

文章编号: 0253-2239(2005)06-746-5

利用锁模光纤激光器在色散位移光纤中产生超连续谱的研究*

贾东方 葛春风 胡智勇 王肇颖 李世忱

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

摘要: 采用主动锁模光纤激光器输出的重复频率 10 GHz、脉宽 7.97 ps 的脉冲作为抽运光源, 无需压缩后直接抽运 4.2 km 的普通色散位移光纤(DSF), 利用色散位移光纤中自相位调制、交叉相位调制等非线性效应的联合作用, 获得了 20 dB 带宽达 125 nm、覆盖整个 C 波段、L 波段和部分 S 波段的超连续(SC)谱。实验研究了抽运光脉冲峰值功率和抽运波长对超连续谱宽度的影响, 结果表明抽运光脉冲峰值功率越高, 得到的超连续谱的带宽越宽; 通过对抽运波长的优化, 可以实现最大程度的超连续展宽; 分析了滤波器带宽对脉冲质量的影响; 利用 0.4 nm 带宽的可调谐滤波器对从超连续谱中滤出脉冲的特性进行了研究, 在超连续谱的不同波长处获得了脉宽为 8.90~9.80 ps、时间-带宽积为 0.44~0.49 的稳定的窄光脉冲。

关键词: 导波与光纤光学; 超连续; 锁模光纤激光器; 色散位移光纤

中图分类号: TN25 文献标识码: A

Studies on Supercontinuum Generation in Dispersion Shifted Fiber by Using Mode-Locked Fiber Laser

Jia Dongfang Ge Chunfeng Hu Zhiyong Wang Zhaoying Li Shichen

(The Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: The 20 dB-bandwidth of 125 nm covering the whole C, L bands and part of S band of supercontinuum (SC) in a 4.2 km dispersion-shifted fiber (DSF) was obtained in the experiment, which was based on the actively mode-locked erbium-doped fiber laser (AMLFL) with the repetition rate of 10 GHz and the pulse duration of 7.97 ps. The dispersion-shifted fiber (DSF) was pumped by the output pulses from the AMLFL without being compressed. In a DSF, the supercontinuum results from combined interaction of nonlinear effects including self-phase modulation (SPM) and cross-phase modulation (XPM). The influences of peak powers and wavelengths of pumping pulse on supercontinuum (SC) spectrum were experimentally investigated. It is clear that the generated supercontinuum could be broadened further when the pump pulse peak power is increased; The broader supercontinuum could be got by optimization of pump wavelength; At the same time, the characteristics of pulses which are filtered out from supercontinuum spectrum by tunable filter with 0.4 nm bandwidth were studied. The stable, narrow optical pulses with pulse-width of 8.90~9.80 ps and time-bandwidth product of 0.44~0.49 were filtered out from the supercontinuum at different wavelengths.

Key words: guided wave and fiber optics; supercontinuum (SC); mode-locked fiber laser; dispersion-shifted fiber (DSF)

1 引 言

最近几年,因特网(Internet)上传输的信息呈现雪崩式的增长,这就给当前的光纤通信网带来巨大

的冲击和压力,使人感到提高光纤通信网传输容量的迫切需要。充分利用石英光纤的低损耗传输窗口,而不是采用敷设更多根光纤的方法,是适应这种

* 国家自然科学基金(69877012)和教育部博士点基金(1999005615)资助课题。

作者简介: 贾东方(1971~),男,山东省人,博士,天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: jiadf@163.com

收稿日期: 2004-06-14; 收到修改稿日期: 2004-11-09

爆炸式增长的方式之一。在现有技术条件下,将波分复用(WDM)和光时分复用(OTDM)技术结合起来,是充分利用石英光纤低损耗窗口的优先方案。由于系统总的带宽容量和带宽效率依赖于光源,因此将系统容量扩展到 Tbit/s 量级,首先要设计出具有大的均匀带宽、精确波长间隔、高度相干性和高功率谱密度的多波长、高重复频率的光源。

超连续(SC)谱超短光脉冲源能在很宽的光谱范围内同时产生高重复率的多波长超短光脉冲,其产生机制源于光纤中多种非线性效应和色散效应的综合作用,这些非线性效应包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)以及受激拉曼散射(SRS)等^[1]。和其他用于光纤通信的超短脉冲光源相比,超连续光源具有连续宽带谱、稳定可靠、简单廉价等诸多优点^[1],已经相继应用于全光再生^[2]、波长变换^[3]、光脉冲压缩^[4]、全光开关^[5]等一系列实验,将在未来的 Tbit/s 波分复用/光时分复用(WDM/OTDM)系统中扮演重要角色^[6~8]。此外,超连续谱光源由于具有宽带相干性,在光学相干时域反射计^[9]、光学相干层析^[10]、光计量学^[11]等领域也有重要应用。

鉴于超连续脉冲光源的诸多优点和广泛应用,国际上关于超连续谱产生和应用方面的研究成为近年的热点。尽管国内也有少量有关超连续谱产生的理论和实验报道,但这些研究工作还是初步的^[12~16]。本文报道了在超连续光子源方面进行的实验研究。

2 实验装置

产生超连续超短光脉冲的实验系统如图 1 所示。主动锁模光纤激光器输出重复频率 10 GHz、波长调

谐范围 1530~1560 nm、脉宽 8 ps 左右的光脉冲,该脉冲通过一台高功率掺铒光纤放大器(EDFA)放大并用光学滤波器(OBPF₁)消除放大自发辐射噪声后,进入一段零色散波长为 1538 nm 的 4.2 km 长的普通色散位移光纤(DSF),超连续谱即在这段光纤中产生。从色散位移光纤出射的超连续光谱用一分辨力为 0.05 nm 的光谱仪测量。同时,用带宽为 0.4 nm 的可调谐光滤波器(OBPF₂)从超连续谱中滤出光脉冲,送入数字示波器测量其波形,并送入自相关仪测量其宽度。

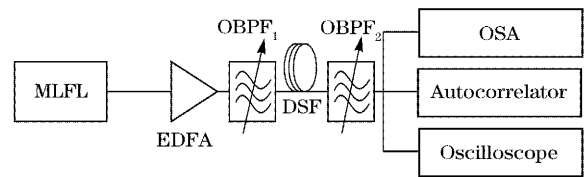


图 1 10 GHz 超连续脉冲光子源的实验装置图
Fig. 1 Experimental setup for 10 GHz supercontinuum pulsed light source

锁模光纤激光器由于具有可调谐性这一优点,因此用来研究超连续谱的产生规律非常方便。这里采用 10 GHz 主动锁模掺铒光纤激光器,其在 1542.6 nm 处的光谱、脉冲波形和自相关曲线如图 2 所示。

由图 2 可知此时输出脉冲谱宽约 0.32 nm,脉宽 7.97 ps,时间带宽积为 0.32,说明得到的是变换极限脉冲。另外,用双曲正割函数(sech²)对输出脉冲的自相关曲线进行了拟合[图 2(c)],发现二者重合性相当好,这说明该主动锁模光纤激光器输出脉冲是双曲正割型。

由于激光器的输出脉冲已经比较窄,加上实验条件的限制,没有对输出脉冲做进一步的压缩,直接通过高功率放大器放大后注入色散位移光纤中产生超连续谱。

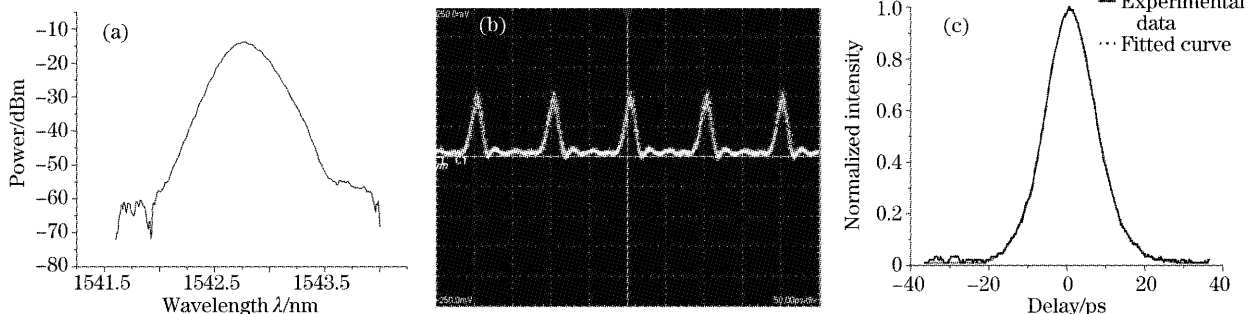


图 2 主动锁模掺铒光纤激光器在 1542.6 nm 处的光谱(a),脉冲波形(b)和自相关曲线(c)
Fig. 2 (a) Spectrum, (b) waveform, and (c) autocorrelation curve of the output pulse from the actively mode-locked Er³⁺-doped fiber laser

3 实验结果与讨论

3.1 抽运功率对超连续谱的影响

图 3 给出了抽运波长在 1542.6 nm 时,入射抽运脉冲在不同峰值功率下利用零色散波长为 1538 nm 的色散位移光纤产生的超连续谱。由于抽运波长此时位于色散位移光纤的反常色散区,自相位调制(SPM)与反常群速度色散(GVD)之间的相互作用导致光纤中的孤子压缩效应,致使光谱展宽^[13]。当峰值功率 P_p 从 0.6 W 增加到 5 W 时,超连续谱的 -20 dB 谱宽从 30 nm 增加到 125 nm 左右。与图 2 所示的抽运脉冲光谱相比,可以明显地看出超连续谱展宽效应。同时,随着抽运功率的逐渐增加,产生的超连续谱宽度也逐渐增加,并且可以发现整个频谱向短波段(零色散波长一侧)展宽的程度更大一些。这是由于抽运功率超过一定值时,展宽的光谱越过零色散波长进入光纤的正常色散区。而在光纤的零色散波长附近,交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)与自相位调制共同作用,进一步向抽运波长两侧展宽光谱,同时三阶色散(TOD)的作用也越来越明显,使光谱更加向短波方向展宽。

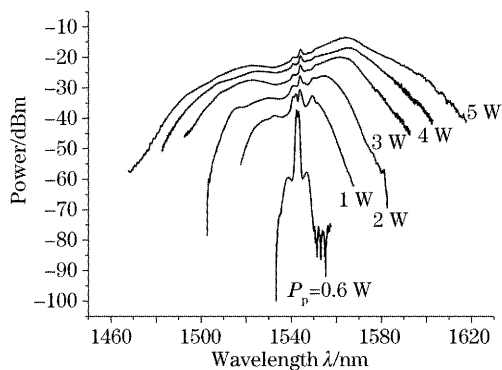


图 3 不同抽运功率下测得的超连续谱, $\lambda_p = 1542.6$ nm
Fig. 3 Supercontinuum spectra measured at different pump power when $\lambda_p = 1542.6$ nm

图 4 比较了根据实验参量数值模拟的结果与实验得到的结果,二者比较一致。根据模拟结果和实验结果可以看出,超连续谱的产生确实存在阈值现象,只有当抽运峰值功率达到一定值时,才能得到明显的频谱展宽。

3.2 滤波器带宽的影响

光纤中产生的超连续谱的宽度一般为 40~200 nm,利用一定带宽的光滤波器,可以在这个范围内任一波长处滤出光脉冲。所滤出光脉冲的宽度

和质量不仅与滤波器的带宽有关,也与超连续谱本身的特性有关,因为在超连续谱的光谱成份中,既有由抽运光脉冲的自相位调制效应产生的谱成份,也有由于交叉相位调制和四波混频效应产生的谱成份。自相位调制致频谱展宽是相干的,而交叉相位调制和四波混频致频谱展宽是非相干的,即在超连续谱范围内不同波长处滤出的光脉冲的质量是不同的。这与超连续过程中何种效应起主要作用有关,同时也与滤波器的带宽有关。若滤波器带宽较宽,则滤出光脉冲中包含的非相干成份可能较多,光脉冲的质量就可能较低;滤波器带宽窄则情况恰好相反。

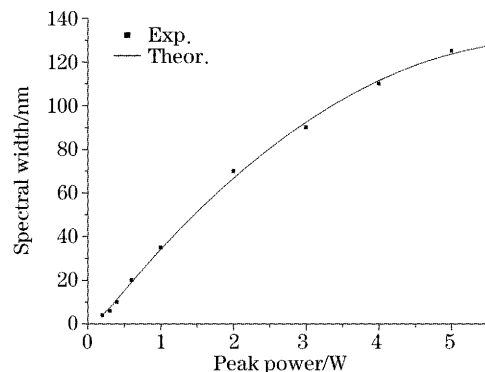


图 4 超连续谱宽与抽运功率的关系曲线
Fig. 4 Spectral width of supercontinuum versus pump power

用 0.4 nm 带宽的可调谐滤波器对图 3 中所示的峰值抽运功率为 5 W 时的超连续谱进行滤波,当滤波器中心波长分别在 1530.0 nm 和 1560.0 nm 时,所得结果分别如图 5、图 6 所示。由图可知两种波长下的脉宽分别为 9.60 ps 和 9.80 ps 左右,时间带宽积分别为 0.48 和 0.49。图 7 给出了在超连续谱的其他波长滤出的脉冲宽度和时间带宽积。可以发现在整个超连续谱的范围内滤出的光脉冲特性并不完全一致,不同波长处滤出光脉冲的宽度也不尽相同,这说明在滤波器带宽范围内的光谱成份并不是完全相干的。其实在用作波分复用光源时,超连续谱的相干性是一个很重要的问题,有待进一步深入研究。另外,滤波器的带宽对所滤出超短脉冲的质量也有影响。若改用宽带宽的滤波器对超连续谱进行滤波,所得脉冲可能会更窄,但脉冲质量要比使用窄带滤波器所得结果差一些,表现为时间带宽积更远离变换极限值。

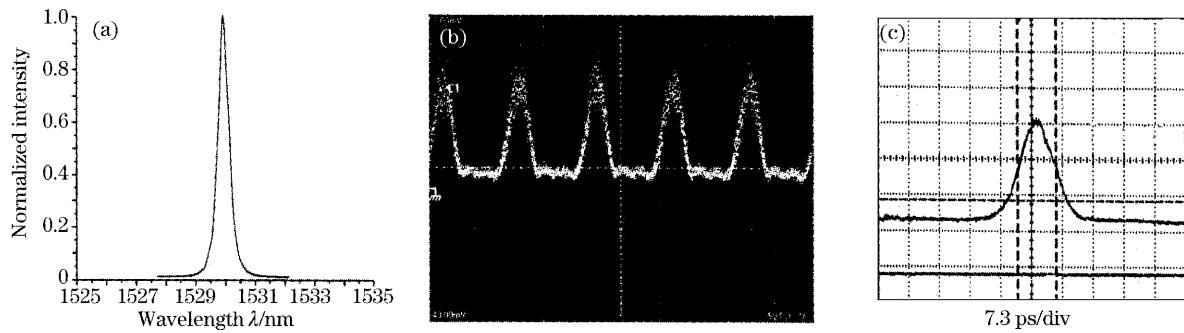


图 5 在 1530.0 nm 波长处对超连续谱进行滤波得到的光谱(a)、脉冲波形(b)和自相关曲线(c)

Fig. 5 (a) Spectrum, (b) waveform, and (c) autocorrelation curve of supercontinuum pulse filtered at 1530.0 nm when the peak pump power is 5 W

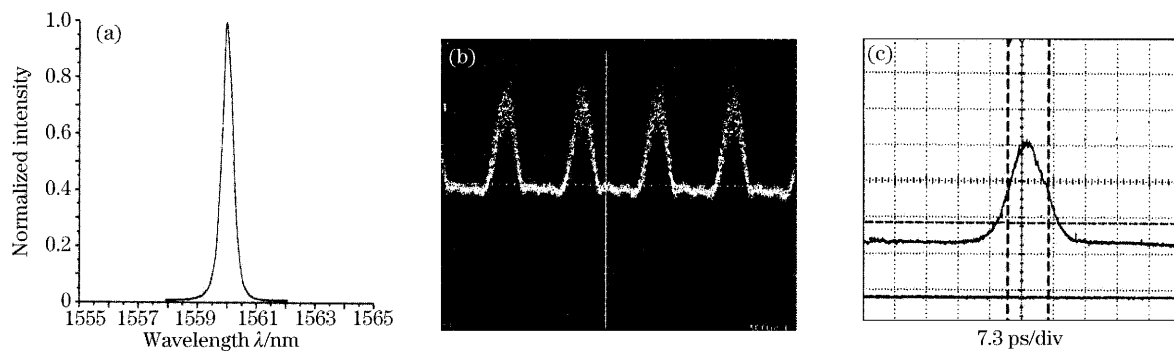


图 6 在 1560.0 nm 波长处对超连续谱进行滤波得到的光谱(a)、脉冲波形(b)和自相关曲线(c)

Fig. 6 (a) Spectrum, (b) waveform, and (c) autocorrelation curve of supercontinuum pulse filtered at 1560.0 nm when the peak pump power is 5 W

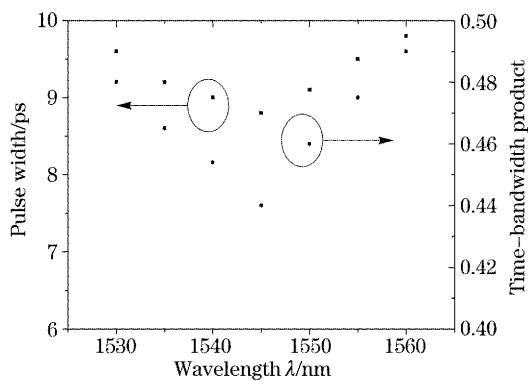


图 7 从超连续谱的不同位置滤出的脉冲的脉宽和时间带宽积

Fig. 7 The pulse width and time-bandwidth products of filtered pulses at different wavelengths of supercontinuum

3.3 抽运波长对超连续谱的影响

实验中还发现,抽运光脉冲的中心波长对超连续谱的产生有重要影响。当抽运光脉冲中心波长逼近色散位移光纤的零色散波长 1538 nm 时,在相同的抽运功率下,超连续光谱的宽度逐渐变窄。图 8 是抽运光波长在 1539.0 nm 附近时测得的超连续谱,峰值抽运功率在 3 W、4 W 和 5 W 时的谱宽分

别为 60 nm、75 nm 和 90 nm,与图 3 相比,各个功率下的谱宽都有不同程度的减小。

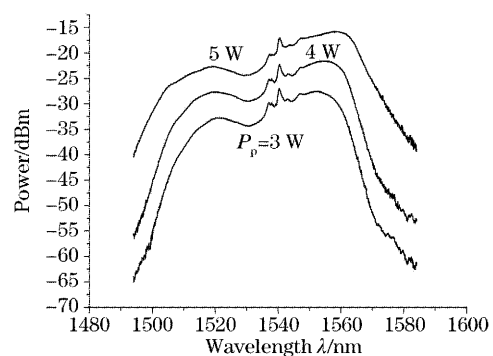


图 8 不同抽运功率下测得的超连续谱,抽运波长 $\lambda_p = 1539.0$ nm

Fig. 8 Supercontinuum spectra measured at different pump powers when $\lambda_p = 1539.0$ nm

图 9 是抽运脉冲中心波长在 1532.6 nm 时得到的超连续谱,峰值抽运功率在 3 W、4 W 和 5 W 时的谱宽分别降至 30 nm、40 nm 和 50 nm。这是由于此时抽运波长位于光纤的正常色散区,当抽运脉冲在光纤正常色散区传输时,色散导致脉宽加大,从而

使峰值功率迅速下降。同时,在光纤的正色散区无法实现相位匹配,四波混频效应的效率极低,也会影响超连续谱的宽度^[12]。

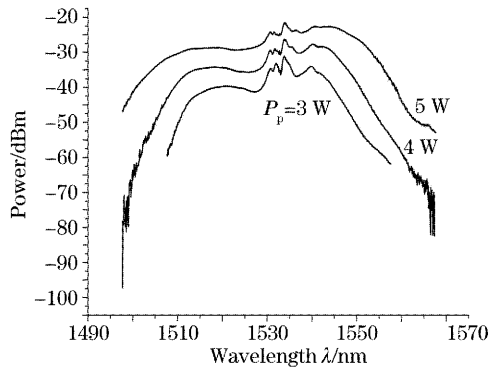


图 9 不同抽运功率下测得的超连续谱,
抽运波长 $\lambda_p = 1532.6 \text{ nm}$

Fig. 9 Supercontinuum spectra measured at different
pump powers when $\lambda_p = 1532.6 \text{ nm}$

当将锁模光纤激光器的输出波长调到远离色散位移光纤的零色散波长 1538 nm 时,无论在正常色散区,还是在反常色散区,超连续展宽现象几乎都消失。

4 结 论

利用 10 GHz 锁模光纤激光器做初始抽运光源,经过放大后得到接近 8ps 脉宽的强超短脉冲,抽运 4.2 km 左右的普通色散位移光纤,获得了谱宽 125 nm 以上的超连续谱。最后,研究了抽运脉冲波长的变化对超连续谱宽度的影响。下一步将重点加强对超连续谱的稳定性和相干性的研究,并用于光时分复用/波分复用传输系统实验。

参 考 文 献

- Jia Dongfang, Huang Chao, Song Lijun *et al.*. The generation and applications of supercontinuum optical pulse[J]. *Study on Optical Communication*, 2000, **6**(5): 22~27 (in Chinese)
贾东方,黄超,宋立军等. 超连续光脉冲的产生及应用[J]. *光通信研究*, 2000, **6**(5): 22~27
- Sharping J E, Fiorentino M, Kumaar P *et al.*. All-optical switching based on cross-phase modulation in microstructure[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1): 77~79
- Lee W S, Zhu Y J, Shaw B *et al.*. 2.56 Tb/s capacity, 0.8 b/s/Hz · s DWDM transmission over 120 km NDSF using polarisation-bit-interleaved 80 Gb/s OTDM signal[C]. *OFC'01*, Qaper TuU1, Anaheim, USA, 2001
- Sotobayashi H, Konishi A, Chujo W *et al.*. Simultaneously generated 3.24 Tbit/s (81 WDM×40 Gbit/s) carrier suppressed RZ transmission using a single supercontinuum source [C]. *ECOC'01*, Paper Mo. F. 3, Amsterdam, Holand, 2001
- Yamada E, Takara H, Ohara T *et al.*. 150 channel supercontinuum CW optical source with high SNR and precise 25 GHz spacing for 10 Gbit/s DWDM systems[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(5): 304~306
- Petropoulos P, Monro T M, Belardi W *et al.*. A highly nonlinear holey fiber and its application in a regenerative optical switch[C]. *OFC'01*, Paper TuC3, Anaheim, USA, 2001
- Hashimoto T, Sotobayashi H, Kitayama K *et al.*. Photonic conversion of OC-192 OTDM-to-4×OC-48 WDM by supercontinuum generation[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(13): 1133~1135
- Husakou A V, Herrmann J. Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(11): 203901~203904
- Smith E D J, Wada N, Chujo W *et al.*. High resolution OCDR using 1.55 μm supercontinuum source and quadrature spectral detection[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(21): 1305~1307
- Hartl I, Li X D, Chudoba C *et al.*. Ultra high-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9): 608~610
- Jones D J, Diddams S A, Ranka J K *et al.*. Carrier-envelop phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, **288**(): 635~638
- Wu Jian, LI Yuhua, Lou Caiyun *et al.*. Ultrashort pulse generation from supercontinuum source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 325~329 (in Chinese)
伍剑,李玉华,娄彩云等. 利用超连续谱光源产生超短光脉冲[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 325~329
- Lou Caiyun, Han Ming, Li Yuhua *et al.*. 10 GHz multiwavelength pulse source of WDM/OTDM communications systems [J]. *Optoelectronics · Laser*, 2000, **11**(2): 123~125 (in Chinese)
娄彩云,韩明,李玉华等. 10 GHz WDM/OTDM 通信多波长光脉冲源[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(2): 123~125
- Liu Jianhui, Jia Dongfang, Ding Yongkui *et al.*. The optimal design of supercontinuum fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 684~688 (in Chinese)
刘俭辉,贾东方,丁永奎等. 超连续谱光纤的优化设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 684~688
- Zhang Jun, Wei Zhiyi, Wang Zhaohua *et al.*. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber by femtosecond pulse laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 511~512 (in Chinese)
张军,魏志义,王兆华等. 利用光子晶体光纤产生超连续飞秒激光光谱[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 511~512
- Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng *et al.*. Supercontinuum generation and transmission in a random distorted microstructure fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(5): 567~569 (in Chinese)
胡明列,王清月,栗岩锋等. 非均匀微结构光纤中超连续光的产生和传输[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 567~569