

# 空芯光子带隙光纤成栅机理及特性研究

齐跃峰<sup>1,2</sup> 周丽英<sup>1</sup> 毕卫红<sup>1,2</sup> 王伟<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004  
<sup>2</sup>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** 利用有限元法和局域耦合模理论对空芯光子带隙光纤成栅机理进行了分析。建立了空芯光子带隙光纤包层空气孔塌缩模型, 分析计算了纤芯基模(LP<sub>01</sub>)和一阶包层模(LP<sub>11</sub>)在塌缩区域内有效折射率分布和耦合系数分布, 得到了LP<sub>01</sub>和LP<sub>11</sub>耦合的传输谱。在此基础上研究了光纤结构参数(空气孔直径和孔间距)、光栅参数(光栅周期和周期个数)、塌缩程度和塌缩方式对谐振波长的影响。研究结果表明, 随着空气孔直径的增大、孔间距的减小、光栅周期的增大和塌缩程度的减小, 其谐振波长向短波方向发生漂移; 随着周期个数的增大, 其谐振波长未发生明显漂移; 此外, 与圆对称塌缩相比, 非对称塌缩谐振波长向短波方向移动。

**关键词** 光纤光学; 长周期光纤光栅; 光子带隙光纤; 局域耦合模理论

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1006006

## Research on Transmission Mechanism and Characteristics of Hollow-Core Photonic Bandgap Fiber Gratings

Qi Yuefeng<sup>1,2</sup> Zhou Liying<sup>1</sup> Bi Weihong<sup>1,2</sup> Wang Wei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Especial Optical Fiber and Fiber Sensor, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** The transmission mechanism of hollow-core photonic bandgap fiber gratings is studied based on finite element method and coupled local-mode theory. The model of holes collapse is built, the distributions of effective refractive indexes and mode coupling coefficients are calculated in the structural change region, and the transmission spectrum is obtained by the coupling between fiber core fundamental mode (LP<sub>01</sub>) and cladding mode (LP<sub>11</sub>). Furthermore, the impacts of the fiber and gratings structure parameters involving in the air hole diameter, air hole spacing, grating period, the number of periods, the depth of cladding collapse and the collapse way on resonant peaks are studied. The results indicate that the resonant wavelength shifts to short wavelength direction varying with the increase of air hole diameters and the gratings period, the decrease of air hole spacing and collapse depth. The resonant wavelength shows no obvious shift with the increase of the number of periods. Otherwise, the resonant wavelength shifts towards short wavelength direction where the fiber is heated by single-side collapse comparing with symmetric collapse.

**Key words** fiber optics; long period gratings; photonic bandgap fiber; coupled local-mode theory

**OCIS codes** 060.2310; 050.2770; 060.5295

## 1 引言

光子晶体光纤根据导光机制可以将其分为两大类: 折射率引导型光子晶体光纤和带隙型光子晶体光纤。不同于折射率引导型光子晶体光纤, 光子带隙光纤的导光机制是通过光子带隙效应将光限制在低折射率的纤芯中进行传播。它具备了普通光纤所

不具备的一些优点如低损耗<sup>[1]</sup>、低非线性<sup>[2]</sup>、高耦合效率<sup>[3]</sup>和可控色散特性<sup>[4]</sup>。将光子带隙光纤和光纤光栅结合起来, 不仅可以更深入地研究光子带隙内模式传输特性, 还可以扩展光纤光栅的应用领域。空芯光子带隙光纤光栅具有很多独特的优点, 尤其是在传感方面, 如它对压力具有很大的灵敏度, 但对

收稿日期: 2013-04-24; 收到修改稿日期: 2013-06-09

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)、国家自然科学基金(61275093, 61205084)

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

温度、弯曲和外界环境折射率变化敏感度很低<sup>[5-6]</sup>。

目前在空芯光子带隙光纤光栅的研究方面以实验现象描述居多,理论研究偏少。因而,系统地研究空芯光子带隙光纤光栅中模式耦合特性进而揭示其成栅机理和传输谱规律具有重要的理论意义。

本文利用有限元法<sup>[7]</sup>和局域耦合模理论(CLMT)<sup>[8]</sup>对空芯光子带隙光纤光栅传输谱进行数值模拟分析,系统地探讨了空芯光子带隙光纤光栅传输谱与光纤参数(空气孔直径和孔间距)、光栅参数(光栅周期和周期个数)和塌缩深度等参数之间的变化关系。

## 2 理论基础

CLMT是在耦合模理论<sup>[9]</sup>的基础上进行改进的,它适合分析折射率调制较大的光纤光栅。由于空芯光子带隙光纤是由纯硅和空气材料组成的,这两种材料并不具备光敏性,所以只能通过使其结构发生周期性变化来实现光栅刻写,这种结构性改变可以引入较大的折射率调制,所以适合采用CLMT来进行分析。

在光纤中引入光栅,破坏了模式之间的正交性,使得模式之间发生能量交换即模式耦合,其耦合方程组表示为

$$\begin{cases} \frac{db_j}{dz} - i\beta_j(z)b_j = \sum_l [C_{jl}(z)b_l + C_{j-l}b_{-l}] \\ \frac{db_{-j}}{dz} + i\beta_j(z)b_{-j} = -\sum_l [C_{-jl}(z)b_l + C_{-j-l}b_{-l}] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\beta_j(z)$ 、 $b_j$ 和 $C_{jl}$ 分别表示的是 $j$ 阶模式的传播常数、 $j$ 阶模式的场强和 $j$ 阶模式与 $l$ 阶模式的耦合系数,其中 $b_j$ 和 $C_{jl}$ 表达式分别为

$$\begin{aligned} b_{\pm j}(z) &= a_{\pm j}(z) \exp\left[\pm i \int_0^z \beta_j(z) dz\right], \quad (2) \\ C_{jl}(z) &= \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \mathbf{h}_{l,j} \times \frac{\partial \mathbf{e}_{l,l}}{\partial z} - \mathbf{e}_{l,j} \times \frac{\partial \mathbf{h}_{l,l}}{\partial z} \right) \cdot \mathbf{z} dA, \quad j \neq l, \quad (3) \end{aligned}$$

式中 $a_{\pm j}(z)$ 为 $j$ 阶模式的场强幅度,正负号代表传播方向是前向或后向; $\mathbf{e}_{l,j}$ 、 $\mathbf{h}_{l,j}$ 是 $j$ 阶模式的归一化的电场和磁场。

对长周期光纤光栅而言,模式耦合发生在同向传输的芯模和包层模之间,将(2)式代入到(1)式中,就可以得到芯模和包层模的耦合方程:

$$\begin{cases} \frac{da_{co}}{dz} = C(z) \cdot a_{cl} \exp\left\{i \int_0^z [\beta_{cl}(z) - \beta_{co}(z)] dz\right\} \\ \frac{da_{cl}}{dz} = -C(z) \cdot a_{co} \exp\left\{i \int_0^z [\beta_{co}(z) - \beta_{cl}(z)] dz\right\} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $a_{co}$ 和 $a_{cl}$ 表示芯模和包层模的场强幅度, $\beta_{co}(z)$ 和 $\beta_{cl}(z)$ 表示芯模和包层模传播常数关于纵轴 $z$ 的函数,将耦合系数 $C(z)$ 傅里叶展开得

$$C(z) = \sum_{N=0}^{\infty} f_N \exp\left(i \frac{2N\pi}{\Lambda} z\right), \quad (5)$$

式中 $f_N$ 为展开后各谐波系数, $N$ 为谐波次数, $\Lambda$ 为光栅周期。

将(5)式代入(4)式可进一步得到相位的失谐量,即

$$\Delta\phi = \int_0^z \left[ \beta_{cl}(z) - \beta_{co}(z) + \frac{2N\pi}{\Lambda} \right] dz. \quad (6)$$

类似耦合模理论,当满足相位匹配条件(即失谐量为零)时,模式之间才会发生较强的耦合。由于传播常数是周期性改变,同样地,相位匹配条件也应该在一个周期内进行计算。经过变换,谐振波长的相位匹配条件可用(7)式表示:

$$N\lambda = \int_{z_0}^{z_0+\Lambda} [n_{\text{eff,co}}(z) - n_{\text{eff,cl}}(z)] dz, \quad (7)$$

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

## 3 数值仿真

建立空芯光子带隙光纤光栅塌缩模型,其中光纤结构参数:空气孔直径为 $2.592 \mu\text{m}$ ,孔间距为 $2.7 \mu\text{m}$ ,纤芯直径为 $5.4 \mu\text{m}$ ,外包层直径为 $40 \mu\text{m}$ ;光栅参数:光栅周期为 $80 \mu\text{m}$ ,周期数为40。根据空气孔随温度的变化规律<sup>[10-11]</sup>,处在不同层面的空气孔塌缩程度不同,越靠近外包层,空气孔塌缩程度越大。其中最大塌缩深度 $\Delta s = 2 \mu\text{m}$ ,塌缩区长度 $l = 80 \mu\text{m}$ 。图1显示的是空芯光子带隙光纤塌缩端面图。为了方便观察塌缩区域内模式变化并为后续的数值仿真提供必要的的数据,将塌缩区域的前半部分划分成5个端面,且L1至L5各个端面间距均设为 $10 \mu\text{m}$ 。

根据文献[12]可知,空芯光子带隙光纤传输的模式个数不仅和纤芯半径有关,还和特定波长下光子带隙的上下边沿有关。通过有限元法求解得到空

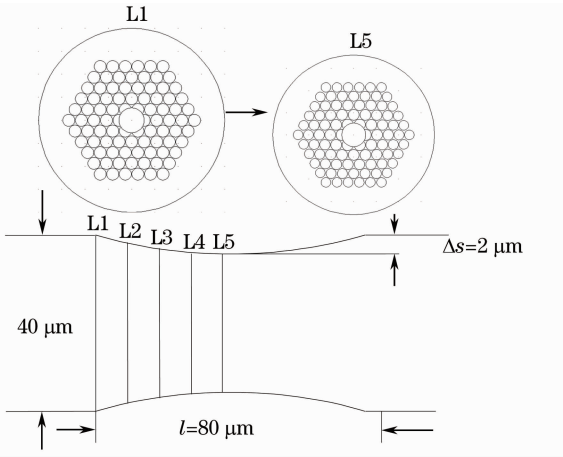


图1 空芯光子带隙光纤塌缩端面图

Fig. 1 Structure of the hollow-core photonic bandgap fiber in the collapse region

芯光子带隙光纤中模式纤芯基模( $LP_{01}$ )、二阶包层模( $LP_{02}$ )和一阶包层模( $LP_{11}$ )在带隙范围内的色散曲线,如图2所示。从图中可以看出,与 $LP_{02}$ 相比, $LP_{01}$ 和 $LP_{11}$ 在带隙相对较宽的范围内传输且它们在带隙范围内波长交叠范围较大。所以分析空芯光子带隙光纤光栅传输谱特性时,不考虑 $LP_{01}$ 与 $LP_{02}$ 耦合,只分析 $LP_{01}$ 与 $LP_{11}$ 耦合。

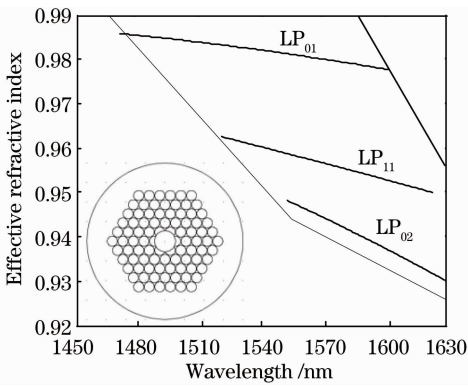


图2 在带隙范围内各模式色散曲线图

Fig. 2 Dispersion of the modes in the range of bandgap

通过有限元法计算 $LP_{01}$ 和 $LP_{11}$ 在塌缩区域内有效折射率分布如图3所示。从图中可以看出,随着塌缩深度的增大, $LP_{11}$ 有效折射率增大,但 $LP_{01}$ 有效折射率基本保持不变。这是因为空气孔直径变小,使得包层有效折射率增大,导致 $LP_{11}$ 有效折射率增大。但 $LP_{01}$ 有效折射率受包层有效折射率的影响较小,所以未发生明显的变化。

根据有限元法求解出 $LP_{01}$ 和 $LP_{11}$ 这两个模式的电磁场值,并代入到(3)式,就可以求解出耦合系数的大小。耦合系数沿着塌缩区域的分布如图4所示。

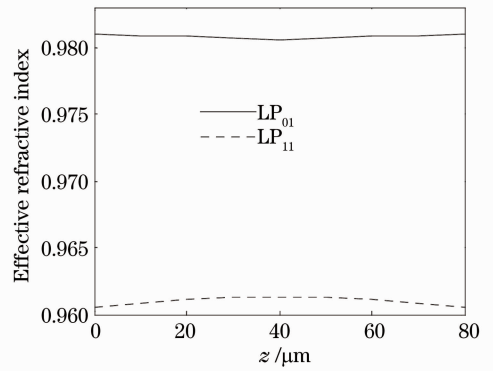


图3 有效折射率沿塌缩区域的分布

Fig. 3 Changes of effective refractive indexes in collapse region when the wavelength equals 1550 nm

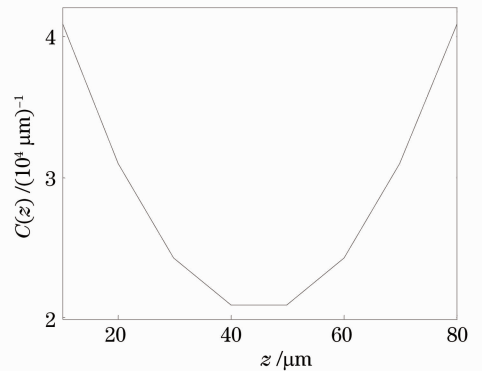


图4 耦合系数在塌缩区域的分布

Fig. 4 Distribution of coupling coefficients in the collapse region

从图4可以看出,耦合系数在塌缩区域内的变化是先减小后增大。由于塌缩区域的前半部分和后半部分是对称关系,所以就以塌缩区域前半部分为例解释耦合系数的变化情况。空气孔塌缩越大,空气孔直径与孔间距之比即占空比下降越快,带隙向长波方向漂移且带隙内的模式场分布变小,导致模式之间的交叠面积减少。根据耦合系数的定义公式可知,耦合系数的大小不仅和模式之间模场交叠面积有关,还和模场沿着纵向的场分布的变化情况有关,所以耦合系数的大小在塌缩区域前半部分减小。

将传播常数和各个塌缩端面内的耦合系数以光栅周期为周期进行傅里叶展开后的值代入耦合模方程(4)式,再结合边界条件就可以求出此光栅的传输谱,如图5所示。

#### 4 结构参数对传输谱的影响

采用同样的方法分析空芯光子带隙光纤光栅传输谱与各结构参数之间的对应关系,其中结构参数主要包括光纤参数、光栅参数、塌缩深度及塌缩

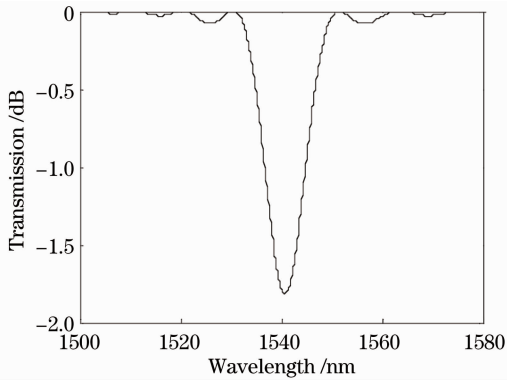


图 5 空芯光子带隙光纤光栅传输谱

Fig. 5 Transmission spectrum of hollow-core photonic bandgap fiber gratings

方式。

#### 4.1 光纤结构参数对传输谱的影响

图 6 显示的是空气孔直径对传输谱的影响。从图中可以看出,随着空气孔直径增大,谐振波长向短波方向漂移,谐振深度降低。当包层空气孔直径增大,带隙向短波漂移。根据光子晶体光纤的色散特性<sup>[13]</sup>可知,当波长变小时,LP<sub>01</sub>和LP<sub>11</sub>有效折射率差也会减小。结合相位匹配条件,谐振波长向短波方向漂移。当空气孔直径增大,带隙向短波方向移动,使得模式之间交叠面积减小且模式场分布发生变化。根据(3)式可知,耦合系数减小,谐振深度降低。

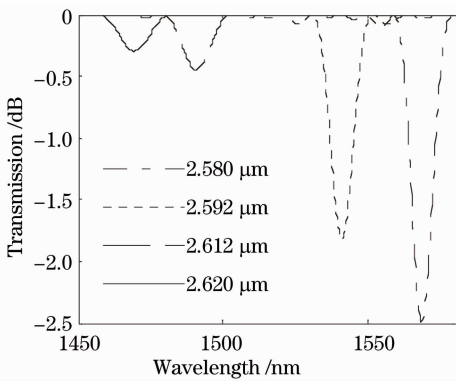


图 6 空气孔直径对传输谱的影响

Fig. 6 Influence of the air hole diameter on resonance peak

图 7 显示的是孔间距对传输谱的影响情况。从图中可以看出,随着孔间距增大,谐振波长向长波方向漂移,谐振深度增大。这和空气孔直径变化的规律相反,这是因为两者对占空比的影响相反所造成,所以表现出相反的规律。

#### 4.2 光栅参数对传输谱的影响

当光栅周期从 80 μm 变化到 95 μm 时,其传输

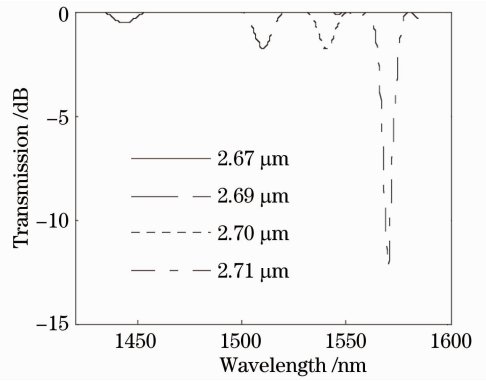


图 7 孔间距对传输谱的影响

Fig. 7 Influence of the air hole spacing on resonance peak

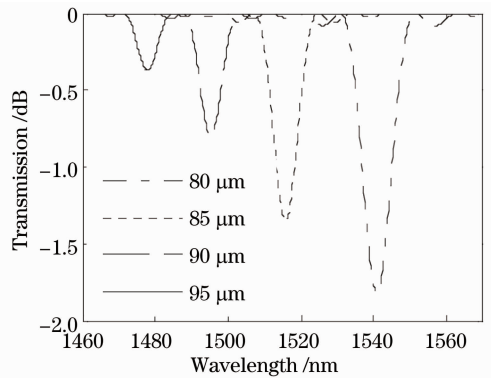


图 8 光栅周期对传输谱的影响

Fig. 8 Influence of the gratings period on resonance peak

谱的变化规律如图 8 所示。从图中可以看出,随着光栅周期的增大,谐振波长向短波方向漂移,谐振深度下降。谐振波长的变化主要是光子晶体光纤色散特性所造成。根据(6)式可知,只有当此等式为零时,才能保证模式之间发生较强的耦合。当光栅周期增大时,LP<sub>01</sub>和LP<sub>11</sub>有效折射率差减小。由(7)式可得,当模式之间的有效折射率差变小时,谐振波长向短波方向漂移。从耦合系数的表达式可知,耦合系数的大小与光栅周期呈反比关系,所以当光栅周期增大时,谐振深度减小。

图 9 表示的是周期个数从 30 变化到 45 时传输谱的变化情况。从图中可以看出,随着周期个数增大,谐振深度增大,但谐振波长并没有发生明显漂移。这是因为周期个数越多,光栅长度越长,模式之间的耦合强度越强,所以谐振深度增大。

#### 4.3 塌缩深度对传输谱的影响

根据热学相关知识可知,当热源靠近光纤和对光纤加热时间越长,空芯光子带隙光纤内空气孔塌缩越明显。图 10 显示的是空芯光子带隙光纤光栅

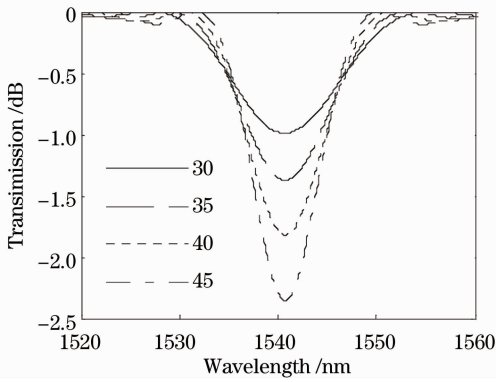


图 9 周期个数对传输谱的影响

Fig. 9 Influence of the number of periods on resonance peak

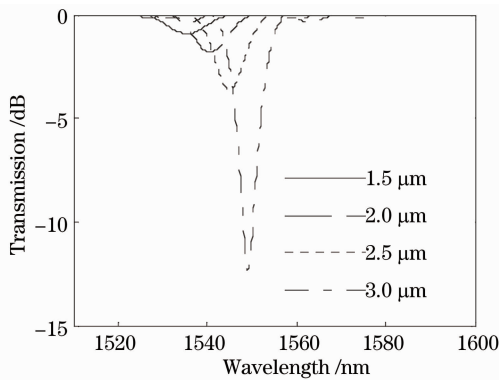


图 10 塌缩程度对传输谱的影响

Fig. 10 Influence of the collapse depth on resonance peak

传输谱随塌缩深度的变化情况。从图中可以看出，随着塌缩程度的增大，谐振波长向长波方向漂移，谐振深度增大。这是因为随着塌缩程度的增大，占空比变小，导致带隙向长波方向漂移， $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  的有效折射率差变小。根据相位匹配条件可知，谐振波长向长波方向移动。谐振峰值下降主要是因为空气孔塌缩越大，包层模式的模场分布越往外扩，使得模式之间的交叠面积增大，引起耦合系数变大。

#### 4.4 塌缩方式对传输谱的影响

图 11 显示的是塌缩方式对传输谱的影响情况。从图中可以看出，与圆对称性结构改变的空芯光子带隙光纤光栅相比，非对称性结构改变的空芯光子带隙光纤光栅的谐振波长向短波方向移动且谐振深度增大。这是因为与对称性塌缩的空芯光子带隙光纤相比，非对称性塌缩的空芯光子带隙光纤的占空比大一些，带隙向短波方向漂移，使得  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  的有效折射率差变小。由(7)式可知，谐振波长向短波方向漂移。谐振深度的变化主要是因为非对称结构改变空芯光子带隙光纤光栅塌缩区域中模式场变

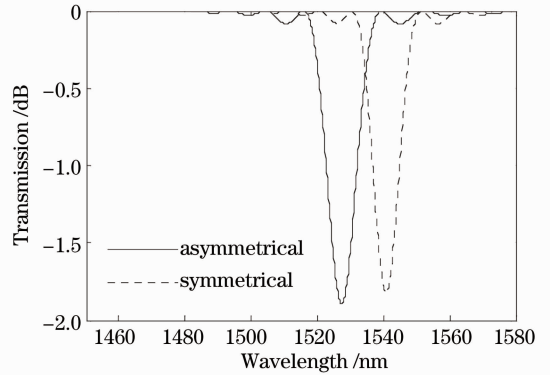


图 11 塌缩方式对传输谱的影响

Fig. 11 Influence of the collapse way on resonance peak  
化更加剧烈，使得纤芯模式的能量更多地耦合到包层模中，在一定程度上增加了模式之间的耦合系数，引起谐振深度增大。

## 5 结 论

详细研究了空芯光子带隙光纤光栅成栅机理，借助于有限元法和 CLMT 数值模拟空芯光子带隙光纤光栅传输谱。研究了光纤参数、光栅参数、塌缩深度和塌缩方式对空芯光子带隙光纤光栅传输谱的影响，并得出了相关规律。此研究可以为空芯光子带隙光纤光栅的制备和应用提供理论上的依据。

## 参 考 文 献

- 1 G B Ren, P Shum, L R Zhang, *et al.*. Low-loss all-solid photonic bandgap fiber [J]. *Opt Lett*, 2001, 32(9): 1023–1025.
- 2 Zhang Bin, Hou Jing, Jiang Zongfu. Controllable high-power supercontinuum generation in all-solid photonic bandgap fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2513–2518.  
张 斌, 侯 静, 姜宗福. 全固光子带隙光纤中实现光谱可控的大功率超连续谱输出[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2513–2518.
- 3 R F Cregan, B J Mangan, J C Knight, *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, 285 (5433): 1537–1539.
- 4 R A Correa, F Gerome, S G Leon-Saval, *et al.*. Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 1142–1149.
- 5 Meng Dan, Hou Lantian, Wang Wei. Analysis on the properties of all-solid photonic crystal fiber with micro-structured core [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1205003.  
孟 丹, 侯蓝田, 王 伟. 混合型导光的全固态光子晶体光纤的特性分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1205003.
- 6 Y P Wang. Review of long period gratings written by CO<sub>2</sub> laser [J]. *J Appl Phys*, 2010, 108(8): 4–5.
- 7 N Guan, S Habu, K Takenaga, *et al.*. Boundary element method for analysis of holey optical fibers [J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(8): 1787–1789.
- 8 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.
- 9 T Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(8): 1277–1294.

- 10 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.
- 11 Zhou Guiyao, Hou Zhiyun, 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.
- 12 Zhang Hu, Wang Qiuguo, Yang Bojun. Research process of photonic bandgap-photonic crystal fibers [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(3): 301—305.  
张 虎, 王秋国, 杨伯君. 带隙型光子晶体光纤的研究进展[J]. 半导体光电, 2007, 28(3): 301—305.
- 13 Chen Weiguo, Lou Shuqin, Wang Liwen, *et al.*. Properties of long period gratings in photonic crystal fibers [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(3): 699—704.  
陈卫国, 娄淑琴, 王立文, 等. 光子晶体光纤长周期光栅的特性[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 699—704.

栏目编辑: 王晓球