

文章编号: 1001-3806(2013)02-0243-04

## 空芯光子晶体光纤损耗的研究

何丁丁, 刘敏\*, 简多, 李丹, 廖洲一  
(重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了研究反共振纤芯壁对空芯光子晶体光纤限制损耗和散射损耗的影响, 利用全矢量有限元法对所设计的具有不同纤芯壁和纤芯半径的空芯光子晶体光纤进行仿真, 得到了3种纤芯壁在不同纤芯半径时的有效折射率、限制损耗和芯内功率分数随波长变化的曲线。由数值模拟结果可知, 纤芯壁采用  $T=3$  的环形反共振层和椭圆反共振层设计时, 限制损耗降低了约两个数量级, 芯内功率分数在通信波段提高了13%。结果表明, 这两种设计可以有效降低空芯光子晶体光纤的限制损耗和散射损耗。

**关键词:** 光纤光学; 空芯光子晶体光纤; 反共振层; 限制损耗; 芯内功率分数

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.026

### Study on loss in hollow-core photonic bandgap fibers

HE Ding-ding, LIU Min, JIAN Duo, LI Dan, LIAO Zhou-yi

(College of Communications Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to study the effect of the antiresonant core-surround ring interface on the confinement loss and scatter loss, the given hollow-core photonic crystal fibers (HC-PCFs) with different antiresonant core-surround rings and core radius were simulated by means of full-vector finite element method, and the curves among the effective index, confinement loss and power-percentage in core with change of wavelength were obtained. The numerical simulation shows that, when the antiresonant core-surround ring is designed as  $T=3$  annular or elliptic geometry, the confinement loss reduces 2 order of magnitude and the power-percentage in core increases 13% in communication wave band which demonstrate both the designs in this paper can reduce the confinement loss and scatter loss in HC-PCFs effectively.

**Key words:** fiber optics; HC-PCFs; antiresonant core-surround; confinement loss; power-percentage in core

## 引言

空芯光子晶体光纤 (hollow-core photonic crystal fibers, HC-PCFs) 是基于光子带隙原理<sup>[1]</sup>, 由 KNIGHT<sup>[2-3]</sup> 等人通过实验提出的一种具有周期分布的空气孔的折射率传导型光纤。近年来, HC-PCFs 因为其独特的导光特性引起了人们的注意。与传统光纤相比, HC-PCFs 具有很多潜在的优势, 如低瑞利散射、低非线性和理论上的低传输损耗<sup>[4]</sup> 等。HC-PCFs 的损耗主要有两种: 限制损耗与散射损耗。限制损耗也称泄漏损耗, 指由于部分传导光在传输过程从包层泄漏出去而产生的光功率损耗。若在保证完全没有光从包层泄漏, 则理论上包层空气孔必须有无限层<sup>[5]</sup>。

HC-PCFs 的散射损耗是指 HC-PCFs 在堆拉时由于热力学原因不可避免地由表面毛细波引入了表面粗糙, 致使包层中的表面模与纤芯中的基模发生耦合。散射损耗难以消除, 但可以设计纤芯壁<sup>[6]</sup> 来代替粗糙表面, 达到降低散射损耗的目的。目前报道的 HC-PCFs 最低损耗大约为  $1\text{dB}/\text{km}$ <sup>[7]</sup>, 仍大于传统单模光纤。因而, 对于 HC-PCFs 损耗的研究是有必要的。

作者主要是探讨不同结构的纤芯壁对 HC-PCFs 损耗的影响。利用全矢量有限元法<sup>[8]</sup> 研究了具有3种不同纤芯壁结构的 HC-PCFs 的限制损耗随波长和包层空气孔层数的变化关系, 以及纤芯中光功率占总光功率的百分数 (简称芯内功率分数) 随波长的变化关系, 并给出了具体变化曲线, 揭示了降低 HC-PCFs 损耗的有效方法。

## 1 基本理论及模型

### 1.1 限制损耗

从波动光学角度来说, 泄漏损耗是由于传播常数出现了虚部, 光在纵向传播的同时还有横向的泄漏。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61007049 / F050304)

作者简介: 何丁丁 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤领域研究。

\* 通讯联系人。E-mail: liumin@cqu.edu.cn

收稿日期: 2012-07-18; 收到修改稿日期: 2012-07-25

考虑光波导的损耗,得到下面的本征方程<sup>[9]</sup>:

$$[K]\{h_i\} = n^2 k_0^2 [M]\{h_i\} \quad (1)$$

式中,  $[M]$ 和 $[K]$ 表示包含所有分量的有限元矩阵矢量,  $h_i$ 为磁场的横向分量  $H_i$ 沿  $z$ 方向变化的包络,  $\{h_i\}$ 为包含所有慢变横向磁场分量值的列矢量,  $\{0\}$ 表示值为0的列矢量,  $n$ 为折射率,  $k_0$ 为自由空间波数。利用完全匹配层作为边界条件求解上述方程,可以求得模场分布和模式的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ 。利用有效折射率的虚部就可以求得限制损耗  $L$ ,其表达式如下:

$$L = \frac{2 \times \pi \times 8.686 \times \text{Im}(n_{\text{eff}})}{\lambda} \quad (\text{dB/m}) \quad (2)$$

## 1.2 散射损耗

HC-PCFs的散射损耗主要是由于纤芯-包层界面不光滑产生了表面模<sup>[10]</sup>而导致光在包层中传导产生的。HC-PCFs在引入空气缺陷形成纤芯时,会引入新的边界条件,导致了满足这些边界条件的表面模产生。新产生的表面模极易和纤芯中的基模耦合,导致纤芯中的光被耦合到包层中,使得损耗增加。因为缺陷分界面的各异性,散射损耗无法具体计算,其散射程度只能通过其它参量来间接表示,如参考文献<sup>[11]</sup>中的  $F$ 和 $\eta$ 参量。本文中采用更加直观的芯内功率分数  $f$ 作为散射损耗的估量参量,其表达式如下:

$$f = \frac{\int_{\text{core}} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy}{\int_{\text{total}} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy} \quad (3)$$

式中  $E_x$ ,  $E_y$ 和 $H_x$ ,  $H_y$ 分别表示在横截面上模场的电场和磁场分量,  $E_x H_y - E_y H_x = S_z$ 为电磁场坡印亭矢量的  $z$ 分量。

有效减小散射损耗的方法是在纤芯与包层之间加一层反共振层<sup>[12]</sup>形成反共振反射波导。反共振层的截面形状目前主要有3种:连续分布的圆环和离散分布的圆形或椭圆形。由于圆形结构制备困难,所以实际生产中一般采用环形或椭圆形结构<sup>[13]</sup>。

环形反共振层(即纤芯壁)的厚度  $t$ 非常重要,很多学者<sup>[11-15]</sup>对此作了研究。研究表明,要抑制表面模降低损耗,纤芯壁的厚度  $t$ 须满足反共振条件:

$$t = \frac{(2j+1)\lambda_j}{4n_1\sqrt{(n_2/n_1)^2 - 1}} \quad (4)$$

式中  $n_1$ 为空气折射率,  $n_2$ 为纤芯壁材料即  $\text{SiO}_2$ 折射率,  $j$ 为反共振阶数,取0或正整数,  $\lambda_j$ 为  $j$ 阶波长。可见对于不同入射波长,满足干涉相消条件的  $t$ 值是不同的。

对于椭圆形反共振层,可以看作纤芯包层交界面局部的环形反共振层,所以小椭圆的长短轴取值与  $t$

类似。

## 1.3 仿真模型

本文中研究的 HC-PCFs 结构源于 Blaze Photonics 公司生产的 HC-1550-02 型带隙型光子晶体光纤,不同纤芯尺寸的横截面结构如图1所示。图1a为在光子晶体的中心移去7根玻璃毛细管而形成缺陷芯(简称7单元芯),图1b为在光子晶体的中心移去19根玻璃毛细管而形成缺陷芯(简称19单元芯)。作者在保持该光纤包层结构参量不变的同时,对纤芯壁进行了优化设计,以获得更好的损耗特性。

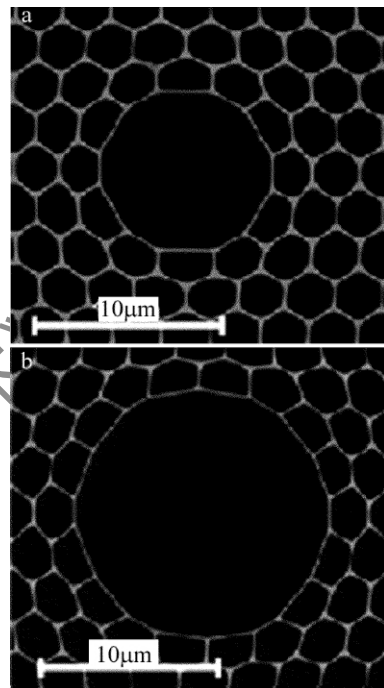


Fig. 1 Cross section of HC-1550-02 hollow-core photonic bandgap fibers  
a—7-cell b—19-cell

上述实物 HC-PCFs 的理论模拟结构如图2所示,  $\Lambda$ 为包层空气孔的孔间距,  $d$ 为包层空气孔的直径,  $d_c$ 为包层气孔的圆化直径,  $t$ 为纤芯壁厚度,  $R_1$ ,  $R_2$ 分别为7

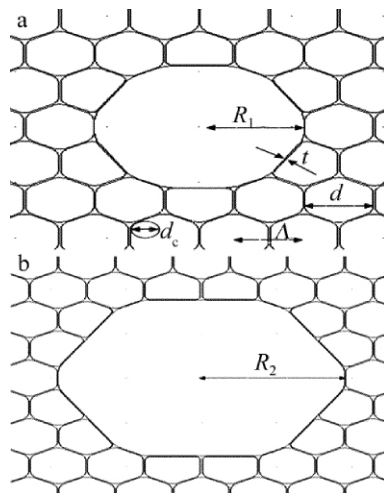


Fig. 2 Geometric parameters used to define the structure  
a—7-cell b—19-cell

单元芯和 19 单元芯的纤芯半径。结构参量为  $d/\Lambda = 0.97$ ,  $d_c/d = 0.2$ ,  $\Lambda = 3.8\mu\text{m}$ ,  $R_1 = 5.7\mu\text{m}$ ,  $R_2 = 9.5\mu\text{m}$ , 并定义纤芯壁相对厚度  $T = t/(\Lambda - d)$ , 包层空气孔层数均设为 3 层。背景材料选择  $\text{SiO}_2$ , 折射率为 1.45, 空气折射率取 1。采用全矢量有限元法, 以完全匹配层作为边界条件对 HC-PCFs 的损耗特性进行分析。

## 2 模拟结果及分析

图 3 是 3 种不同纤芯壁设计的 7 单元芯 HC-PCFs 几何结构图, 三者都采用反共振层设计。图 3a 和图 3b 中采用环形反共振层设计, 其相对厚度分别为  $T = 0.5$  和  $T = 3$ , 下面分别以  $7\text{HC-PCF}_1$  和  $7\text{HC-PCF}_2$  代称。图 3c 中采用椭圆形反共振层设计, 称为  $7\text{HC-PCF}_3$ , 即在环形反共振层的基础上添加数个小椭圆, 椭圆结构参量为: 长轴  $a = 0.6\mu\text{m}$ , 短轴  $b = 0.2\mu\text{m}$ 。同样, 19 单元芯 HC-PCFs 也有 3 种类似的纤芯壁设计, 分别以  $19\text{HC-PCF}_1$ ,  $19\text{HC-PCF}_2$  和  $19\text{HC-PCF}_3$  代称。

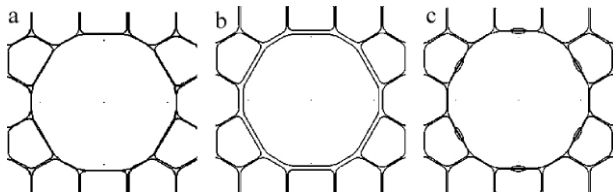


Fig. 3 Three kinds of rings at the core-cladding

a—annular antiresonant core-surround  $T = 0.5$  ( $7\text{HC-PCF}_1$ ) b—annular antiresonant core-surround  $T = 3$  ( $7\text{HC-PCF}_2$ ) c—elliptic antiresonant core-surround ( $7\text{HC-PCF}_3$ )

### 2.1 基模特性

具有上述参量和纤芯壁结构的  $7\text{HC-PCFs}$  和  $19\text{HC-PCFs}$  的基模有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随波长  $\lambda$  变化的曲线分别如图 4 所示。有效折射率曲线发生跳变是因为在特定波长处表面模与基模发生耦合, 导致该波长的

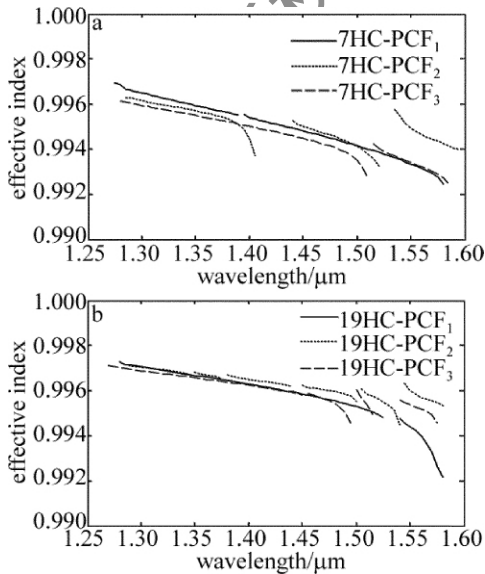


Fig. 4 Effective mode index for fundamental mode

a—7-cell b—19-cell

有效折射率不再是基模的有效折射率。从图 4a 中可以看出,  $7\text{HC-PCF}_1$  的基模有效折射率曲线只在  $1.39\mu\text{m}$  波长处产生跳变; 而  $7\text{HC-PCF}_2$  的基模有效折射率曲线有  $1.40\mu\text{m}$  和  $1.53\mu\text{m}$  两个跳变点; 对于  $7\text{HC-PCF}_3$ , 跳变点位置移动至  $1.51\mu\text{m}$  处。图 4b 为  $19\text{HC-PCFs}$  的基模有效折射率随波长的变化曲线。从图中可以得知,  $19\text{HC-PCF}_1$  曲线只有  $1.54\mu\text{m}$  一个跳变点;  $19\text{HC-PCF}_2$  曲线有 5 个跳变点, 主要是因为表面模的激发比较频繁; 对于  $19\text{HC-PCF}_3$ , 表面模引起的跳变点主要位于大于  $1.5\mu\text{m}$  的波长范围内。

### 2.2 限制损耗特性

3 种反共振纤芯壁设计的  $7\text{HC-PCFs}$  的限制损耗随波长的变化曲线如图 5a 所示。由图可知, 当采用  $7\text{HC-PCF}_2$  时, 在跳变波长  $1.40\mu\text{m}$  跟  $1.53\mu\text{m}$  波长处由于受激发态表面模的影响导致限制损耗较高以外, 其余波长处的损耗均低于常规的  $7\text{HC-PCF}_1$ , 在某些波长处甚至低一个数量级; 采用  $7\text{HC-PCF}_3$  时, 在小于  $1.47\mu\text{m}$  的波段限制损耗低于  $7\text{HC-PCF}_1$ , 而且比  $7\text{HC-PCF}_2$  变化趋势平缓, 这是因为其在该波段未受激发态表面模的影响。

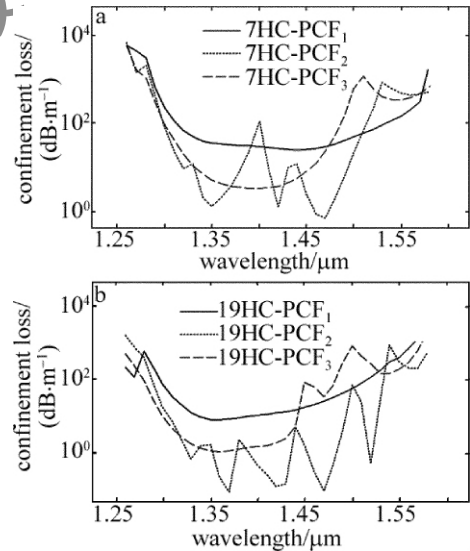


Fig. 5 Confinement loss

a—7-cell b—19-cell

$19\text{HC-PCFs}$  的限制损耗随波长的变化曲线如图 5b 所示。与图 5a 类似, 在小于  $1.45\mu\text{m}$  波段,  $19\text{HC-PCF}_3$  较  $19\text{HC-PCF}_1$  具有更低的限制损耗, 且未受表面模影响;  $19\text{HC-PCF}_2$  虽然受表面模影响较为严重, 曲线变化曲折, 但限制损耗仍低于  $19\text{HC-PCF}_1$ , 并且在部分波长处要低两个数量级。

### 2.3 芯内功率分数特性

利用 (3) 式可求得 HC-PCFs 的芯内功率百分比。3 种不同纤芯壁设计的  $7\text{HC-PCFs}$  和  $19\text{HC-PCFs}$  的芯内功率分数如图 6 所示。对比图 4 可知, 在特定波长

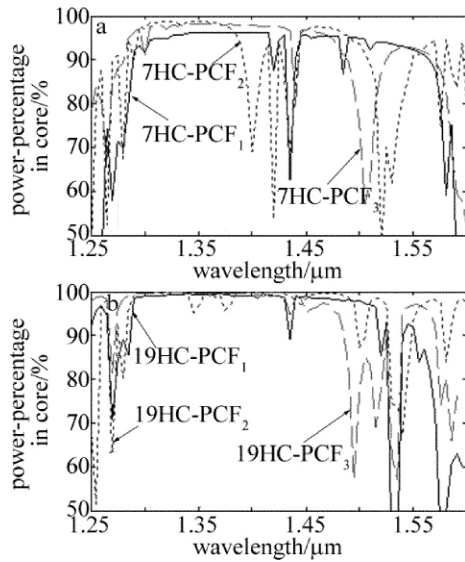


Fig. 6 Power-percentage in core  
a—7-cell b—19-cell

处呈激发态的表面模使芯内功率分数曲线在特定点产生凹陷,这表明在这些波长处,纤芯内的能量大幅跌落,使散射损耗增加。

两种不同纤芯半径、3种不同纤芯壁设计的 HC-PCFs 芯内功率分数指标分别由表 1 和表 2 中给出。其中  $f_{1.31}$  和  $f_{1.55}$  分别代表  $1.31\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  两个通信波长处的芯内功率分数。由表 1 可知,7HC-PCF<sub>2</sub> 在  $1.31\mu\text{m}$  波长处具有最高的芯内功率分数,且  $f > 90\%$  波段与 7HC-PCF<sub>1</sub> 相差无几;而 7HC-PCF<sub>3</sub> 的  $f > 90\%$  的波段减少了约  $0.07\mu\text{m}$ 。从表 2 可以看出,19HC-PCF<sub>2</sub> 和 19HC-PCF<sub>3</sub> 的各项指标均超越了 19HC-PCF<sub>1</sub>, 表现出较好的抑制散射损耗特性。

Table 1 Power-percentage in core index of 7HC-PCFs

core-surround	7HC-PCF <sub>1</sub>	7HC-PCF <sub>2</sub>	7HC-PCF <sub>3</sub>
$f > 90\%$ bandwidth	$0.25\mu\text{m}$	$0.25\mu\text{m}$	$0.18\mu\text{m}$
$f_{1.31}$	94.9%	98.5%	97.7%
$f_{1.55}$	92.2%	91%	92.6%

Table 2 Power-percentage in core index of 19HC-PCFs

core-surround	19HC-PCF <sub>1</sub>	19HC-PCF <sub>2</sub>	19HC-PCF <sub>3</sub>
$f > 90\%$ bandwidth	$0.24\mu\text{m}$	$0.29\mu\text{m}$	$0.26\mu\text{m}$
$f_{1.31}$	99.1%	99.6%	99.6%
$f_{1.55}$	83.9%	93.6%	96.8%

### 3 结论

作者对已运用于实际生产的 HC-1550-02 型 HC-PCFs 的纤芯壁进行了优化设计,并采用全矢量有限元法着重分析了 3 种不同反共振层纤芯壁对 HC-PCFs 基模有效折射率、限制损耗及散射损耗的影响。结果表明,HC-PCFs 的限制损耗不仅与包层空气孔层数有关,还与纤芯包层交界面结构的设计密切相关。本文

中设计的两种反共振层与传统的  $T = 0.5$  反共振层相比,限制损耗有明显降低。对于散射损耗,采用较大纤芯半径设计由于可以减少光与纤芯壁的接触面积,从而增加芯内功率分数。本文中设计的两种反共振层可以看作是传统的  $T = 0.5$  反共振层加厚的结构,加厚纤芯壁可以使芯内能量集中于特定波段,若结构参量设置合理,则可使通信波段芯内功率分数显著提高。

### 参考文献

- [1] CREGAN R F, MANGAN B J, KNIGHT J C, *et al.* Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, 285 (5433): 1537-1539.
- [2] KNIGHT J C, RUSSELL P S. New ways to guide light [J]. *Science*, 2002, 296(5566): 276-277.
- [3] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P S, *et al.* All-silica single-mode fiber with photonic crystal cladding [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [4] SMITH C M, VENKATARAMAN N, GALLAGHER M T, *et al.* Low-loss hollow-core silica air photonic band-gap fiber [J]. *Nature*, 2003, 424(6949): 657-659.
- [5] SAITOH K, KOSHIBA M. Confinement losses in air-guiding photonic bandgap fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15 (2): 236-238.
- [6] KIM H K, DIGONNET M J F, KINO C S, *et al.* Simulations of the effect of the core ring on and air-core modes in photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3436-3442.
- [7] ROBERTS P, COUNTY F, SABERTETAL H. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2005, 13 (1): 236-244.
- [8] ARISTIZABAL V H, VELEZ R J, TORRES P. Modeling of photonic crystal fibers with the scalar finite element method [J]. *Proceedings of SPIE* 2004 5622: 849-854.
- [9] POLETTI F, RICHARDSON D J. Hollow-core photonic bandgap fibers based on a square lattice cladding [J]. *Optics Letters*, 2007, 32 (16): 2282-2284.
- [10] ALLAN D C, BORRELLI N F, GALLAGHER M T, *et al.* Surface modes and loss in air-core photonic band-gap fibers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5000: 161-174.
- [11] ROBERTS P J, WILLIAMS D P, MANGAN B J, *et al.* Realizing low loss air core photonic crystal fibers by exploiting an antiresonant core surround [J]. *Optics Express*, 2006, 13(20): 8277-8285.
- [12] ROBERTS P J, WILLIAMS D P, MANGAN B J, *et al.* Design of low-loss and highly birefringent hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2006, 14(16): 7329-7341.
- [13] CHEN X, ZHU Y, LUO L. The loss property of hollow-core photonic crystal fiber [EB/OL]. (2007-11-7) [2012-6-15]. [http://d.wanfangdata.com.cn/Conference\\_6552033.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Conference_6552033.aspx) (in Chinese).
- [14] AMEZCUA-CORREA R, BRODERICK N G R, PETROVICH M N, *et al.* Optimizing the usable bandwidth and loss through core design in realistic hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7974-7985.
- [15] AMEZCUA-CORREA R, BRODERICK N G R, PETROVICH M N, *et al.* Design of 7 and 19 cells core air-guiding photonic crystal fibers for low-loss, wide bandwidth and dispersion controlled operation [J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 17577-17586.