

文章编号: 0253-2239(2008)03-0543-06

空芯光子带隙光纤纤芯-包层交界面的设计

张 虎 杨伯君 王秋国

(北京邮电大学理学院, 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 利用平面波展开法计算了圆六边形空气孔按三角形排列的光子晶体带隙, 基于带隙图设计了移去 7 根玻璃毛细管形成纤芯、传输波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的空芯光子带隙光纤的结构参量。随后利用全矢量有限元法计算了所设计的在纤芯-包层界面处引入石英环的光纤, 给出了在不同半径情况下沿 z 轴方向的光强分布、光强等高线分布图和损耗随引入石英环相对厚度的变化曲线。得出了光纤消除表面模、减小损耗的纤芯外半径取值范围为 $1.55\Lambda \sim 1.7\Lambda$, 石英环的相对厚度取值范围为 $1.3 \sim 1.5$ 或 $3.4 \sim 3.8$ 。通过分析发现石英环的引入既可以抑制表面模也可以激发表面模, 抑制还是激发有赖于纤芯外半径和石英环厚度的选择。

关键词 光纤光学; 空芯光子带隙光纤; 全矢量有限元法; 光子带隙; 表面模; 损耗

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

Design of Core-Cladding Interface of Hollow-Core Photonic-Bandgap Fibers

Zhang Hu Yang Bojun Wang Qiuguo

(School of Science, Key Laboratory of Communication and Lightwave Technologies, the Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The photonic bandgap structure for a photonic crystal with rounded hexagons air hole arranged by triangular lattice was calculated by plane wave method (PWM), and based on the structure diagram, structure parameters of a seven-cell hollow-core photonic bandgap fiber (PBF) was designed to propagate a lightwave with $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. And then numerical simulation for a hollow-core PBF with a silica ring introduced at the core-cladding interface was done with full-vectorial finite element method (FEM), and the intensity distribution, intensity contour distribution in z axis and a curve of leakage loss as a function of normalized core thickness were presented. The ranges of out core radius and the normalized thickness of a silica ring for the fiber free of surface modes and reducing loss are $1.55\Lambda \sim 1.7\Lambda$ and $1.3 \sim 1.5$ or $3.4 \sim 3.8$ respectively. A silica ring can not only create surface modes but also remove surface modes, which depends on choices of the out core radius and a silica ring thickness.

Key words fiber optics; hollow-core photonic bandgap fibers (PBF); full-vectorial finite element method (FEM); photonic bandgap, surface modes; loss

1 引 言

空芯光子带隙光纤(PBF)是微结构光纤^[1]的一种。在过去的几年里,空芯光子带隙光纤引起了科研人员的极大兴趣。空芯光子带隙光纤是通过包层光子晶体的布拉格衍射^[2]的多重干涉而将光限制在纤芯中传输的,所以与传统光纤相比,在纤芯中导光的光子带隙光纤具有潜在的优势,如低的瑞利散射、低的非线性和理论上的低传输损耗^[3]。这些光纤由

于其独特的性能将被广泛应用,例如,它们为研究拉曼散射^[4]、孤子传输^[5]、脉冲压缩^[6]和粒子输运^[7]提供了一个新的平台。但是,目前报道的空芯光子带隙光纤的最小损耗接近 1 dB/km ^[8],仍大于传统单模光纤。空芯光子带隙光纤在堆拉时由于热力学原因不可避免地由表面毛细波(SCW)引入了表面粗糙,致使包层中的表面模与纤芯中的芯模发生了耦合,这最终限制了空芯光子晶体光纤的损耗,是目前

收稿日期: 2007-06-18; 收到修改稿日期: 2007-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(60578043)和北京市教委共建项目(XK100130637)资助。

作者简介: 张 虎(1976—),男,山西朔州人,博士研究生,主要从事空芯光子晶体光纤及其应用等方面的研究。

E-mail: zhh309@sina.com

导师简介: 杨伯君(1938—),男,湖南新化人,博士生导师,主要从事光纤光学、量子光通信与光子晶体光纤及其在光通信中应用等方面的研究。E-mail: bojunyang99@sina.com

空芯光子带隙光纤损耗大的主要原因^[9],为此了解表面模的行为以及如何抑制表面模的出现对减小空芯光子带隙光纤损耗具有重要的理论意义和实际的应用价值。

本文首先利用平面波展开法(PWM)^[10,11]给出了最新使用的圆六边形空气孔接三角形排列的光子晶体的带隙结构图,基于带隙结构图设计了要研究的光纤,由于表面模是空芯光子带隙光纤损耗大的主要原因,为此简要介绍了消除表面模的方法,接下来利用全矢量有限元法(FEM)^[12,13]模拟了不同纤芯外半径和不同石英环相对厚度的光纤,给出了光强分布,等高线分布和损耗曲线图,通过分析得出了消除表面模的光纤纤芯外半径和石英环相对厚度的可取范围。

2 光子带隙结构图

对于空气孔按三角形排列的空芯光子带隙光纤而言,模式是否能被传导由轴向波矢量值 β 和传播常量 kn 的关系来决定, k 为真空中的波数, n 为介质的折射率。由光波导理论可知,对于给定波长, β 的最大值可取为 kn ,如果 $\beta < kn$,光在折射率为 n 的介质中自由传播,否则光在介质中是消逝的。对于传统光纤而言,导模在掺杂的纤芯中自由传播,而在包层中是

消逝的。类似的,对空芯光子带隙光纤,导模在空芯中自由传播而在包层中是消逝的。为了更接近实际的光纤,包层结构采用圆的六边形孔^[3],如图1(a)所示, d 为包层孔的直径, Λ 为相邻两空气孔的间距, d_c 为圆六边形角处的曲率直径, R 为纤芯的外半径,利用平面波展开法(PWM)^[10,11]计算了结构参量为 $d/\Lambda=0.97$, $d_c/\Lambda=0.55$,占空比为91.27%的三角形排列光子晶体的带隙结构。图1(b)给出了 β 与 k 的色散关系,图中横坐标为无量纲的量 $\beta\Lambda$,纵坐标为无量纲的量 $k\Lambda$,点线为空气线,此时 $\beta=k$,两个交叉的实线形成了所谓的“指”形区域,这就是完全二维光子带隙。注意到这些“指”形区域的一部分延伸到了空气线的左边,这表明如果对应的 β 与 k 落在这个区域中,光在真空中可以自由传播,落在这个区域外,光在真空中是截止的。由图1(b)还能找到在空气线左边的“指”形区域中, $k\Lambda$ 的范围为10.8~19.72。若 $k\Lambda$ 取为15.81时,图中的 β 对应的值为15.43~15.81,若光波长取为1.55 μm ,则 Λ 应取为3.9 μm 。因此设计的光纤参量为: $d/\Lambda=0.97$, $d_c/\Lambda=0.55$, $\Lambda=3.9 \mu\text{m}$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$,外半径 R 和石英环的厚度需要由下面的分析给出。在下面的模拟中,采用上面的这些参量。

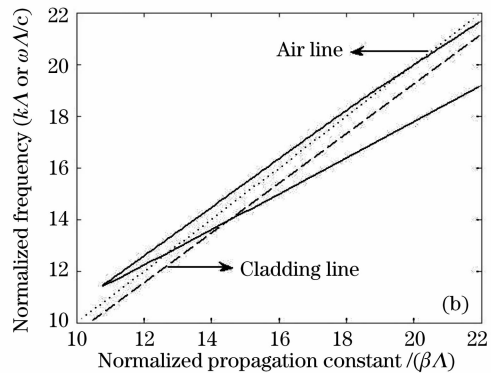
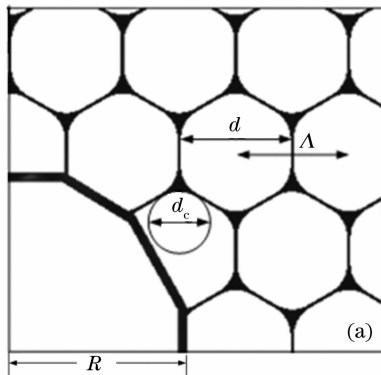


图1 (a)结构参量为 $d/\Lambda=0.97$, $d_c/\Lambda=0.55$ 的空芯光子晶体光纤1/4截面图,(b)占空比为91.27%三角形格子的光子带隙

Fig. 1 (a) A quarter of cross section of a hollow-core photonic bandgap fiber (PBF) with $d/\Lambda=0.97$, $d_c/\Lambda=0.55$,

(b) photonic bandgap for a triangular lattice with air-filling fraction 91.27%

3 理论和模拟结果

3.1 消除表面模的方法和全矢量有限元算法

对于表面模形成原因的分析在文献^[9]中给予了说明,这里主要介绍消除表面模的方法。要想消除表面模就需要尽量减小对块体模的干扰,拉制光纤时在两个邻近孔的交叠处截断空气孔或者在芯与包层的交界处增加一个一定厚度的石英环就会避免

表面模的引入,最初包层空气孔为圆形时通常采用前一种,后来为了增大占空比包层空气孔为圆六边形时通常采用后一种,定义石英环的相对厚度为

$$T = t/(\Lambda - d), \quad (1)$$

t 为石英环的实际厚度。在下面的模拟中分析了空气芯大小和石英环的厚度等对于表面模的影响,并给出光纤损耗曲线图。模拟的光纤是圆六边形空气

孔按三角形排列的空芯光子带隙光纤。纤芯由在光纤的中心引入一个较大的空气孔,即移去 7 根玻璃毛细管形成纤芯的光纤,纤芯与包层的界面引入一个 12 边形的石英环,通过改变纤芯的截切半径和纤芯和包层交界处石英环的厚度,系统地研究了随着半径的变化沿纵向传播方向(即 z 轴方向)光强的变化和泄漏损耗随石英环厚度的变化,找到最佳的截切半径和石英环厚度。

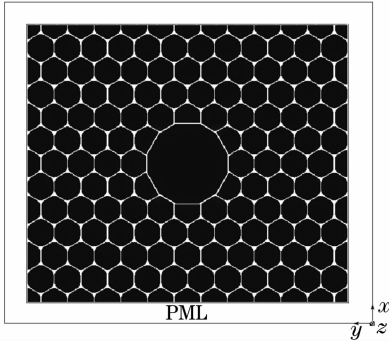


图 2 完全匹配层包围的空芯光子带隙光纤横截面

Fig. 2 Cross section of a hollow-core PBF surrounded by perfectly matched layers (PML)

考虑在 xy 平面有限的空芯光子带隙光纤,假定沿着传播方向即 z 轴方向结构是均匀的,图 2 给出了其横截面结构示意图^[3],计算采用完全匹配层(PML)作为边界条件,从麦克斯韦方程组出发,得到如下的矢量波方程:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{n^2} \nabla \times \mathbf{H} \right) - k_0^2 \mathbf{H} = 0, \quad (2)$$

其中 \mathbf{H} 为磁场矢量, k_0 为真空中的波数,由于光纤是均匀的,可将磁场写为

$$\mathbf{H}(x, y, z) = \mathbf{H}(x, y) \exp(-\gamma z), \quad (3)$$

其中 $\gamma = \alpha + j\beta$, γ 为复传播常量, α 为衰减常量,利用变分有限元过程,得到本征值方程

$$[\mathbf{K}] \{\mathbf{H}\} = \gamma^2 [\mathbf{M}] \{\mathbf{H}\}, \quad (4)$$

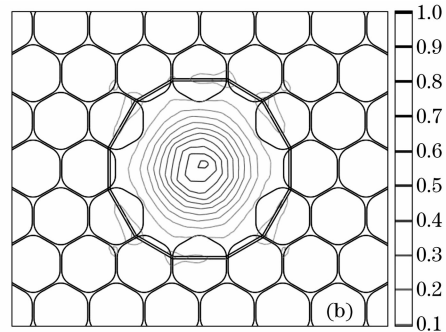
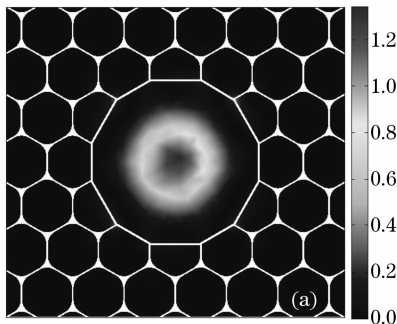


图 3 纤芯外半径 $R=1.7\Delta$ 的空芯光子带隙光纤光强分布(a)和光强等高线图(b)

Fig. 3 Intensity distribution (a) and intensity contour (b) of a hollow-core PBF with outer radius of the core $R=1.7\Delta$

其中 $\{\mathbf{H}\}$ 是离散化的磁场矢量, $[\mathbf{K}]$ 和 $[\mathbf{M}]$ 为在文献[12]中给出的有限元矩阵矢量。通过求解上述方程,还可以求得不同缺陷形状参量下,对应光子晶体光纤的泄漏损耗曲线。

3.2 模拟结果

首先,利用全矢量有限元方法(FEM)^[12,13]求解本征值方程(3),在给定石英环厚度的情况下,通过改变纤芯的半径,系统地研究了纤芯半径的变化对纤芯中模式的影响,以及表面截切对表面模行为的影响,选取了几个最具代表性的图来说明模式的演化过程。

计算中取石英环相对厚度为 $T=1.4$,从图 3~图 8 可以看到, $R=1.7\Delta$ 时(图 3),光场强度分布主要集中在纤芯中,只有很少能量分布在纤芯外,损耗比较小,光场强度等高线分布为六边形,没有表面模出现; $R=1.6\Delta$ 时(图 4),光场能量几乎全部集中在纤芯中,损耗达到了最小,光场强度等高线分布接近圆形,没有表面模出现; $R=1.55\Delta$ 时(图 5),光场强度分布主要集中在纤芯中,损耗比较小,但能量分布发生了扭曲,光场强度等高线分布变为椭圆,没有表面模出现; $R=1.5\Delta$ 时(图 6),光场强度分布有一定的扭曲,从等高线看到泄漏到包层中的光较多,在石英环和紧贴石英环包层的角处有表面模出现,芯模的能量有一部分转移到了表面模,损耗增大; $R=1.45\Delta$ 时(图 7),光场强度分布发生了明显的扭曲,等高线分布也显示光场的泄漏较 $R=1.5\Delta$ 进一步增加,在石英环和紧贴石英环包层的角处表面模包含的能量进一步增强,损耗也进一步增加; $R=1.4\Delta$ 时(图 8),中心光场强度分布大大减弱,能量几乎都转移到了石英环上的表面模中,大部分能量集中在玻璃中,所以能量损失严重,损耗比 $R=1.45\Delta$ 的更大。从上面的图 6 和图 7 中可以看出,石英环半径

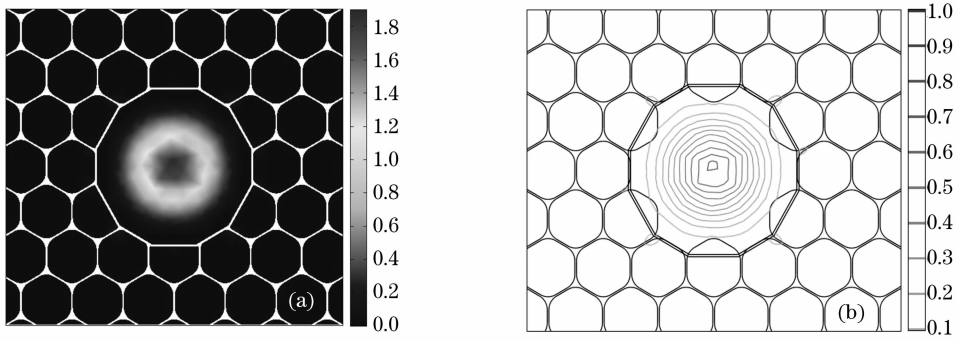


图 4 纤芯外半径 $R=1.6\Delta$ 的空芯光子带隙光纤光强分布(a)和光强等高线图(b)

Fig. 4 Intensity distribution (a) and intensity contour (b) of a hollow core PBF with outer radius of the core $R=1.6\Delta$

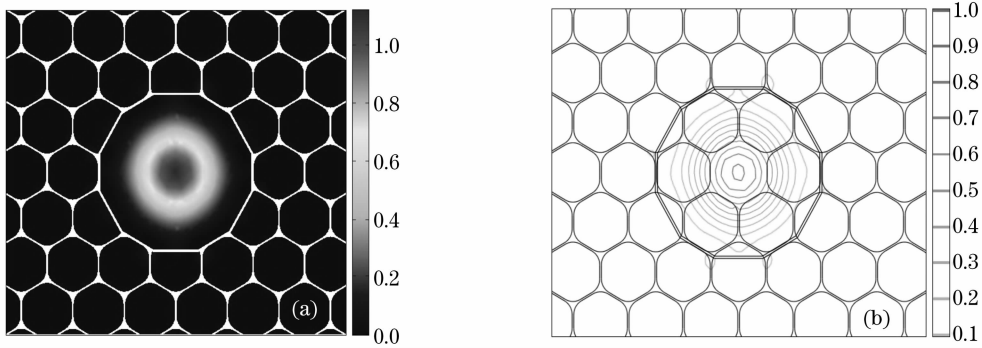


图 5 纤芯外半径 $R=1.55\Delta$ 的空芯光子带隙光纤光强分布(a)和光强等高线图(b)

Fig. 5 Intensity distribution (a) and intensity contour (b) of a hollow core PBF with outer radius of the core $R=1.55\Delta$

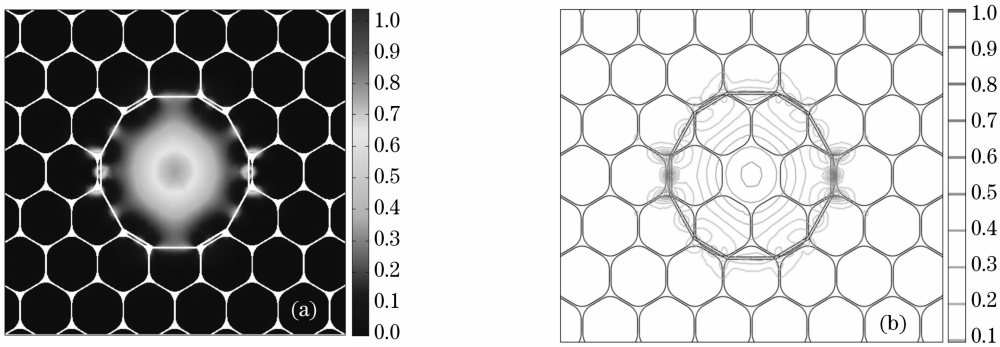


图 6 纤芯外半径 $R=1.5\Delta$ 的空芯光子带隙光纤光强分布(a)和光强等高线图(b)

Fig. 6 Intensity distribution (a) and intensity contour (b) of a hollow core PBF with outer radius of the core $R=1.5\Delta$

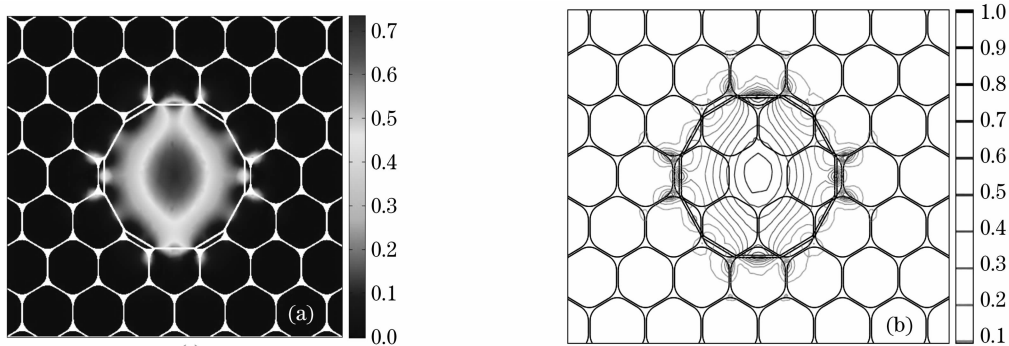


图 7 纤芯外半径 $R=1.45\Delta$ 的空芯光子带隙光纤光强分布(a)和光强等高线图(b)

Fig. 7 Intensity distribution (a) and intensity contour (b) of a hollow core PBF with outer radius of the core $R=1.45\Delta$

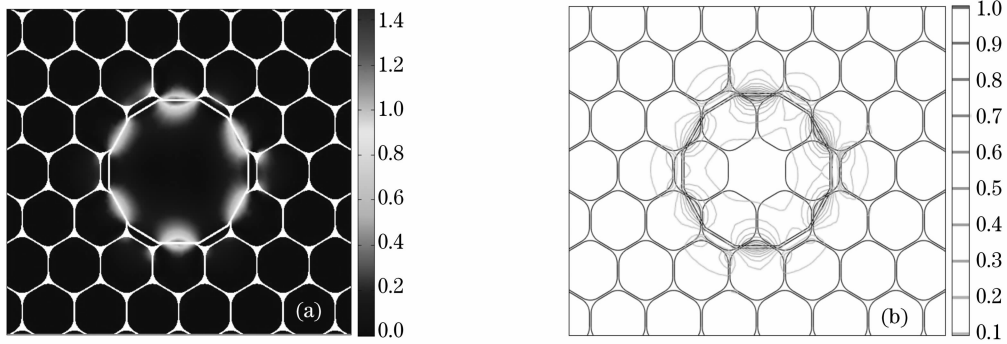


图 8 纤芯外半径 $R=1.4\Lambda$ 的空芯光子带隙光纤光强分布(a)和光强等高线图(b)

Fig. 8 Intensity distribution (a) and intensity contour (b) of a hollow core PBF with outer radius of the core $R=1.4\Lambda$

的选取截切了包层中的三孔交叠处从而较强地干扰了块体模,使得表面模和芯模发生耦合,光场移向边界,这从等高线分布更能清晰地看到。从图 3、图 4 和图 5 可以看到,石英环半径的选取虽然截切了包层中的三孔交叠处但没有表面模的产生,而图 8 中,石英环半径的选取没有截切包层中的三孔交叠处,却激发了表面模,所以石英环的引入既可以抑制表面模也可以激发表面模,这就要求对截切半径进行选择。对于 7 芯的空芯光子晶体光纤,对 $T=1.4$ 而言,取 $R=1.55\Lambda\sim 1.7\Lambda$, $R=1.6\Lambda$ 达到最佳。

当然一定的截切半径下石英环的厚度对表面模也有影响,表面模的出现会增加光纤的泄漏损耗,在图 9 中给出了光纤的泄漏损耗随石英环厚度的变化曲线图,计算中取 $R=1.58\Lambda$ 。从图 9 可以看出,光纤的泄漏损耗存在四段低损耗曲线,其中有两段是我们最感兴趣的,一段是石英环相对厚度在 1.3~1.5 之间 ($T=1.4$ 属于这个范围),平均损耗为 0.737 dB/km,最低损耗为 0.716 dB/km;另一段是石英环相对厚度在 3.4~3.8 之间,平均损耗为 0.445 dB/km,最低损耗可达到 0.217 dB/km。高损耗曲线对应表面模的高激发,所以石英环的厚度对表面模的影响也非常大,关键是要正确选择石英

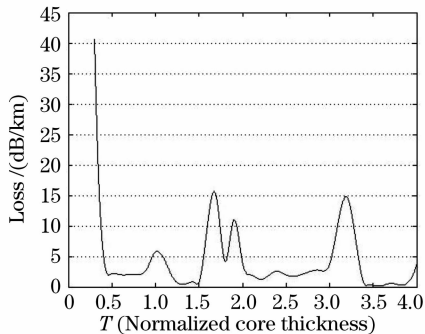


图 9 泄漏损耗随归一化纤芯厚度的变化曲线

Fig. 9 Leakage loss versus normalized core thickness

环的厚度。

4 结 论

研究了以圆六边形为空气孔,以三角形结构为包层的空芯光子带隙光纤中表面模的行为和相应的泄漏损耗。研究发现引入石英环的外半径和厚度对表面模都有影响,利用石英环既可以抑制表面模也可以激发表面模,所以石英环的外半径和厚度的选择尤为重要。通过模拟发现,对于结构参量为 $d/\Lambda=0.97$, $d_c/\Lambda=0.55$, $\Lambda=3.9\ \mu\text{m}$, 包层占空比为 91.27%, 抽掉 7 根玻璃毛细管形成纤芯, 传输波长 $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$, 石英环相对厚度 $T=1.4$ 的光子带隙光纤而言,其纤芯外半径的取值范围为 $R=1.55\sim 1.7\Lambda$, 若外半径 $R=1.58\Lambda$ 时,石英环的相对厚度应取为 $T=1.3\sim 1.5$ 或 $T=3.4\sim 3.8$ 之间,这样可以消除表面模,降低光纤的泄漏损耗。这一结论可以为光纤的拉制提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月,胡明列,柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- 2 Wang Zhi, Li Xinbei, Wang Jingjing. Properties of uniform fiber Bragg grating in high birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1325~1328
王智,李欣蓓,王晶晶. 高双折射光子晶体光纤中均匀布拉格光栅的特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1325~1328
- 3 C. M. Smith, N. Venkataraman, M. T. Gallagher *et al.*. Low-loss hollow-core silica/air photonic band gap fibre[J]. *Nature*, 2003, **424**: 657~659
- 4 F. Benabid, J. C. Knight, G. Antonopoulos *et al.*. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, **298**: 399~402
- 5 D. G. Ouzounov, F. R. Ahmad, D. Müller *et al.*. Generation of megawatt optical solitons in hollow-core photonic band-gap fibers[J]. *Science*, 2003, **301**: 1702~1704
- 6 D. G. Ouzounov, C. J. Hensley, A. L. Gaeta *et al.*. Soliton

- pulse compression in photonic band-gap fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(16): 6153~6159
- 7 F. Benabid, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Particle levitation and guidance in hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(21): 1195~1203
- 8 P. St. J. Russell. Photonic-crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4729~4749
- 9 Zhang Hu, Wang Qiuguo, Yang Bojun. Research progress 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
- 10 Liu Jie, Yang Changxi, Claire Gu *et al.*. A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1569~1574
刘 洁,杨昌喜,Claire Gu 等. 一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1569~1574
- 11 Cheng Tonglei, Li Shuguang, Zhou Guiyao *et al.*. Relation between power fraction in the core of hollow-core photonic crystal fibers and their bandgap property [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 249~254
程同蕾,李曙光,周桂耀 等. 空芯光子晶体光纤纤芯中的功率分数及其带隙特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 249~254
- 12 S. S. A. Obayya, B. M. A. Rahman, H. A. El-Mikati. New full-vectorial numerically efficient propagation algorithm based on the finite element method [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(3): 409~415
- 13 Wei Yan, Chang Deyuan, Zheng Kai *et al.*. Numerical simulation of temperature properties of photonic crystal fibers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 945~951
卫 延,常德远,郑 凯 等. 光子晶体光纤的温度特性数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 945~951