

在色散渐减光子晶体光纤中产生超连续谱的实验研究

祝贤 张心贲 陈翔 彭景刚 戴能利 李海清 李进延[†]

(武汉光电国家实验室, 华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2012年9月29日收到; 2012年11月28日收到修改稿)

本文利用非线性偏振锁模激光器产生的重复频率 50 MHz, 脉宽为 1.8 ps 的脉冲分别抽运外径均匀和色散渐减两种高非线性光子晶体光纤, 在三阶非线性效应(自相位调制、交叉相位调制、四波混频和受激拉曼散射效应等)和色散共同作用下得到扩展至蓝光部分的超连续谱. 模拟了光谱在色散渐减光纤和均匀光纤中的展宽过程, 通过对比均匀光纤发现色散渐减光纤在调控色散, 加强拉曼孤子和色散波的群速度匹配条件, 产生超宽带光谱方面具有很大优势. 实验利用 20 m 长的色散渐减光纤, 得到了 406.1 至 671.8 nm 的可见光波段增强的较为平坦的超连续谱.

关键词: 超连续谱, 色散渐减光子晶体光纤, 群速度匹配, 非线性效应

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 81.05.Ni

DOI: 10.7498/aps.62.094217

1 引言

超连续谱(SC)产生现象是指超短脉冲在非线性介质中传输时由于非线性效应导致光谱被极大的展宽. 光子晶体光纤(PCF)又叫做微结构光纤, 是具有传统光纤所无法比拟的特殊光学特性, 如增强光学非线性、可控色散以及无截止单模等特性, 是产生SC的一种有效的介质^[1]. 2000年 Ranka 等^[2]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^[3-6]. 利用 PCF 产生 SC, 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, 其应用前景非常广阔. 其中, 覆盖可见光波段的超连续谱在高分辨率光谱分析仪、荧光寿命成像、光学频率测量、光学相干层析以及光电探测等方面有重要用途, 成为近几年光学测量, 生物医学和军事等领域的一个研究热点. PCF 中 SC 的产生的机理已基本被揭示, 包含了自相位调制, 自陡, 孤子自频移, 高阶孤子形成和分裂^[7], 四波混频(FWM)^[8,9], 交叉相位调制(XPM)

和群速度匹配等^[10]一系列过程. 但是由于 PCF 制备难度大, 实际制作过程中存在诸多不确定因素, PCF 横向微结构周期分布的精密性和纵向均匀性得不到保证, 预期色散特性得不到精确实现, 一定程度上阻碍了 PCF 的研究和应用. 在国内对 PCF 中产生 SC 的实验研究有了长足进步^[11-14], 目前我们掌握的能有效产生覆盖可见光 SC 的主要方法有: 零色散波长(ZDW)渐减的 PCF 解决了由抽运波长决定的光纤色散特性不利于可见光 SC 产生的难题, 成为扩展光谱至蓝光部分的有效手段^[15-19]; 掺杂高折射率氧化物, 不仅可以改变波导结构, 形成有利于可见光的色散特性, 而且为超连续谱提供更高的非线性系数, 提高频率转换效率^[20-22]. 本文根据上述方法对光脉冲在光子晶体光纤中产生超连续谱进行了多种实验研究. 主要内容如下: 皮秒激光器抽运两种纤芯掺 GeO₂ 的光子晶体光纤, 其中一根光纤外径均匀, 另外一种光纤为外径渐减的色散渐减光子晶体光纤. 阐述了色散渐减光纤在调控色散, 加强拉曼孤子和色散波的群速度匹配条件方面的优势.

2 实验装置

激光脉冲抽运 PCF 产生 SC 的实验装置如图 1

[†] 通讯作者. E-mail: ljj@mail.hust.edu.cn

所示. 光脉冲经过保偏光隔离器后, 使用一个半波片调节其偏振态, 使脉冲偏振方向与光纤光轴方向一致, 然后脉冲经非球面镜耦合到 PCF 中, 耦合效率约 20%, 最后输入到光谱分析仪和功率计中检测. 实验中用到重复频率 50 MHz、脉冲宽度为 1.8 ps, 最高平均功率 2 W, 抽运波长 1040 nm 的掺 Yb 光纤激光器. 所用到的纤芯掺 GeO₂ 的外径均匀 PCF 和色散渐减 PCF 均由我们自主设计并拉制.

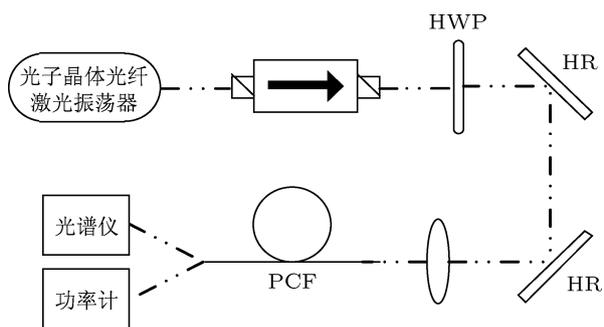


图 1 实验装置示意图

3 实验结果及分析

首先利用脉冲宽度为 1.8 ps、中心波长 1040 nm 的脉冲耦合至长 20 m、ZDW 在 896 nm 的外径均匀 PCF. 光纤的电镜扫描图和模拟得到的色散曲线如图 2 所示. 该光纤的 ZDW 在 896 nm, 纤芯直径 2.5 μm. 图 3 为实验获得的在不同平均功率皮秒激光脉冲作用下产生的超连续光谱. 在不同功率输入时, 光谱随着功率的增加而展宽, 并趋于更加平坦. 在功率增加过程中, 光谱的展宽包含了调制不稳定性、孤子的形成和孤子自频移的现象, 以及在交叉相位调制和四波混频效应下, 光谱趋向平坦. 从图 3 中可以看出, 在低功率 0.2 W 时已经有明显的孤子生成, 短波方向未见明显的色散波生成. 此时 SPM 作用可以忽略, 主要由调制不稳定性促使初始长脉冲逐渐分解为多重超短脉冲, 脉冲宽度由 $T_{MI} = \sqrt{\frac{2\pi|\beta_2|}{\gamma P_0}}$ 确定参量, β_2 表示群速度色散, γ 为非线性系数, P_0 即抽运功率. 这些超短孤子波的时域脉宽通常非常窄, 常会发生脉冲内拉曼散射, 孤子红移, 光谱朝长波方向展宽. 功率增大至 0.6 W 时, 红外波段有了明显的展宽, 同时在可见波段也有一个明显的峰, 即色散波. 高阶孤子分裂为稳定的基孤子的过程中会有一部分能量以色散波的形式存在, 色散波的位置可以由相位匹配条件得到

式存在, 色散波的位置可以由相位匹配条件得到

$$\Delta\beta = \beta(\omega_s) - \beta(\omega_{DW}) - (\omega_s - \omega_{DW})\beta_1(\omega_s) + (1 - f_R) \cdot \gamma P_s = 0, \quad (1)$$

其中 $\beta(\omega_s)$ 和 $\beta(\omega_{DW})$ 分别表示孤子和色散波的传播常数, $f_R = 0.18$ 代表演示拉曼响应对非线性极化的贡献, P_s 为孤子的峰值功率. 从图 3 中可以观察到在 641 nm 和 715 nm 附近都有色散波产生. 当功率继续增大, 孤子继续红移, 高阶色散使其群速度降低, 并逐渐被色散波赶超, 在时域重叠的时候会发生 XPM 和 FWM 作用, 促使部分色散波蓝移. 蓝移过程中色散波速度减慢落后于孤子, 孤子红移过程也同样会经历群速度减小, 直到再次与蓝移色散波相遇, 重复上述过程, 直至孤子由于损耗或光谱反冲停止频移而停止. 这个过程通常称之为群速度匹配 (GVM) 或孤子俘获. 色散波蓝移程度依赖于孤子红移能力. 以功率为 0.6 W 得到光谱为例, 如图 4 所示, 红移最远的孤子和蓝移最远的色散波在群速度上保持一致. 当光谱展宽到一定程度时, 增加功率对光谱的展宽影响越来越小, 如功率从 1.0 W 增大至 1.7 W, 表现在光谱上除了强度的增大, 还有在四波混频的作用下光谱趋于平坦, 但展宽并不明显, 功率至最大 1.7 W 时, 光谱扩展至约 439.4 nm.

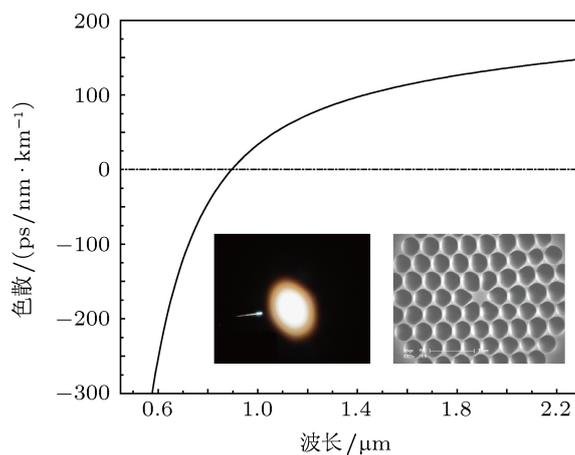


图 2 实验中所用的均匀 PCF 的色散曲线 (右面的插图为端面的电镜扫描图, 左面的插图为光场的远场图)

为了改善群折射率曲线, 降低光纤对近红外光的限制损耗, 实现同样波长下的红移孤子能够与更短波长的色散波满足 GVM, 我们设计了一种色散渐减光纤并模拟对比了光谱在色散渐减光纤和均匀光纤中的展宽情况. 设定激光器中心波长在 1040 nm, 脉宽 ~ 1.7 ps, 色散渐减光纤总长 1.1 m,

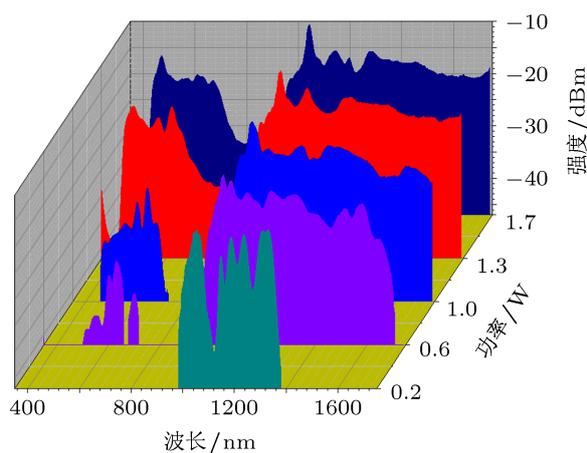


图3 在不同功率的皮秒脉冲输入到外径均匀 PCF 中所获得的超连续光谱

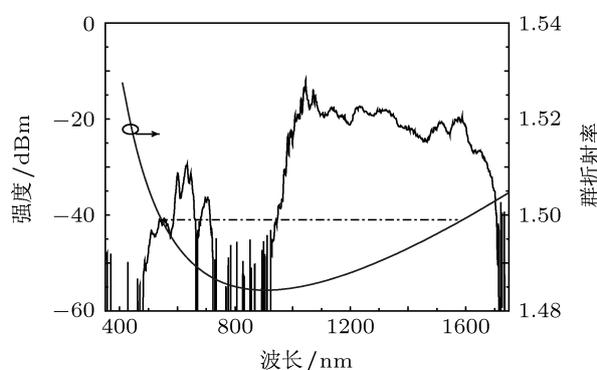


图4 皮秒激光器功率 0.6 w, 在均匀光纤中得到的超连续谱以及该光纤的群折射率曲线 (虚线表示标识的光谱短波边界和长波边界的群速度相同, 满足群速度 (折射率) 匹配)

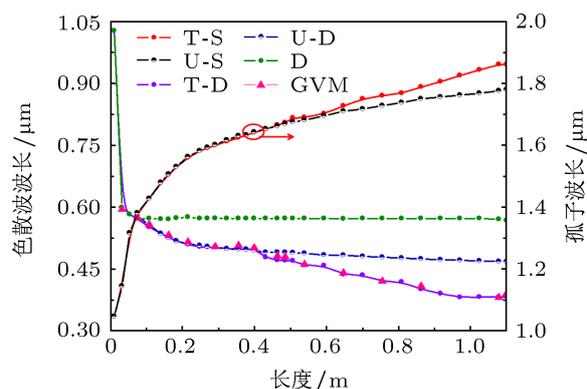


图5 孤子和色散波在色散渐减光纤和均匀光纤中的发展过程 (T-D 和 U-D 分别代表色散渐减光纤中和均匀光纤波长蓝移最多的色散波, T-S 和 U-S 相应代表上述两种光纤中波长红移最远的孤子, D 代表两种光纤中初始阶段生成的色散波, GVM 为色散渐减光纤中与孤子满足群速度匹配的色散波波长)

前 0.4 m 外径均匀约为 120 μm, 后面 0.7 m 光纤的外径以 5 μm 为梯度由 120 μm 减小至 85 μm, ZDW 相应由 890 nm 减小至 778 nm. 均匀光纤长 1.1 m, 外径为 120 μm, ZDW 为 890 nm. 两种光纤的占空比约为 89%. 图 5 为模拟得到的孤子和色散波在色

散渐减光纤和均匀光纤中的发展过程. 由图我们将光谱在色散渐减光纤中的发展过程分为 3 个阶段: 1) 前 0.1 m, 色散波 D 产生, 孤子红移, 群速度减小, 直到它与色散波在时域上重合, 孤子通过 XPM 和 FWM 作用俘获色散波 D 的部分能量; 2) 0.1 m 至 0.4 m, 色散波 D 的位置基本保持不变, 孤子不断红移, 并不断将俘获的色散波蓝移至使其能够与它满足 GVM 的位置, 0.4 m 处色散波蓝移至 477 nm 附近; 3) 0.4 m 以后, 均匀光纤中色散波蓝移并不明显, 而对于色散渐减光纤, 光纤直径不断减小, 孤子速度大幅降低并落后于 477 nm 处的色散波, 破坏了 GVM, 孤子和色散波 XPM 作用长度非常短, 孤子只能俘获部分色散波蓝移至 387.2 nm 附近. 图 6 为最终得到的模拟的光谱图, 色散渐减光纤中的孤子红移的更多, 短波极限更至 382.6 nm, 比均匀光纤中少了 88.9 nm.

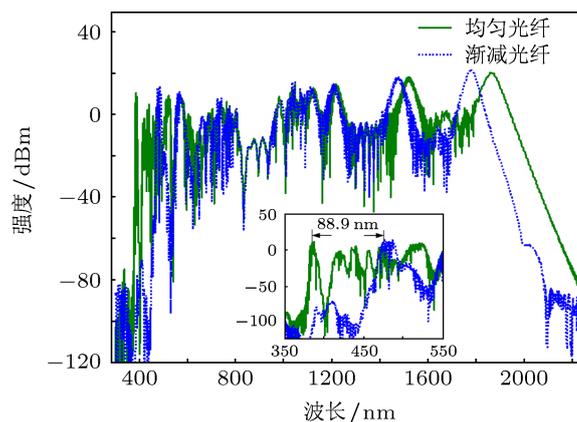


图6 经模拟得到的在均匀光纤和色散渐减光纤中的光谱图

为了验证色散渐减光纤在展宽光谱方面的优越性我们设计并制作了一根色散渐减光纤, 由于制作工艺的限制, 控制的光纤长度为 20 m, ZDW 从 896 nm 均匀减小至 786 nm, 外径由 120 μm 减小至 85 μm, 占空比均约为 89%. 保持与均匀光纤相同抽运条件, 功率 1.3 W 时产生的 SC 如图 7 所示, 光谱延伸至 406.1 nm, 而此功率下均匀光纤中光谱仅仅能够到达 447.8 nm (如图 3 所示). 蓝光部分 406.1—671.8 nm 平坦度约为 10 dB, 这部分光对生物医学荧光成像等有重要应用价值. 色散渐减光纤相对之前的外径均匀的光纤的好处在于在保证高耦合效率的同时又能使色散和非线性系数根据需要而随着光纤外径的减小而相应变化. 和外径均匀的光纤相比, 近红外区的红移孤子群速度减慢, 加强了拉曼孤子和色散波的 GVM 条件, 孤子可以俘获蓝光区域中更短波长的色散波, 充分显示的色散

渐减光纤在扩展光谱方面的优越性.

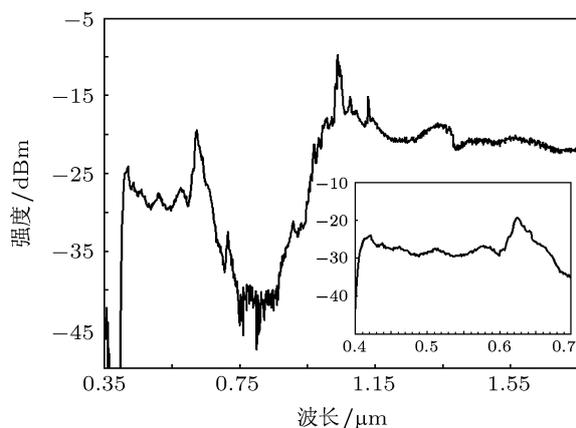


图7 皮秒激光器功率为 1.3 w, 在色散渐减光子晶体光纤中得到的超连续谱

4 结论

实验研究了皮秒脉冲抽运均匀光纤和色散渐

减 PCF 产生 SC, 通过调整脉宽为 1.8 ps 输入脉冲的功率, 在均匀光纤中获得了不同程度展宽的超连续光谱, 在同样宽度的脉冲输入条件下, 能量越高超连续光谱趋向更宽、更平坦. 通过对比模拟得到的色散渐减 PCF 和均匀 PCF 中光谱展宽过程, 我们发现在色散渐减 PCF 外径减小的位置, 孤子减速加剧并在 XPM 作用下俘获更短波长的色散波, 加强了拉曼孤子和色散波的 GVM 条件, 这个过程在色散渐减光纤中产生超宽带连续谱起着至关重要的作用. 最终光谱在色散渐减光纤中扩展至 382.6 nm, 短波极限比均匀光纤少将近 89 nm. 为了验证模拟结果, 我们拉制了色散渐减光纤, 并在其中得到 406.1—671.8 nm 平坦度约为 10 dB 的蓝光, 超出了均匀光纤中能够扩展的光谱的范围, 实验结果表明色散渐减光纤在扩展光谱方面具有较大的优越性.

- [1] Russell P 2003 *science* **299** 358
- [2] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 25
- [3] Roy S, Chaudhuri P R 2009 *Opt. Commun.* **282** 3448
- [4] Tombelaine V, Leproux P, Couderc V, Barthelemy A 2006 *IEEE Photonic Tech L* **18** 2466
- [5] Schreiber T, Andersen T V, Schimpf D, Limpert J, Tunnermann A 2005 *Opt. Express* **13** 9556
- [6] Frosz M H 2006 *Supercontinuum generation in photonic crystal fibres-Modelling and dispersion engineering for spectral shaping* (Denmark: COM, DTU) p3
- [7] Demircan A, Bandelow U 2007 *Appl. Phys. B-Lasers O* **86** 31
- [8] Lesvigne C, Couderc V, Tonello A, Leproux P, Barthelemy A, Lacroix S, Druon F, Blandin P, Hanna M, Georges P 2007 *Opt. Lett.* **32** 2173
- [9] Serebryannikov E E, Zheltikov A M 2007 *Opt. Commun.* **274** 433
- [10] Dudley J M, Genty G, Coen S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1135
- [11] Hu M L, Wang Q Y, Li Y F, Wang Z, Zhang Z G, Chai L, Zhang R B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4243 (in Chinese) [胡明列, 王清月, 栗岩峰, 王专, 张志刚, 柴路, 章若冰 2004 物理学报 **53** 4243]
- [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, 周桂耀, 侯蓝田, 王清月, 胡明列, 栗岩峰, 魏志义, 张军, 刘晓东 2004 物理学报 **53** 478]
- [13] Hu M L, Li Y F, Chai L, Xing Q, Doronina L V, Ivanov A A, Wang C Y, Zheltikov A M 2008 *Opt. Express* **16** 11176
- [14] Liu W H, Song X Z, Wang Y S, Liu H J, Zhao W, Liu X M, Peng Q J, Xu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 917 (in Chinese) [刘卫华, 宋啸中, 王屹山, 刘红军, 赵卫, 刘雪明, 彭钦军, 许祖彦 2008 物理学报 **57** 917]
- [15] Travers J C 2010 *Journal of Opt.* **12** 113001
- [16] Sørensen S T, Judge A, Thomsen C L, Bang O 2011 *Opt. Lett.* **36** 816
- [17] Stark S P, Podlipensky A, Joly N Y, Russel P S 2010 *JOSA B* **27** 592
- [18] Cascante-Vindas J, Diez A, Cruz J L, Andres M V 2010 *Opt. Express* **18** 14535
- [19] Wadsworth W J, Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Birks T A, Man T P M, Russell P S 2002 *JOSA B* **19** 2148
- [20] Kudlinski A, Bouwmans G, Vanvincq O, Quiquempois Y, Rouge A Le, Bigot L, Melin G, Mussot A 2009 *Opt. Lett.* **34** 3631
- [21] Labruyère A, Leproux P, Couderc V, Tombelaine V, Kobelke J, Schuster K, Bartelt H, Hilaire S, Huss G, Melin G 2010 *IEEE Photonic Tech L* **22** 1259
- [22] Cascante-Vindas J, Torres-Peiro S, Diez A, Andres M V 2010 *Appl. Phys. B-Laers O* **98** 371

Experimental study on supercontinuum generation in zero-dispersion wavelength decreasing photonic crystal fiber

Zhu Xian Zhang Xin-Ben Xiang Chen Peng Jing-Gang Dai Neng-Li
Li Hai-Qing Li Jin-Yan[†]

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 29 September 2012; revised manuscript received 28 November 2012)

Abstract

We have carried out experimentally the supercontinuum generation in GeO₂-doped-core uniform photonic crystal fiber and zero-dispersion wavelength-decreasing photonic crystal fiber with pump pulses 1.8 ps operating at 1040 nm. Dispersion and nonlinear effects such as cross-phase modulation, four-wave mixing, modulation instability play a crucial role as they extend the supercontinuum towards short wavelength side. Zero-dispersion wavelength-decreasing photonic crystal fiber can improve group-velocity matching between solitons and dispersive waves deduced from numerical simulation of the evolution of spectra generated in a taper and uniform fiber. We obtained experimentally a spectrum expanding to the blue side and the power variation is indeed of 10 dB over a spectral range of 165.7 nm (between 4061 and 6718 nm) in the taper fiber.

Keywords: supercontinuum, taper fiber, group-velocity matching, nonlinear effects

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 81.05.Ni

DOI: 10.7498/aps.62.094217

[†] Corresponding author. E-mail: ljy@mail.hust.edu.cn