

结构性改变长周期光子晶体光纤光栅成栅机理研究

齐跃峰^{1,2} 郭文光¹ 毕卫红^{1,2}

(¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004
²河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 详细分析了光子晶体光纤包层气孔塌缩对光纤传输特性的影响,建立了包层气孔塌缩结构模型,利用有限元法和局域耦合模理论对环形结构改变下变形区域的有效折射率分布和模式耦合系数进行了计算,得到了调制区域各模式的有效折射率和耦合系数分布。研究了基模和包层模的耦合规律,得到了纤芯基模(LP01)和包层模(LP11,LP02)耦合下的传输谱,探讨了此种结构性改变成栅方法的可能性。在此基础上进一步分析了结构性参数如周期长度、周期个数和塌缩深度对传输特性的影响,得到了谐振峰随这些参数变化的规律。研究结果表明,光子晶体光纤包层空气孔塌缩可以形成光栅,调整塌缩参数可以改变所成光栅传输特性。研究结论为结构性改变光子晶体光纤光栅的刻写和应用提供了理论依据。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 传输特性; 局域模式耦合理论; 结构性改变; 有限元法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1205004

Research on Transmission Mechanism of the Structurally Changed Long Period Photonic Crystal Fiber Grating

Qi Yuefeng^{1,2} Guo Wenguang¹ Bi Weihong^{1,2}

(¹Institute of Information science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China
²Key Laboratory of Especial Optical Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract The influence of holes collapse in photonic crystal fiber cladding on transmission characteristics is analyzed in detail. The structure model of photonic crystal fiber with collapse holes is built. Using finite element method and coupled local-mode theory, the distribution of effective refractive indexes and mode coupling coefficients are calculated in the structural change region, where periodic ringlike collapse is induced. Then the mode effective refractive indexes and the distribution of coupling coefficients in modulation region can be obtained. The coupling rules between the core-mode and the cladding-modes are studied, and the transmission spectrum is obtained, which consists of two peaks formed by the couplings of LP01-LP11 and LP01-LP02 modes. The feasibility of this grating fabrication technique based on structural change is also discussed. On this basis, the influence of the fiber structural parameters on transmission characteristics are further studied involving in the grating period, the number of periods, the depth of cladding collapse. Thus the laws of resonance peaks varying with these parameters can be got. The research results indicate that the periodic holes collapse in photonic crystal fiber cladding can form grating. The transmission characteristics can be tuned by changing the collapse parameters. This result can provide theoretical basis for design and fabrication of structural photonic crystal fiber grating.

Key words fiber optics; fiber grating; transmission characteristic; coupled local-mode theory (CLMT); structural change; finite element method

OCIS codes 050.2770; 060.2310; 060.5295

收稿日期: 2011-07-11; **收到修改稿日期**: 2011-09-01

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)、河北省自然科学基金(F2010001286)和河北省应用基础研究计划(10963526D)资助课题。

作者简介: 齐跃峰(1972—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: yfqi@ysu.edu.cn

1 引 言

光纤光栅由于其诸多优点在光纤通信和光纤传感领域具有广泛应用^[1,2]。结构性改变光子晶体光纤光栅(PCFG)作为一种新型的光纤光栅,是利用电弧^[3]、CO₂激光器等热源^[4,5],对光子晶体光纤(PCF)进行加热,使PCF的包层空气孔按设定间距塌缩,形成周期性的折射率调制,从而形成光栅。这种光栅具有一些不同于其它光纤光栅的独特性质,例如无需纤芯掺杂或载氢处理,而是通过改变PCF本身结构来形成光栅,因而从根本上克服了常规光纤光栅热稳定性和长期稳定性难以保证的问题,在长期监测等领域具有很大的潜在应用价值^[6,7]。

本文借助局域模式耦合理论(Coupled local-mode theory, CLMT)对一种环形塌缩结构性改变长周期光子晶体光纤光栅(LP-PCFG)进行了数值仿真,分析了其成栅机理,从理论上验证了在PCF上引入圆对称结构改变也可成栅,并进一步研究了这种结构性改变PCFG的光栅参数与传输特性的关系。

2 理论基础

对于光纤光栅的理论分析一般都是沿用耦合模理论(CMT)^[8],该理论将外界对光纤的影响看成是一种缓慢变化的微扰,而且认为在调制区光纤模式的场分布不发生变化,用CMT分析紫外曝光法刻写的PCFG能得到较准确的结果。但是对于结构性改变PCFG来说,在调制区由于光纤的结构改变会使其模场发生明显的变化,此时不能再将扰动看成是一种微扰,因此用CMT分析结构性改变PCFG会产生较大误差。CLMT作为一种改进的CMT更适合于分析变化缓慢但扰动剧烈的波导^[9,10]。

光纤中电磁场横向分量表示为各个正交模式电场和磁场横向分量的叠加,如下式所示:

$$\mathbf{E}_t(x, y, z) = \sum_j \{b_j(z) + b_{-j}(z)\} \mathbf{e}_{t,j}(x, y, z), \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_t(x, y, z) = \sum_j \{b_j(z) - b_{-j}(z)\} \mathbf{h}_{t,j}(x, y, z), \quad (2)$$

式中 $\mathbf{e}_{t,j}$, $\mathbf{h}_{t,j}$ 是模式 j 的归一化的电场和磁场。 b_j 包含了场强的大小和相位表示为

$$b_{\pm j}(z) = a_{\pm j}(z) \exp\left[\pm i \int_0^z \beta_j(z) dz\right], \quad (3)$$

式中 $a_{\pm j}(z)$ 为模式 j 的场强幅度,正负号代表了传播方向是前向或后向, $\beta_j(z)$ 为模式传播常数。

由于光栅中扰动的影响破坏了模式之间的正交性,从而产生模式之间的能量交换即模式耦合,光栅中的耦合方程组为

$$\frac{db_j}{dz} - i\beta_j(z)b_j = \sum_l \{C_{jl}(z)b_l + C_{j-l}b_{-l}\}, \quad (4)$$

$$\frac{db_{-j}}{dz} + i\beta_j(z)b_{-j} = - \sum_l \{C_{-jl}(z)b_l + C_{-j-l}b_{-l}\}, \quad (5)$$

式中耦合系数 C_{jl} 反映了模式之间的耦合效率,表示为

$$C_{jl}(z) = \frac{1}{4} \int_{A_{\text{co}}} \left\{ \mathbf{h}_{t,j} \times \frac{\partial \mathbf{e}_{t,l}}{\partial z} - \mathbf{e}_{t,j} \times \frac{\partial \mathbf{h}_{t,l}}{\partial z} \right\} \cdot \mathbf{z} dA, \quad j \neq l \quad (6)$$

对于长周期光纤光栅来说如果只考虑基模和同向包层模的耦合,将(3)式代入(4)和(5)式可得到基模和包层模的耦合方程组如下式所示:

$$\frac{da_{\text{co}}}{dz} = C(z)a_{\text{cl}} \exp\left\{i \int_0^z [\beta_{\text{cl}}(z) - \beta_{\text{co}}(z)] dz\right\}, \quad (7)$$

$$\frac{da_{\text{cl}}}{dz} = -C(z)a_{\text{co}} \exp\left\{i \int_0^z [\beta_{\text{co}}(z) - \beta_{\text{cl}}(z)] dz\right\}, \quad (8)$$

式上 a_{co} 和 a_{cl} 分别为纤芯模和包层模的场强幅度,耦合系数 $C(z)$ 、纤芯模传播常数 $\beta_{\text{co}}(z)$ 和包层模传播常数 $\beta_{\text{cl}}(z)$ 沿光纤纵向都是关于 z 的周期函数,其周期为光栅周期 Λ 。可将 $C(z)$ 进行傅里叶展开,如下所示

$$C(z) = \sum_{N=0}^{\infty} f_N \exp\left(i \frac{2N\pi z}{\Lambda}\right), \quad (9)$$

式中 f_N 为展开后各次谐波系数, N 为谐波次数。

将(9)式代入(7),(8)式可得决定谐振波长的相位匹配条件

$$N\lambda = \int_{z_0}^{z_0+\Lambda} [n_{\text{eff,co}}(z) - n_{\text{eff,cl}}(z)] dz, \quad (10)$$

式中 $n_{\text{eff,co}}(z)$, $n_{\text{eff,cl}}(z)$ 是纤芯模和包层模的有效折射率。

从上述公式可以看出,CLMT与CMT最大的不同在于CLMT将光栅区模式的改变考虑在内,认为光栅中模式之间的耦合情况是沿光栅纵向变化的,这些可以通过(6)~(8)式以及(10)式中的积分项体现出来。

3 数值分析

利用以上理论方法对一种通过热激方法形成的

周期性环形塌缩 LP-PCFG 进行数值分析, 光纤参数与 LMA-10 PCF 相同, 端面如图 1 中 L1 面所示, 孔直径 $3.38 \mu\text{m}$ 、孔间距 $7.37 \mu\text{m}$ 、包层直径 $125 \mu\text{m}$, 光纤材料为 SiO_2 。塌缩区端面呈圆对称的环型塌缩, 塌缩间距即光栅周期为 $440 \mu\text{m}$, 周期个数 40。图 1 描述了塌缩区域该 LP-PCFG 的塌缩模型, 这里设定外包层半径塌缩沿光纤纵向近似于半周期正弦函数,

$$\Delta R = \Delta S \sin(\pi z/l),$$

式中 ΔR 代表纵向 z 处光纤包层半径塌缩量, ΔS 为最大塌缩深度(设为 $10 \mu\text{m}$), l 为塌缩区长度(设为 $90 \mu\text{m}$)。

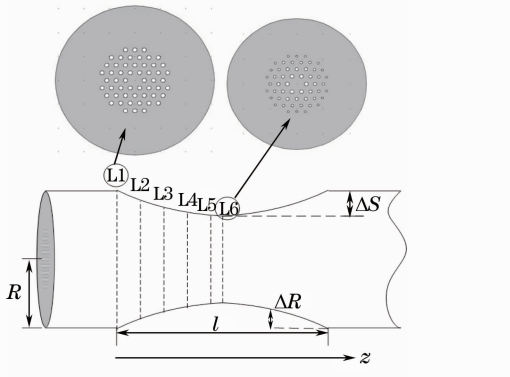


图 1 LP-PCFG 结构

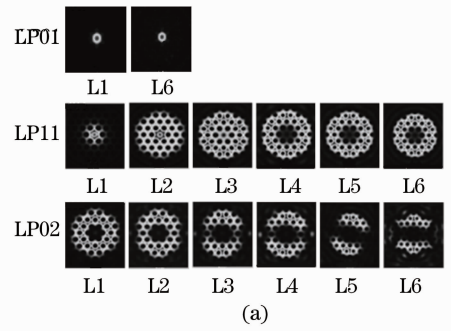
Fig. 1 Structure of the LP-PCFG

在结构改变区域, 随着外包层半径塌缩程度的增加, PCF 中的空气孔直径和孔间距也会发生相应改变, 由于空气孔所处层数不同塌缩程度也不一样, 越靠近外包层塌缩程度越大^[11~13]。根据该结构光纤的热传导特性及包层空气孔随温度的变化规律设定包层空气孔按一定比例塌缩, 从而可构建出截面塌缩模型。为了便于后续分析, 将塌缩区域前半部分划分为 6 个面如图 1 的 L1~L6, 其中 L1~L5 相邻面相距 $10 \mu\text{m}$, L5 与 L6 为 $5 \mu\text{m}$ 。

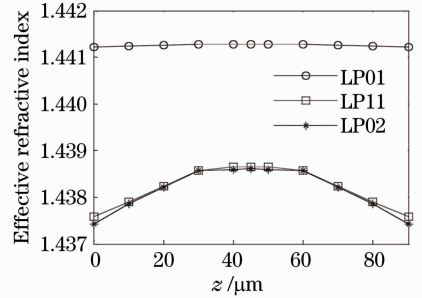
3.1 模场分布及有效折射率变化

本文借助于有限元法^[14,15], 对一定波长下光栅区域中各模式的模场分布和有效折射率的变化情况进行分析, 讨论了两组低阶包层模 LP11 模、LP02 模和基模 LP01 模的耦合情况。图 2(a) 是 LP01, LP11, LP02 的模场在 L1 至 L6 截面的模场分布, 由于基模变化不明显所以只列出了其 L1 和 L6 面的分布情况。图 2(b) 描述了调制区域内各模式的有效折射率沿光纤纵向的变化关系。

从图 2 中可以看出随着空气孔塌缩程度的增加模式分布发生了明显变化, 包层模有向外包层扩散



(a)



(b)

图 2 波长 1550 nm 时塌缩区模场和有效折射率变化情况。(a) 模场变化; (b) 模式有效折射率变化

Fig. 2 Changes of mode fields and effective refractive indexes in collapse region when the wavelength equals 1550 nm. (a) Changes of mode fields;

(b) changes of effective refractive indexes

的趋势, 有效折射率随塌缩深度的增加而逐渐增大, 且包层模的变化比基模更加明显。这是由于空气孔的塌缩使包层等效折射率增大, 纤芯和包层折射率梯度降低, 导致了光纤对模式的束缚能力减弱, 从而得到图中所示的结果。

3.2 模式耦合情况分析

将得到的各模式的电场和磁场代入(6)式中, 求出基模 LP01 与 LP11, LP02 的耦合系数 $C(z)$ 沿光栅纵向的分布如图 3 所示。

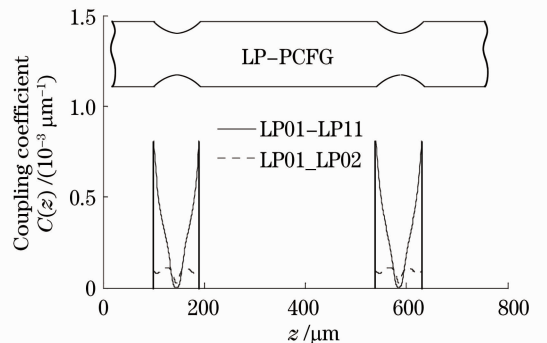


图 3 LP-PCFG 耦合系数分布情况

Fig. 3 Distribution of coupling coefficients along the LP-PCFG

通过(6)式可以看出模式的耦合情况不仅与模场交叠和场强大小有关还与模场的变化程度有关,因此 $C(z)$ 只有在塌缩区域才不为零且耦合系数随着结构的变化而变化。同时 LP01 和 LP11 的耦合系数比 LP01 与 LP02 的大,这可以由模场的能量分布得出,因为 LP11 模的能量更集中于芯区,与 LP01 模场交叠面积更大,且 LP11 模在塌缩区域的变化更明显。

最后通过求解耦合方程组可得到反映各模式耦合情况的透射谱如图 4 所示。

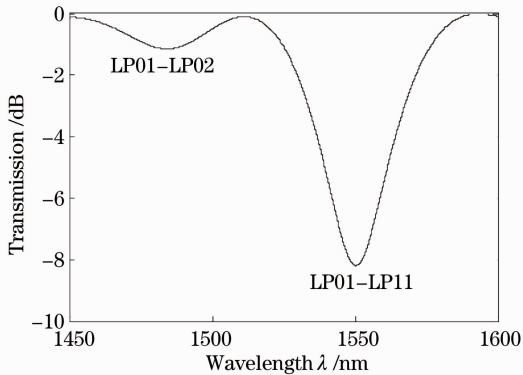


图 4 环形塌缩 LP-PCFG 透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of the ringlike collapse LP-PCFG

LP01 模与 LP11 耦合的谐振波长在 1550 nm 深度达到 -8.19 dB, LP01 模与 LP02 模耦合的谐振波长在 1484 nm 谐振深度为 -1.14 dB。该结果证明了通过在 PCF 上引入对称结构改变实现 LP-PCFG 刻写的可行性。

4 LP-PCFG 参数对谐振峰的影响

采用上述 LP-PCFG 的结构和计算方法,进一步分析了 LP-PCFG 的光栅参数对谐振峰的影响。由于 LP01 模与 LP02 模的耦合较弱,为了简化分析过程,只考虑了 LP01 模和 LP11 模单独耦合的情况。

4.1 周期个数对谐振峰的影响

图 5 是光栅周期个数变化时的透射谱,可以看出随着周期个数增加谐振峰的深度逐渐增大。产生这种变化的原因与普通光栅类似,因为增加周期的个数相当于延长了光栅的长度,基模和包层模的耦合得到增强,从而使透射率下降。

4.2 周期长度对谐振峰的影响

图 6 是不同周期长度下的 LP-PCFG 的透射谱。从图中可以看出随着周期长度增大谐振深度略

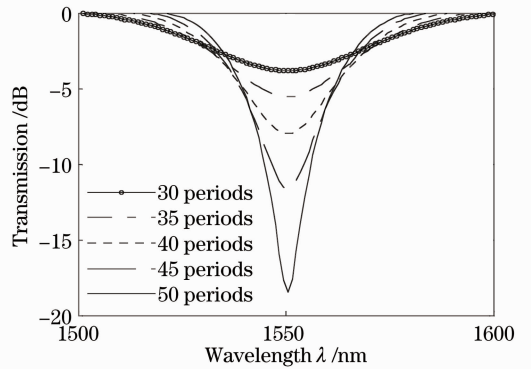


图 5 周期个数对谐振峰的影响

Fig. 5 Influences of the number of periods on resonance peak

微增加而且谐振波长 λ_{res} 向着短波方向移动。谐振深度略微增加是因为在周期个数一定的情况下,增加周期长度也相当于延长了光栅长度,从而使谐振峰深度增加。而对于谐振波长的变化可以利用(10)式所示的相位匹配条件来解释,由于光子晶体光纤各模式的有效折射率是随波长 λ 变化的,因此(10)式实际是关于 λ 的一个方程,该方程的解即是谐振波长 λ_{res} 。可以看到等式右边的积分项含有周期长度 Λ ,所以 Λ 的改变会使方程解发生变化,即表现为谐振峰的 λ_{res} 移动。

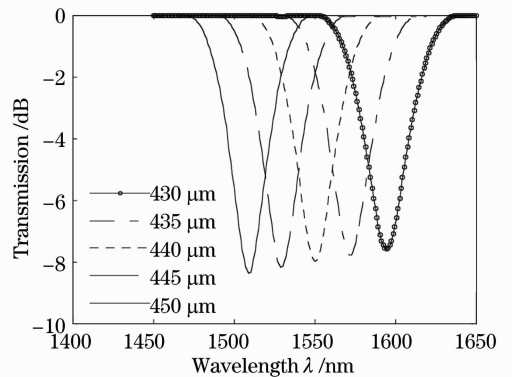


图 6 周期长度对谐振峰的影响

Fig. 6 Influences of the length of period on resonance peak

4.3 塌缩深度对谐振峰的影响

在不改变结构变化包络的条件下,通过改变塌缩深度,研究了谐振峰的变化情况。图 7 反映了调制区最大塌缩深度对谐振峰的影响情况,外包层半径最大塌缩深度从 $8 \mu\text{m}$ 变化到 $12 \mu\text{m}$ 。通过计算发现,随着调制区塌缩程度的增大谐振深度增加显著,且 λ_{res} 向着长波方向移动。

透射率的下降是因为在结构变化包络形状相同的情况下,塌缩深度越深包层模式的模场变化就越

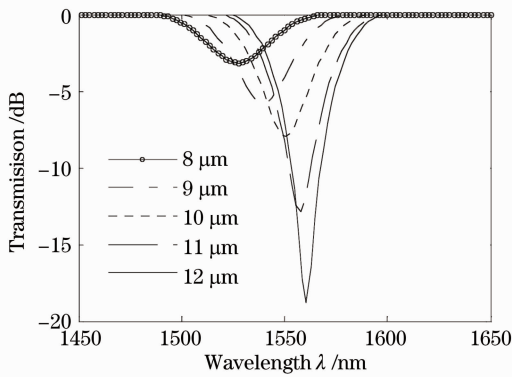


图7 塌缩深度对谐振峰的影响

Fig. 7 Influences of the collapse depth on resonance peak

大,而且变化更为迅速,因此由(6)式求解出的耦合系数也随之增加,反映到透射谱中就表现为谐振峰的加深。由(10)式右边积分项可知, λ_{res} 的移动是因为受到基模和包层模有效折射率差的影响,塌缩程度不同将影响基模和包层模的有效折射率差在结构改变区域内的积分,从而使 λ_{res} 发生移动。

5 结 论

本文对一种环形塌缩的结构性改变长周期光子晶体光纤光栅进行了详细的研究,证明了其成栅的可行性。借助于有限元法和 CLMT 对这种结构性改变 LP-PCFG 的成栅机理和模式的耦合情况进行了分析,得到了调制区域各模式的有效折射率和耦合系数分布。其中基模和包层模的有效折射率随塌缩深度增加而增大,模式之间的耦合系数与结构和模场变化有关,并通过数值计算实现了对这种 LP-PCFG 透射谱的仿真。接着又进一步研究了 LP-PCFG 的塌缩周期个数、周期长度和塌缩深度对于该 LP-PCFG 谐振峰的影响。结果表明随着光栅参数的变化其传输特性会发生规律性的改变,这为结构性改变 LP-PCFG 的设计和刻写提供了一定的理论依据。

参 考 文 献

- 1 Luo Tao, Gu Zhengtian. Progress of biological and chemical sensors based on long period grating in photonic crystal fiber[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 34~40
罗涛,顾铮先. 光子晶体光纤光栅在生物和化学传感器领域研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 34~40

- 2 Chen Peng, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Double band En/Decoder based on super structured fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1124~1128
陈鹏,王荣,蒲涛等. 基于超结构光纤光栅的双边带编/解码器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1124~1128
- 3 W. J. Bock, J. Chen, P. Mikulic *et al.*. Pressure sensing using periodically tapered long-period gratings written in photonic crystal fibres [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**(10): 3098~3102
- 4 Y. Zhu, P. Shum, J. H. Chong *et al.*. Deep-notch, ultracompact long-period grating in a large-mode-area photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(24): 2467~2469
- 5 Wang Yiping. Review of long period fiber gratings written by CO₂ laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **108**(8): 081101
- 6 Qi Yuefeng, Qiao Hanping, Bi Weihong. Study of heat transfer characteristics in PCFG fabrication technology using heat method [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(2): 020605
- 7 Zhou Zhihua, Wang Zhi, Xie Ping *et al.*. Long-period gratings inscribed in photonic crystal fibers[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(8): 41~44
周志华,王智,谢平等. 基于光子晶体光纤的长周期光栅[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(8): 41~44
- 8 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 9 Li Qingning. Coupled-local-mode theory and study of optical properties of a Gaussian fiber grating[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(6): 1312~1325
- 10 L. Jin, W. Jin, J. Ju *et al.*. Coupled local-mode theory for strongly modulated long period gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(12): 1745~1751
- 11 Fu Guangwei, Bi Weihong, Jin Wa. Mechanics characteristic of air-hole in fusion splicing process for photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2966~2971
付广伟,毕卫红,金娃. 光子晶体光纤熔接过程中的空气孔力学特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2966~2971
- 12 Zhou Guiyao, Hou Shiyun, Li Shuguang *et al.*. Analysis of the shrinkage in size of air holes in different sections during the fabrication of microstructured fibre [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11): 6486~6489
周桂耀,侯峙云,李曙光等. 微结构光纤制备过程中不同位置空气孔的形变量分析[J]. *物理学报*, 2007, **56**(11): 6486~6489
- 13 Qi Yuefeng, Bi Weihong. Theoretical study on a kind of photonic crystal fiber grating based on structural change[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106003
齐跃峰,毕卫红. 一种基于结构性改变的光子晶体光纤光栅理论研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106003
- 14 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng. Analysis of the microstructure fiber by the finite element method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1337~1342
胡明列,王清月,栗岩峰. 微结构光纤的有限元分析算法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1337~1342
- 15 Zhang Fangdi, Liu Xiaoyi, Zhang Min *et al.*. A full-vector FEM model and its application to optical waveguides and photonic crystal fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 209~215
张方迪,刘小毅,张民等. 全矢量有限元模型及其在光波导和光子晶体光纤中的应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 209~215

栏目编辑:谢婧