

空芯光子晶体光纤表面模损耗控制的研究*

程胜飞¹⁾ 彭景刚¹⁾ 李进延¹⁾ 程兰¹⁾ 蒋作文¹⁾ 李海清¹⁾戴能利^{1)†} 姜发刚²⁾ 杨晓波²⁾

1) (华中科技大学, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

2) (华中科技大学同济医学院附属协和医院, 武汉 430074)

(2012年3月16日收到; 2012年6月5日收到修改稿)

本文研究了纤芯结构对空芯光子晶体光纤光子带隙和传输损耗的影响, 得到了适合光纤制备工艺的纤芯结构. 首先利用平面波展开法计算了一定占空比三角形结构的空芯光子晶体光纤的带隙结构, 给出了在传输波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时光纤的结构参数值, 并模拟了纤芯直径对带隙位置和大小影响, 得出纤芯直径的取值范围, 通过分析泄露损耗特性得出纤芯壁厚的取值. 然后根据分析结果设计出了光纤端面图, 运用全矢量有限元法模拟出在不同纤芯直径情况下的模场分布, 通过对比分析得出光纤的最佳纤芯半径 R 为 $1.6A-1.75A$. 研究表明, 选择合适的纤芯结构既能满足空芯光子晶体光纤的光子带隙和损耗特征, 又可以适当降低光纤制备工艺的难度.

关键词: 纤芯结构, 空芯光子晶体光纤, 光子带隙, 传输损耗

PACS: 42.70.Qs, 42.79.Gn, 42.81.Dp

1 引言

近年来, 空芯光子晶体光纤 (hollow-core photonic crystal fiber, HC-PCF)^[1,2] 以其独特的光学特性成为研究热点. HC-PCF 是通过包层光子晶体的布拉格衍射的多重干涉而将光限制在纤芯中传输的, 它能够将约 99% 导模场能限制在空气纤芯中, 这样就使得该种光纤具有低非线性性和低损耗特性^[3]. HC-PCF 以其独特的性能将被广泛应用, 例如, 可以用来研究拉曼散射^[4]、孤子传输^[5]、脉冲压缩^[6], 用来制作高效率的光耦合器、传输高峰值功率超短光脉冲、制作滤波器, 也可用于可见光波段传输^[7,8] 等. 目前报道的 HC-PCF 的最小损耗接近 1 dB/km ^[9], 虽然仍大于传统单模光纤, 但在很多应用中却是不可替代的. HC-PCF 最主要的特性是带隙和损耗, 对于带隙的位置和宽度, 可以分别通过改变孔间距和空气占有率来实现. 而损耗

来源主要有两个方面, 一个是泄露损耗^[10], 来源于包层的有限大小, 但这可以通过改变包层空气孔的结构和大小^[11], 增大空气占有率将该损耗降低至足够小的范围内; 另一个是表面模损耗^[12], 是目前空芯光子晶体光纤损耗大的最主要原因, 如何消除表面模损耗成为成功控制低损耗光纤的关键. 对于一定的占空比和孔间距而言, 纤芯结构决定着是否会引入表面模, 纤芯结构包括纤芯壁厚和纤芯半径. 目前, 国内外也有不少研究者针对纤芯结构对 HC-PCF 的性能做过一些研究, 但他们很少考虑到光纤制备工艺问题, 设计了一些理想的纤芯结构, 在很大空气占有率的同时, 所设计的纤芯壁厚达到约 100 nm ^[13-17] 但要实现这种纤芯结构无疑会有很大的工艺难度. 目前国外拉制出来的光纤纤芯壁厚最小在 $0.3 \mu\text{m}$ 左右^[18,19], 即使是这个纤芯尺寸, 在光纤拉制工艺上可重复性也较差. 因此, 研究纤芯结构对 HC-PCF 性能的影响, 并结合光纤的制备工艺可行性, 选择合适的纤芯结构既能满

* 国家自然科学基金 (批准号: 81100701) 资助的课题.

† E-mail: dainl@mail.hust.edu.cn

足 HC-PCF 的基本特性, 又能满足光纤制备工艺将更具有研究价值和科学意义.

本文首先利用平面波展开法^[20] 模拟给出了一定占空比三角形结构空芯光子晶体光纤的光子带隙结构, 基于带隙结构设计了需要的光纤结构参数, 并进一步研究了纤芯直径的变化对带隙大小和位置的影响, 然后分析了石英芯环壁厚对泄露损耗的影响. 再利用全矢量有限元法^[21] 模拟的数据和实际情况, 分析给出了抑制表面模的光纤纤芯的直径.

2 光纤特性

根据现有的实验情况, 空芯光子晶体光纤采用三角形排列结构, 其空气占有率较大, 更接近于实际的光纤结构. 对有效光子带隙而言, 传播常数 β 的变化对应光的传播方向和传输模式有效折射率的变化, 而且制作光纤的两种材料 (玻璃和空气) 的折射率差较小, 在平面内不能产生完全的带隙, 将受到光波传播方向和角度的影响, 所以空芯光子晶体光纤依据平面外带隙导光原理^[22]. 经过理论研究, 要在空芯光子晶体光纤中实现空芯缺陷导光, 必须具备两个条件, 光波频率必须在光子带隙范围内, 并且传播常数 $\beta < kn_1$, 其中 k 为波矢量, n_1 为折射率.

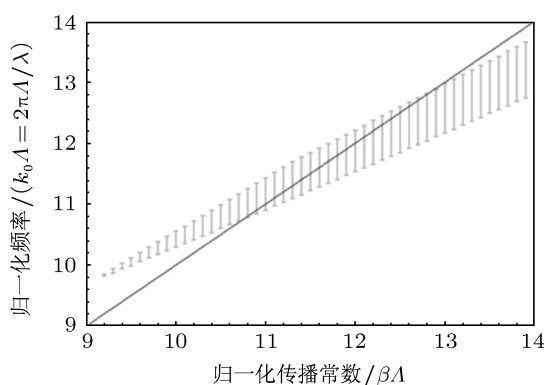


图1 空气占有率为 0.836 空芯光子晶体光纤的带隙图

利用平面波展开法模拟了占空比 $d/\Lambda = 0.96$, 其中 d 为孔直径, Λ 为孔间距, 纤芯直径 $d_{\text{core}} = 8.0 \mu\text{m}$, 空气占有率 $f = 0.836$ 的带隙结构. 图 1 给出了归一化频率 $k\Lambda$ 与归一化传播常数 $\beta\Lambda$ 之间的关系, 图中的黑线为空气线, 绿色区域为带隙宽

度. 由空芯导光条件可知, 有效的带隙在空气线的左边, 并落入带隙宽度内, 所以有效的 $k\Lambda$ 的范围为 9.82—12.85, 转换成波长范围为 1.46—1.91 μm . 若取 $k\Lambda = 12.15$, 光波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 则孔间距 $\Lambda = 3 \mu\text{m}$.

2.1 纤芯直径对光子带隙的影响

在给定归一化传播常数 $\beta\Lambda = 10$ 的情况下, 分析纤芯直径对带隙大小和位置的变化. 如图 2 所示, 从图中可以看出, 纤芯直径在 7—8.1 μm 范围内, 带隙是没有变化的, 不影响光纤导光的性能, 而从 8.2 μm 到 8.8 μm 之间, 出现了两个带隙, 新产生的带隙波长向长波方向移动, 而且带隙宽度逐渐减小, 这是由于在这段区域内, 纤芯孔直径变大截切到包层的第二层空气孔, 改变了之前的散射结构, 破坏了纤芯外围的周期性结构, 布拉格散射变弱, 带隙变窄. 随着纤芯直径的继续增大, 纤芯将占据第二层空气孔的一部分, 进一步破坏原来的周期性结构, 使得原来满足布拉格条件的波长将慢慢变得不能让光产生干涉回到纤芯中, 此处的布拉格散射逐渐减弱直至消失. 而纤芯向四周的变化是均匀的, 也具有对称性, 将会形成一个新的周期性结构, 达到新的平衡, 这样将会在其他能带产生满足布拉格条件的带隙范围, 新产生的带隙位置较之前的向长波方向有一定的移动, 不过随着纤芯直径的继续增大, 带隙的宽度变大, 位置也向长波方向移动, 直至稳定. 我们希望光纤的带隙越宽越好, 而纤芯直径的增大也会增加在纤芯中传输的模式数量, 难以实现单模传输, 所以初定纤芯直径 d_{core} 的范围应该在 9.5—11 μm 之间, 以上的参数值, 将在下面的模拟中用到.

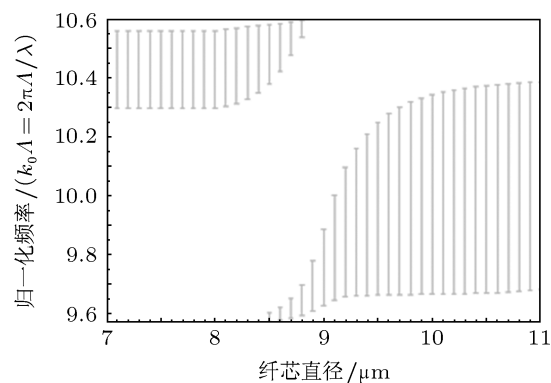


图2 空芯光子晶体光纤的归一化频率随纤芯直径的变化

2.2 纤芯壁厚对泄露损耗的影响

在前面说明了要拉制出低损耗光纤,则必须要消除表面模,在纤芯与包层的交界处增加一个一定厚度的石英芯环,这样就会避免表面模的引入,石英芯环的归一化厚度为

$$T = \frac{t}{\Lambda - d}, \quad (1)$$

式中, t 为石英芯环的实际厚度, Λ 为孔间距, d 为孔直径. 在纤芯直径大小一定的情况下, 芯环壁厚的变化影响着是否会引入表面模, 也即对损耗有较大的影响, 表面模的出现会增大光纤的泄露损耗. 图 3 中给出了在纤芯直径 $d_{\text{core}} = 1.6 \Lambda$ 时, 光纤的泄露损耗随石英芯环归一化厚度的变化曲线图. 图中有几段低损耗区, 为了尽量减小光纤损耗, 我们采用的低损耗区的芯环归一化厚度为 4—4.4 之间, 理论最低损耗在 $T = 4.1$ 处可达 0.45 dB/km, 芯环的实际壁厚 t 为 0.48—0.528 μm , 这一厚度对于光纤拉制工艺相对比较是可以实现的, 再低于这个值光纤拉制对纤芯壁厚的控制将十分困难. 我们取芯环归一化厚度 $T = 4.1$, 即实际壁厚 $t = 0.492 \mu\text{m}$, 这将在下面的模拟计算中用到.

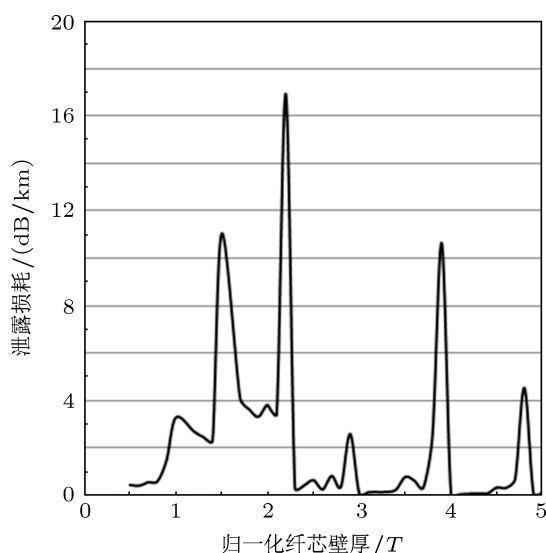


图 3 泄露损耗随归一化纤芯壁厚的变化曲线

3 光纤端面模场分布

我们设计的光纤结构参数与上文给出的一致, 纤芯移去 7 根毛细管, 形成一个大的空气孔, 在纤芯和空气孔包层的界面是一定厚度的石英芯环,

在计算中采用完全匹配层 (perfectly matched layer, PML) 作为边界条件. 如图 4 所示, 给出光纤端面的截切图, 在给定纤芯壁厚的条件下, 利用全矢量有限元法分别模拟了不同纤芯半径对纤芯模场和表面模的影响, 最后可以得出适合的纤芯直径取值, 以及最佳值, 下面分别列出了几个不同纤芯半径的模场分布图.

在光子晶体中, 当无限的光子晶体被截断时就会产生表面模, 这是由于截断引入了新的边界条件, 导致了满足这些边界条件的表面模产生. 在 HC-PCF 中, 表面模的出现很大程度上依赖于截断的位置, 在三个相邻孔的交叠处有块体模, 两个孔的交界处称为石英膜. 当引入空气纤芯时, 空气芯表面截断了包层的空气孔, 如果在块体模处截断, 就会强烈的干扰块体模, 便会引入表面模; 若在石英膜处截断空气孔就会避免表面模损耗. 所以在设计和拉制 HC-PCF 时, 就要尽量避免或减小表面模损耗.

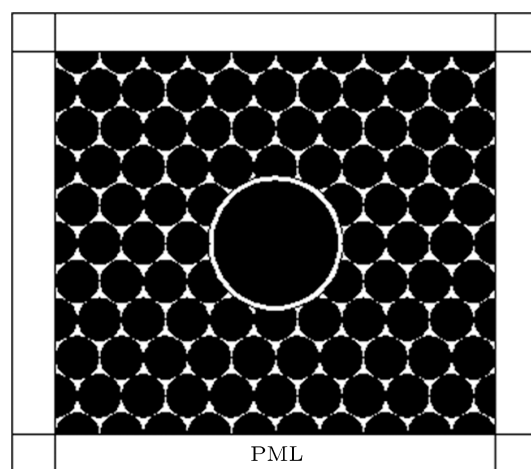


图 4 空芯光子晶体光纤的端面截切图

空气纤芯在截切包层空气孔时, 就需要考虑到纤芯直径和石英芯环厚度对表面模的影响了. 在石英环厚度越薄的情况下, 空气芯将越不容易截切到块体模, 这样将会最大可能的避免引入表面模, 即使截切到块体模, 对块体模的干扰也会越小, 但对工艺的要求会很高. 在石英环较厚的情况下, 截切到块体模的可能性更大, 所以就要对纤芯直径进行选择, 在满足 7 芯 HC-PCF 纤芯直径大小范围内, 选择纤芯直径在适当范围内, 使空气芯截切到石英膜处, 是可以避免引起表面模泄露而产生

损耗的.

如图 5(a) 所示, 当纤芯半径 $R = 1.55 \Lambda$ 时, 虽然光场强度主要集中在纤芯, 但在纤芯周围产生了大量的表面模, 从光场强度等高线分布图可以看出, 在纤芯中传输的模式已与表面模发生强烈的耦合, 有相当一部分的能量转移给表面模而消耗掉, 损耗较大, 结构不满足设计要求; 从图 5(b) 可以看出, 当纤芯半径 $R = 1.6 \Lambda$ 时, 光场强度等

高线分布接近于圆形, 没有激发产生表面模, 光场能量基本上全部集中到纤芯里, 损耗最小; 在图 5(c) 中, 当纤芯半径 $R = 1.75 \Lambda$ 时, 光场能量主要集中在纤芯中, 只有很少一部分能量泄露, 损耗较小, 也没有产生表面模. 由此趋势可以看出, 当继续增加纤芯直径时, 将会有更多的能量泄露出去, 损耗进一步增大, 也将可能会引入表面模.

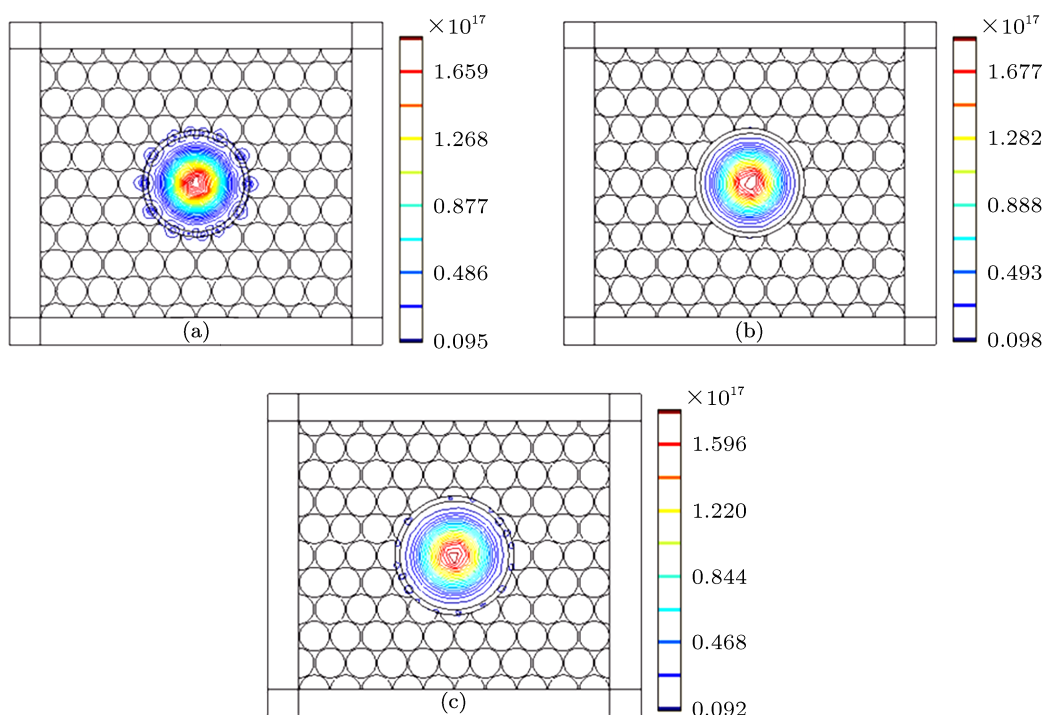


图 5 空芯光子晶体光纤不同纤芯直径下的光强等高线图 (a) 纤芯半径 $R = 1.55 \Lambda$, 即 $d_{\text{core}} = 9.3 \mu\text{m}$; (b) 纤芯半径 $R = 1.6 \Lambda$, 即 $d_{\text{core}} = 9.6 \mu\text{m}$; (c) 纤芯半径 $R = 1.75 \Lambda$, 即 $d_{\text{core}} = 10.5 \mu\text{m}$

从图 5 可以得出, 选择纤芯直径在适当的范围内, 可以大大降低纤芯壁厚不适合引起的表面模泄露, 使光纤可以获得低损耗的性能. 对于 7 芯的空芯光子晶体光纤, 当归一化芯环厚度 $T = 4.1$ 时, 纤芯半径 R 为 1.6Λ — 1.75Λ 范围内, 即纤芯直径 $d_{\text{core}} = 9.6$ — $10.5 \mu\text{m}$, 取纤芯半径 $R = 1.6 \Lambda$, 即最佳纤芯直径 $d_{\text{core}} = 9.6 \mu\text{m}$.

4 结论

本文从三角型空芯光子晶体光纤的两个重要特性带隙和损耗入手, 分析了石英芯环的厚度和

纤芯直径的变化对光纤性能的影响, 以及如何消除表面模的影响, 较为完整的设计给出了符合要求的光纤结构参数值. 对于目前国内的拉制工艺水平, 在光纤结构参数为占空比 $d/\Lambda = 0.96$, 空气占有率 $f = 0.836$, 孔间距 $\Lambda = 3 \mu\text{m}$, 传输波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的情况下, 为尽量减小泄露损耗, 通过模拟计算得出石英芯环归一化厚度为 4—4.4 之间, 取 $T = 4.1$, 即壁厚 $t = 0.492 \mu\text{m}$, 通过改变纤芯直径分别模拟出模场分布图得出最佳的纤芯半径, $R = 1.6 \Lambda$ — 1.75Λ , 在此范围内可以消除表面模. 本文的研究结果将对实际的空芯光子晶体光纤科学制备提供理论依据.

- [1] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C 1999 *Science* **285** 1537
- [2] Knight J C, Russell P S J 2002 *Science* **296** 276
- [3] Smith C M, Venkataraman N, Gallagher M T 2003 *Nature* **424** 657
- [4] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G 2002 *Science* **298** 399
- [5] Ouzounov D G, Ahmad F R, Muller D 2003 *Science* **301** 1702
- [6] Ouzounov D G, Hensley C J, Gaeta A L 2005 *Opt. Express* **13** 6153
- [7] Yuan J H, Hou L T, Zhou G Y, Wei D B, Wang H Y, Dong S R, Wang Q Y, Liu B W, Hu M L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4230 (in Chinese) [苑金辉, 侯蓝田, 周桂耀, 魏东宾, 王海云, 董世蕊, 王清月, 刘博文, 胡明列 2008 物理学报 **57** 4230]
- [8] Mi Y, Hou L T, Zhou G Y, Wang K, Chen C, Gao F, Liu B W, Hu M L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3583 (in Chinese) [米艳, 侯蓝田, 周桂耀, 王康, 陈超, 高飞, 刘博文, 胡明列 2008 物理学报 **57** 3583]
- [9] Philip St J, Russell 2006 *J. Lightwave Technol* **24** 4729
- [10] Saitoh K, Koshihara M 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 236
- [11] Benabid F, Russell P S J 2005 *Proc. SPIE* **5733** 176
- [12] West J A, Smith C M, Borrelli N F 2004 *Opt. Express* **12** 1485
- [13] Amezcua-Correa R, Broderick N G R, Petrovich M N, Poletti F, Richardson D J 2007 *Opt. Express* **15** 17577
- [14] Saitoh K, Florous N, Murao T, Koshihara M 2007 *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Anaheim, CA, March 25–29, 2007 OML2
- [15] Saitoh K, Varallyay Z, Kakihara K, Koshihara M, Szpocs R 2009 *The Conference on Lasers and Electro-Optics*, Baltimore, MD, June 2–4, 2009 JWA52
- [16] Murao T, Saitoh K, Koshihara M 2008 *IEEE J. Lightwave Technol.* **26** 1602
- [17] Kim H K, Shin J, Fan S, Dignonnet M J F, Kino G S 2004 *IEEE J. Quantum Electronics* **40** 551
- [18] Roberts P J, Couny F, Birks T A, Knight J C, Russell P S J, Mangan B J, Sabert H, Williams D P, Farr L 2005 *The Conference on Lasers and Electro-Optics*, Baltimore, Maryland, May 22–27, 2005 CWA7
- [19] Gerome F, Humbert G, Auguste J L, Jamier R, Blondy J M, Wadsworth W, Knight J 2010 *12th International Conference on Transparent Optical Networks*, Munich, June 27–July 1, 2010 Tu.D4.2
- [20] Maradudin A A, Mcgurn A R 1994 *J. Mod. Opt.* **41** 275
- [21] Obayya S S A, Rahman B M A, El-Mikati H A 2000 *IEEE J. Lightwave Technol.* **18** 409
- [22] Maradudin A A, Mcgurn A R 1994 *J. Mod. Opt.* **41** 275

The surface modes loss control of hollow-core photonic crystal fibers*

Cheng Sheng-Fei¹⁾ Peng Jing-Gang¹⁾ Li Jin-Yan¹⁾ Cheng Lan¹⁾
Jiang Zuo-Wen¹⁾ Li Hai-Qing¹⁾ Dai Neng-Li^{1)†}
Jiang Fa-Gang²⁾ Yang Xiao-Bo²⁾

1) (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (Tongji medical school affiliate union medical college hospital, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 16 March 2012; revised manuscript received 5 June 2012)

Abstract

In this paper, the influences of fiber core structure on photonic band gap and transmission loss for hollow-core photonic crystal fiber are investigated, and the proper fiber core structure of fiber preparation technology is obtained. First, the band gap structure of triangular lattice of hollow core photonic crystal fiber with a fixed duty ratio is calculated by using plane wave expansion method. When the transmission wavelength $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, the structural parameters of the optical fiber are figured out. The value range of the core diameter is given by simulating the influences of core diameter on the band gap location and size, and the value of core wall thickness is obtained through analyzing the leak loss characteristics. Then the fiber end view drawing is designed according to the analytical results. The mode field distributions are simulated by the full-vectorial finite element method under different core diameters. Through the contrast analysis the best fiber core radius with $R = 1.6 \Lambda$ — 1.75Λ is obtained. The results indicate that choosing appropriate core structure not only can meet the photonic band gap and loss characteristics of hollow-core photonic crystal fiber, but also can properly reduce the difficulty in the preparation technology of fiber.

Keywords: core structure, hollow-core photonic crystal fiber, photonic band gap, transmission loss

PACS: 42.70.Qs, 42.79.Gn, 42.81.Dp

* Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 81100701).

† E-mail: dainl@mail.hust.edu.cn