只有 80 mW.按常理在一定的转换效率下,抽运功率越高,输出的 SC 功率也越大,但由于光谱处于初始展宽阶段,部分功率没起作用就直接输出,在 90 mW 的脉冲光中抽运残留要比 80 mW 的脉冲光大很多,根据后面的数据推算,此次实验的

转换效率约为 27% ,在 90 mW 中还有大约 25 mW 属于抽运功率 ,SC 光功率为 65 mW ,而在输出功率为 80 mW 时 ,只有 10 mW 为抽运残留 ,输出的 SC 光功率为 70 mW ,所以在初始展宽阶段 ,抽运的利用率不高 ,得到的 SC 也不是很宽。

当抽运功率在 305—570 mW 时 ,输出的 SC 处于剧烈展宽阶段 ,从图 4 中可以看出 ,当抽运功率分别为 305 ,450 ,480 和 570 mW 时 ,其输出功率分别为 85 ,100 ,130 和 135 mW ,在这一阶段增加抽运功率 ,相应光谱宽度也会增加 ,同时输出功率也会成比例增长 ,根据实验中给出的输入和输出功率计算 ,发现其转换效率都在 27%—28% 之间 .在实验结果中也观察不到明显的抽运残留 ,说明这一阶段抽运利用率最高。

当抽运功率继续增加时 ,输出的 SC 处于饱和展宽阶段 ,这时增加抽运功率 ,SC 的光谱宽度将不再增加 ,图 4 中给出了抽运功率分别为 580 和 700 mW 的情况 ,与输入功率为 570 mW 的情况比较 ,增加 10 mW 的抽运功率 ,就增加 10 mW 的输出功率 ,增加 130 mW 的抽运功率 ,对应也增加 130 mW 左右的输出功率 ,说明此时增加的抽运功率完全没有起作用 .所以当输出 SC 处于饱和展宽阶段时 ,增加抽运功率并不利于 SC 的产生。

由前面的分析可以得出结论 :对同一根光纤 ,根据抽运功率大小 ,可将输出的 SC 分成初始展宽、剧烈展宽及饱和展宽三个阶段 ,功率太小 ,处于初始展宽阶段 ,光谱不能展得很宽 ,而且会存在一定的抽运残留 ,抽运的有效利用率不是很高 ;功率太高 ,SC 处于饱和展宽阶段 ,增加抽运功率并不能使光谱宽度增加 ,因此抽运的有效利用率也不是很高 ;只有选择合适的功率 ,使 SC 处于剧烈展宽阶段时 ,才能充分利用抽运功率 ,获得很宽的 SC ,这为选择合适的功率进行光谱控制提供了重要的依据。

3.3. 不同抽运波长的影响

本文还研究了不同抽运波长下 SC 产生的情况 ,结果如图 5 所示 ,选取抽运波长分别为 750 ,760 ,780 ,800 ,810 ,830 和 850 nm ,钛宝石激光器的抽运功率为 640 mW ,当抽运波长位于 750 nm 时 ,刚好位于光纤的 ZDW 处 ,得到的光谱宽度只有 800 nm 左右 ,随着抽运波长的增加 ,光谱宽度也在逐渐增加 ,说明当抽运波长位于光纤反常色散区时 ,离 ZDW 越远 ,光谱展的越宽 ,这主要是因为离 ZDW 越远 ,二阶色

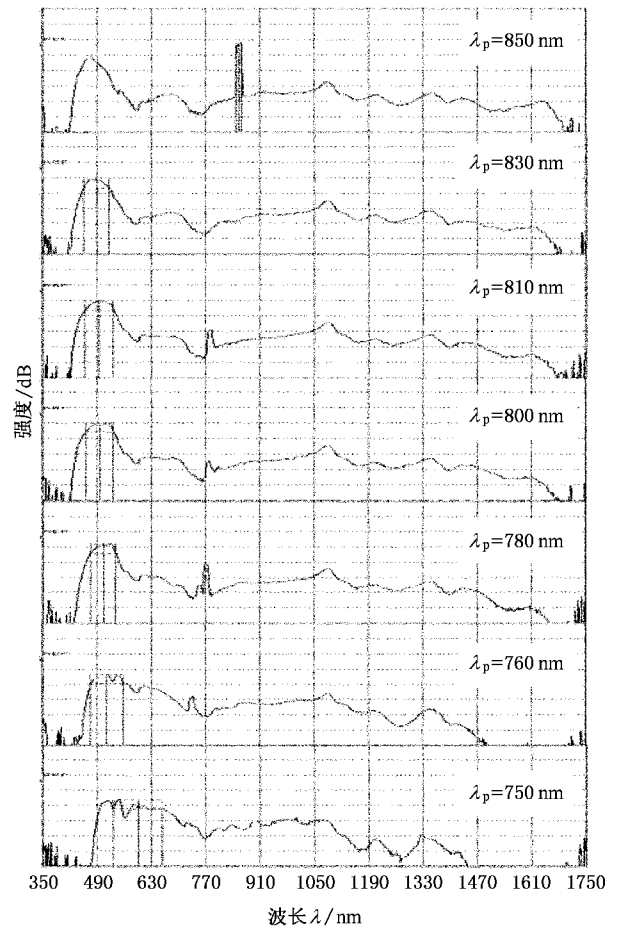


图 5 不同抽运波长下的实验结果 输入脉冲光功率为 640 mW

散越大。

与位于光纤反常色散区相比 ,抽运波长位于光纤 ZDW 处 ,其光谱宽度要窄得多 ,但从图中 5 可以看出最终的光谱形状与反常色散区得出的结果很相似 ,这主要是因为 ,在 ZDW 处 ,由于二阶色散为零 ,不能直接形成高阶孤子 ,首先必须依靠自相位调制将光谱展到反常色散区 ,然后才能形成高阶孤子并发生分裂 ,最后发生四波混频效应 ,所以最后得出的光谱比较窄 ,但是形状和反常色散区的结果相似 .所以要获得较宽的光谱 ,应使抽运波长位于反常色散区 ,离 ZDW 稍远的地方。

4. 结 论

使用美国光谱物理公司的 Maitai 钛宝石可调谐激光器抽运一根长 1 m 的高非线性保偏光子晶体光纤 ,获得光谱宽度超过了 1400 nm ,光谱的平坦度较好 ,强度变化在 10 dB 以内 ,光谱约 900 nm ,转换效率超过了 20% ,反常色散区 SC 主要由高阶孤子的分

裂和四波混频效应产生,其中在 500 nm 左右的几个峰值是非孤子辐射的结果,对应的基孤子辐射峰为 1080,1200,1350 和 1420 nm,在 750 和 1260 nm 两个 ZDW 处 SC 存在两个带隙,这是由于在 ZDW 两边脉冲传输的群速度不同引起的.理论模拟反映了 SC 的基本特征,但在 500 和 900 nm 周围有两个很大的下陷,这主要是因为,在计算时没有考虑四波混频效应,而在实际中,由于四波混频效应的作用,会使能量向其低能量的频谱分量上转移,最终形成平坦的超连续谱.

本文还研究了不同抽运功率和反常色散区不同抽运波长下 SC 产生的情况,对同一根光纤,根据抽运功率大小,可将输出的 SC 分成初始展宽、剧烈展宽及饱和展宽三个阶段,功率太小或过大,输出 SC

处于初始展宽阶段或饱和展宽阶段,都会存在一定的抽运残留,抽运的有效利用率不是很高,只有选择合适的功率,使 SC 处于剧烈展宽阶段时,才能充分利用抽运功率,获得很宽的 SC.

当抽运脉冲位于光纤的反常色散区时,离 ZDW 越远,光谱展得越宽.与位于光纤反常色散区相比,抽运波长位于光纤 ZDW 处,其光谱宽度要窄得多,但其最终的光谱形状与反常色散区得出的结果却很相似,这主要是因为,在 ZDW 处,不能直接形成高阶孤子,首先必须依靠自相位调制将光谱展到反常色散区,然后才发生与抽运波长位于反常色散区时相同的过程,由于多了这一过程,所以光谱较窄,但光谱形状却很相似.这些结论对于超连续谱系统的优化设计与控制具有重要意义.

- [1] Alfano R R , Shapiro S L 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 584
- [2] Morioka T , Mori K , Saruwatari M *et al* 1995 *IEEE. Transactions on Instrumentation and Measurement* **44** 712
- [3] Knight J C , Briks T A , Russell P St J *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [4] Ranka J K , Robert S W , Stentz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 25
- [5] Knight J C 2003 *Science* **296** 276
- [6] Li S G , Liu X D , Hou L T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2811 (in Chinese) [李曙光、刘卫东、侯蓝田 2003 物理学报 **52** 2811]
- [7] Petropoulos P , Ebendorff H E , Finazzi V F *et al* 2003 *Opt. Express* **11** 3568
- [8] Monro T M J 1999 *Lightwave Technology* **17** 1093
- [9] Ranka J K , Windeler R S , Stentz A J *et al* 2003 *Opt. Lett.* **25** 25
- [10] Blanch A , Knight J C , Russell P St J 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2567
- [11] Wadsworth W J , Blanch A , Knight J C *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2148
- [12] Li S G , Ji Y L , Zhou G Y , Hou L T , Wang Q Y , Hu M L , Li Y F , Wei Z Y , Zhang J , Liu X D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 478 (in Chinese) [李曙光、冀玉领、周贵耀、侯蓝田、王清月、胡明列、栗石峰、魏志义、张军、刘卫东 2004 物理学报 **53** 478]
- [13] Yan P G , Ruan S C , Lin H J *et al* 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1093
- [14] Srivastava A , Goswami D 2003 *Appl. Phys. B* **77** 325
- [15] Austin D R , Bolger J A , Sterke C M *et al* 2006 *Opt. Express* **14** 13412
- [16] Chen Y Z , Li Y Z , Qu G *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 717 (in Chinese) [陈泳竹、李玉忠、屈圭等 2006 物理学报 **55** 717]
- [17] Husakou A V , Herrmann J *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2171
- [18] Herrmann J , Griebner U , Zhavoronkov N *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 173901
- [19] Hilligsoe K M , Paulsen H N , Thogersen J *et al* 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1887
- [20] Liu W H , Wang Y S , Liu H J *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1815 (in Chinese) [刘卫华、王屹山、刘红军等 2006 物理学报 **55** 1815]

Experimental research of supercontinuum generation by femtosecond pulse in highly nonlinear photonic crystal fiber^{*}

Liu Wei-Hua^{1,2)†} Song Xiao-Zhong²⁾ Wang Yi-Shan²⁾ Liu Hong-Jun²⁾ Zhao Wei²⁾
Liu Xue-Ming²⁾ Peng Qin-Jun³⁾ Xu Zu-Yan³⁾

¹ *Department of Mathematics and Physics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China*

² *State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics
and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*

³ *Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

(Received 9 May 2007; revised manuscript received 7 June 2007)

Abstract

We pumped a 1m long highly nonlinear photonic crystal fiber by a Ti : sapphire laser and generated a supercontinuum with the wavelength extension from 420—1700 nm, of which the output power was about 170 mW and we conversion efficiency was above 20%. The experiment result was particularly analyzed and compared with calculated result, and we consider the main reasons of supercontinuum generation was fission of high-order solitons and four-wave mixing. We also researched the supercontinuum generation under different pump power and wavelength conditions. With the pump power increased gradually in the same fiber, the output spectrum can be divided into initial broadening stage, dramatic broadening stage and saturation broadening stage. When the output spectrum is in the initial broadening stage or saturation broadening stage, there exists some residual pump, when the output spectrum is in the dramatic broadening stage, the highest conversion efficiency is obtained. When the pump wavelength is in the anomalous dispersion region of the fiber, the spectrum width is far broader than that in the zero dispersion region, but the shapes of the spectra are very similar. These conclusions provide valuable reference for supercontinuum system optimization and control.

Keywords : photonic crystal fibers, supercontinuum, high-order solitons, anomalous dispersion region

PACC : 4265, 4280M, 4265S

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60408002, 60537060).

[†] E-mail: liuwhsy@126.com