

文章编号: 1001-3806(2011)06-0817-03

## 光子带隙光纤中纤芯环掺杂对传输特性的影响

张敏, 刘敏\*, 孙世红, 马玲芳, 贺冯良  
(重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了研究光子带隙光纤中纤芯环掺杂浓度的百分比对光纤传输特性的影响, 利用全矢量有限元法在纤芯环掺杂浓度的百分比为1%~5%的条件下对7孔光子带隙光纤纤芯环掺杂和19孔光子带隙光纤纤芯环掺杂两种结构进行了仿真, 比较了两种结构的纤芯模能量分布曲线, 并且给出了19孔光子带隙光纤在不同的纤芯环掺杂浓度的百分比下, 光纤带宽、色散、有效模面积和有效折射率的分布曲线图。结果表明, 19孔光子带隙光纤比7孔光子带隙光纤具有更强的限光能力, 且纤芯环掺杂浓度的百分比对光子带隙光纤的传输性能有显著的影响。

**关键词:** 光纤光学; 纤芯环掺杂; 全矢量有限元法; 光子带隙光纤; 表面模

**中图分类号:** TN929.11      **文献标识码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.025

### Influence of the doping concentration of core surround on transmission characteristics in photonic band gap photonic crystal fibers

ZHANG Min, LIU Min, SUN Shi-hong, MA Ling-fang, HE Feng-liang

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

**Abstract:** In order to find out the influence of the percentage of doping concentration of core surround on transmission characteristics in photonic band gap photonic crystal fibers (PBG-PCF), simulations on 7-cell PBG-PCF core surround doping and 19-cell PBG-PCF core surround doping were carried out by using full-vector finite element method under the condition of the percentage of doping concentration between 1% and 5%. The core-confined energy of these two structures were compared, and the influence of the percentage of doping concentration on optical fiber transmission characteristics in 19-cell PBG-PCF was investigated, such as the distribution curves of bandwidth, dispersion, effective mode area and effective mode index in different the percentage of doping concentration. The results show that the light limiting capacity of 19-cell PBG-PCF is better than that of 7-cell PBG-PCF, and the percentage of doping concentration has notable influence on optical fiber transmission characteristics.

**Key words:** fiber optics; core surround doping; full-vector finite element method; photonic band gap photonic crystal fiber (PBG-PCF); surface mode

## 引言

光子晶体光纤是由充满空气孔的石英材料形成的周期性结构, 纤芯是通过空气孔遭到破坏或者缺失形成的缺陷, 光能沿光纤在晶体结构的缺陷中传输<sup>[1]</sup>。根据导光原理的不同, 光子晶体光纤可分为两种: 全内反射型光子晶体光纤 (total internal reflection photonic crystal fiber, TIR-PCF) 和光子带隙型光子晶体光纤 (photonic band gap photonic crystal fiber, PBG-PCF)。其中, 带隙型光子晶体光纤突破了传统光纤的全内反

射的导光模式, 通过光子带隙将光限制在折射率比包层低的纤芯中传输, 与传统光纤相比, 它具有许多无可比拟的优良特性<sup>[2]</sup>。

在光子带隙型光子晶体光纤的带隙内, 空芯光纤纤芯和包层的分界面处会出现表面模 (surface mode, SM), 这些模式可以把纤芯中基模 (fundamental mode, FM) 的能量耦合进包层中, 引起纤芯模的损耗<sup>[3-4]</sup>。改变表面模在带隙中的位置可以改变表面模和基模在带隙内的耦合位置, 从而会改变光子带隙型光纤的传输特性。影响表面模的因素主要有两个: 纤芯周围石英环和纤芯半径<sup>[5]</sup>。

作者利用全矢量有限元方法, 在纤芯环厚度固定情况下, 对7孔PBG-PCF和19孔PBG-PCF纤芯环掺杂后的纤芯能量进行了数值模拟比较, 并给出了19孔PBG-PCF在不同的纤芯环掺杂浓度的百分比下, 光纤带宽、色散、能量、有效模面积和有效折射率的分布曲

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目 (CDJXS 1116000)

作者简介: 张敏 (1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤领域的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: liumin@cqu.edu.cn

收稿日期: 2010-12-08; 收到修改稿日期: 2010-12-16

线图,通过分析得出了纤芯环掺杂浓度的百分比对光子晶体光纤的传输性能的影响。

## 1 光纤建模

当通过调节包围纤芯空气孔的管壁厚度来抑制表面模从而降低 PBG-PCF 的损耗时,最佳纤芯环厚度为包层中两气孔间石英支柱厚度的一半<sup>[6-9]</sup>,所以规定纤芯环厚度  $t_r$  是包层中石英支柱厚度的一半。在光纤建模时,设定背景材料为纯石英,其折射率为 1.45,空气的折射率设为 1,包层采用三角形排列的圆化六边形结构,纤芯是去掉中心 7 个或 19 个空气孔而成,其结构参量图如图 1a 所示: $d/\Lambda = 0.98$ ,  $d_c/\Lambda = 0.44$ ,  $d_p/\Lambda = 0.2$ ,  $r_c/\Lambda = 1.1$ ,  $\Lambda = 4.7\mu\text{m}$ ,  $t_r/(\Lambda - d) = 0.5$ ,其中  $d$  为包层空气孔直径,  $\Lambda$  为相邻气孔的间距,  $d_c$  为六边形的曲化直径,  $d_p$  为纤芯周围五边形的两个角的曲化直径,  $r_c$  为中心孔的角的曲化半径,  $t_r$  为包围纤芯的石英环的实际厚度。最终 7 孔 PBG-PCF 和 19 孔 PBG-PCF 截面图如图 1b 和图 1c 所示。纤芯环掺杂后的折射率为  $n' = n(1+i)$ ,  $i$  为掺杂浓度的百分比。

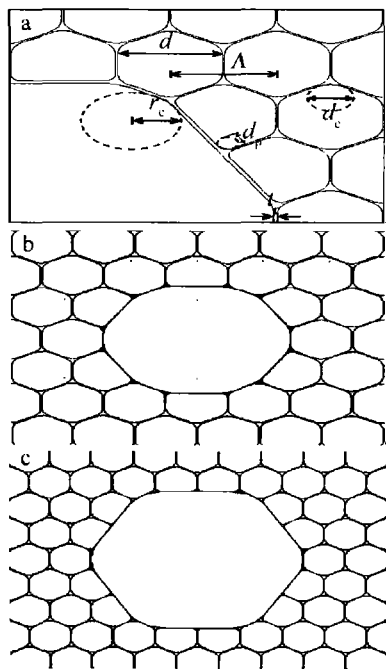


Fig. 1 a—structural b—cross section of 7-cell PBG-PCF c—cross section of 19-cell PBG-PCF

## 2 理论和模拟结果

### 2.1 7 孔 PBG-PCF 和 19 孔 PBG-PCF 的限光能力比较

当无限的光子晶体突然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,且局限在截断处,表面模的传播常数非常接近或者等于基模的传播常数,因此表面模和基模很容易耦合<sup>[8]</sup>。

表面模主要集中于纤芯和包层交界处的纤芯环上,当改变纤芯环的参量时,表面模比基模更容易受到影响<sup>[8]</sup>。通过掺杂来改变纤芯环的折射率时,表面模的折射率也会随之改变,所以会改变表面模在带隙中的位置,从而改变表面模和基模在带隙内的耦合位置,进而改变光子晶体光纤的传输特性。

作者在 7 孔 PBG-PCF 纤芯环掺杂的基础上,提出了对 19 孔 PBG-PCF 结构进行纤芯环掺杂,并且比较了两者的性能,结果如图 2 所示。

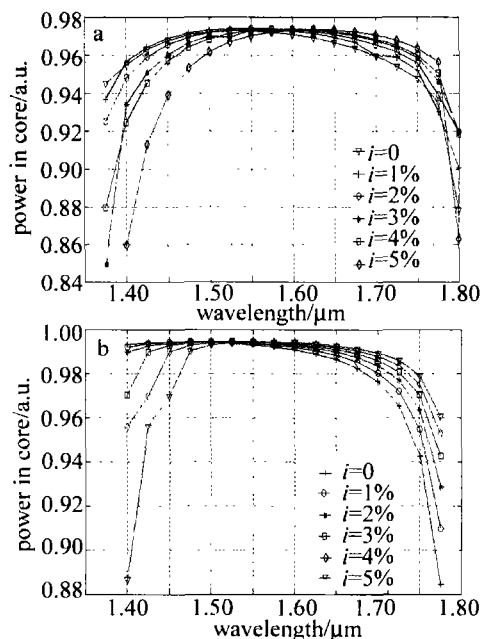


Fig. 2 Wavelength dependence of the fraction of core-confined energy of FM a—7-cell PBG-PCF b—19-cell PBG-PCF

由图 2 可知,7 孔 PBG-PCF 的纤芯中能量呈现先递增后递减的趋势,并且最高的纤芯能量为 97% 左右;19 孔 PBG-PCF 相对于 7 孔 PBG-PCF 而言,带隙内的能量分布更为平坦,且纤芯能量都集中在 99% 左右,因此,19 孔 PBG-PCF 比 7 孔 PBG-PCF 在带隙内的纤芯能量要高,即损耗更小,并且更稳定,效果有明显改善;在带隙边缘处纤芯能量会急剧下降,这是由于在带隙边缘处,基模更容易与表面模发生耦合。

### 2.2 纤芯环掺杂对 19 孔 PBG-PCF 传输特性的影响

通过有限元软件对理论模型进行计算,可得光纤中各个模式的有效折射率值。 $i$  分别为 0, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% 时,纤芯中基模的有效折射率随  $i$  的增大而增大,如图 3 所示。掺杂使得纤芯环的折射率增加,从而导致基模的有效折射率随  $i$  的增加呈上升趋势。

有效模场面积是光子晶体光纤的重要参量之一,其数学表达式如式(1)所示:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[ \iint_S |E(x,y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint_S |E(x,y)|^4 dx dy} \quad (1)$$

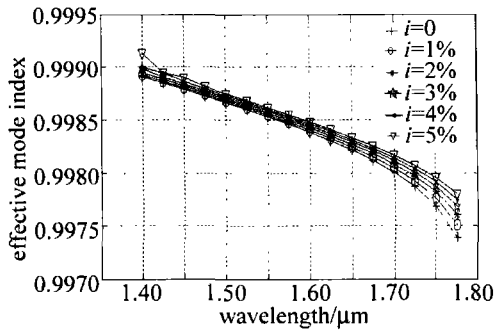


Fig. 3 Wavelength dependence of the effective mode index of FM in 19-cell PBG-PCF

式中,  $E(x, y)$  为基模的电场分布,  $S$  为光纤的横截面积。由图 4 可知, 光纤的有效模面积随  $i$  的增加而增加。19 孔 HC-PBGF 的大模场面积可以通过纤芯环的不同的  $i$  来实现, 而不同模场面积的光纤则在各种光电器件中具有不同的作用<sup>[10-11]</sup>。

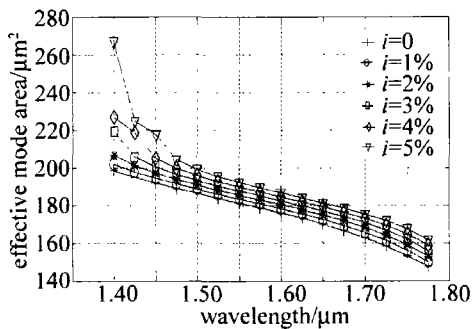


Fig. 4 Wavelength dependence of the effective mode area of FM in 19-cell PBG-PCF

波导群速度色散 (group velocity dispersion, GVD) 的表达式可写为:

$$D_g = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (2)$$

式中,  $c$  为真空中光波速度,  $n_{\text{eff}}$  为模式的有效折射率<sup>[12]</sup>,  $\lambda$  为波长。

由图 5 可知, 随着  $i$  的增加, 零群速度色散点向长波长方向移动, 这是由于表面模和基模在带隙内的耦合位置的改变导致的, 并且随着  $i$  的增加, 色散会减小, 使得光子晶体光纤在很宽的带隙范围内具有低的群速度色散。当  $i$  从 1% 上升到 5% 时, 零群速度色散

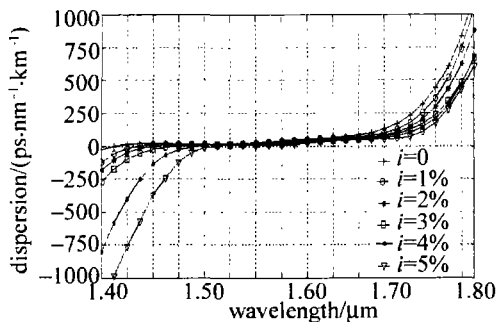


Fig. 5 Wavelength dependence of the group velocity dispersion of FM in 19-cell PBG-PCF

点从波长 1.4125  $\mu\text{m}$  转移到 1.5125  $\mu\text{m}$  处, 零色散点漂移了 100nm, 由此可见, 根据  $i$  来调整零群速度色散点的波长位置是非常有效的。

### 3 结论

利用全矢量有限元法对 7 孔 PBG-PCF 和 19 孔 PBG-PCF 在纤芯环  $i$  为 1% ~ 5% 的条件下分别进行了仿真分析, 结果表明, 通过在纤芯环中掺杂来改变纤芯环的有效折射率时, 19 孔 PBG-PCF 比 7 孔 PBG-PCF 的限光能力要好。在纤芯环  $i$  为 1% ~ 5% 时, 19 孔 PBG-PCF 随着纤芯环  $i$  的增加, 有效模面积会增大, 并且其零群速度色散点会向长波长移动。在带隙范围内, 随着  $i$  的增加, 群速度色散会减小。理论仿真结果表明, 通过光子晶体光纤的适当设计和向纤芯环中掺杂适当物质等方法, 可控制 19 孔 PBG-PCF 的有效折射率、有效模面积、群速度色散等传输特性。本研究结果为今后深入开展研究奠定了理论基础。

### 参考文献

- [1] WANG J Y, JIANG Ch, HU W Sh, *et al.* Properties of index-guided PCF with air-core [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(2): 317-321.
- [2] RUSSELL P St J. Photonic crystal fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4729-4749.
- [3] ZHANG H, WANG Q G, YANG B J. Research progress of photonic bandgap photonic crystal fibers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(3): 301-311 (in Chinese).
- [4] WANG R X. Number study on the coupling loss of the photonic crystal fiber [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(5): 493-495 (in Chinese).
- [5] WEST J A, SMITH C M, BORRELLI N F, *et al.* Surface modes in air-core photonic band-gap fibers [J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1485-1496.
- [6] ROBERTS P J, COUNY F, SABERT H, *et al.* Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 236-244.
- [7] 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*, 2005, 13(20): 8277-8285.
- [8] AMEZCUA-CORREA R, GEROME R, LEON-SAVAL S, *et al.* Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1142-1149.
- [9] AMEZCUA-CORREA R, BRODERICK N G, 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.
- [10] LI H, MAFI A, SCHULZGEN A, *et al.* Analysis and design of photonic crystal fibers based on an improved effective-index method [J]. *IEEE Lightwave Technology*, 2007, 25(5): 1224-1230.
- [11] GUO Sh Q, AN W Sh, WANG K, *et al.* Large area mode field photonic crystal fiber design [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 6019: 970-977.
- [12] ZHANG Y, LI X Z, ZHENG Y. Analysis of dispersion characteristics of photonic crystal fiber [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 24-26 (in Chinese).