

文章编号: 0253-2239(2007)03-0414-5

基于高非线性微结构光纤的全光再生研究^{*}

卫艳芬 张 霞 徐永钊 黄永清 任晓敏

(北京邮电大学 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要: 提出了利用高非线性微结构光纤自相位调制效应进行全光再生的研究方案。分析了一组微结构光纤的色散和非线性特性。结果显示光纤的非线性系数与光纤结构有密切关系。通过减小有效模面积,可以提高光纤的非线性系数。采用一种高空气填充比的高非线性微结构光纤作为非线性介质,进行了基于自相位调制效应的全光再生研究。结果表明,由于微结构光纤的高非线性,采用较短的光纤长度就可以实现较好的再生效果。同时,输入微结构光纤的峰值功率、滤波器的参量选择对光再生的效果有重要的影响,它们必需满足一定要求,才能实现光再生。此外,对再生器的传输特性进行了研究。通过调整输入峰值功率和滤波器的参量,可以对不同宽度的光脉冲信号进行全光再生。

关键词: 光纤光学与光通信; 微结构光纤; 全光再生; 自相位调制

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

All-Optical Regeneration Based on Highly Nonlinear Microstructured Fiber

Wei Yanfen Zhang Xia Xu Yongzhao Huang Yongqing Ren Xiaomin

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: All-optical regeneration based on self-phase modulation in a highly nonlinear microstructured fiber is proposed. The dispersion and nonlinearity properties of a series of microstructured fibers are analyzed and the results show that the nonlinearity coefficient is closely related to the structure of the fiber. The nonlinear coefficient is increased by reducing the effective mode area and a highly nonlinear microstructured fiber with large air-filling ratio is used as the nonlinear medium in optical regeneration. The process of all-optical regeneration based on self-phase modulation in the fiber is investigated. The numerical results show a good optical regeneration result can be obtained by using a relatively short fiber length due to the high nonlinearity of the fiber. The input peak power launched into the microstructured fiber and the parameters of the filter have much influence on optical regeneration. In order to achieve good optical regeneration results, those parameters need to meet certain requirements. Furthermore, the transmission characteristic of the regenerator is also discussed. With adjustable input peak power and filter parameters, the regenerator can deal with the input pulses with different pulse widths.

Key words: fiber optics and optical communications; microstructured fiber; optical regeneration; self-phase modulation

1 引 言

近年来,微结构光纤的研究受到人们广泛的关注^[1~6]。微结构光纤具有许多与传统光纤不同的特性,例如特殊的色散特性和高的非线性特性。常规的微结构光纤通常是在中心处引入一个空气孔缺陷

作为芯区(即中心是熔融硅纤芯),而周围由沿着光纤长度方向排列的空气孔构成,若空气孔排列具有周期性,这样的微结构光纤也称为光子晶体光纤。通过改变空气孔的尺寸和排列方式,可以灵活地控制光纤的色散特性和非线性特性。

^{*} 国家重点基础研究发展计划(2003CB314900)、教育部科学技术研究重大项目(104046)和北京市教育委员会共建项目(Grant No. XK100130437)资助课题。

作者简介: 卫艳芬(1982—),女,山西孝义人,硕士研究生,主要从事微结构光纤和全光再生方面的研究。

E-mail: yanfenwei@gmail.com

导师简介: 任晓敏(1958—),男,山西孝义人,教授,博士生导师,目前研究方向通信光电子器件与半导体光电子学。

E-mail: xmren@bupt.edu.cn

收稿日期: 2006-06-15; 收到修改稿日期: 2006-09-18

微结构光纤在非线性光学、光纤光学、光纤通信等许多领域都具有广阔的应用前景,其应用研究正不断地深入,特别是在光纤通信中的应用,已经有很多这方面的研究报告^[7~10]。在光纤通信中,光信号在传输过程中由于受到噪声和其他因素的影响会产生失真,随着传输距离和处理过程的增加,噪声的不断累积将使光信号受到损伤。为了保证传输质量,需要对信号进行再生,从而光信号得到恢复。传统的光再生方法是把光信号转变为电信号,再对信号进行再生,然后再转换为光信号。这种方法成本高并受到电子处理速度的限制,对光信号不具有透明性。因此在下一代全光网络中,采用全光再生技术是必然的趋势。目前,利用各种新型光纤、光电子器件进行全光再生是光纤通信中的一个研究热点。本文利用微结构光纤的高非线性特性,采用一种高非线性微结构光纤作为非线性介质,进行了基于光纤中自相位调制效应(SPM)的光再生的理论研究。

2 高非线性微结构光纤的设计与特性

光纤的非线性由非线性系数 γ 表示,定义如下:

$$\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{\text{eff}}, \quad (1)$$

式中 n_2 为材料的非线性折射率, A_{eff} 为有效模面积, λ 为工作波长。 A_{eff} 与光纤的结构参量、工作波长等有密切的关系。由(1)式可知,可通过提高光纤的 n_2 或减小 A_{eff} 提高光纤的非线性系数。采用时域有限差分法^[11] 分析了不同结构参量下,常规微结构光纤的非线性特性与结构参量的关系。设微结构光纤包层空气孔的直径为 d , 空气孔间距为 Λ , 如图 1 为 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, 空气填充比 d/Λ 从 0.2 ~ 0.8 时, 光纤的色散曲线, 图 2 为在 1550 nm 工作波长处, 光纤的有效模面积 A_{eff} 以及非线性系数 γ 随 d/Λ 的变化关系。可以看出随着 d/Λ 的增大, 色散曲线往上移

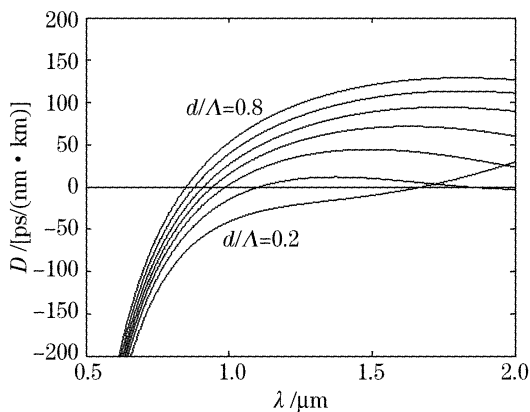


图 1 微结构光纤的色散曲线

Fig. 1 Dispersion as a function of wavelength

动,在 1550 nm 波长处,光纤具有较大的反常色散。而随着 d/Λ 的增大, A_{eff} 逐渐减小,同时非线性系数 γ 相应的增大,这是因为当空气填充比增大时,纤芯与包层折射率差增大,光纤对光的约束能力增强,因此非线性增强。当 d/Λ 为 0.8 时,光纤的非线性系数 γ 达 $40 (\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$, 相应的色散值为 $123 [\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})]$ 。选择这组微结构光纤作为光再生中的非线性介质,研究了基于自相位调制效应的全光再生。

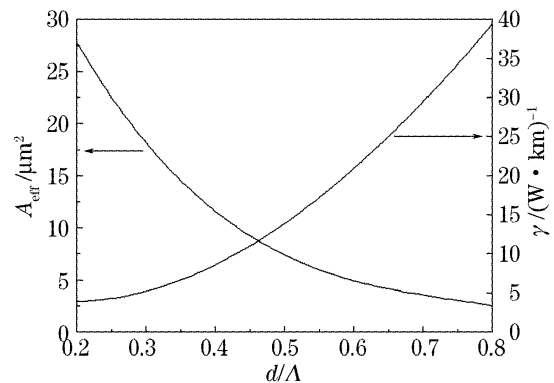


图 2 有效模面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随 d/Λ 的变化关系

Fig. 2 Effective mode area A_{eff} and nonlinearity coefficient γ as a function of d/Λ

3 基于高非线性微结构光纤自相位调制效应的全光再生

3.1 基本原理

强度较高的光脉冲入射到光纤中,由于自相位调制效应,脉冲的频谱会得到展宽,而且频谱的展宽效应与光脉冲的强度有关。如图 3 所示,传输后发生了损伤的归零光脉冲信号通过光放大后输入到高非线性微结构光纤,由于自相位调制效应,脉冲的频谱得到展宽。但是强度较高的光信号获得的频谱展宽较宽,而强度较低的噪声获得的频谱展宽较小。在光纤

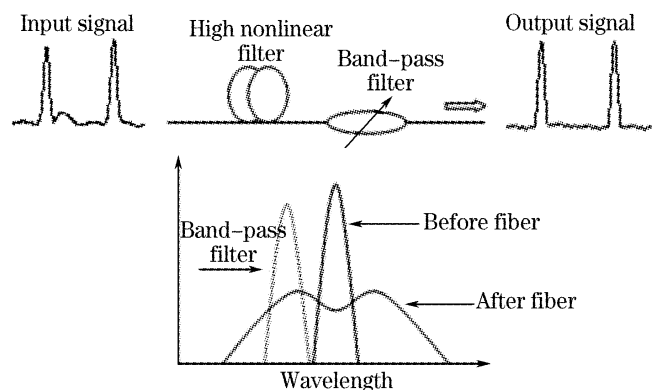


图 3 基于自相位调制的光再生原理图

Fig. 3 Principle of self-phase modulation-based optical regeneration

的输出端,将可调谐带滤波器的透射波长偏离入射脉冲中心波长一定的距离,使其成为一个判决开关。由于信号中的噪声自相位调制效应较弱,频谱展宽较小,不能从滤波窗口透射,而强度较高的光信号产生的频谱展宽较宽,可以从滤波窗口透射出来,从而实现了抑制噪声和信号再生整形的功能。

3.2 数值计算与结果

采用前面讨论的高非线性微结构光纤作为光再生的非线性介质研究了基于自相位调制的光再生过

程。光纤的非线性系数 $\gamma=40 \text{ (W} \cdot \text{km)}^{-1}$,色散 $D=123 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,长度取 10 m,并选取中心波长为 1550 nm 的高斯脉冲作为初始脉冲信号,脉冲宽度 $T_{\text{FWHM}}=10 \text{ ps}$,速率为 10 Gbit/s。

图 4(a)、图 4(b)为初始脉冲信号的波形和频谱。图 5 为经过传输后受损伤的信号,由图可见由于噪声的影响信号产生了失真,其波形产生了畸变,强度出现抖动。这样的信号必须进行再生,否则将影响传输质量。

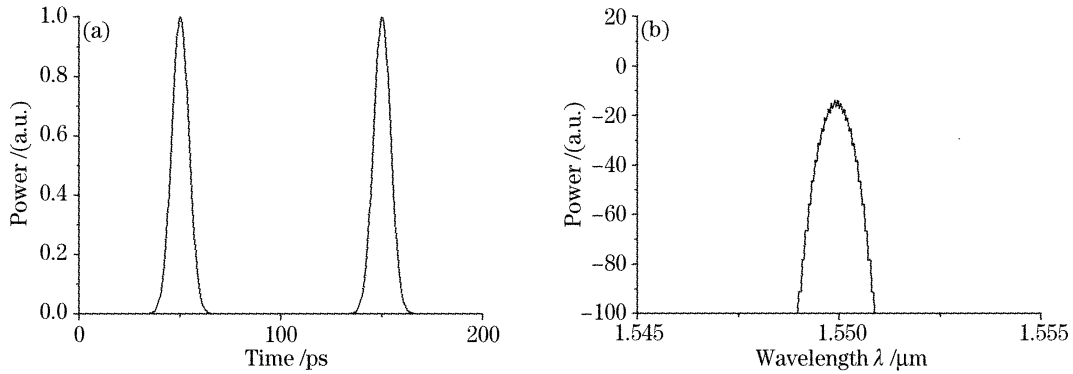


图 4 初始信号的波形图(a)和频谱图(b)

Fig. 4 Waveform (a) and spectrum (b) of the initial signal pulses

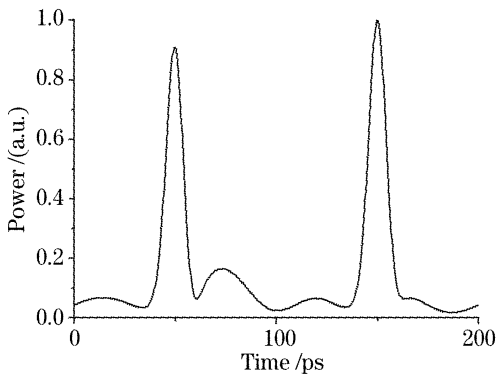


图 5 传输后受到损伤的信号

Fig. 5 Damaged signals after transmission

受损伤的信号通过掺铒光纤放大器(EDFA)将峰值功率放大到 10 W,然后输入到高非线性微结构光

纤。由于光纤的高的非线性,脉冲经过较短的传输距离,其频谱即可获得明显的展宽,图 6 为经过光纤后被展宽的频谱。由于对任意宽度的非啁啾高斯脉冲,其时域和频域宽度的乘积 $\Delta\nu\Delta t$ 约等于 0.44,为了获得与初始信号脉冲宽度(10 ps)相同的光再生信号,滤波器带宽选择为 0.35 nm(44 GHz),且中心波长偏离 1 nm 对展宽的频谱进行滤波。由于噪声频谱展宽很小,不能从滤波窗口透射,而强度较高的信号频谱较宽,可以从滤波窗口透射,从而得到了再生信号。滤波后的再生信号如图 7 所示,再生信号完全消除了幅度抖动,噪声受到显著地抑制,脉冲宽度为 9.98 ps,与初始信号宽度基本相同,脉冲的时域和频域宽度乘积 $\Delta\nu\Delta t=0.439$,显示再生脉冲为近似

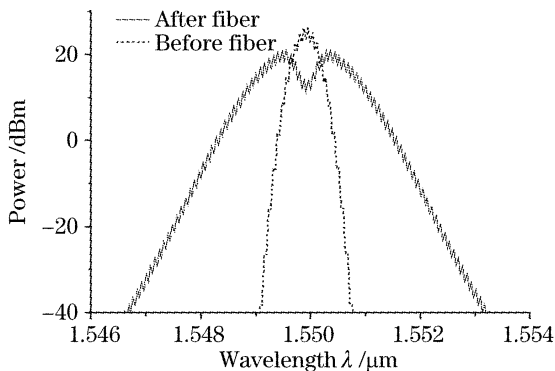


图 6 经过光纤后由自相位调制效应展宽的频谱

Fig. 6 Spectrum is broadening due to self-phase modulation (SPM) after passing through the fiber

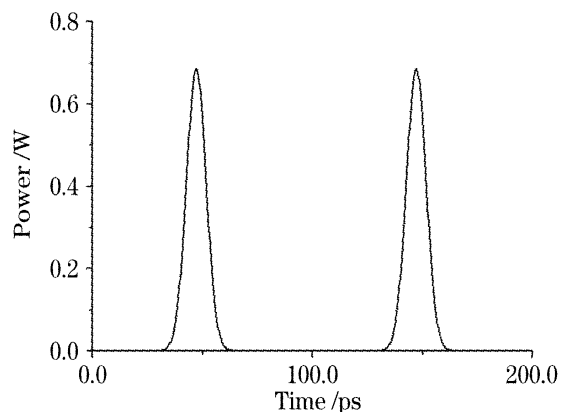


图 7 再生信号的波形图

Fig. 7 Waveform of the regenerated pulses

变换极限非啁啾高斯脉冲,获得了很好的再生效果。

3.3 滤波器参量对光再生的影响

选择合适的滤波器参量对于再生的效果有重要的影响。滤波器的传输函数可表示为

$$H(\omega) = \exp[(\omega - \omega_0)^2 / \delta\omega^2],$$

通过改变滤波器的中心频率 ω_0 和带宽 $\delta\omega$ 可以优化再生性能。对于变换极限脉冲^[12],再生信号的脉冲宽度由滤波器的带宽决定,因此,对于特定脉冲宽度的信号再生,只有中心频率 ω_0 是可调节的。

保持输入信号脉冲宽度和进入微结构光纤的峰值功率不变,仿真了滤波器在不同中心波长下光再生的情形,结果如图 8 所示。可以看出,当滤波器中心波长偏离信号中心波长较小时,再生的信号质量较差,如波长偏移 0.3 nm 时,幅度抖动达 11%,并且有明显的基座和旁瓣,这是因为有大量噪声成分进入到滤波器频带内,没有得到滤除的缘故。

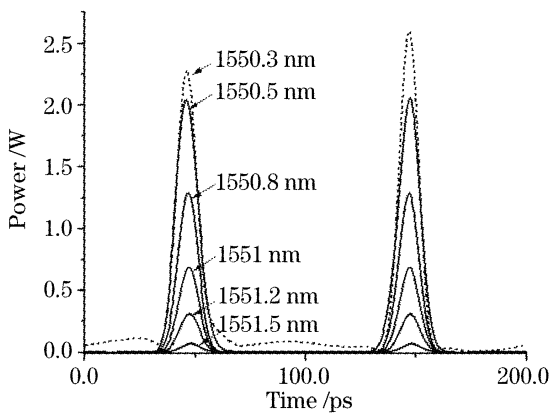


图 8 滤波器中心频率不同的再生信号

Fig. 8 Regenerated pulses for different values of central frequency of the filter

随着滤波器波长偏移量的增加,再生的信号的峰值功率逐渐减小,脉冲幅度抖动逐渐减小,基座和旁瓣逐渐消失。当滤波器波长偏移量达到 0.8 nm

时,再生信号幅度抖动可以忽略,基座和旁瓣已被消除。可见为了获得好的再生效果,滤波器中心波长的偏移量须超过一定的临界值。但是,波长偏移量不能超过自相位调制的展宽频谱,否则将得不到再生的信号。

3.4 再生器的传输特性

保持脉冲宽度和滤波器参量不变 [$T_{FWHM} = 10$ ps, 中心波长偏移量 1 nm, 带宽 0.35 nm (44 GHz)],仅改变入射脉冲的峰值功率,研究了该再生器的传输特性。

图 9 为计算得到的再生信号峰值功率随入射脉冲峰值功率变化的曲线,即再生器的传输函数。可见,当输入微结构光纤信号功率较小时,再生信号功率几乎为零。这是因为自相位调制展宽的频谱较小,以至于展宽的频谱还没有进入滤波器带宽内,因此达不到再生的效果。图 10 为微结构光纤在 10 mW 和 1.5 W 激光入射下的频谱展宽图与再生信号图,峰值功率为 10 mW 时,由于功率较小,再生效果较差。而当输入微结构光纤的峰值功率增加到 1.5 W 时,再生效果变好。

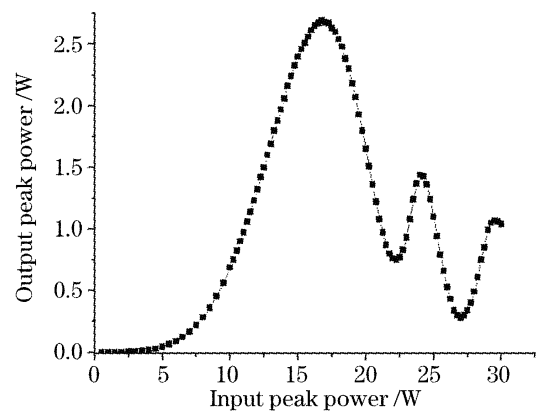


图 9 光再生器的传输函数

Fig. 9 Transfer function of the optical regenerator

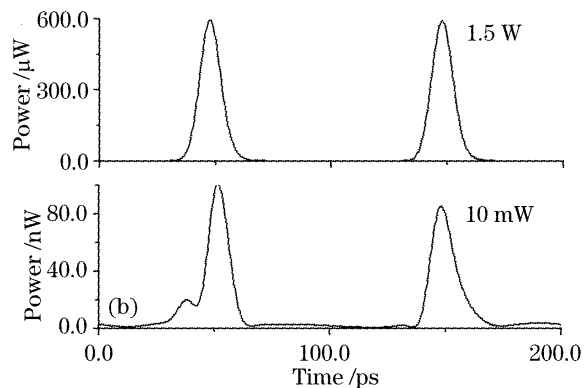
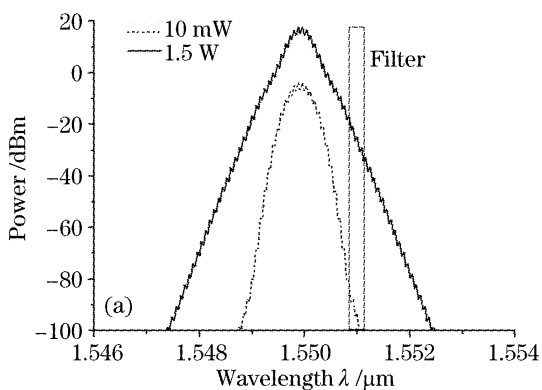


图 10 输入微结构光纤峰值功率分别为 10 mW 和 1.5 W 时的再生效果比较。(a)频谱展宽图,(b)再生信号图

Fig. 10 Comparisons between two regeneration results for the input peak powers of 10 mW and 1.5 W, respectively.

(a) Broadened spectrum, (b) regenerated signals

当入射功率增加到一定程度后,再生信号功率随入射功率迅速增加。随着入射功率的增加,传输函数曲线出现振荡。这是由于展宽的光谱具有振荡结构所造成的,如图 11。因此光再生过程中,合理选择入射脉冲的峰值功率,用较小的入射功率,即可实现较好的再生效果,并使再生信号获得合适的功率,以满足继续传输的要求。通过调整入射功率和滤波器参量,光再生器可以对不同脉冲宽度的光信号进行全光再生。

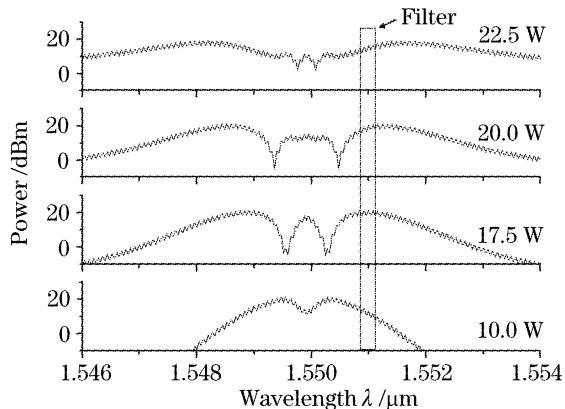


图 11 输入微结构光纤峰值功率增加时,展宽的光谱进入滤波器的情形

Fig. 11 Broadened spectra entering the filter with increased input peak powers

4 结 论

分析了一组微结构光纤的色散和非线性特性与光纤结构参量的关系,并采用了一种高空气填充比的高非线性微结构光纤作为全光再生的非线性介质,进行了基于微结构光纤自相位调制效应的全光再生的研究。研究表明:由于微结构光纤的高非线性,采用较短的光纤长度就可以实现较好的光再生效果。滤波器中心波长、带宽以及入射脉冲的峰值功率对光再生有重要的影响。为了实现光再生,入射峰值功率必需满足一定的要求,同时须选择好滤波器的中心波长和滤波带宽。通过调整入射功率和滤波器参量,再生器可以对不同的脉冲宽度的

光信号进行全光再生。

参 考 文 献

- 1 P. St. J. Russell, J. C. Knight, T. A. Birks *et al.*. Photonic crystal fibers[C]. *ECOC*, 1997, 1(448): 22~25
- 2 Zhang Chunshu, Kai Guiyun, Wang Zhi *et al.*. Influence of lateral pressure on phase and group modal birefringence in microstructure fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 171~175 (in Chinese)
张春书,开桂云,王志等. 侧向压力对微结构光纤双折射的影响[J]. *光学学报*, 2006, 26(2): 171~175
- 3 Zhang Xia, Wang Zinan, Yang Guangqiang *et al.*. Birefringence in squeezed hexagonal lattice microstructure fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(1): 25~28 (in Chinese)
张霞,王子南,杨广强等. 椭圆六角分布微结构光纤中的双折射[J]. *光学学报*, 2006, 26(1): 25~28
- 4 Wu Jinqing, Xue Wenrui, Zhou Guosheng. Dispersion property analysis of square-lattice varying microstructured optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 174~178 (in Chinese)
武劲青,薛文瑞,周国生. 方形渐变空气孔微结构光纤的色散特性分析[J]. *光学学报*, 2005, 25(2): 174~178
- 5 Liu Yanyun, Hou Lantian, Li Qiuju *et al.*. Measurement of photon localization in micro-structure optical fibers using coherent back scattering[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(3): 343~346 (in Chinese)
刘艳云,侯蓝田,李秋菊等. 相干背散射法测量微结构光纤中的光子局域化[J]. *中国激光*, 2006, 33(3): 343~346
- 6 Qinling Zhou, Xingqiang Lu, Jianrong Qiu *et al.*. Beam-shaping microstructure optical fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, 3(12): 686~688
- 7 Song Xuepeng, Chen Bo, Lin Jianfei *et al.*. Supercontinuum generation in multi-core microstructure fiber [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(8): 1066~1068 (in Chinese)
宋学鹏,陈波,林健飞等. 多芯微结构光纤产生超连续谱[J]. *中国激光*, 2006, 33(8): 1066~1068
- 8 Kazi S. Abedin, Fubota Kubota. Wavelength tunable high-repetition-rate picosecond and femtosecond pulse sources based on highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2004, 10(5): 1203~1210
- 9 Kazi S. Abedin. Nonlinear optical loop mirror with highly birefringent polarization-maintaining photonic crystal fiber for walk-off free wavelength conversion over 150 nm [C]. *CLEO*, 2004, 2: 16~21
- 10 Peter A. Andersen, Torger Tokle, Yan Geng *et al.*. Wavelength conversion of a 40-Gb/s RZ-DPSK signal using four-wave mixing in a dispersion-flattened highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(9): 1908~1910
- 11 Min Qiu. Analysis of guided modes in photonic crystal fibers using the finite-difference time-domain method [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2001, 30(5): 327~330
- 12 P. V. Mamyshev. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect[C]. *ECOC*, 1998, 1: 475~476