

· 光电器件与材料 ·

## 低弯曲损耗大模场面积多芯光纤的研究

巩玲仙<sup>1,2</sup>, 王春灿<sup>1,2</sup>, 陈雪<sup>1,2</sup>, 许丽丽<sup>1,2</sup>, 尚玉美<sup>1,2</sup>

(1. 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京交通大学, 北京 100044; 2. 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要:** 针对19芯、37芯大模场光纤提出两种降低弯曲损耗的方法, 一种方法是在芯区外引入一层空气孔, 另外一种方法是在芯区外引入多包层低折射率结构。理论分析表明, 多芯光纤弯曲损耗存在临界弯曲半径, 在大于临界半径的情况下, 弯曲损耗基本不变, 在小于临界半径的情况下, 弯曲损耗急剧增大。引入空气孔后, 当19、37芯光纤模场面积分别为 $516 \mu\text{m}^2$ 和 $920 \mu\text{m}^2$ 时, 临界弯曲半径都从3.5 cm减小到4 mm。当引入包层数达三层以上时, 多包层结构也可使19、37芯光纤的临界弯曲半径从3.5 cm减小到4 mm。

**关键词:** 弯曲损耗; 多芯光纤; 大模场; 空气孔

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)05-0036-04

## Research of Large Mode Area Multi-core Fibers with Low Bending Loss

GONG Ling-xian<sup>1,2</sup>, WANG Chun-can<sup>1,2</sup>, CHEN Xue<sup>1,2</sup>, XU Li-li<sup>1,2</sup>, SHANG Yu-mei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China; 2. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Two methods are proposed to decrease the bending loss of 19-core and 37-core large mode area fibers. The first approach is to introduce a ring of air holes around the cores. The second approach is to introduce cladding layers with the lower refractive index. The numerical simulation shows that there is a critical bend radius in the multi-core fibers and the variation of bending loss is small when the bend radius is bigger than the critical radius. But the bending loss increases sharply when the bend radius is smaller than the critical radius. In the cases of 19-core and 37-core fibers with air holes, the critical radius both decreases from 35 mm to 4 mm with mode field area of  $516 \mu\text{m}^2$  and  $920 \mu\text{m}^2$ . The critical bend radius of the 19-core and 37-core fiber both decreases from 35 mm to 4 mm with three or more claddings of the low refractive index.

**Key words:** bending loss; multi-core fiber; large-mode-area; air holes

大模场面积多芯光纤<sup>[1-3]</sup>与传统的单芯光纤相比增大了基模的有效面积, 使得受激拉曼散射和受激布里渊散射等非线性效应的阈值功率得到提升, 从而有效提高多芯光纤激光器的输出功率。但是多芯光纤有着比较高的弯曲敏感度<sup>[4]</sup>, 而弯曲损耗<sup>[5-6]</sup>的降低有利于提升光纤激光器工作的稳定性和输出效率。

文中针对多芯光纤弯曲损耗的降低进行理论分

析, 提出两种改进方法, 一种方法是在芯区外引入一层空气孔, 另外一种方法是在芯区外引入多包层结构, 分别如图1、图2所示。基于全矢量有限元法计算分析了不同结构参数下多芯光纤的弯曲损耗, 并与传统多芯光纤进行对比。

### 1 仿真结果与分析

光纤弯曲时引起形变, 导致光纤的折射率分布发

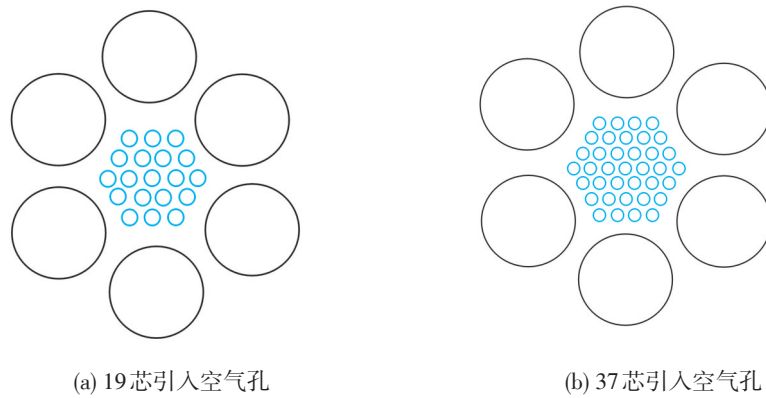


图1 引入空气孔的多芯光纤截面

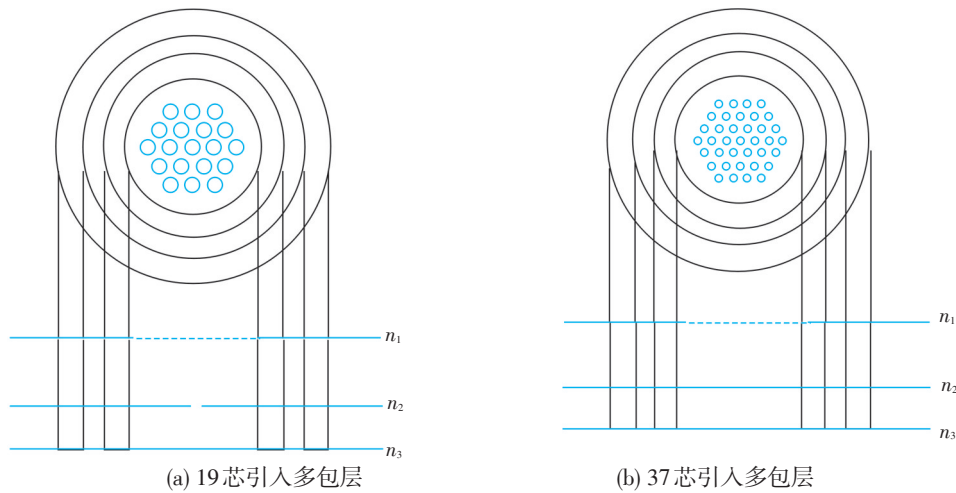


图2 引入多包层的多芯光纤截面

生变化,从而影响光束沿光纤传输的全反射条件,严重情况下光束泄漏至包层甚至外层介质。多芯光纤也会同样因为上述原因产生损耗。弯曲损耗系数为<sup>[7-8]</sup>

$$\alpha = \frac{20}{\ln(10)} \text{Im}(\beta z) = 8.618 \text{Im}(\beta z) \quad (1)$$

式中, $\beta_z$ 表示基模的传输常数,可以通过软件 COM-SOL Multiphysics<sup>[9]</sup>仿真得出。光纤在弯曲时折射率可以表示<sup>[10-11]</sup>为

$$n(x, y) = n_0(x, y)(1 + (1 + \psi)) \frac{x}{R_b} \quad (2)$$

式中, $n_0$ 表示光纤未弯曲时纤芯的折射率; $x$ 表示光纤中的位置; $\psi$ 表示光纤修正后的弹性系数取-0.22; $R_b$ 表示弯曲半径。

### 1.1 引入空气孔包层

图1所示为引入空气孔包层结构的19、37芯光纤。

各纤芯的半径 $r = 1.0 \mu\text{m}$ ,内包层半径为 $125 \mu\text{m}$ 。纤芯折射率 $n_1 = 1.458$ ,包层折射率为 $n_2 = 1.45$ 。表1所示为

表1 不同芯距所对应的模场有效面积

类别	$d = 5.5 \text{ mm}$	$d = 6.3 \text{ mm}$	$d = 7.0 \text{ mm}$
19芯光纤 $A_{\text{eff}}$	$341 \text{ mm}^2$	$437 \text{ mm}^2$	$516 \text{ mm}^2$
37芯光纤 $A_{\text{eff}}$	$606 \text{ mm}^2$	$762 \text{ mm}^2$	$920 \text{ mm}^2$

不同芯距 $d$ 所对应的模场有效面积<sup>[12]</sup>。其计算公式为

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E|^2 dx dy)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E|^4 dx dy} \quad (3)$$

式中, $E$ 为基模电场的分布。

图3给出了芯距 $d = 5.5 \mu\text{m}$ ,模场面积 $A_{\text{eff}} = 341 \mu\text{m}^2$ 时引入空气包层后19芯光纤的弯曲损耗曲线。由图3可见,随着所引入空气孔半径的增大,相同半

径下光纤弯曲损耗逐渐减小。其中没有引入空气孔时, 19芯光纤在弯曲半径为 $r = 2\text{ cm}$ 时达到临界值, 其对应弯曲损耗为 $22.61\text{ dB/m}$ 。引入一层半径为 $13\text{ }\mu\text{m}$ 的空气孔后, 临界弯曲半径减小到 $2\text{ mm}$ , 对应弯曲损耗为 $7.2\text{ dB/m}$ 。弯曲半径大于 $3\text{ mm}$ 时, 弯曲损耗的值均小于 $10^{-2}\text{ dB/m}$ 。弯曲半径小于 $2\text{ mm}$ 时弯曲损耗开始急剧增大。

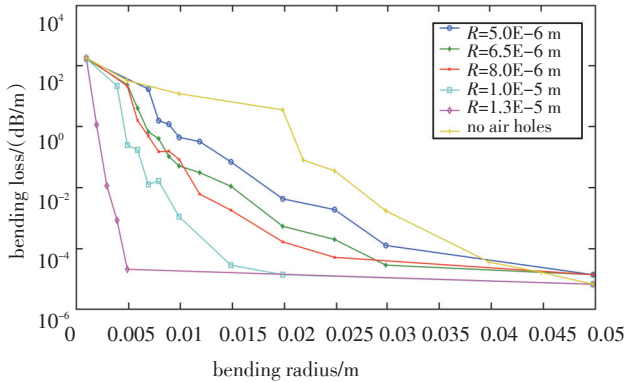


图3  $A_{\text{eff}} = 341\text{ }\mu\text{m}^2$ 时不同空气孔半径下19芯光纤的弯曲损耗

图4所示为纤芯距离增大到 $d = 7\text{ }\mu\text{m}$ , 模场面积对应为 $516\text{ }\mu\text{m}^2$ 时引入空气孔后19芯光纤的弯曲损耗曲线。与图3曲线有着同样的变化趋势。引入空气孔后可使19芯光纤临界弯曲半径从 $3.5\text{ cm}$ 减小到 $4\text{ mm}$ 。

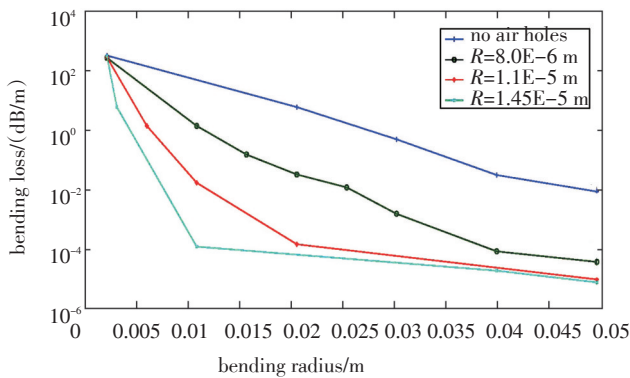


图4  $A_{\text{eff}} = 516\text{ }\mu\text{m}^2$ 时不同空气孔半径下19芯光纤的弯曲损耗

图5给出了芯距为 $d = 5.5\text{ }\mu\text{m}$ , 模场面积为 $606\text{ }\mu\text{m}^2$ 时引入空气包层后37芯光纤弯曲损耗曲线。从中可看出, 随着所引入空气孔半径的增大, 相同半径下光纤弯曲损耗逐渐减小。其中没有引入空气孔时, 传统37芯光纤在弯曲半径为 $r = 2\text{ cm}$ 时达到临界值, 其对应弯曲损耗为 $22.13\text{ dB/m}$ 。引入一层半径为 $18\text{ }\mu\text{m}$ 的空气孔后, 临界弯曲半径减小到 $4\text{ mm}$ , 对应弯曲损耗为 $20.74\text{ dB/m}$ 。弯曲半径大于 $5\text{ mm}$ 时,

弯曲损耗的值均小于 $10^{-2}\text{ dB/m}$ ; 弯曲半径小于 $4\text{ mm}$ 时弯曲损耗开始急剧增大。

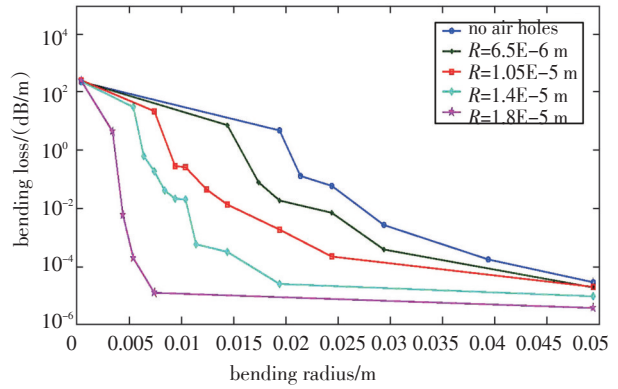


图5  $A_{\text{eff}} = 606\text{ }\mu\text{m}^2$ 时不同空气孔半径下37芯光纤的弯曲损耗

图6所示为芯距增大到 $d = 7\text{ }\mu\text{m}$ , 模场面积对应为 $920\text{ }\mu\text{m}^2$ 时, 引入空气孔之后的37芯光纤的弯曲损耗曲线。与图5曲线有着同样的变化趋势。当空气孔半径增大到 $R = 17\text{ }\mu\text{m}$ 时, 临界弯曲半径从 $3.5\text{ cm}$ 减小到 $4\text{ mm}$ 。

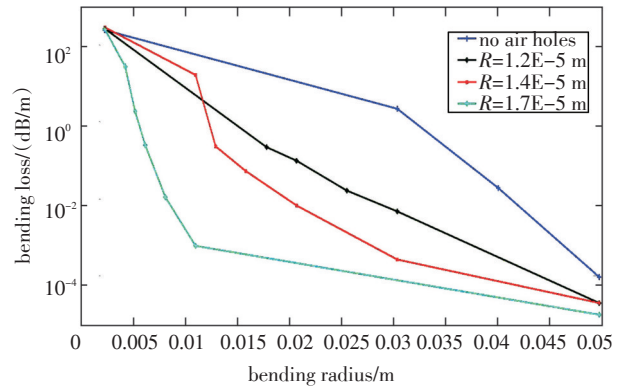


图6  $A_{\text{eff}} = 920\text{ }\mu\text{m}^2$ 时不同空气孔半径下37芯光纤的弯曲损耗

### 1.2 引入多包层低折射率结构

图2所示的是引入两层低折射率包层后的19、37芯光纤。引入的包层折射率为 $1.446$ , 除芯距外其余参数均与图1相同。

图7给出了芯距 $d = 5.5\text{ }\mu\text{m}$ , 模场面积为 $341\text{ }\mu\text{m}^2$ 的19芯光纤, 引入不同层数的低折射率包层时的弯曲损耗曲线。可以看出, 在相同弯曲半径下弯曲损耗随着层数的增加而减小。但是加到三层之后, 三、四、五层的弯曲损耗曲线几乎重合, 原因是引入的包层距离芯区越远, 起到限制模场的作用越弱。引入

五层低折射率包层后,临界弯曲半径减小到4 mm,对应弯曲损耗为0.32 dB/m。弯曲半径大于4 mm时,弯曲损耗的值均小于 $10^{-2}$  dB/m,当弯曲半径小于4 mm时弯曲损耗急剧增大。

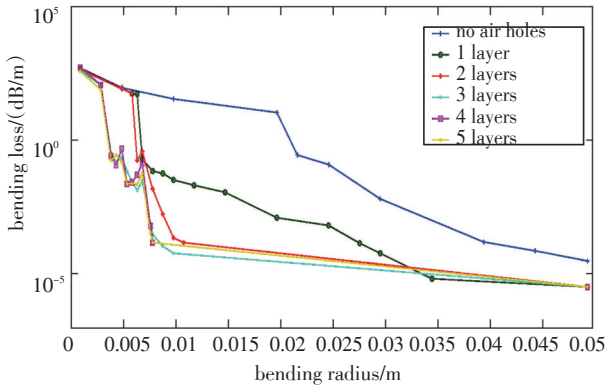


图7  $A_{eff} = 341 \mu\text{m}^2$ 时不同层数下19芯光纤的弯曲损耗

图8所示为19芯光纤引入多包层后的弯曲损耗曲线,芯距 $d = 7 \mu\text{m}$ ,模场面积为 $516 \mu\text{m}^2$ 。可以看出,多包层结构可使19芯光纤临界弯曲半径从3.5 cm减小到4 mm。

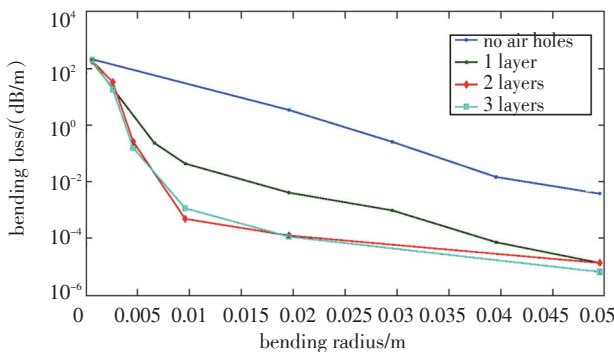


图8  $A_{eff} = 516 \mu\text{m}^2$ 时不同层数下19芯光纤的弯曲损耗

图9给出了37芯光纤引入多包层后的弯曲损耗,芯距 $d = 5.5 \mu\text{m}$ ,模场面积为 $606 \mu\text{m}^2$ 。由图9可见在相同弯曲半径下弯曲损耗随着层数的增加而减小,层数大于3时弯曲损耗无明显改变。引入四层低折射率包层后,临界弯曲半径减小到4 mm,对应弯曲损耗为1.13 dB/m。弯曲半径大于7 mm时,弯曲损耗的值均小于 $10^{-2}$  dB/m。当弯曲半径小于4 mm时弯曲损耗急剧增大。

图10所示为引入多包层后37芯光纤不同弯曲半径对应的弯曲损耗曲线,芯距 $d = 7 \mu\text{m}$ ,模场面积为 $920 \mu\text{m}^2$ 。多包层结构可使37芯光纤临界弯曲半径从3.5 cm减小到4 cm。可见多包层结构同样能很好的改进多芯光纤的弯曲损耗。

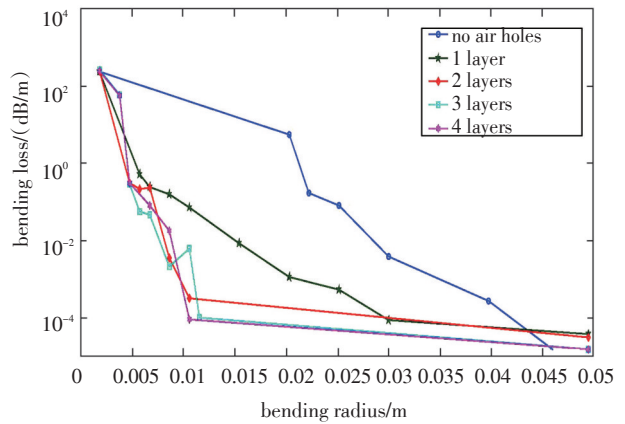


图9  $A_{eff} = 606 \mu\text{m}^2$ 时不同层数下37芯光纤的弯曲损耗

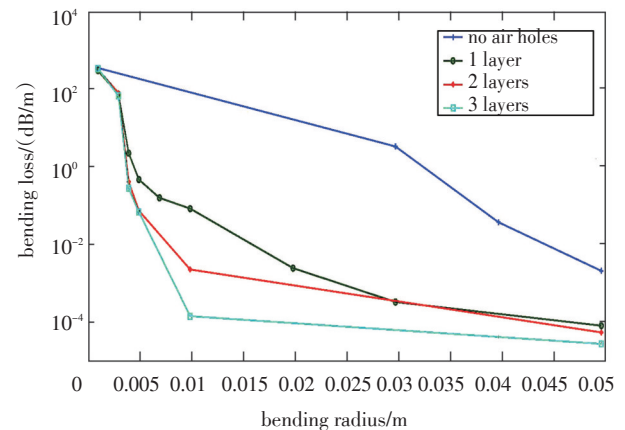


图10  $A_{eff} = 920 \mu\text{m}^2$ 时不同层数下37芯光纤的弯曲损耗

## 2 结 论

对19芯和37芯光纤分别引入空气孔和多包层结构以降低弯曲损耗,基于全矢量有限元法计算多芯光纤的弯曲损耗和模场面积。结果表明,多芯光纤弯曲损耗存在临界弯曲半径,在大于临界半径的情况下,弯曲损耗随弯曲半径的减小变化很小,在小于临界半径的情况下,弯曲损耗急剧增大。并且弯曲损耗随着引入空气孔和多包层面积比例的增大而减小。引入空气孔后,当19、37芯光纤模场面积分别为 $516 \mu\text{m}^2$ 和 $920 \mu\text{m}^2$ 时,临界弯曲半径都从3.5 cm减小到4 mm。当引入包层数达三层以上时,多包层结构也可使19、37芯光纤的临界弯曲半径从3.5 cm减小到4 mm。

## 参考文献

[1] Mori M Vogel, Marwan Abdou-Ahmed. Very-large-mode-area,

(下转第46页)

- id-state physics and electronics[J]. Phys. Rev. Lett, 1987, 58: 2059-2062.
- [2] S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. Phys. Rev. Lett, 1987, 58: 2486-2489.
- [3] J D Joannopoulos, S G Johnson, J N Winn, et al. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light[M]. 2nd Edition . Princeton: Princeton Univ. Press, 2008.
- [4] J Hou, H Wu, C E, et al. Flat band slow light with high coupling efficiency in one-dimensional grating waveguides[J]. Photon. Tech. Lett., 2011, 24:7-9.
- [5] 掌蕴东, 翁文, 喻波, 等. 光子晶体波导慢光技术[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 44:26-32.
- [6] L Dai, T Li, C Jiang. Wideband ultralow high-order-dispersion photonic crystal slow-light waveguide[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2011, 28:1622-1626.
- [7] T Baba. Slow light in photonic crystals[J]. Nature Photon., 2008, 2: 465-473.
- [8] C M Munoz, A Kanchana, A Y Petrov, et al. Dynamic light storage in slow light waveguides[J]. IEEE J. Quantum Electron., 2012, 48:862-866.
- [9] J F McMillan, M Yu, D Kwong, et al. Observation of four-wave mixing in slow-light silicon photonic crystal waveguides[J]. Opt. Express, 2010, 18:15484-15497.
- [10] C M Johnson, P J Reece, G J Conibeer. Slow-light-enhanced upconversion for photovoltaic applications in one-dimensional photonic crystals[J]. Opt. Lett., 2011, 36: 3990-3992.
- [11] A Oskooi, D Roundy, M Ibanescu, et al. MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method[J]. Computer Physics Communications, 2010, 181: 687-702.
- [12] Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions , 1966, 14: 302-307.
- [13] 葛德彪. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [14] J Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114: 185-200.

(上接第39页)

- single-mode multicore fiber[J]. OPTICS LETTERS, 2009, 34 (18):2876.
- [2] Guillaume Canat<sup>1</sup>, Ron Spittel. Analysis of the multifilament core fiber using the effective index theory[J]. OPTICS EXPRESS, 2010, 18(5):4644-4654.
- [3] John M Fini<sup>1</sup>. Large-mode-area multicore fibers in the single-moded regime[J]. OPTICS EXPRESS , 2011 , 19 (5): 40-42.
- [4] Guo-ying, LI Xiao-dong .Theoretical Analysis and Measurement on the Character of Bending Loss in Fiber[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 11-14.
- [5] Ming-Yang Chen , Yong-Kang Zhang . Bend Insensitive Design of Large-Mode-Area Microstructured Optical Fibers[J]. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2011, 29 (15) : 0733-8724.
- [6] Fenfen Dai , Yonghao Xu , Xianfeng Chen .Tunable and low bending loss of liquid-core fiber[J]. CHINESE OPTICS LETTERS, 2010, 8(1) : 1671-7694.
- [7] CREGAN R F, MANGAN B J, KNIGHT J C. Singlemode photonic bandgap guidance of light in air[J]. Science, 1999, 285 (5433) : 1537-1539.
- [8] M-J Li, Fellow. Ultra-Low Bending Loss Single-Mode Fiber for FTTH[J]. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2009, 27(3):376.
- [9] COMSOL Multiphysics, www.comsol.com, 2010.
- [10] D Marcuse. Influence of curvature on the losses of doubly clad Fibers[J]. Appl. Opt., 1982, 21: 4208-4213.
- [11] J M Fini. Bend-compensated design of large-mode-area fibers[J]. Opt. Lett., 2006, 31: 1963-1965.
- [12] S M ABDUR .Theoretical design of a large effective mode area microstructure optical fiber[J] . Optica Applicata, 2010, XL(3):678.