

# 耗散孤子脉冲的放大和超连续光谱的产生

张巨慧 胡明列 刘博文 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 研究了耗散孤子的放大和非线性展宽的动力学过程, 成功研制了一种紧凑型高相干性的全光纤超连续光谱源。种子源为工作在全正色散域的耗散型全光纤锁模激光器, 采用了非线性偏振旋转锁模技术, 输出的耗散孤子脉冲宽度为 5.18 ps, 重复频率为 24 MHz。种子光脉冲经过 15 m 双包层掺镱光纤放大后, 耦合到长度为 10 m 的光子晶体光纤中, 产生了超过一个倍频程的超连续光谱(550~1750 nm), 最大输出功率为 700 mW。系统研究了耗散孤子的放大过程以及光子晶体光纤反常色散区产生超连续谱的动力学过程和机理。

**关键词** 光纤光学; 超连续谱; 全光纤激光器; 耗散孤子; 光子晶体光纤

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0405003

## Amplification of Dissipative Soliton and Supercontinuum Generation

Zhang Juhui Hu Minglie Liu Bowen Chai Lu Wang Qingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technical Science of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** The amplification and nonlinear broadening dynamics of dissipative soliton are studied. A compact all-fiber highly coherent supercontinuum source is successfully developed. The seed laser in the experiment is a dissipative all-fiber mode-locked laser working in all-normal dispersion region. The nonlinear polarization rotation mode-locking technology is applied. The output pulse width of the dissipative soliton is 5.18 ps with a repetition rate of 24 MHz. The seed laser pulse is amplified with a 15-m double-clad ytterbium-doped fiber, then is coupled into a 10 m photonic crystal fiber. The supercontinuum generation achieves more than one octave of bandwidth (550~1750 nm) at 700 mW average power. The amplification process of dissipative soliton and the mechanism of supercontinuum generation in anomalous dispersion region of photonic crystal fiber are systematically studied.

**Key words** fiber optics; supercontinuum; all fiber laser; dissipative soliton; photonic crystal fiber

**OCIS codes** 060.2320; 060.5295; 140.3615; 140.4050; 320.6629

## 1 引言

超连续谱在脉冲压缩、光通信、光学相干层析、光谱分析、超短脉冲产生和光学频率梳等方面有着广泛的应用。超连续谱的产生是高强度的脉冲通过非线性材料时, 光谱急剧展宽的一种复杂的非线性现象<sup>[1]</sup>。1970年, Shapiro等<sup>[2]</sup>在块状玻璃中首次观察到了宽度为 200 THz 的超连续谱。从此以后,

超连续谱在理论和实验上都得到了广泛的研究, 人们在固体、液体、气体和各种不同结构的波导中观察到了超连续谱。使用连续光、纳秒脉冲、皮秒脉冲、飞秒脉冲抽运非线性介质都实现了超连续谱的产生<sup>[3-5]</sup>。可见, 抽运源和非线性介质对超连续谱的产生都起着至关重要的作用<sup>[6-7]</sup>。在非线性介质方面, 由于光子晶体光纤非线性效应强并且色散可控,

收稿日期: 2013-09-04; 收到修改稿日期: 2013-10-27

基金项目: 国家 973 计划(2011CB808101, 2010CB327604)、国家自然科学基金(61322502)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110032110056)

作者简介: 张巨慧(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤锁模激光器方面的研究。E-mail: zhangjuhui@tju.edu.cn

导师简介: 胡明列(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光子晶体光纤及超短脉冲激光技术等方面的研究。

E-mail: huminglie@tju.edu.cn(通信联系人)

所以被广泛应用于超连续谱的产生<sup>[8-12]</sup>。在抽运源选择方面,全光纤化的种子源有很大的优势,能够提高系统的环境稳定性和结构的紧凑性<sup>[13-15]</sup>。

光学相干层析、光脉冲压缩、光学频率梳等应用对超连续谱的相干性要求较高。而在影响超连续谱产生的诸多非线性效应中,调制不稳定性对超连续谱的相干性有着非常重要的影响<sup>[16]</sup>。因为光场中的随机噪声会引起调制不稳定性,而在调制不稳定性使光谱产生对称边带从而展宽光谱的过程中,产生的新光谱成分相位不相关,最终导致超连续谱相干性变差。当脉冲宽度更短时,自相位调制等效应在光谱展宽中的作用增大,起主要作用,调制不稳定性的影响减小<sup>[17]</sup>。所以更短的输入脉冲得到的超连续谱的相干性更好。因此最近基于耗散锁模机制产生的超短脉冲有重要的研究价值,这种锁模激光器能够直接输出具有啁啾的皮秒量级超短脉冲,且单脉冲能量高<sup>[18-19]</sup>。这样的皮秒脉冲在耦合到光子晶体光纤初始端时峰值功率可以控制在一定范围,不会打坏熔接点。进而在负色散的光子晶体光纤中传输时,脉冲宽度会受到光纤负色散的压缩,达到飞秒量级,可以在传输过程中维持较高的峰值功率,与纳秒脉冲或者连续光做抽运源相比,从而可以产生高质量、高相干、质量更好、相干性更高的超连续谱。

本文利用耗散型种子源经过双包层掺镱光纤放大后,抽运零色散点在 1025 nm 附近的光子晶体光纤,产生了 550~1750 nm 的超连续光谱,最大输出功率为 700 mW。双包层掺镱光纤与光子晶体光纤熔接,实现了结构紧凑、环境稳定性好、相干性好的全光纤超连续光源,进一步研究了在不同抽运功率下光谱演变的非线性动力学过程。

## 2 实验装置

图 1 为超连续谱产生的实验装置示意图。该装置除了波片和偏振分束器之外全部使用光纤器件,以提高装置的紧凑性和环境稳定性。种子源为环形腔结构。单模光纤(SMF)长度为 7.5 m;高掺杂掺镱单模(SM)光纤的长度为 0.55 m,作为种子源的增益光纤。3 个波片[1/4 波片(QWP),半波片(HWP)]和偏振分束器(PBS)共同作用,将光纤中脉冲的偏振态变化转化为振幅的调制,实现非线性偏振旋转锁模。波分复用器(WDM)用于将抽运光耦合入腔内。隔离器(ISO)使激光单向运转,同时起到保护抽运源的作用。滤波器(SF)用于提供耗散机制。分光比为 7:3 的光纤耦合器(coupler)将腔

内 30% 的光作为信号光输出并耦合至放大级。放大级的抽运光通过抽运合束器(combiner)耦合,抽运长度为 15 m 的双包层(DC)掺镱光纤,对信号光进行放大。从放大级输出的光抽运光子晶体光纤(PCF)产生超连续谱。

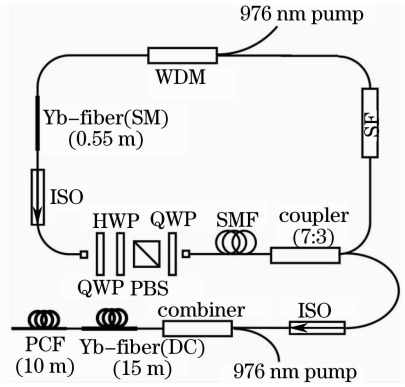


图 1 超连续谱生产的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of supercontinuum generation

## 3 实验结果与分析

实验中使用的种子源是工作在全正色散域的非线性偏振旋转锁模激光器。逐渐增加抽运功率,并且旋转波片,种子源可以实现稳定锁模,重复频率为 24 MHz。脉冲的形成是通过耗散过程(线性增益和损耗、非线性饱和和吸收和光谱滤波)和相位调制实现的,称为耗散孤子<sup>[20-22]</sup>。当抽运功率为 650 mW 时,测量从耦合器输出的脉冲,得到的自相关曲线和光谱分别如图 2(a)中虚线和图 2(b)所示。脉冲为超高斯形状,脉冲宽度为 5.18 ps,脉冲中心波长在 1064 nm 附近。由图 2(b)光谱得到的变换极限脉冲如图 2(a)中实线所示,宽度为 111 fs,所以提供负色散可以使皮秒脉冲压缩至飞秒量级。

图 3 为从耦合器输出的信号光经过 15 m 双包层掺镱光纤放大后的输出功率曲线。随着放大级抽运功率的升高,输出功率逐渐升高,但斜率略有下降。因此如果放大级使用更高功率的抽运源,有望使输出功率得到更大的提升。从图 4 所示的光谱可以看出,随着放大级输出功率的增加,放大级输出光谱逐渐变宽。当输出功率为 700 mW 时,光谱在 1068 nm 和 1120 nm 附近出现两个峰,间隔为 13.04 THz,说明此时放大级激光功率超过了拉曼阈值,由于受激拉曼散射,光谱在长波方向出现拉曼峰;随后,光谱的能量逐渐向 1120 nm 附近的拉曼峰转移。当输出功率为 2350 mW 时,光谱的两个峰值出现在 1126 nm 和 1184 nm 附近,间隔为

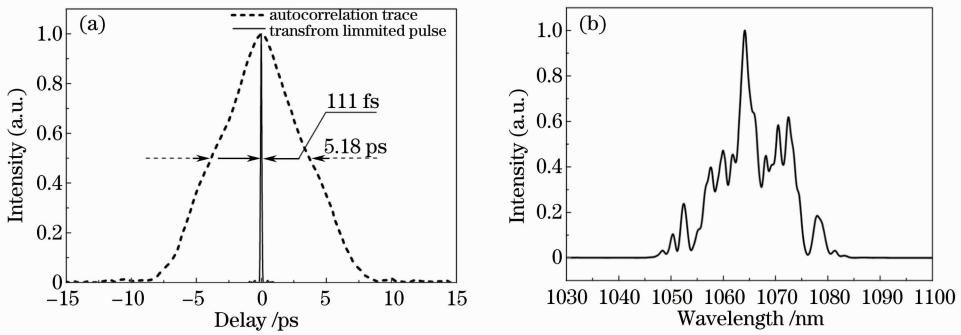


图 2 种子源输出特性。(a) 自相关曲线(虚线)和变换极限脉冲(实线); (b) 光谱

Fig. 2 Output properties of seed laser. (a) Autocorrelation trace (dotted line) and transform limited pulse (solid line); (b) spectrum

13.05 THz。在最大输出功率下, 光谱在 1131、1188、1251 nm 附近出现 3 个峰值, 间隔分别为 12.72 THz 和 12.72 THz; 此时, 通过光谱分析可以得知出现了多级拉曼峰。当然, 在自相位调制和四波混频等非线性效应的作用下, 光谱还有进一步的展宽, 所以还有其他的旁瓣出现带来的光谱展宽。随着放大级输出功率的增加, 光谱逐渐展宽, 并且有整体向长波移动的趋势, 这是由于自相位调制以及受激拉曼散射等非线性效应共同作用的结果。

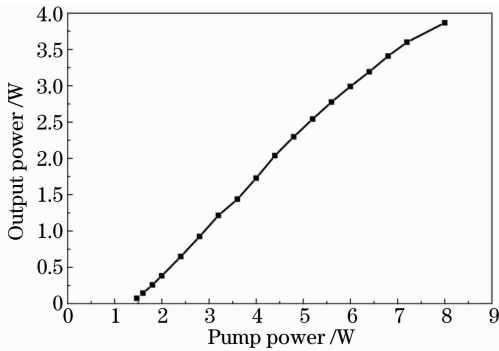


图 3 放大级输出功率随抽运功率的变化

Fig. 3 Output power versus pump power of amplifier

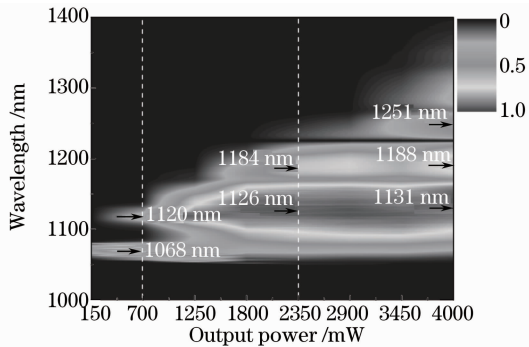


图 4 放大级输出功率与放大级输出光谱的关系

Fig. 4 Relationship between output power and output power-spectrum of amplifier

实验中使用的光子晶体光纤长度为 10 m, 零色

散波长为 1025 nm, 因此抽运光处在光子晶体光纤的反常色散区。经过计算得到的光子晶体光纤色散曲线如图 5 所示, 插图为光纤端面结构的扫描电子显微镜图。由于抽运光波长在光子晶体光纤的反常色散区, 因此在放大过程中产生的多个拉曼孤子自然就转换为传输过程中的孤子, 并进入到自频移和色散波匹配的过程。图 6 为在不同入射功率下, 从光子晶体光纤输出的光谱。当抽运功率较低时, 光谱主要发生红移。因为脉冲内拉曼散射只能在光谱的低频方向产生新的频率分量, 引起光谱不对称展宽<sup>[23]</sup>。这表明脉冲内拉曼散射在超连续谱产生的初期占主导<sup>[7]</sup>。

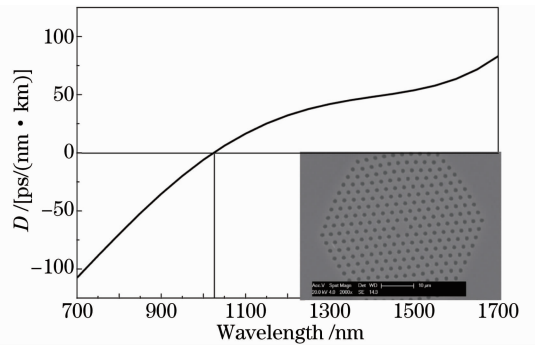


图 5 光子晶体光纤色散曲线(插图为光纤端面结构的扫描电子显微镜图)

Fig. 5 Dispersion profile of PCF (the inset is scanning electron microscope picture of PCF)

在反常色散区, 脉冲内拉曼效应引起孤子自频移, 而调制不稳定性导致孤子分裂<sup>[24]</sup>。孤子自频移使光谱在长波方向展宽, 非孤子辐射使光谱在短波方向展宽<sup>[15]</sup>。当满足相位匹配条件时, 在放大过程中产生的多个孤子与色散波之间发生四波混频效应<sup>[2]</sup>, 产生新的频谱成分, 使光谱展宽; 同时能量向新的频谱成分转移, 使得光谱更加平坦。多个孤子包含更多的频谱成分, 更容易实现相位匹配。所以,

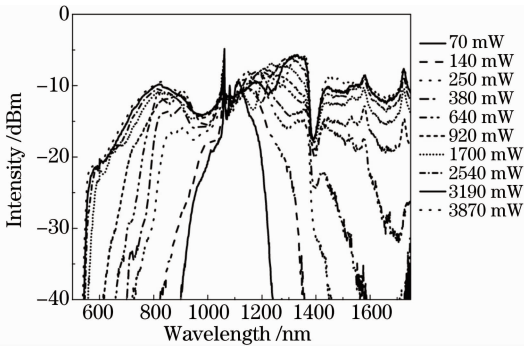


图 6 不同输入功率下超连续谱的演变

Fig. 6 Evolution of supercontinuum with different input powers

与单脉冲抽运相比,多个孤子脉冲同时抽运光子晶体光纤,产生超连续谱的转换效率更高,光谱更平坦<sup>[20-21]</sup>。另外,频谱成分之间的交叉相位调制效应也起到了使光谱平坦化的作用。随着抽运功率的增加,1064 nm附近的尖峰降低,残余光逐渐减少,并且光谱逐渐变得更平坦。在光谱的强度方面,低频方向比高频方向强度高,这是由于受激拉曼散射只能放大低频部分引起的<sup>[23]</sup>。光谱在1380 nm附近的凹陷是因为OH<sup>-</sup>的吸收损耗。从图6可以看出,在最高输出功率下,超连续谱从550 nm扩展到1750 nm,在长波方向已经超出了光谱仪的观测范围。脉冲在光子晶体光纤中传输产生超连续谱的同时,脉宽由于光纤的负色散得到压缩,因而可以一直保持较窄的脉宽和较高的峰值功率,相对于纳秒脉冲或者连续光激光为抽运源产生的超连续光源,因而能够获得平坦度和相干性更好的超连续光谱。

图7中的曲线表示了超连续谱输出功率特性。从图7可以看出,当输入光子晶体光纤的功率逐渐增加时,超连续谱输出功率随之逐渐升高。当抽运功率为3870 mW时,超连续谱最大输出功率为700 mW。从以上趋势可以看出,如果提高抽运功率,有望得到更高的输出功率。

## 4 结 论

研究了耗散孤子的放大和非线性演变,搭建了基于耗散型种子源的紧凑型全光纤超连续谱源,输出超连续谱功率为700 mW,光谱覆盖范围为550~1750 nm。全光纤结构提高了系统的稳定性和紧凑性。耗散孤子皮秒脉冲的峰值功率较低,耦合到光子晶体光纤时,不会打坏熔接点;在负色散的光子晶体光纤中传输时,脉冲宽度可以压缩至飞秒量级,峰值功率提高,因而与飞秒脉冲具有相似的非线性效

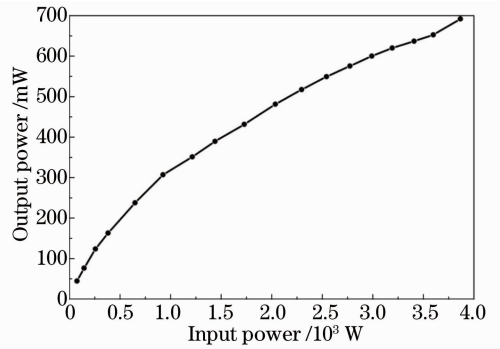


图 7 超连续谱输出功率特性

Fig. 7 Output power property of supercontinuum

应,与纳秒脉冲或者连续光激光抽运产生超连续光源相比,可以产生高平坦度、高相干度的超连续谱。

## 参 考 文 献

- 1 S Coen, A H L Chau, R Leonhardt, *et al.*. White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(17): 1356-1358.
- 2 S Coen, A H L Chau, R Leonhardt, *et al.*. Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, 19(4): 753-764.
- 3 J M Dudley, G Genty, S Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- 4 Guo Chunyu, Ouyang Deqin, Ruan Shuangchen, *et al.*. Supercontinuum generation from a tapered photonic crystal fiber pumped with a high-power nanosecond fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0405003.  
郭春雨, 欧阳德钦, 阮双琛, 等. 高功率纳秒光纤激光器抽运锥形光子晶体光纤产生超连续谱[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0405003.
- 5 Liu Chu, Eric Rees, Toni Laurila, *et al.*. Experimental research on supercontinuum generation from nanosecond pulse and conventional single mode fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0705003.  
刘 楚, Eric Rees, Toni Laurila, 等. 纳秒脉冲在普通单模光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0705003.
- 6 Fang Xiaohui, Wang Qingyue, Liu Junjie, *et al.*. Experimental research on the 3.95 W high power supercontinuum generation [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1585-1588.  
方晓惠, 王清月, 刘俊杰, 等. 3.95 W 高功率超连续光谱产生的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1585-1588.
- 7 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing, *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 1943-1949.  
陈胜平, 谌鸿伟, 侯 静, 等. 30 W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 1943-1949.
- 8 A V Husakou, J Herrmann. Supercontinuum generation, four-wave mixing, and fission of higher-order solitons in photonic crystal fibers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, 19(9): 2171-2182.
- 9 P Russell. Photonic-crystal fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(12): 4729-4749.
- 10 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(1): 57-66.  
王清月, 胡明列, 柴 路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展

- [J]. 中国激光, 2006, 33(1): 57–66.
- 11 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900139.  
余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900139.
  - 12 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0101001.  
柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0101001.
  - 13 A B Rulkov, M Y Vyatkin, S V Popov, *et al.*. High brightness picosecond all-fiber generation in 525 ~ 1800 nm range with picosecond Yb pumping [J]. Opt Express, 2005, 13(2): 377–381.
  - 14 N Nishizawa, J Takayanagi. Octave spanning high-quality supercontinuum generation in all-fiber system[J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(8): 1786–1792.
  - 15 Xiaohong Hu, Wei Zhang, Zhi Yang, *et al.*. High average power, strictly all-fiber supercontinuum source with good beam quality[J]. Opt Lett, 2011, 36(14): 2659–2661.
  - 16 Jin Aijun, Wang Zefeng, Hou Jing, *et al.*. Coherence properties of the supercontinuum generated in anomalous dispersion region of photonic crystal fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(12): 124211.  
靳爱军, 王泽锋, 侯静, 等. 光子晶体光纤反常色散区抽运产生超连续谱的相干特性分析[J]. 物理学报, 2012, 61(12): 124211.
  - 17 J M Dudley, S Coen. Coherence properties of supercontinuum spectra generated in photonic crystal and tapered optical fibers [J]. Opt Lett, 2002, 27(13): 1180–1182.
  - 18 K Kieu, W H Renninger, A Chong, *et al.*. Sub-100 fs pulses at watt-level powers from a dissipative-soliton fiber laser[J]. Opt Lett, 2009, 34(5): 593–595.
  - 19 B Ortac, M Baumgartl, J Limpert, *et al.*. Approaching microjoule-level pulse energy with mode-locked femtosecond fiber lasers[J]. Opt Lett, 2009, 34(10): 1585–1587.
  - 20 W H Renninger, A Chong, F W Wise. Dissipative solitons in normal-dispersion fiber lasers[J]. Physical Review A, 2008, 77(2): 023814.
  - 21 Zhang Zuxing, Dai Guoxing. All-normal-dispersion dissipative soliton ytterbium-doped fiber laser without additional filter[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214005.  
张祖兴, 戴国星. 全正色散耗散孤子掺镱光纤激光器[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214005.
  - 22 Xu Zhongwei, Zhang Zuxing. Study of the filter effect in all-normal-dispersion mode-locked fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 021405.  
徐中巍, 张祖兴. 全正色散被动锁模光纤激光器中滤波器效应的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 021405.
  - 23 G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Application of Nonlinear Fiber Optics[M]. Second Edition, Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Wang Zhaoying *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 349–354.  
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 第二版, 贾东方, 余震虹, 王肇颖 等译. 北京: 电子工业出版社, 2010. 349–354.
  - 24 G Genty, S Coen, J M Dudley. Fiber supercontinuum sources [J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(8): 1771–1785.

栏目编辑: 宋梅梅