

文章编号: 0253-2239(2008)07-1379-05

一种高双折射光子晶体光纤的模式特性分析

张晓娟 赵建林 崔 莉

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 应用全矢量频域有限差分法, 分析了所提出的一种高双折射光子晶体光纤的模式截止、损耗、模场半径及数值孔径等特性。数值模拟结果表明, 通过设置合适的结构参量, 可使这种高双折射光子晶体光纤在保持模式双折射为 10^{-3} 量级的前提下, 能够在 600~1800 nm 波长范围内保持单模传输, 并且限制损耗可低于 10^{-4} dB/m 量级, 同时还可以获得较大的数值孔径, 因而聚光能力增强。此外, 通过采用高斯曲线拟合基模的模场分布, 得到的模场半径与实际模场半径吻合得很好。

关键词 光子晶体光纤; 截止特性; 限制损耗; 频域有限差分

中图分类号 TN253; TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1379

Analysis of Mode Properties of Photonic Crystal Fiber with High Birefringence

Zhang Xiaojuan Zhao Jianlin Cui Li

(Shannxi Key Laboratory of Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xian, Shaanxi 710072, China)

Abstract The mode cutoff, confinement loss, modal radius, and numerical aperture of photonic crystal fiber (PCF) with high birefringence were analyzed by using full-vector finite difference frequency domain (FDFD) method. The numerical simulation results shown that, by choosing suitable structural parameters, the birefringence of the PCF may reach the order of 10^{-3} with broad single-mode region (600~1800 nm). A low confinement loss less than 10^{-4} dB/m and high numerical aperture can be obtained in a properly designed geometrical structure of PCF, so the focusing ability is enhanced. Moreover, by fitting the distribution of the fundamental mode using Gaussian curve, the obtained modal radius agrees well with the actual one.

Key words photonic crystal fiber (PCF); cut-off property; confinement loss; finite difference frequency domain (FDFD)

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)是一种将光子晶体及缺陷结构引入光纤中而形成的新型微结构光纤。PCF包层中空气孔的特殊排列结构使其呈现出许多在传统光纤中难以实现的特性, 如无截止波长的单模特性^[1]、可调的色散特性^[2]、大的模场面积^[3]、良好的非线性^[4]及高双折射特性^[5]等, 因而引起了国内外广泛的关注, 成为光纤通信、传感和光电器件领域的一个新的研究热点^[1-6]。相对于传统光纤, PCF有很大的设计自由度, 因此可以直接通过调整其包层

结构, 设计出具有很高双折射的 PCF。现阶段 PCF的模式双折射已经可以达到 10^{-3} 量级^[7], 比普通保偏光纤至少高一个数量级。特殊结构的 PCF 可以在极宽的波长范围内支持单模运行, 且其单模特性与 PCF 的绝对尺寸无关。对于高双折射 PCF, 如果在保持高双折射的情况下, 还可以在很宽的波长范围内保持单模传输, 无疑是非常有用的。文献[8]曾提出了一种高双折射 PCF 结构, 并初步分析了该结构 PCF 的模场、偏振及色散特性。但由于篇幅限制, 尚未涉及其他模式特性, 如截止、损耗、模场半径

收稿日期: 2007-11-02; 收到修改稿日期: 2008-01-24

作者简介: 张晓娟(1980—), 女, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤结构设计及其传输特性等方面的研究。

E-mail: zzzxdj_0913@mail.nwpu.edu.cn

导师简介: 赵建林(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息技术及应用方面的研究。E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

及数值孔径等,而这些对光纤传输特性的影响不容忽视。因此,本文在文献[8]的基础上,进一步讨论该结构 PCF 的截止、损耗、模场半径及数值孔径等特性,以期通过比较分析,得到一组最优结构参量。

2 PCF 的端面结构及理论分析方法

文献[8]提出的 PCF 端面结构如图 1 所示,其中 Λ 为空气孔横向间距, θ 为三角结构顶角, d_2 、 d_1 分别为大、小空气孔直径。为了讨论问题方便,采用系数 α 表征大小空气孔的直径比。

假设光纤中传输着频率为 ω 的单色光波,其电场强度矢量 \mathbf{E} 或磁场强度矢量 \mathbf{H} 的坐标分量可以表示为 $\Phi = \psi \exp[i(\beta z - \omega t)]$, 式中传播常量 $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$ 。相应地,将麦克斯韦方程组中的两个旋度方程按频域有限差分法在一个差分格点上离散化,并采用各向异性完全匹配吸收层,可得特征方程^[9]

$$\mathbf{P} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{Q} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} \\ Q_{yx} & Q_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

通过求解特征方程的本征值和本征矢量,便可得到各阶模式对应的传播常量和模场分布,从而进一步分析相应的传输特性。文献[8]中计算了由(1)式所构成的本征方程,其特征值对应传输常量 β^2 ,其特征向量对应横向电场分布。当采用各向异性完全匹配吸收层时,得到的传播常量 β 为复数,其实部与采用零边界条件^[10]计算得到的传播常量相同。由 β 的实部 β_r ,可以计算光纤中可能存在的模场的有效折射率($n_{\text{eff}} = \beta_r/k_0$);由 β 的虚部 β_i ,可计算出限制损耗 L_{loss} ($L_{\text{loss}} = \frac{20}{\ln 10} \beta_i$);同时,由模场的空间强度分布,可计算出相应模场的有效面积 A_{eff} 、模场半径、数值孔径 NA 等等。

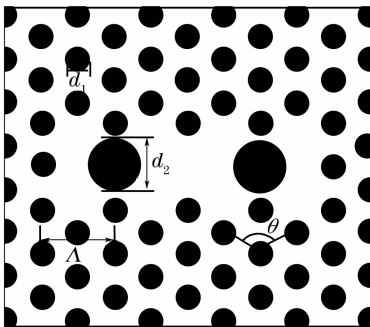


图 1 高双折射光子晶体光纤

Fig. 1 Sketch of cross section PCF with high birefringence

3 截止特性

传统光纤中导模的折射率必须满足 $n_{\text{clad}} < \beta/k_0 < n_{\text{co}}$, n_{clad} 为包层折射率, n_{co} 为纤芯折射率, $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ 为模场的有效折射率。当要求保持单模传输时,除必须满足上述条件外,还必须满足归一化频率条件 $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{clad}}^2} < 2.405$, 其中 a 为纤芯半径, λ 为工作波长。在 PCF 中包层由大量空气孔构成,没有对应传统光纤的包层折射率 n_{clad} 和纤芯折射率 n_{co} , 因此不能直接按照上式判断光纤传输是否为单模传输。但已有文献^[11,12]报道,当光在 PCF 中传输时,可以认为导模的模式折射率满足同样的关系,不过此时包层的折射率 n_{clad} 用基空间填充模式折射率 n_{FSM} 来代替。基空间填充模(FSM)是指无限大 PCF 包层结构中的基模, β_{FSM} 为 PCF 包层中允许的最大传播常量。而满足单模传输的条件也有所不同,在 PCF 中,归一化频率

$$V_{\text{PCF}}(\lambda) = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{\text{eff}}^2(\lambda) - n_{\text{FSM}}^2(\lambda)} < \pi, \quad (3)$$

针对所提出的高双折射 PCF 结构,模拟不同结构参量情况,得到不同波长下其模场的有效折射率 n_{eff} 和基空间填充模式的有效折射率 n_{FSM} ,代入归一化频率 V 的计算公式,便得到归一化频率 V 与结构参量及波长之间的关系。

图 2 描述了 V 随波长的变化关系,图中虚线处的 V 取值为 π 。图 2(a)是在固定小空气孔直径 d_1 , 而改变空气孔直径比 α 时,归一化频率 V 随波长的变化关系。可以看出,大小空气孔直径比 α 增大或者减小,对 V 的影响很大,但没有单一的增大或减小关系。也就是说, α 增大时, V 有可能增大也可能减小。因此需要设置合适的结构参量,使 V 尽量小,以保持单模传输。同时模拟结果也表明,波长越长, V 越小。图 2(b)是在固定空气孔直径比 α 而改变小空气孔直径 d_1 时得到的数值模拟结果。当 d_1 增大时, V 值先是增大,然后减小以至与其他曲线相交。图 2(c)是在固定其他结构参量,仅改变横纵向空气孔间距时,计算得到的 V 随波长的变化关系。可以看出,间距减小,归一化频率 V 也减小。而且在顶角 $\theta = 96^\circ$ 和 $\theta = 89^\circ$ 时,场在 600~1800 nm 波长范围内一直呈单模传输。同时,文献[8]中已得出该光纤在所选定的结构参量情况下的双折射可以达到 10^{-3} 量级。因此,可以认为该结构 PCF 可以在宽波长范围实现高双折射。

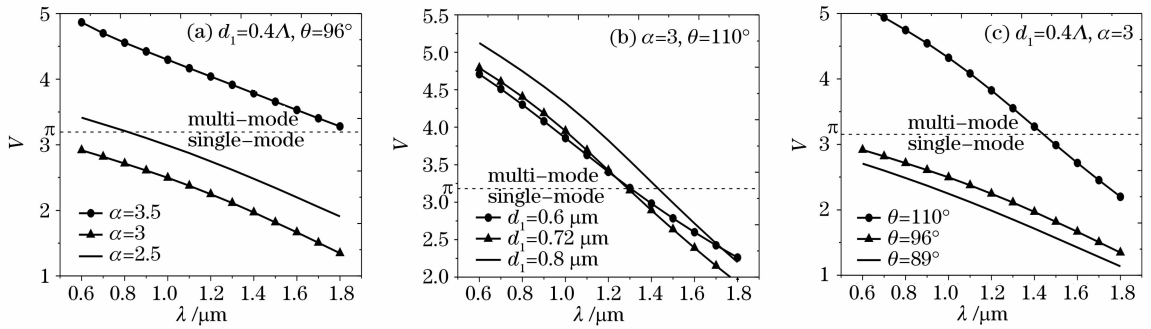


图 2 归一化频率 V 随波长的变化关系

Fig. 2 Relationship of V versus wavelength

4 限制损耗

由于该结构 PCF 具有二重旋转对称性,因此 x 和 y 偏振的限制损耗不同,损耗曲线分离。两个偏振方向限制损耗差距大小与光纤结构和结构参量有关。当差距很小时,可以实现稳定的高双折射传输;当差距较大(如相差一个数量级)时,不利于高双折射传输,但却为单模单偏振传输提供了可能,即通过设置结构参量使一个偏振方向的损耗很大以至于完全损耗,从而只能稳定传输一个偏振方向的光波。

图 3 为结构参量 $\Lambda=2 \mu\text{m}$, $d_1=0.8 \mu\text{m}$, $\alpha=3$, $\theta=96^\circ$ 时, x 和 y 偏振的限制损耗随波长的变化。可以看出, $\lambda < 1600 \text{ nm}$ 时,限制损耗很小; $\lambda > 1600 \text{ nm}$ 时,限制损耗显著增加。分析其原因主要是由于计算时包层空气孔数目(即包层层数)设置较少,波长越长,场越向包层延伸,因而限制损耗明显增大。固定其它结构参量,当包层设置为两层,工作波长为 1550 nm 时,两个偏振模式的限制损耗分别为: 0.094 dB/m 和 0.064 dB/m ;而当包层设置为三层,工作波长为 1550 nm 时,得到的限制损耗明显减小,分别为 $2.88 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ 和 $1.34 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$ 。从制作的角度来看,包层数目越少越好。因此,在设计 PCF 结构时,应尽可能地减少包层数目,以减少

制作的困难,同时保持限制损耗尽量小。

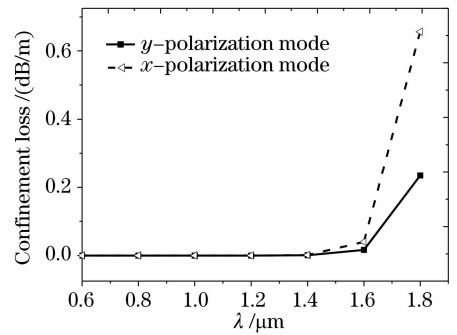


图 3 x 和 y 偏振对应限制损耗随波长的变化

Fig. 3 Relationship of confinement loss versus wavelength for x and y polarization

模拟结果还表明,采用不同的结构参量(d_1 、 α 和 θ),可使光在 PCF 中传输时的限制损耗差别很大。图 4 给出了不同结构参量情况下, x 偏振基模的限制损耗随波长的变化关系。可以看出,小空气孔直径 d_1 、大小空气孔直径比 α 及三角结构顶角 θ 减小时,限制损耗明显减小。其主要原因是 d_1 、 α 、 θ 增大,将导致包层等效折射率增大,从而使纤芯和包层折射率差减小,模场更多地分布在包层,于是限制损耗增加。

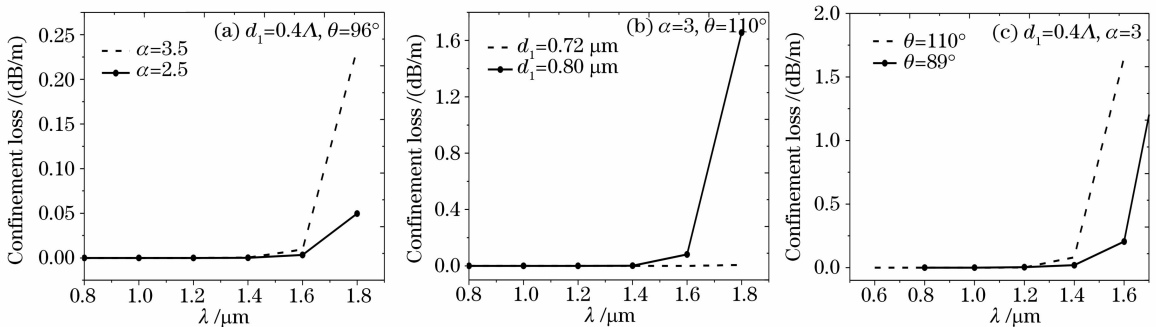


图 4 限制损耗随波长的变化关系

Fig. 4 Relationship of confinement loss versus wavelength

5 模场半径

因为 PCF 一般用于单模传输,所以与普通单模光纤一样,其所传输的光波场不能完全集中在纤芯中,而是有一部分在包层区域中传输。另外,在 PCF 中,纤芯和包层之间并没有一个非常明确的界限划分。故需要采用模场半径作为描述 PCF 中传输光能集中程度的参量。

模场半径是分析光纤中光波场传输特性的一个非常重要的参量,与光纤的非线性系数、数值孔径、宏弯损耗、微弯损耗、光纤间的熔接损耗等^[13]都具有重要的关系。利用模场半径的变化也可以判断模式的截止特性^[14]。

由于 PCF 的基模模场分布具有高斯函数的特征,所以在实际应用中,可以用高斯函数来近似表示实际 PCF 中的场分布,即将基模模场的分布曲线用高斯曲线拟合。通过拟合曲线得到高斯型场分布的 $e^{-1/2}$ 点,由此可求出对应于光场强度分布曲线最大值的 e^{-1} 处的光斑直径 D ,即 PCF 的模场直径。

假设 PCF 纤芯中的模场近似为圆高斯分布,即基模的场强分布为

$$g(r) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\omega} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right), \quad (4)$$

式中 ω 为 $e^{-1/2}$ 模场半径。在一般的周期性三角结构中也用式 $A_{\text{eff}} = \pi\omega^2$ 计算模场半径^[11]。这里 A_{eff} 为模场的有效面积。

以上分析表明,这种新结构 PCF 只具有二重对称性,光纤基模的两个正交偏振态不再简并, x 偏振基模和 y 偏振基模对应的模场半径有所不同。这里仅给出结构参量 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $\alpha = 3$, $\theta = 96^\circ$, 波长为 1550 nm 时的 x 偏振基模的模场分布及采用高斯曲线拟合的结果,如图 5 所示,图中实线为拟合曲线,虚线为数值模拟得到的模场沿中心截面的分布曲线。可以看出两曲线在中心处完全重

合,只有在纤芯与包层的交界处才出现很小的偏离。表明采用高斯拟合的模场分布与数值模拟得到的模场分布能够很好地吻合。

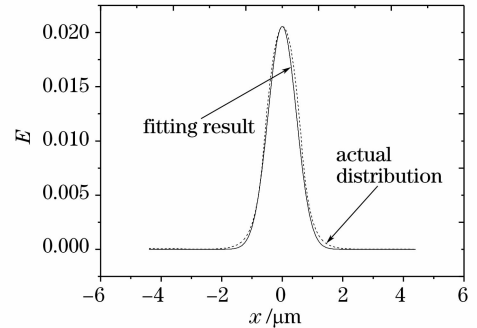


图 5 模场半径

Fig. 5 Modal radius

6 数值孔径

光纤的数值孔径在一定程度上反映了某种模式是否容易被激发,或光场是否容易被耦合的性质。只有入射角小于数值孔径确定的孔径角的光束才可以进入光纤成为传输光束。对于采用双包层光纤的高功率激光器而言,大的数值孔径能极大地增强抽运效率。传统阶跃光纤的数值孔径定义为

$$NA = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (5)$$

式中 $\Delta = n_1 - n_2/n_1$ 为纤芯与包层的相对折射率差; n_1 、 n_2 分别是纤芯和包层的折射率。可见, Δ 越大, NA 越大,光纤的聚光能力越强。从光纤与光源耦合角度看, NA 越大,耦合效率越高。但传统光纤的相对折射率差不可能做得很大,而 PCF 可以灵活地设置包层的空气孔,以产生大的相对折射率差,从而获得大的数值孔径。W. J. Wadsworth 等^[15]设计出了数值孔径高达 0.9 的大数值孔径 PCF,目前已被应用到 PCF 激光器上。PCF 的数值孔径可以近似表示为

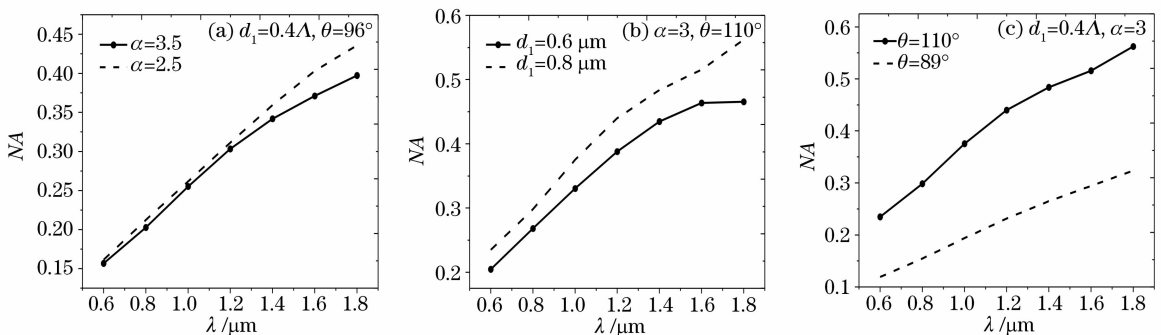


图 6 数值孔径随波长的变化

Fig. 6 Relationship of NA versus wavelength

$$NA = \sin \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \pi^2 \omega^2 / \lambda^2}} \approx \frac{\lambda}{\pi \omega}, \quad (6)$$

式中 λ 为工作波长, ω 为模场半径。

图 6 为计算得到的数值孔径随波长的变化关系。可以看出, 小空气孔直径 d_1 和三角结构顶角 θ 越大, 大小空气孔直径比 α 越小, 则数值孔径越大, 聚光能力越强; 波长增大, 数值孔径增大。

7 结 论

采用频域有限差分法进一步详细分析了所提出的新结构高双折射 PCF 的模式特性。为了得到最优的传输特性, 需要综合考虑以上数值模拟结果, 从中选择一组最佳结构参量。数值模拟结果表明, 当选择结构参量 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.4\Lambda$, $d_2/d_1 = 3.5$, $\theta = 96^\circ$ 时, 该结构 PCF 具有如下好的传输特性:

1) 在保持这种高双折射 PCF 的模式双折射为 10^{-3} 量级的前提下, 可以在 $600 \sim 1800 \text{ nm}$ 波长范围内保持单模传输;

2) 当计算区域为 $7\Lambda \times 7\Lambda$ 时, 限制损耗很低, 低于 10^{-4} dB/m 量级;

3) 用高斯曲线拟合 x 偏振基模模场分布, 对应模场半径和实际模场半径能够很好的吻合;

4) 数值孔径很大, 达到 0.6, 具有很好的聚光能力。因此, 相信这种结构的 PCF 将具有广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. Russel. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 961~963
- 2 Enrique Silvestre, Teresa Pinheiro-Ortega, Pedro Andrés *et al.*. Analytical evaluation of chromatic dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5): 453~455
- 3 John M. Fini. Bend-resistant design of conventional and microstructure fibers with very large mode area [J]. *Opt.*

Express, 2006, **14**(1): 69~81

- 4 Zhou Bing, Jiang Yongliang, Chen Xiaowei *et al.*. Numerical simulation on propagation of ultra-short laser pulse in photonic crystal fibers with different group velocity dispersion parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 323~328
- 周 冰, 姜永亮, 陈晓伟 等. 超短激光脉冲在不同色散参量光子晶体光纤中传输的数值模拟[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 323~328
- 5 Fang Hong, Lou Shuqin, Guo Tiejing *et al.*. Novel-high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 202~206
- 方 宏, 娄淑琴, 郭铁英 等. 一种新结构高双折射光子晶体光纤 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 202~206
- 6 P. Glas, D. Fischer, M. Moenster *et al.*. Large-mode-area Nd-doped single-transverse mode dual-wavelength microstructure fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(20): 7884~7892
- 7 A. Ortigasta-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth. Highly birefringence photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(9): 1325~1327
- 8 Zhang Xiaojuan, Zhao Jianlin, Hou Jianping. A novel photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8): 4668~4676
- 张晓娟, 赵建林, 侯建平. 一种新型高双折射光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2007, **56**(8): 4668~4676
- 9 Shangping Guo, Feng Wu, Sacharia Albin. Loss and dispersion analysis of microstructured fibers by finite-difference method[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3341~3352
- 10 Zhaoming Zhu, Thomas G. Brown. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(17): 853~864
- 11 Niels Asger Mortensen, Jacob Riis Folkenberg. Modal cut-off and the V-parameter in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1879~1881
- 12 R. Folkenberg, N. A. Mortensen, K. P. Hansen *et al.*. Experimental investigation of cut-off phenomena in non-linear photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1882~1884
- 13 Niels Asger Mortensen. Effective area of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 341~348
- 14 Fang Hong, Lou Shuqin, Ren Guobin *et al.*. Mode cut-off in photonic crystal fiber with non-uniform holes [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(4): 493~498
- 方 宏, 娄淑琴, 任国斌 等. 非均匀孔径光子晶体光纤的模式截止 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 493~498
- 15 W. J. Wadsworth, R. M. Percival, G. Bouwmans *et al.*. Very high numerical aperture fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 843~845