

文章编号: 0253-2239(2008)06-1172-06

光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性分析

崔 莉 赵建林 张晓娟 杨德兴

(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 综合运用弯曲光纤的等效直光纤模型、全矢量频域有限差分法及各向异性完全匹配层吸收边界, 计算了两种类型(折射率引导型和带隙型)光子晶体光纤(PCF)的弯曲损耗。通过数值模拟弯曲损耗随弯曲半径的变化关系, 证实了两种光子晶体光纤均具有弯曲损耗振荡特性。进而分析了两种光子晶体光纤弯曲损耗振荡的产生机理并给出了与损耗峰对应的包层模式。结果表明, 振荡的产生源于基模与包层模式的耦合, 其中, 折射率引导型光子晶体光纤的弯曲损耗振荡机理类似于传统双包层光纤, 带隙型光子晶体光纤弯曲损耗振荡的产生则是两种不同类型的包层模式共同作用的结果。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 弯曲损耗振荡; 频域有限差分法; 完全匹配层

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

Analysis of Bending Loss Oscillations in Photonic Crystal Fibers

Cui Li Zhao Jianlin Zhang Xiaojuan Yang Dexing

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

Abstract The bending losses in refractive index-guiding photonic crystal fiber (PCF) and photonic band-gap fiber are analyzed by using equivalent straight fiber approximation and finite difference frequency domain (FDFD) method with anisotropic perfectly matched layers (PML) boundary conditions. The bending loss oscillations in the two kinds of PCFs are observed by simulating the relationship between the bending loss and bending radius, and the origin of the loss oscillations was analyzed. The cladding modes corresponding to loss peaks are identified. Results show that the oscillations are caused by the coupling between the fundamental mode and the cladding modes. Moreover, the origin of oscillations in index-guiding PCF is similar to that of conventional double-clad fiber, while the oscillations in the photonic band-gap fiber are caused by two different kinds of cladding modes.

Key word fiber optics; photonic crystal fiber; bending loss oscillation; finite difference frequency domain; perfectly matched layers

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)以其独特的性质和在光通信、传感及非线性光学等领域的应用前景而引起了国内外的广泛关注^[1~5]。集成光学器件和小型光纤器件中经常需要将光纤弯曲, 而光纤的弯曲特性也可用做某些物理量的传感测量, 因此研究光纤的弯曲损耗及相关的物理现象对于其实际应用具有重要意义。实验及理论研究均已表明, 传统双包层光纤

具有弯曲损耗振荡特性。在折射率引导型和带隙型光子晶体光纤的实验研究^[6,7]中发现, 给定波长情况下光纤弯曲损耗与弯曲半径之间的关系也不是严格的单调增变化。早期对光子晶体光纤弯曲特性的理论研究, 往往采用最简便的等效折射率(ESI)法^[8,9]。该方法假设光子晶体光纤具有无限大的包层, 因此得到弯曲损耗随弯曲半径呈单调关系, 不能解释上述实验结果, 且该方法不能用于分析带隙型

收稿日期: 2007-09-21; 收到修改稿日期: 2007-10-31

作者简介: 崔 莉(1983—), 女, 山东人, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤传输特性方面的研究。

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

导师简介: 赵建林(1958—), 男, 陕西人, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息技术及应用等方面的研究。

E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

光子晶体光纤。近年来,人们采用全矢量有限元(FEM)法^[10~12]分析光子晶体光纤的弯曲特性。该方法通过在不同子空间离散麦克斯韦方程组得到复传播常量,与等效折射率方法相比更为精确。利用有限元法,Yukihiko Tsuchida 等^[10]设计出了低弯曲损耗的单模光子晶体光纤,Jacek Olszewski 等^[11,12]证实了折射率引导型光子晶体光纤具有类似传统双包层光纤的弯曲损耗振荡特性,可解释部分实验结果,但均没有对带隙型光子晶体光纤进行分析。另外,由于光子晶体光纤的几何结构复杂,应用有限元法分析时涉及的未知量太多,不易掌握。本文旨在采用一种更简便的方法有效地模拟光子晶体光纤的弯曲损耗,并验证带隙型光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性。

2 理论模型

为模拟光纤中传输模场的泄漏,一般需应用吸收边界条件使得边界上“无”反射。选用各向异性完全匹配层(PML)作为吸收边界。在各向异性完全匹配层边界条件下,麦克斯韦方程组的两个旋度方程^[13]可表示为(相关符号含义参见文献[13])

$$jk_0 s_{\epsilon} E = \nabla \times H, \quad -jk_0 s_{\mu} H = \nabla \times E, \quad (1)$$

式中

$$s = \begin{bmatrix} s_y/s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_x/s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_x s_y \end{bmatrix},$$

$$s_x = 1 - \frac{\sigma_x}{j\omega\epsilon_0}, \quad s_y = 1 - \frac{\sigma_y}{j\omega\epsilon_0},$$

σ_x, σ_y 分别为完全匹配层区域内沿 x, y 方向的电导率,在自由空间为零。

假设在光纤中传输着频率为 ω 的单色光波,其场分量表示为 $\Phi = \psi \exp[j(\beta z - \omega t)]$, β 为传播常

量,将(1)式按频域有限差分(FDFD)法进行差分,最后得到如下特征方程^[13]:

$$P \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$Q \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 P 和 Q 为只与波长及介电常量分布有关的系数矩阵^[13,14], $[E_x, E_y]^T, [H_x, H_y]^T$ 为由网格点场量构成的向量。其特征值和特征向量分别对应模式的传播常量和模场分布。

为求解光纤的弯曲损耗,一种有效的途径是将弯曲光纤等效为直光纤^[10~12],其折射率分布为

$$n_{\text{eq}}(x, y) = n(x, y) \exp\left(\frac{p}{R}\right), \quad (4)$$

式中 $n(x, y)$ 为光纤原有的折射率分布; $p = x$ 或者 y ,取决于弯曲方向; R 为弯曲半径。(4)式表明,弯曲光纤相当于折射率分布沿弯曲方向发生倾斜的直光纤,且弯曲半径越小,倾斜越大。例如,对图1所示的光子晶体光纤结构,其弯曲前后的折射率分布分别如图2(a)和图2(b)所示。

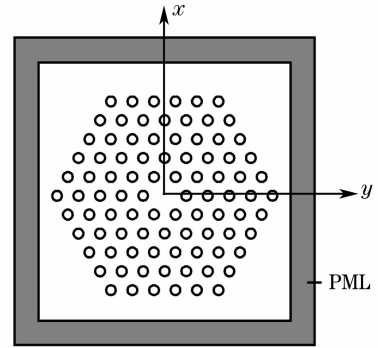


图1 光子晶体光纤结构及计算区域

Fig. 1 Cross section of photonic crystal fiber and computational domain

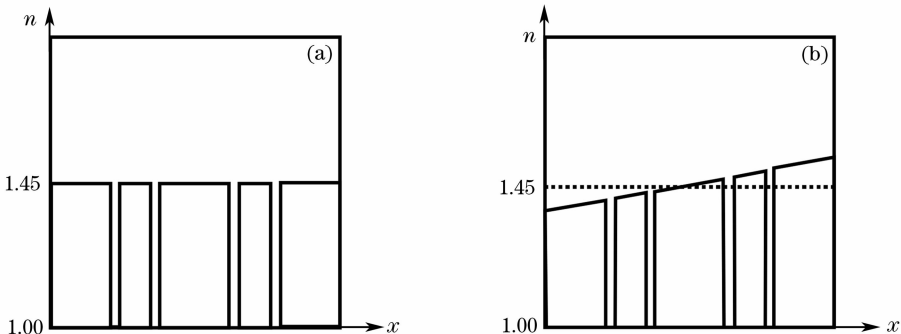


图2 弯曲前后的折射率分布示意图。(a) 直光子晶体光纤,(b) 弯曲光子晶体光纤

Fig. 2 Refractive index distribution for (a) straight, (b) bent photonic crystal fiber

光束在传播过程中的损耗可由传播常量 β 的虚部表示,传播损耗定义^[10,11]为

$$L_B = 8.686 \text{Im} \beta, \quad (5)$$

L_B 的单位为 dB/m。对于弯曲光纤,其传播损耗包括弯曲损耗和直光纤的限制损耗两部分。因此,弯曲损耗可由传播损耗减去直光纤的限制损耗而得到。

取图 1 所示的光纤计算区域,并将完全匹配层设置在包层外一段距离处。这种设置考虑了基模和包层模式的耦合,从而可研究弯曲损耗振荡特性。考虑到不同偏振模式的弯曲损耗遵循相同规律,只是数值略有不同,因此,为方便起见,只计算 x 偏振基模的弯曲损耗。另外,当光纤在 y 方向弯曲时,从纤芯泄露出去的场被空气孔包层的拐角处反射,导致包层模式具有更加复杂的结构,并且与 x 方向弯曲相比,由于基模的距离增加,耦合减弱,只能产生较弱的振荡,为

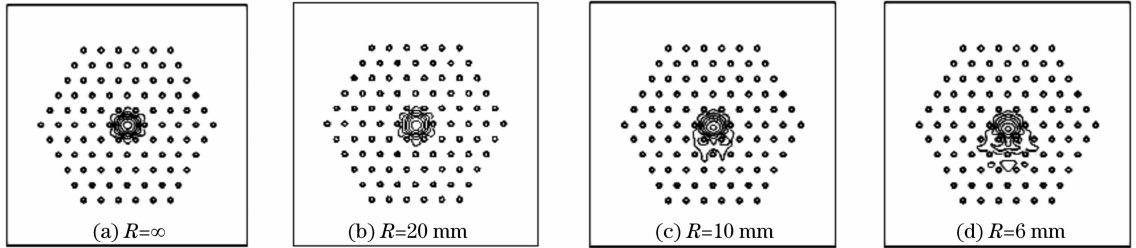


图 3 折射率引导型光子晶体光纤对应不同弯曲半径的基模模场分布

Fig. 3 Distributions of the fundamental mode field for index-guiding fiber under different bending radius R

进而考虑折射率引导型光子晶体光纤的弯曲损耗。图 4 是波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时弯曲损耗与弯曲半径之间的关系曲线,可以看出,弯曲损耗随弯曲半径的减小而增大,且存在明显的振荡现象。结果表明,折射率引导型光子晶体光纤具有类似于传统双包层光纤的弯曲损耗振荡特性。传统双包层光纤弯曲损耗振荡的产生是由于基模泄露的能量被外包层反射

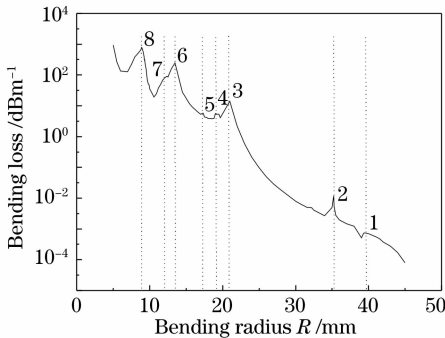


图 4 折射率引导型光子晶体光纤的弯曲损耗与弯曲半径的关系

Fig. 4 Bending losses versus bending radius for index-guiding photonic crystal fiber

此,这里仅讨论光纤沿 x 方向弯曲的情况。

3 数值模拟与结果分析

3.1 折射率引导型光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性

首先观察弯曲光子晶体光纤的模场分布。考虑图 1 所示的折射率引导型光子晶体光纤结构,取空气孔间距 $\Lambda = 7.8 \mu\text{m}$,空气孔直径 $d = 2.4 \mu\text{m}$ 。图 3 为对应 $1.55 \mu\text{m}$ 波长在不同光纤弯曲半径下的基模模场分布。由于假设光纤沿 x 正向弯曲,且弯曲外侧有效折射率增大,与纤芯折射率的差值减小,所以能量从弯曲外侧即 x 负向泄漏。当弯曲半径减小时,能量泄漏在纤芯外的成分增多,导致弯曲损耗增大。

后重新与基模耦合所致。折射率引导型光子晶体光纤具有与传统双包层光纤类似的结构,其包层可分为空气孔包层和实心包层两部分,分别对应传统双包层光纤的内外包层,因此其振荡的产生源于空气孔包层模式的作用。从另一个角度分析,无弯曲时光纤基模的有效折射率大于包层模式,随着弯曲半径的减小,基模有效折射率的变化很小,而包层模式的有效折射率快速增大;当两者接近时,包层模式与

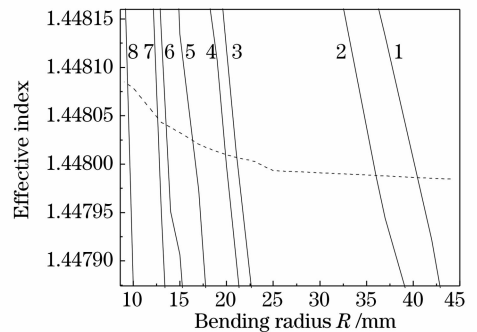


图 5 基模及包层模式的有效折射率与弯曲半径的关系

Fig. 5 Effective refractive indices of the fundamental mode and the cladding modes

基模发生耦合,基模的损耗达到极大。因此,通过分析包层模式有效折射率的变化,可以确定出包层模式与损耗峰之间的对应关系。图 5 给出了基模(虚线)和产生损耗峰的包层模式(实线)的有效折射率,图 5 图中数字标识与图 4 中的损耗峰对应。对照图 4 和图 5 可明显看出,损耗峰的位置正好位于包层模式和基模有效折射率的交叉点。图 6 是对应包层模式的能量分布图。将包层模式命名为 CL_{km} ,其中 k, m 分别代表场分布沿径向和切向的极大值个数。

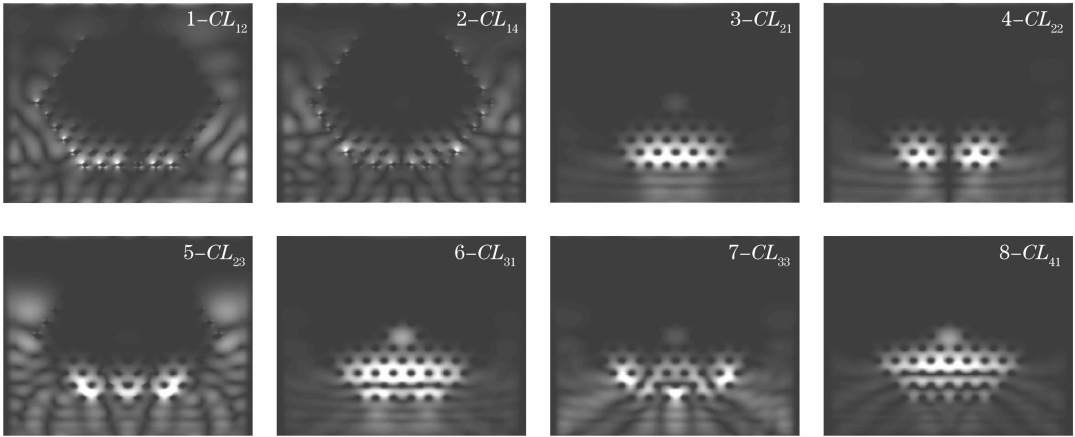


图 6 折射率引导型光子晶体光纤包层模式的能量分布图

Fig. 6 Energy distributions of the selected cladding modes for index-guiding photonic crystal fiber

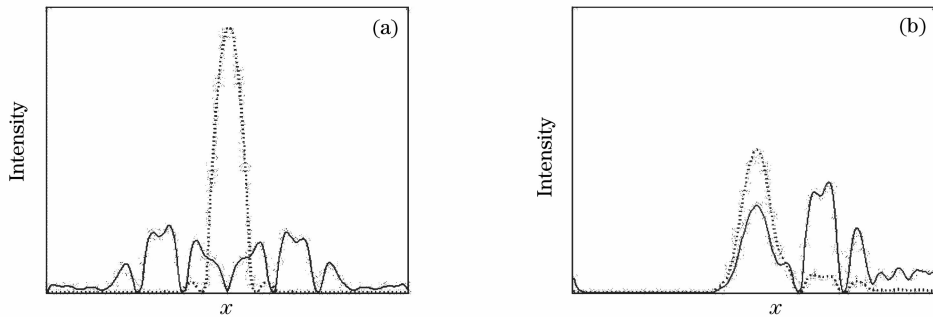


图 7 弯曲前后基模及包层模式的横向模场分布。(a) 直光纤,(b) 弯曲光纤

Fig. 7 Transverse distributions of the cladding mode and the fundamental mode for (a) straight, (b) bent fiber

3.2 带隙型光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性

带隙型光子晶体光纤在纤芯引入空气孔缺陷,从而使光场被限制在光子带隙内传输,并且传输模式的有效折射率必须满足 $n_{\text{eff}} = n_{\text{air}} \cos(\theta_z) < 1$,其中 θ_z 为波矢量与光纤轴线的夹角, n_{air} 为空气折射率。所以只有存在于空气折射率线和带隙上边缘之间的模式(包括纤芯模式和表面模式^[15,16])才可在带隙型光子晶体光纤内传输,其中纤芯模式的大部分能量存在于空气纤芯内,而表面模式被限制在纤芯附近,其大部分能量都分布在纤芯周围的石英区域。

表面模式被证实是影响带隙型光子晶体光纤限

可以看出,因为 CL_{k1} 模与基模的交迭系数比 $m > 1$ 的包层模式大,所以 CL_{k1} 模构成了三个主损耗峰。

图 7(a)与图 7(b)分别给出弯曲前后 CL_{21} 模(实线)与基模(虚线)的横向模场分布。其中图 7(b)是在弯曲半径 $R = 21.2 \text{ mm}$ 时计算的结果,此时, CL_{21} 模与基模的有效折射率发生交叉。从图中可看出, CL_{21} 模与基模发生明显耦合,验证了上述对振荡产生机理的分析。

制损耗的重要因素^[16]。因其能量大部分在石英材料内,波长增大时,表面模式的有效折射率迅速减小,相比之下基模有效折射率的变化很小,所以表面模式有可能与基模发生交叉,使损耗达到极大。由此可以推断,表面模式似乎也是影响弯曲损耗的重要因素。但数值模拟分析却得出如下结论:对同一波长,弯曲对表面模式有效折射率的影响很小,不会在弯曲半径变化上与基模发生耦合,所以表面模式对弯曲损耗的影响基本可以忽略。

带隙型光子晶体光纤的包层模式存在于带隙的上下边缘附近,其有效折射率可大于也可小于基模。

光纤弯曲时,随着弯曲半径的减小,能量主要分布在弯曲外侧的包层模式有效折射率增大,能量主要分布在弯曲内侧的包层模式有效折射率减小。这两种不同的包层模式都可能与基模发生耦合而产生弯曲损耗振荡。由此可推断出,带隙型光子晶体光纤中也存在弯曲损耗振荡现象,并且振荡是由两种不同的包层模式共同作用的结果。

为验证上述分析,对图 8 所示的带隙型光子晶

体光纤结构进行数值模拟,结果如图 9。这里取空气孔间距 Λ 为 $3.8 \mu\text{m}$,空气孔直径 d 与 Λ 之比为 0.98,纤芯直径为 $10.9 \mu\text{m}$,石英环厚度 T 与 Λ 之比为 0.15。图 9 和图 10 分别为 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下弯曲损耗和有效折射率随弯曲半径的变化关系。图中可观察到明显的振荡现象,与折射率引导型光子晶体光纤不同的是,带隙型光子晶体光纤包层模式的有效折射率随弯曲半径的减小可增大也可减小。图 11 给

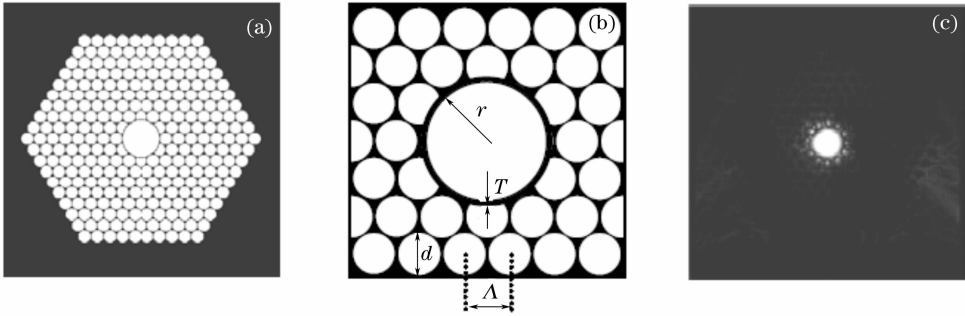


图 8 带隙型光子晶体光纤结构图及其基模模场分布

Fig. 8 Cross section of photonic band-gap fiber and distribution of the fundamental mode field

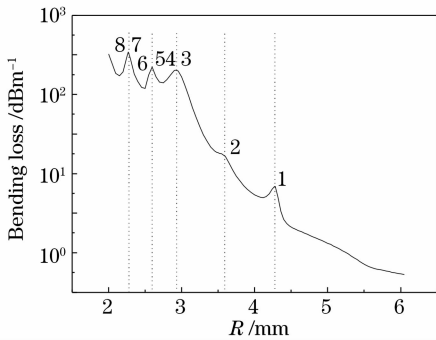


图 9 带隙型光子晶体光纤的弯曲损耗与弯曲半径的关系
Fig. 9 Bending losses versus bending radius for photonic band-gap fiber

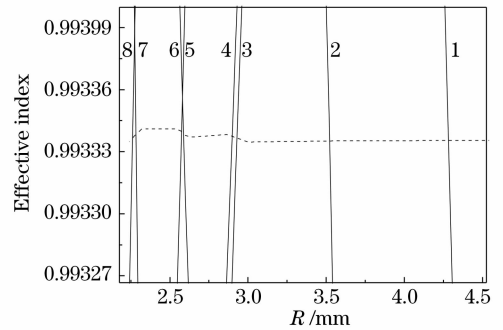


图 10 基模及包层模式的有效折射率与弯曲半径的关系
Fig. 10 Effective refractive indices of the fundamental mode and the cladding modes

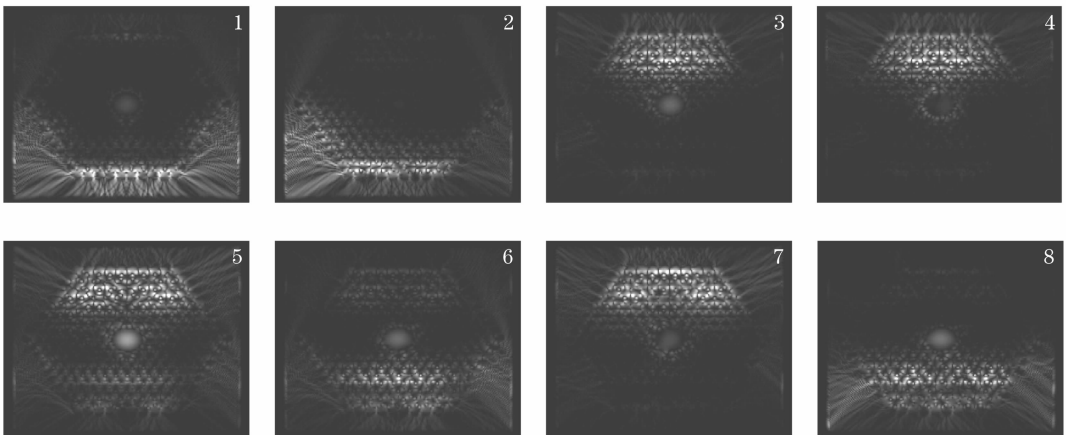


图 11 带隙型光子晶体光纤包层模式的能量分布图

Fig. 11 Energy distributions of the selected cladding modes for photonic band-gap fiber

出了包层模式的能量分布。对照图 10、图 11 可看出,包层模式的能量分布决定了其有效折射率的变化趋势。其中包层模式 1、2、6、8 的场能量主要分布在弯曲外侧,其有效折射率随弯曲半径减小而增大,包层模式 3、4、5、7 的能量则主要分布在弯曲内侧,其有效折射率随弯曲半径减小而减小。由于包层模式 3 与 4 的折射率相差很小,因此难以区分出两个损耗峰,可认为共同作用形成一个损耗峰。5 与 6,7 与 8 是同样的情况。基于以上分析,带隙型光子晶体光纤的两种包层模式都在一定的弯曲半径下与基模耦合,使损耗达到极大并产生振荡。

4 结 论

采用频域有限差分法分别研究了折射率引导型光子晶体光纤和带隙型光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性,并从模式折射率变化的角度分析了振荡产生的原因。结果表明:1) 折射率引导型光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性类似于传统双包层光纤,振荡产生的原因是,弯曲使得包层模式的有效折射率随弯曲半径减小而增大,当包层模式与基模的折射率接近时两者发生耦合,产生损耗峰。2) 带隙型光子晶体光纤同样存在弯曲损耗振荡,其产生机理与折射率引导型略有不同。带隙型光子晶体光纤中存在着有效折射率小于或者大于基模的两种包层模式,能量分布在弯曲内侧的包层模式的有效折射率随弯曲半径减小而减小,也会与基模发生耦合,产生损耗峰。因此带隙型光子晶体光纤弯曲损耗振荡的产生是这两种不同的包层模式共同作用的结果。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight. Photonic crystal fibers[J]. *Nature*, 2003, **424**: 847~851
 - 2 Fang Hong, Lou Shuqin, Ren Guobin *et al.*. Mode cutoff 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
- 3 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
 - 4 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
 - 5 J. H. Rothwell, D. A. Flavin, W. N. MacPherson *et al.*. Photonic sensing based on variation of propagation properties of photonic crystal fibres[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(25): 12445~12450
 - 6 M. D. Nielsen, J. R. Folkenberg, N. A. Mortensen *et al.*. Bandwidth comparison of photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(3): 430~435
 - 7 T. P. Hansen, J. Broeng, A. Bjarklev. Macrobending loss in air-guiding photonic crystal fibres[C]. *29th Eur. Conf. Opt. Commun.*, 2003, **We2.7.4**: 484~485
 - 8 T. Serensen, J. Broeng, A. Bjarklev *et al.*. Spectral macrobending loss considerations for photonic crystal fibres[J]. *IEE Proc. Optoelectronics*, 2002, **149**(5/6): 206~210
 - 9 M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, M. Albertsen *et al.*. Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(8): 1775~1779
 - 10 Y. Tsuchida, K. Saitoh, M. Koshiba *et al.*. Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(12): 4770~4779
 - 11 J. Olszewski, M. Szpulak, W. Urbanczyk. Effect of coupling between fundamental and cladding modes on bending losses in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(16): 6015~6022
 - 12 J. Olszewski, M. Szpulak, T. Martynkien *et al.*. Analytical evaluation of bending loss oscillations in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**: 261~270
 - 13 S. Guo, F. Wu, S. Albin. Loss and dispersion analysis of microstructured fibers by finite-difference method [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(15): 3341~3352
 - 14 Z. Zhu, T. G. Brown. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(17): 853~864
 - 15 K. Saitoh, N. A. Mortensen, M. Koshiba. Air-core photonic band-gap fibers: the impact of surface modes[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(3): 394~400
 - 16 J. A. West, C. M. Smith, N. F. Borrelli *et al.*. Surface modes in air-core photonic band-gap fibers [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(8): 1485~1496