

文章编号: 0258-7025(2008)09-1350-05

小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备和研究

孟 佳 侯蓝田 周桂耀 高 飞 米 艳

(燕山大学信息科学与工程学院, 燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 介绍一种小芯径折射率引导型光子晶体光纤(PCF)的拉制方法。制备出的光纤纤芯周围第一层空气孔发生形变,呈柚子形,其芯径为 $1.7\ \mu\text{m}$,孔间距 Λ 和空气孔直径 d 分别为 $3.4\ \mu\text{m}$ 和 $2.8\ \mu\text{m}$ 。由于光纤结构的特殊性,采用有限元法在 $200\sim 1600\ \text{nm}$ 波段对其基模有效折射率、色散系数、有效模场面积以及非线性系数进行了数值模拟计算。经过理论计算,这种光纤在所研究的波段具有极高的非线性系数且表现为反常色散,这些特性十分有利于超连续谱的产生。在测量了光纤的损耗、色散等基本特性后,选取损耗较小且位于光纤反常色散区域,中心波长为 $800\ \text{nm}$ 的飞秒激光作为光源,将不同功率的超短激光脉冲耦合入光纤,对这种小芯径折射率引导型光子晶体光纤产生超连续谱的过程进行了测量和分析。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;非线性;色散;超连续谱;有限元法

中图分类号 TN 253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083509.1350

Fabrication and Study on the Small-Core Index-Guiding Photonic Crystal Fiber

Meng Jia Hou Lantian Zhou Guiyao Gao Fei Mi Yan

(College of Information Science and Engineering,

Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A way of fabricating a small-core index-guiding photonic crystal fiber (PCF) is introduced. The first ring of the air holes around the core is deformed, the shape of which is similar to the grapefruit, and the diameter of the core is $1.7\ \mu\text{m}$; the pitch and diameter of the air hole are $3.4\ \mu\text{m}$ and $2.8\ \mu\text{m}$, respectively. Because of the special structure of the fiber, the effective refractive indices, dispersion coefficients of the fundamental modes, effective areas and nonlinear coefficients of the fiber are calculated by finite element method from $200\ \text{nm}$ to $1600\ \text{nm}$. The results show that, in this wavelength range, the nonlinear coefficients of this fiber are extremely high and dispersion coefficients are positive. These characteristics are of benefit to the supercontinuum generating. After measuring the dispersion and loss properties of the fiber, the laser operating wavelength in $800\ \text{nm}$ is chosen to be the light source because the loss in this wavelength is lower and the central wavelength of the pulse is in the range of abnormal dispersion. The femtosecond pulses with different powers are coupled into this small-core index-guiding photonic crystal fiber. The supercontinuum generating in the fiber is detected and analyzed.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; nonlinearity; dispersion; supercontinuum; finite element method

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)是一种新型光纤^[1,2],其包层由具有周期性结构的空气孔构成,空气孔的直径和孔间距可以在一定的范围内进行调节,通过改变这些结构参数,可以优化光子晶体光纤的特性。光

子晶体光纤按纤芯结构的不同可以分为两类,一类是空芯光子带隙(PBG)型光子晶体光纤;另一类是实芯折射率引导型光子晶体光纤。相对于空芯的光子带隙型光子晶体光纤,折射率引导型光子晶体光纤结构设计更加灵活且便于拉制,它具有宽带单模

收稿日期:2007-12-06;收到修改稿日期:2008-01-17

基金项目:国家 973 计划(2003BC314905)和国家 863 计划(2003AA311010)资助项目。

作者简介:孟 佳(1982—),女,河北人,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤的制备及理论方面的研究。

E-mail:bingyananying@sina.com

导师简介:侯蓝田(1939—),男,吉林人,教授,博士生导师,主要从事红外物理技术与红外光纤材料方面的研究。

E-mail:hlt8068853@yahoo.com.cn

传输、宽带色散平坦、高非线性、色散补偿、偏振保持等性质^[3~6]。宽带色散平坦光纤在光学参量放大和超连续谱产生方面起着重要的作用,而高非线性光纤在非线性光学和光纤器件领域有着广阔的应用前景。本文详细描述折射率引导型光子晶体光纤的制备方法,并对其特性进行研究。讨论的折射率引导型光子晶体光纤,芯径为 $1.7\ \mu\text{m}$,可以与光波的波长相比拟,第一层空气孔发生形变,呈柚子形,孔间距 Λ 和空气孔直径 d 分别为 $3.4\ \mu\text{m}$ 和 $2.8\ \mu\text{m}$ 。

2 小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备

由于通常情况下光子晶体光纤的纤芯是由去掉石英包层中相应层数的空气孔形成缺陷而构成的,所以纤芯直径会大于包层中空气孔的直径。因此要制备小芯径光子晶体光纤,包层中空气孔的直径和孔间距也要成比例地相应减小,而且要保证较大的空气填充率。所以在用堆叠法制备预制棒时要选用直径很小的薄壁毛细管,而这种毛细管在堆叠和拉制过程中极易受到外部环境的影响而塌缩变形,以至于扰乱光子晶体光纤的晶格结构,对光子晶体光纤的特性产生不良影响。所以如果选用直径很小的薄壁玻璃管制备小芯径折射率引导型光纤,成功制备出预期的光纤将会十分困难。为解决这一问题,在拉制过程中,选用常规直径的毛细管,去掉预制棒中心的一根毛细管,并减小预制棒中心的压力,由于中心周围的压力相对较高,预制棒中心将会发生塌缩,使第一环毛细管产生形变,这环毛细管的管壁在压力的作用下向中心聚拢,在高温下熔合形成小实芯。这种拉制光子晶体光纤的方法极大地减小了纤芯的直径,而且对除第一环空气孔外的其他空气孔直径几乎没有产生任何影响。拉制成功的小芯径光子晶体光纤的端面图如图 1 所示。

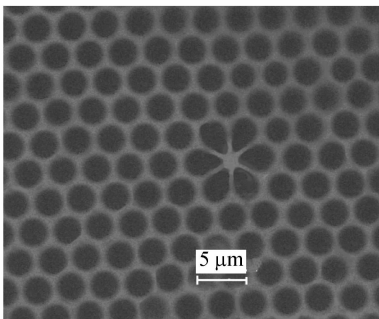


图 1 小芯径光子晶体光纤端面图

Fig. 1 Cross-section of the small-core PCF

从图 1 中可以看出,用这种方法拉制出的实芯光纤其芯径明显小于包层中空气孔的直径,而且第一环空气孔发生了明显的形变,由圆形变为柚子形,这一形变将会对光纤的性质产生一定的影响。

3 数值模拟

3.1 有限元法

要计算和分析这种小芯径光子晶体光纤,首先要建立适当的光纤端面模型,反映出第一环空气孔发生的形变。许多数值方法都可以用于光子晶体光纤的数值模拟^[7,8],例如平面波展开法和时域有限差分法,但是这些方法很难准确地模拟空气孔形状不规则的光纤。相比之下,有限元法在处理空气孔形状不规则的光子晶体光纤时有明显的优势,它甚至可以对每一个空气孔的形状进行单独的描述,再通过对光纤端面进行三角形微元剖分,从而精确模拟出空气孔的形状。如果要提高计算精度,可以增加剖分的次数,相应的计算时间也会有所增加。剖分后光纤端面中空气孔的形状和位置信息将会被提取出来,为在不同区域内求解本征方程提供数据。

从麦克斯韦方程得到本征方程的方法很多,而且具体的推导过程比较复杂,在这里只做简要的介绍。基于麦克斯韦矢量波动方程

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r) \right] - k_0^2 \mu(r) H(r) = 0, \quad (1)$$

式中 $H(r)$ 为磁场, $\mu(r)$ 和 $\epsilon(r)$ 分别为相对磁导率和相对介电常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数, λ 为波长。由于光子晶体光纤横截面上不同区域的折射率不同,并且在硅和空气的分界面上发生突变,因此矢量波动方程折射率不同的区域可以写成齐次方程

$$(\nabla_i^2 + k_0^2 n_i^2 - \beta^2) H = 0, \quad (2)$$

式中下标 i 为区域编号, n_i 为区域的折射率, β 为传播常数。通过 GALERKIN 算法,将(2)式离散,再经过一系列较为复杂的运算,最终可以得到本征方程

$$(\mathbf{A} - n_{\text{eff}}^2 \mathbf{B}) \mathbf{h} = 0, \quad (3)$$

式中 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为与光纤横截面结构有关的稀疏矩阵, n_{eff}^2 和 \mathbf{h} 分别为特征值和特征向量,它们分别对应模式有效折射率的平方和横向模场分布。从(3)式可以得到 n_{eff} 和 $\langle \mathbf{h} \rangle$ 的数值解。对于实芯光纤来说,非线性和色散系数是最重要的特征参数。求解出(3)式后,可以通过

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint |H(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint |H(x, y)|^4 dx dy}, \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (5)$$

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}, \quad (6)$$

分别求出光子晶体光纤的有效模场面积、非线性系数和光纤的色散系数。其中 $H(x, y)$ 为该模式下模场的横向分布函数,它对应着(3)式中的 $\{h\}$, n_2 为光子晶体光纤的非线性折射率,这里取 $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。

3.2 模拟结果

在 $200 \sim 1600 \text{ nm}$ 的波长范围内,对制备出的这种芯径为 $1.7 \mu\text{m}$,孔间距 Λ 和空气孔直径 d 分别为 $3.4 \mu\text{m}$ 和 $2.8 \mu\text{m}$ 的小芯径折射率引导型光子晶体光纤的有效模场面积和非线性系数进行模拟计算,结果如图 2 所示。从图中可以看到,在数值模拟的整个波长范围内,这种小芯径折射率引导型光纤都具有很大的非线性系数,这是传统石英光纤无法企及的。即使是普通结构的折射率引导型光子晶体光纤,要获得如此大的非线性系数,经过理论模拟,其包层中空气孔的间距 Λ 至少要小于 $1.0 \mu\text{m}$ ^[9~11],符合这一条件的光子晶体光纤实际制备起来十分困难。小芯径光子晶体光纤的芯径为 $1.7 \mu\text{m}$,可以与传输的光波波长相比拟,而且由于第一环空气孔的形变,增加了空气填充率,且柚子形的空气孔可以把光更好地限制在纤芯中,这些特点均有利于减小光纤有效模场面积,从而提高光纤的非线性系数。

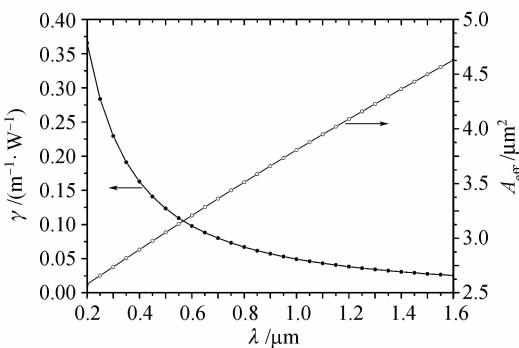


图 2 非线性系数和光纤有效模场面积曲线

Fig. 2 Curves of nonlinear coefficients and effective areas

除非线性系数外,光子晶体光纤的另一个重要的性能参数为色散系数。图 3 所示即为 $200 \sim 1500 \text{ nm}$ 波长范围内小芯径光子晶体光纤的模式有效折射率和基模的色散曲线。从基模的色散曲线可以看出这种光子晶体光纤的特殊之处在于,在 $200 \sim 1500 \text{ nm}$ 的波长范围内均表现为反常色散,且色散曲线较为平坦。

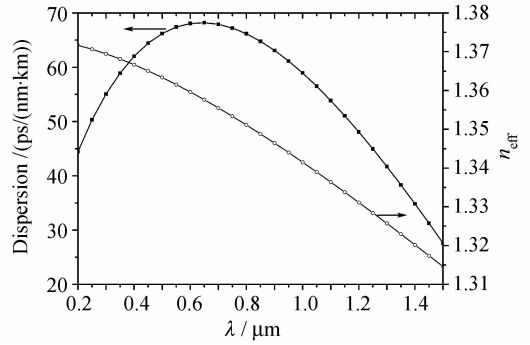


图 3 基模有效折射率和色散曲线

Fig. 3 Effective refractive index and dispersion curves of the fundamental mode

从模拟结果可以看出,小芯径光子晶体光纤具有极高的非线性系数,且在掺钛蓝宝石飞秒激光器的工作波长 800 nm 处表现出反常色散,这两个条件为在这种特殊结构的光纤中产生超连续谱^[12,13]奠定了基础。产生超连续谱是小芯径折射率引导型光子晶体光纤的一个重要应用,以制备出的光纤为研究对象,将不同功率的中心波长为 800 nm 的飞秒激光耦合入小芯径折射率引导型光子晶体光纤,观察产生超连续谱的过程。

4 超连续谱

4.1 光纤基本特性的测量

由于小芯径折射率引导型光子晶体光纤结构较为特殊,而超连续谱的产生是多种光学效应共同作用的结果,因此在研究超连续谱产生之前对这种光纤的基本特性进行了测量。首先选取长度为 2 m ,纵向均匀性好的小芯径折射率引导型光子晶体光纤,以溴钨灯作为光源,对光纤的透射谱和损耗曲线进行测量。

图 4 所示的透射光谱图以光源的光谱为基准对

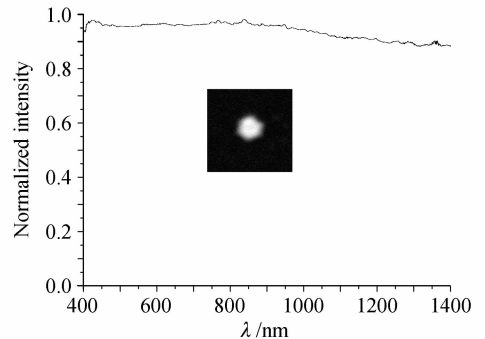


图 4 光纤的归一化透射谱和近场模式图

Fig. 4 Normalized transmission spectrum of the fiber and the near-field profile of the modes

透射光强进行了归一化,并且给出了透射光的近场模式图。图5所示的是光纤的损耗曲线,虽然测量的光纤长度为2 m,为了和传统的石英光纤以及其他结构的光子晶体光纤进行对比,将在不同波长下测量出的损耗值的单位换算成 dB/km 的形式。从图5可以看出,光纤的损耗曲线在整个测量范围内变化很大,特别是在波长大于950 nm时,光纤损耗明显增加。

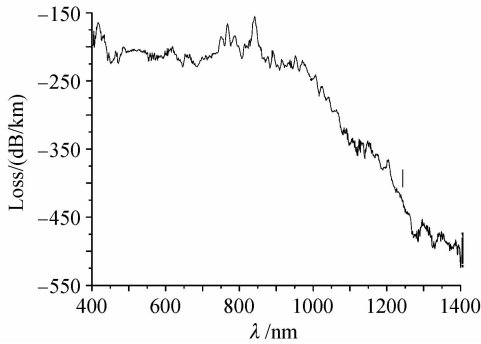


图5 光纤的损耗曲线

Fig. 5 Loss curve of the fiber

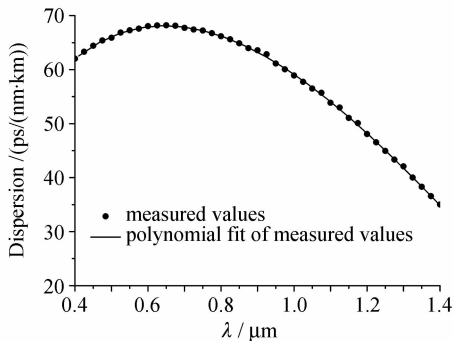


图6 色散的测量值和多项式拟合曲线

Fig. 6 Measured values of the dispersions and the polynomial-fitted curve

虽然光子晶体光纤的色散主要取决于基模的色散,但是由于高阶模的存在会对光纤的色散曲线产生一定的影响。为了准确获得这种光纤的色散特性,采用相移法在400~1400 nm的波长范围内测量其色散值,并用多项式拟合测量结果,得到光纤的色散曲线,如图6所示。测量值与理论计算结果符合得比较好,这也反映出用有限元法进行理论模拟的准确性。

由于中心波长在光子晶体光纤反常色散区的飞秒激光入射到光纤中更有利于产生超连续谱,且超连续谱的覆盖范围也比较宽,因此选取中心波长在800 nm处的飞秒激光作为光源,用制备出的小芯径折射率引导型光子晶体光纤进行超连续谱的研究。

4.2 不同功率的飞秒激光在光纤中的传输

在实验中将中心波长为800 nm,重复频率为80 MHz,半峰全宽为100 fs的功率不同的飞秒激光耦合到这种小芯径高非线性光纤的纤芯中,耦合效率为70%,光纤长度为2 m,在光纤后端面采用光谱仪对透射光的光谱进行测量。

图7为入射到光纤中的超短激光脉冲功率分别为0.5 mW, 2 mW, 10 mW, 20 mW和40 mW时,测量到的透射光光谱图。当入射光的平均功率为0.5 mW时,飞秒激光经2 m长的光纤传输后其频谱形状基本保持不变。这是由于在800 nm处光纤的反常色散区,根据数值模拟得到的色散和非线性系数,可以计算出光纤的色散长度 L_D 与非线性长度 L_{NL} 之比为1.03,此时光纤中群速度色散(GVD)和自相位调制(SPM)相对平衡,脉冲经过光纤传输后其频谱基本不发生变化。而当入射的飞秒激光功率增加到2 mW时,非线性长度小于色散长度,此时非线性效应起主要作用,光谱开始展宽。从光谱图中可以明显观察到孤子自频移现象,在波长大于800 nm的红外波段有一个明显的峰值。这种自频移现象是由脉冲内拉曼散射引起的,对于脉宽小于1 ps的入射脉冲,其谱宽较宽,使得脉冲的蓝移分量可以作为抽运,通过拉曼增益有效地放大相同脉冲的红移分量。同时在光谱图中还可以观察到在短波段有相应匹配的非孤子辐射的峰值出现,色散和脉冲自陡峭效应共同作用导致了频谱的不对称性。随着功率的增加,飞秒激光脉冲在红外波段形成的高阶孤子在高阶色散的影响下,分裂成数个基态孤子,并伴随相应的非孤子辐射,光谱显示为红外波段的峰往长波扩展,并出现几个新的峰值,而相应的短波也往蓝绿方向扩展。当入射光的功率达到20 mW时,激发出更高阶孤子,功率越高,孤子阶数越多,且红移的中心波长偏离抽运光越远。随着功率进一步增加,所产生的超连续光谱中非孤子辐射的强度增强,即短波段继续扩展,相应的长波段也在扩展,最终在四波混频(FWM)效应的作用下,光谱变得连续。但是光谱在较高功率时在短波段依然存在明显的峰值,这是相位匹配效应在短波段产生新的光谱成分的必然结果。可以认为孤子的分裂产生超连续谱,FWM更加宽了连续谱的覆盖范围。最终超连续谱覆盖从紫外330 nm到红外1560 nm的波长范围。

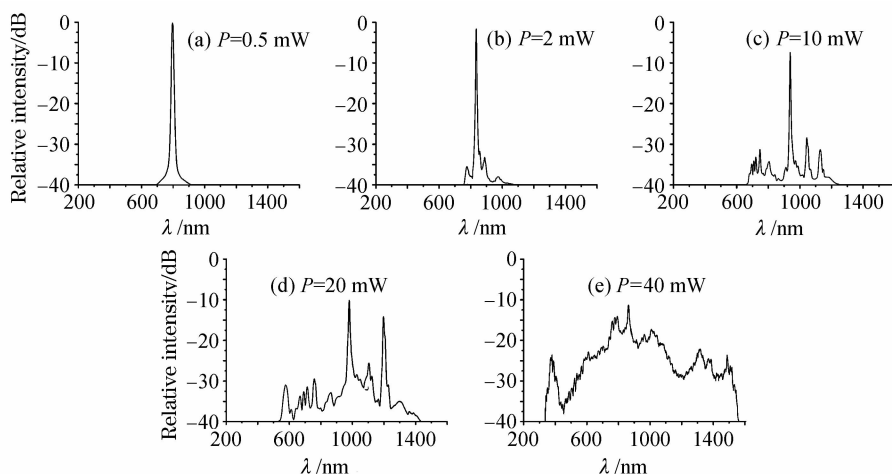


图 7 不同功率飞秒激光脉冲经小芯径光子晶体光纤传输后的输出光谱

Fig. 7 Transmission spectrum of the small-core PCF pumped by different power femtosecond pulse

5 结 论

详细介绍了小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备方法,并利用有限元法对其非线性和色散性质进行了模拟计算。结果表明这种结构的光纤在200~1600 nm波长范围内均具有很高的非线性系数,且这一波段位于光纤的反常色散区域,这对于光纤中产生超连续谱十分有利。在测量了光纤的基本特性后,选取位于光纤反常色散区且损耗较小的中心波长为800 nm的不同功率超短激光脉冲入射到光纤中,测量并分析了透射光产生超连续谱的过程。这种光子小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备及数值模拟方法对光子晶体光纤的研究具有一定的参考价值。光纤产生的超连续谱对于非线性光学中超短脉冲产生、光谱分析、光学相干层析、光计量学、光通信等许多应用都有重要意义^[14,15]。

参 考 文 献

- 1 P. St. J. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605):358~362
- 2 J. C. Knight. Photonic crystal fibers [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950):847~851
- 3 W. H. Reeves, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Demonstration of ultra flattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14):609~613
- 4 Zhang Lin, Yang Changxi. Photonic crystal fibers with squeezed hexagonal lattice [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(11):2371~2376
- 5 Zhang Lin, Yang Changxi. A novel polarization splitter based on the photonic crystal fiber with nonidentical dual cores [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7):1670~1672
- 6 Fangdi Zhang, Xiaoyi Liu, Min Zhao *et al.*. A novel design for single-polarization single-mode photonic crystal fiber at 1550 nm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5):260~263

- 7 Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. A vectorial analysis on the dispersion of PCF's fundamental mode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6):1873~1879
李曙光,刘晓东,侯蓝田. 一种光子晶体光纤基模色散特性的矢量法分析[J]. *物理学报*, 2004, **53**(6):1873~1879
- 8 A. Ferrando, E. Silvestre, J. J. Miret *et al.*. Full-vector analysis of a realistic photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(5):276~278
- 9 Liu Zhaolun, Liu Xiaodong, Ni Zhenghua *et al.*. Research on high nonlinearity and flattened dispersion of photonic crystal fibers [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(1):47~50
刘兆伦,刘晓东,倪正华等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(1):47~50
- 10 Li Chunlei, Sheng Qiuqin. The relation between the nonlinear coefficient of PCF and its geometry parameters and the optical wavelength [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5):734~737
李春雷,盛秋琴. 光子晶体光纤非线性系数与其结构参量及光波长的关系[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5):734~737
- 11 Liu Jie, Yang Changxi, Claire Gu *et al.*. A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1569~1574
刘洁,杨昌喜,Claire Gu等. 一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1569~1574
- 12 J. K. Randa, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion in 800nm [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):25~27
- 13 S. Coen, Rainer Leonhardt, J. D. Harvey *et al.*. White-light supercontinuum generation with 60 ps pump pulses in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(17):1356~1358
- 14 I. Hartl, X. D. Li, C. Chudoba *et al.*. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air - silica microstructure optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9):608~610
- 15 Xu Yongzhao, Wang Zinan, Zhang Xia *et al.*. 10 GHz-spaced over 1100 channel flat supercontinuum source generated in a microstructure fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):675~679
许永钊,王子南,张霞等. 基于微结构光纤的10 GHz超过1100信道的平坦超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):675~679