

文章编号: 0253-2239(2006)07-1007-6

# 光子晶体光纤布拉格光栅传输谱特性的分析

刘 锐<sup>1,2</sup> 瞿荣辉<sup>1</sup> 蔡海文<sup>1</sup> 方祖捷<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 研究光子晶体光纤中光纤光栅的传输谱特性对于研制基于光子晶体光纤的光纤光栅器件有着重要的意义。结合耦合模理论和光束传输相关函数方法,对一种典型光子晶体光纤中的布拉格光栅(FBG)传输谱进行了理论分析。比较了光子晶体光纤中布拉格光栅与常规布拉格光栅的传输谱。数值分析了光纤截面结构变化对于光栅传输谱的影响,并给出这种影响的定性解释。计算结果显示,与常规光纤光栅相比,包层模共振引起的损耗峰与正反向纤芯模耦合引起的损耗峰可以相比拟,而包层模共振的间隔也比常规光纤中光纤光栅的包层模共振间隔要大。同时给出了晶体光纤截面上空气孔的占空比,空气孔的排布层数对于传输谱影响的规律。

**关键词:** 光纤光学; 光纤光栅; 光束传输方法; 耦合模理论; 光子晶体光纤

中图分类号: TN25 的 文献标识码: A

## Analysis of the Transmission Spectral Characteristics of Fiber Bragg Grating in Photonic Crystal Fibers

Liu Rui<sup>1,2</sup> Qu Ronghui<sup>1</sup> Cai Haiwen<sup>1</sup> Fang Zujie<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** It is essential for the development of photonic crystal fiber based fiber grating devices to study the transmission spectral characteristics of the fiber grating in photonic crystal fiber. Based on the coupled mode theory and beam propagation correlation function mode-solver, the transmission spectrum of a typical fiber Bragg grating in photonic crystal fiber is studied. The transmission spectra of fiber Bragg grating in photonic crystal fiber and conventional fiber are compared. The influence of the structure change of the fiber cross section on the transmission spectrum is simulated, and derived qualitatively. It is found that the loss peaks caused by cladding mode resonances have similar strengths with those caused by the bidirectional core mode coupling, and the spacing of cladding mode resonances is larger than that in a conventional fiber. Meanwhile, the rule of effects of duty ratio of the air holes and the layer number of the air holes on the transmission spectrum is given.

**Key words:** fiber optics; fiber grating; beam propagation method; coupled mode theory; photonic crystal fiber

## 1 引 言

近年来,微结构光纤(包括光子晶体光纤)的制造技术,理论研究方法以及在不同科学领域中的广泛应用都取得了很大的进展,国内在这方面也开展了一系列工作。微结构光纤的一系列奇异特性为此类光纤的器件研制与开发提供了新的可能<sup>[1~3]</sup>。研究光子晶体光纤中光纤光栅的传输谱特性对于研制基于光子晶体光纤的光纤光栅器件有着重要的意义。

目前,微结构光纤的数值建模方法已经有多种<sup>[4~11]</sup>。不过大都局限于微结构光纤的截面分析。对于微结构光纤的纵向特性的研究,如微结构光纤中的光纤光栅,熔融拉锥型的微结构光纤等,则需要更多地依赖于光束传输方法。

研究任意光波导器件传输谱特性的一种直接方法是用光束传输方法在给定波段的波长处逐一计算该器件输出功率与输入功率之比,从而得到该

作者简介: 刘 锐(1982~),男,中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室硕士研究生,主要从事光子晶体光纤数值建模、光纤传感、探测电子学等方面的研究。E-mail: liurui@nju.org.cn

收稿日期: 2005-10-21; 收到修改稿日期: 2005-12-02

波段内器件的传输特性。然而在研究稍微复杂一点的器件传输特性时,这种方法所需的时间常常是无法容忍的。本文结合耦合模理论和光束传输相关函数方法,对光子晶体光纤中布拉格光栅传输谱进行了研究。

## 2 理论基础

光束传输方法(Beam propagation method, BPM)是一种用于仿真介质波导中光束传播的简单数值方法。把基于光束传输框架的模式求解器和耦合模理论相结合,即可以得到一种求解光子晶体光纤中光纤光栅的传输谱的简单方法。首先,选择合适的初始场,利用光束传输相关函数方法对光纤进行模式求解。然后,把各模式在初始场中所占权重与各个包层模式与纤芯模式的耦合系数联系起来。最后,利用耦合模理论得出布拉格光栅的传输谱。

### 2.1 利用光束传输相关函数方法对光纤进行模式求解

本文采用了一种基于标量光束传输方法框架的相关函数方法来求解模场。光子晶体光纤横截面上较高的折射率差通常要求在求解过程中采用基于矢量的模式求解器,但是本文并非侧重于挖掘光纤的偏振特性等矢量性质,而且该方法的计算结果与文献<sup>[12]</sup>中实验结果吻合得很好。因此,这种标量方法对于研究光子晶体光纤中光纤光栅的传输谱仍不失为一种较为有效的方法。其主要求解依据如下<sup>[12~14]</sup>。

沿波导纵向( $Z$ 方向)传播的场可以分解如下:

$$E(x, y, z) = \sum_i \alpha_i E_i(x, y) \exp(-j\beta_i z), \quad (1)$$

其中  $\beta_i = 2\pi n_i/\lambda$  为各模式在纵向方向上的传播常量,  $\alpha_i$  为相应模式在初始场中所占的比例。

在传播方向上,求纵向各点场分布与初始场的相关函数:

$$P(z) = \int E(x, y, 0) E^*(x, y, z) dx dy, \quad (2)$$

对上式化简可得

$$P(z) = \sum_i \alpha_i \alpha_i^* \exp(i\beta_i z), \quad (3)$$

其中

$$\alpha_i = \int E_i^*(x, y) E(x, y, 0) dx dy, \quad (4)$$

以  $z$  为变量,对  $P(z)$  求傅里叶变换。变换后的傅里叶谱图在  $\beta_i$  处呈现峰值。

当  $\beta_i$  已知后,以  $z$  为变量,对  $E(x, y, z)$  求变换,

即可以得到相应各模式的模场分布。

### 2.2 耦合模理论

使用耦合模理论来处理光纤光栅已经非常成熟。对于折射率调制和光栅周期给定的均匀布拉格光纤光栅而言,第  $n$  个共振峰处的传输系数为<sup>[15~17]</sup>

$$T_i = 1 - \tanh^2(\kappa_i L), \quad (5)$$

$L$  是光纤布拉格光栅(FBG)的长度,  $\kappa_i$  是纤芯模与包层模之间的耦合系数。光子晶体光纤中光纤布拉格光栅的传输谱中包含了模式分解中各个模式的贡献。

进一步假设包层模式之间的耦合远小于纤芯模式与包层模式之间的耦合。当栅区纤芯折射率纵向微扰对包层模式的影响远远小于对纤芯模式的影响时,这个假设成立。 $\kappa_i$  正比于纤芯模式  $E_{\text{core}}(x, y)$  和包层模式  $E_{\text{clad},i}(x, y)$  的双重积分。比例系数取决于栅区的横向分布以及栅区折射率的纵向调制幅度。

$$\kappa_i = \frac{\pi}{\lambda} \int E_{\text{core}}(x, y) E_{\text{clad},i}^*(x, y) \Delta n(x, y) dx dy, \quad (6)$$

这里,纤芯模和包层模的电场分量被看作是归一化的。 $\Delta n(x, y)$  是栅区折射率纵向微扰,在这里它是一个常量,可以提到积分号外。(6)式强调了很重要的一点:只有那些与栅区有空间上重叠的那部分才能够通过相位匹配条件激发。

比较(4)式和(6)式,可以发现:

若令  $E(x, y, 0) = \Delta n(x, y) E_{\text{core}}(x, y)$ , 则

$$\alpha_i = \int E_i^*(x, y) \Delta n(x, y) E_{\text{core}}(x, y) dx dy = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) \kappa_i, \quad (7)$$

这样,通过光束传播相关函数方法求解出的  $\alpha_i$  就可以与耦合系数  $\kappa_i$  巧妙的联系起来。假设横截面上栅区的折射率是均匀对称分布的,因此对于截面折射率对称分布的光纤,只考虑对称模式。虽然这样的假设与光栅的实际制作过程略有不符,但是这样的假设只会引起数值上的误差,并不影响结论的一般性<sup>[18]</sup>。

令起始场  $E(x, y, 0) = E_{\text{core}}(x, y)$ , 则(7)式可以变为

$$\Delta n \int_{\text{core}} E_i^*(x, y) E_{\text{core}}(x, y) dx dy = \Delta n \alpha_i = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) \kappa_i, \quad (8)$$

$$\text{即} \quad \kappa_i = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} \alpha_i, \quad (9)$$

当  $\kappa_i$  和相应的光栅参量已知,布拉格光栅的传输谱就可以通过(5)式得到。传输谱中的相应峰值对应的波长可以通过下面两式得到。

布拉格条件：

$$\lambda_B = 2n_{co}\Delta_{FBG}, \quad (10)$$

$\lambda_B$  为布拉格波长,  $n_{co}$  为光纤中基模的等效折射率;  $\Delta_{FBG}$  是布拉格光纤光栅周期。

相位匹配条件：

对于布拉格光纤光栅

$$\beta_{clad,i} + \beta_{01} = \frac{2\pi}{\Delta_{FBG}}, \quad n_{clad,i} = \frac{\lambda_{clad,i}}{\Delta_{FBG}} - n_{co}, \quad (11)$$

$\beta_{01}$  是基模的传播常量,  $\beta_{clad,i}$ ,  $n_{clad,i}$  分别代表第  $i$  个包层模的传播常量和等效折射率,  $\lambda_{clad,i}$  为第  $i$  个包层模式共振所对应的峰值波长。

### 3 数值结果与讨论

本文主要研究在折射率导引型(Index-guiding)光子晶体光纤上所写入布拉格光栅的传输谱。

#### 3.1 光纤中各模式的计算结果

图 1 显示了一种空气孔呈三角排布的典型光子晶体光纤的截面示意图,其中空气孔直径  $d=2 \mu\text{m}$ ,空气孔的间距  $\Delta=10 \mu\text{m}$ 。截面中心是一个很小的掺锗纤芯,掺锗纤芯被七层六角形排布的空气孔所包围(图中只画了两层)。锗芯半径  $\rho=1 \mu\text{m}$ 。

$$\Delta = \frac{n_{core} - n_{clad}}{n_{core}} = 0.5\%,$$

表 1 各模式参量

Table 1 Parameters of each mode

Mode label	Wavelength of corresponding mode peak /nm	Re{ $n_{eff}$ } measurement, from Ref. [12]	Re{ $n_{eff}$ } BPM	Im{ $n_{eff}$ } BPM	Loss / (dB/cm)	Overlap integral of the core mode with the cladding mode in the grating area
01	1551.6	1.4439	1.4434	$8.341 \times 10^{-10}$	$2.93 \times 10^{-4}$	0.0710485
02	1549.8	1.4402	1.4399	$9.079 \times 10^{-6}$	3.2	0.0537849
03	1548.6	1.4382	1.4378	$1.36 \times 10^{-4}$	48	0.0355269
04	1546.4	1.4341	1.4337	$1.717 \times 10^{-5}$	6	0.0517891

图 2 给出了 01~04 模式的模场分布图,所有的模场分布都呈现六角对称分布。图 3 中的虚线部分是根据以上光纤参量计算出的光子晶体光纤模式谱图<sup>[13]</sup>。纵坐标为  $\alpha^2$ ,横坐标为等效折射率。01 对应纤

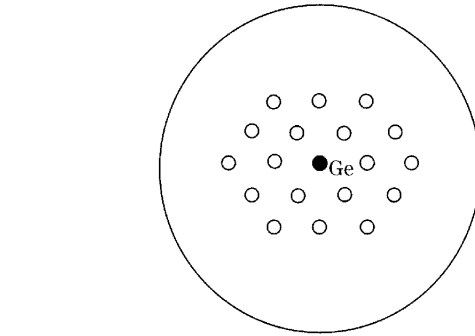


图 1 光子晶体光纤的截面图

Fig.1 Cross section of photonic crystal fiber

式中  $n_{core}$  和  $n_{clad}$  分别为掺锗纤芯和  $\text{SiO}_2$  的折射率。根据赛耳迈耶尔(Sellmeier)公式,1550 nm 处的  $\text{SiO}_2$  折射率  $n_{clad} = 1.44402$ ,  $n_{core} = 1.45128$ 。假设  $\Delta=0.5375 \mu\text{m}$  栅区纵向折射率微扰  $\Delta n=4 \times 10^{-5}$ ,栅区长度  $L=4 \text{ cm}$ ,传输光束波长为  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 。计算时,首先以轴对称束腰为  $2 \mu\text{m}$  的高斯光束(高斯光束的束腰宽度与栅区截面宽度一致)作为起始场,传播 1 cm,利用相关函数方法得到光纤中传播的各模式解。根据计算出的各个模式等效折射率虚部可以推算出的各个模式的损耗,结果见表 1 的 4~6 列。

由表 1 可知,模式标记为 02 以上的模式损耗都比较大,皆为泄漏模式。

芯模式,02~04 对应包层模式。

#### 3.2 光子晶体光纤中布拉格光栅传输谱

把(9)式代入(5)式,就可以得到光子晶体光纤中的光纤光栅的传输谱图,如图 3 实线所示。这与

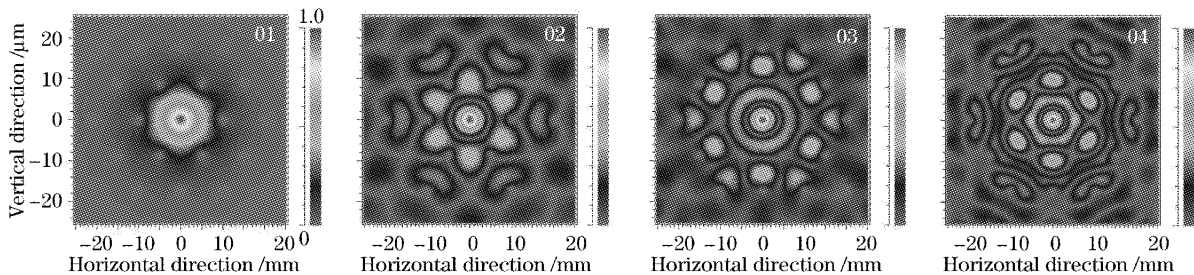


图 2 各模式模场图

Fig.2 Field distribution of each mode

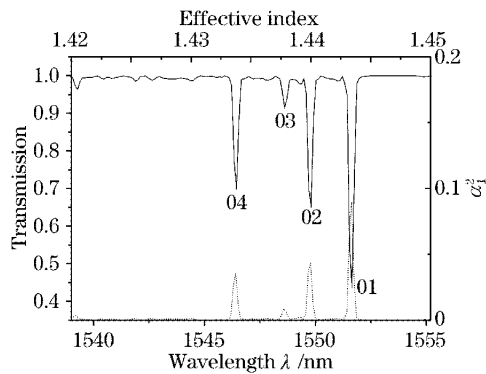


图3 光子晶体光纤中布拉格光栅传输谱图  
Fig. 3 Transmission spectrum of Bragg grating  
in photonic crystal fiber

文献[12]中的实验结果吻合得很好,见表1第3,第4列。计算出的各模式等效折射率比实验结果略小,可能是计算中的折射率分布仍与实际实验条件略有差异。01峰是正反向纤芯模式之间耦合所产生的损耗峰。02~04峰是包层模与纤芯模式相互耦合所产生的损耗峰。事实上,图3中各个模式与光子晶体光纤中光纤光栅传输谱图中的各个损耗峰是一一对应的。表1中列出了这几个模式对应的有效折射率。根据表格1中所给出的各个模式的有效折射率,利用(10)式、(11)式可以计算出01~04损耗峰所对应的波长。计算结果也在表1的第2列中给出。

在相同的光栅纵向折射率微扰、栅区面积、光栅周期和光栅长度的条件下,对光子晶体光纤和常规光纤中布拉格光栅的传输谱做了比较研究。与常规光纤中所写入的光纤光栅的传输谱(如图4所示)相比,光子晶体光纤中光纤光栅的传输谱有以下两个特点:

1) 从传输谱上看,包层模共振处的传输损耗比

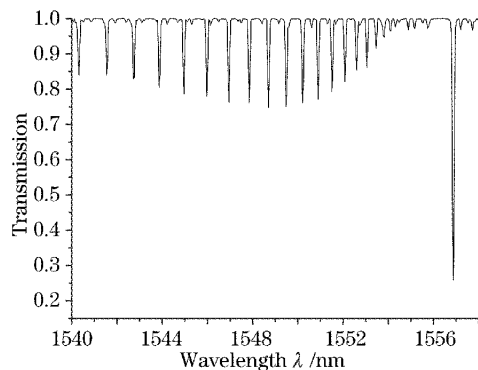


图4 常规光纤(SMF-28型光纤)布拉格光栅的传输谱  
Fig. 4 Transmission spectrum of conventional fiber  
Bragg grating (type: SWF-28)

在常规光纤中大,甚至可与布拉格反射引起的传输谱上损耗峰相比拟。这是由于光子晶体光纤中包层模与纤芯模在栅区部分的重叠要比在常规光纤中大许多。表1的最后一列给出了图2中各模式与纤芯模式(01模式)在栅区的重叠积分。从表1可以看出,各包层模式与纤芯模式在栅区的重叠积分与纤芯模式本身在栅区的重叠积分相差不多。也就是说,根据(8)式、(9)式,包层模式与纤芯模式的耦合系数与正反向纤芯模式之间的耦合系数相差不多。因此,包层模式共振引起的损耗峰与布拉格共振峰相比还是较为显著的。

2) 在光子晶体光纤的布拉格光栅的传输谱中,只有少数几个低阶包层模式共振的影响比较大。包层模式共振的间隔大于常规光纤中的包层模共振的间隔。这主要是由于空气孔包层的等效半径都要比常规光纤的小,导致包层模式的数量和各包层模式间的等效折射率差增大,从而引起传输谱中包层模共振间的波长间隔变大。

### 3.3 光纤结构参量变化对于光纤光栅传输谱的影响

光子晶体光纤结构参量的改变对于光纤中各个模式的等效折射率和模场分布都会产生影响,从而对光纤中的布拉格光栅传输谱产生影响。在比较经典的空气孔呈三角形排布的光子晶体光纤中,空气孔的占空比,和空气孔阵列的排布层数是最为明显的可调参量,下面就用上述方法来考察这两个量的变化对光子晶体光纤中布拉格光栅的传输谱规律的影响,尤其是对于包层模共振的位置和强度的影响,从而为设计相应的光子晶体光纤布拉格光栅传输谱(尤其是增强或者削弱包层模式共振)提供必要的依据。

#### 3.3.1 空气孔填充率对光栅传输谱的影响

针对不同光纤结构参量进行计算,发现光子晶体光纤中基模和第一包层模式等效折射率之差随光纤截面上空气孔填充率的增加而增加。这种影响直接导致光栅传输谱中布拉格反射峰与第一包层损耗峰之间的间隔随空气孔填充率的增加而增加,即布拉格反射峰附近的自由光谱范围随着填充率的增加而增加。图5给出了不同空气孔填充率的光子晶体光纤中布拉格共振峰和第一包层模共振峰的波长间隔随空气孔填充率变化的曲线,并给出了拟合结果。这一性质可以通过等效折射率模型加以解释:当光纤中传播光束波长给定时,空气孔的填充率增加导致光子晶体光纤中包层等效折射率减小,相应包层模式的等效折射率也下降,从而导致基模和第一包层模式等效折射率之差增大。

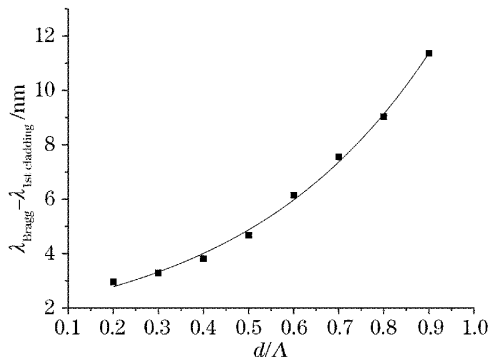


图 5 布拉格共振峰与第一包层模式共振峰的波长差随光纤中空气填充率的变化

Fig. 5 Wavelength difference between Bragg resonance peak and the first cladding mode resonance versus peak air-filling ratio of the fiber

令  $f = d/\Lambda$ , 曲线拟合的关系如下:

$$\Delta\lambda = \Delta_{\text{FBG}} (N_{\text{eq01}} - N_{\text{eq02}}) = 4.386 + 0.790125 \exp(f/0.42089), \quad (12)$$

$N_{\text{eq01}}, N_{\text{eq02}}$  分别是 01, 02 模式的等效折射率。

计算中, 还发现包层模式共振在空气孔填充率小于等于 0.5 时, 布拉格共振随着空气孔填充率的增大而增大, 包层模共振随空气孔填充率的增大略有减弱。当空气孔填充率大于 0.6 时, 包层模共振损耗随着空气孔填充率的增大而增强甚至出现多个共振损耗超过布拉格共振所产生的损耗的包层模共振峰。这种转变是由于随着空气孔变大, 锗芯和周围的石英基底逐渐构成了导波结构, 而这种波导结构的包层半径大大减少, 从而导致其包层模式更加集中于锗芯, 纤芯模式与包层模式的耦合系数进一步增大甚至超过正反向纤芯模式之间的耦合系数。

### 3.3.2 空气孔层数对于传输谱的影响

改变光纤截面上包围锗芯的空气孔层数, 对传输谱中各个包层模共振损耗峰的位置几乎没有影响, 但是各个包层模共振损耗会随着空气孔的层数增加而增加。图 6 给出了 02 与 01 模式间耦合系数随空气孔层数变化规律。这是由于空气孔的层数增加, 光纤束缚光的能力增强。因此, 基模更加集中于锗芯, 导致基模与高阶模的重叠积分加大。也就是说, 基模与高阶模之间的耦合系数增大, 相应包层模共振损耗会增加。03, 04 模式与 01 模式的耦合系数随包层中空气孔层数的变化规律也是如此, 只不过在空气孔层数较少时, 较高阶包层模式趋于截止。

虽然这里只对空气孔呈三角形排布的光子晶体光纤进行了分析。但是给出的定性解释表明, 这些规律在各种包层中空气孔排布规则(如空气孔呈矩

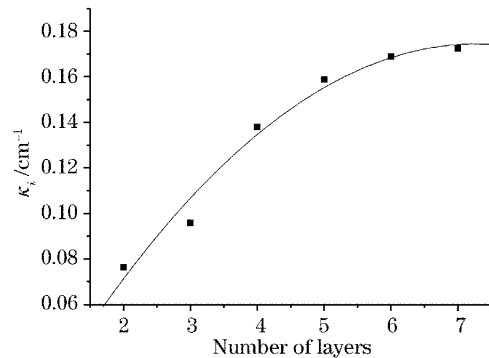


图 6 02 与 01 模式间耦合系数随空气孔层数变化规律

Fig. 6 Coupling coefficient between 02 mode and 01 mode versus layer number of air holes

形排布或者空气孔为非圆孔)的折射率导引型光子晶体光纤中同样适用。可以依据这些规律, 参照常规范光纤中发展起来的特种光纤设计法则(如 W 型光纤, 高数值孔径光纤), 合理设计包层中空气孔排布结构, 来有效减少或增强包层模共振峰对传输谱的影响并加以利用。这些特性必然会为基于光子晶体光纤的增益谱均衡滤波器, 光纤化滤波器, 光纤传感器等的研发提供新的技术路线。

## 4 结 论

与常规光纤光栅相比, 包层模共振引起的损耗峰与正反向纤芯模耦合引起的损耗峰可以相比拟, 而包层模共振的间隔也比常规光纤中光纤光栅的包层模共振间隔要大。同时, 光子晶体光纤截面上折射率分布设计的灵活性为设计相应的布拉格光纤光栅中传输谱提供了可能。第一包层共振峰与布拉格峰的波长间隔随着光纤截面上空气占空比的增加而增加。包层模式共振在空气孔填充率小于等于 0.5 时, 布拉格共振随着空气孔填充率的增大而增大, 包层模共振随空气孔填充率的增大略有减弱。当空气孔填充率大于 0.6 时, 包层模共振损耗随着空气孔填充率的增大而增强甚至出现多个共振损耗超过布拉格共振所产生的损耗的包层模共振峰。空气孔包层的层数减少会导致包层模共振峰的减弱。

**致谢** 作者真诚地感谢与中国科学院上海光学精密机械研究所周秦岭博士后, 韩秀友博士的有益讨论。

## 参 考 文 献

- 1 T. M. Monro, D. J. Richardson. Holey optical fibres; fundamental properties and device applications[J]. *Physique*, 2003, 4(1): 175~186

- 2 B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook. Microstructured optical fiber devices[J]. *Opt. Exp.*, 2001, **9**(13): 698~713
- 3 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Jin Long *et al.*. Recent progress on imprinting technologies of photonic crystal fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 42~47 (in Chinese)  
涂勤昌, 张伟刚, 金龙等. 光子晶体光纤光栅制备方法最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(4): 42~47
- 4 Anders Bjaklev, Jes Broeng, Araceli Sanchez Bjarklev. *Photonic Crystal Fibres* [M]. Kluwer Academic Publishers, 2003. 53~113
- 5 Jingyuan Wang, Mingyi Gao, Chun Jiang *et al.*. Design and parametric amplification analysis of dispersion-flat photonic crystal fibers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 380~382
- 6 Kwang N. Park, Kyung S. Lee. Improved effective-index method for analysis of photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9): 958~960
- 7 Ning Guan, Shinji Habu, Katsuhiro Takenaga *et al.*. Boundary element method for analysis of holey optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(8): 1787~1792
- 8 Zhaoming Zhu, Thomas G. Brown. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(17): 853~864
- 9 Chin-ping Yu, Hung-chun Chang. Yee-mesh-based finite difference eigenmode solver with PML absorbing boundary conditions for optical waveguides and photonic crystal fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(25): 6165~6177
- 10 Wang Zhi, Ren Guobin, Lou Shuqin *et al.*. Novel supercell lattice method for the photonic crystal fibers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 59~63 (in Chinese)  
王 智, 任国斌, 娄淑琴等. 用于光子晶体光纤研究的超格子构造法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 59~63
- 11 Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin *et al.*. Localized orthogonal function model of photonic crystal fibers [J]. *Acata Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1130~1136 (in Chinese)  
任国斌, 王 智, 娄淑琴等. 光子晶体光纤的正交函数模型[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1130~1136
- 12 B. J. Eggleton, P. S. Westbrook, C. A. White *et al.*. Cladding-mode-resonances in air-silica microstructure optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(8): 1084~1100
- 13 M. D. Feit, J. A. Fleck. Computation of mode properties in optical fiber waveguides by a propagating beam method [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(7): 2240~2246
- 14 R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla *et al.*. Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2000, **6**(1): 150~162
- 15 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 16 T. Erdogan. Cladding mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 17 R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings* [M]. 1st ed., New York: Academic, 1999. 119~189
- 18 L. Dong, L. Reekie, J. L. Cruz *et al.*. Optical fibers with depressed claddings for suppression of coupling into cladding modes in fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(1): 64~66