

# 混合导引型光子晶体光纤中纤芯折射率相关的导光特性研究\*

程同蕾 柴路<sup>†</sup> 栗岩锋 胡明列 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2010年1月13日收到; 2010年4月15日收到修改稿)

利用全矢量有限元法研究了一种混合导引型光子晶体光纤在纤芯折射率改变时, 光纤导光机理和模式的演变特性. 当纤芯折射率小于混合包层中空气孔包层的有效折射率时, 芯模的导光机理为“双带隙导引型”; 当纤芯折射率位于空气孔和高折射率两套包层的有效折射率之间时, 芯模的导光机理为“单带隙+全内反射导引型”; 当纤芯折射率大于高折射率棒包层的有效折射率时, 芯模的导光机理为“全内反射导引型”. 并对该光纤在上述三种条件下的导光特性进行了比较和讨论. 这些结果对设计特殊用途的光子晶体光纤具有指导意义.

**关键词:** 混合导引型光子晶体光纤, 带隙, 模式

**PACS:** 42.70.Qs, 42.81.Cn, 42.90.+m

## 1. 引言

光子晶体光纤(PCF)自问世以来, 由于它的特殊结构, 决定了它与传统光纤有很多不同的性质, 所以在最近十几年内已经成为相关领域的研究热点, 在PCF的特殊性质、制作工艺和各种应用等方面都有大量的研究报道<sup>[1-5]</sup>. 按照导光机理, PCF一般可分为折射率引导型和带隙型<sup>[6-8]</sup>. 这主要是由于纤芯和包层折射率差导致的. 当PCF的纤芯折射率比包层的有效折射率大时, 称为全内反射型PCF, 即由全内反射机理将光限制在芯中; 当PCF的纤芯折射率比包层的有效折射率小时, 称为带隙导引型PCF, 即由光子带隙作用将光限制在芯中. 依照纤芯和包层填充物的不同, 带隙导引型PCF又可分为全固态型和空气孔布拉格反射带隙型两类<sup>[9,10]</sup>. 其中对于全固态带隙型PCF的带隙限光机理可以用高折射率包层的反谐振作用来解释<sup>[11]</sup>. 最近, 混合型PCF又成为研究的热点<sup>[12-16]</sup>. 所谓混合型PCF主要是在传统空气孔包层中填充了两种不同折射率

的介质, 使包层形成某一局部的有效折射率大于纤芯折射率, 而另外部分包层的有效折射率小于纤芯折射率, 即存在带隙型和全内反射型两种导引机理共同作用的情况. 此外, 利用液体材料填充PCF的技术也是最近发展起来的新型技术, 它在制作传感器、光电集成器件、特殊波导等方面已经体现出很好的应用前景<sup>[17,18]</sup>.

上述两种PCF技术的宗旨就是调节PCF包层或芯区的相对折射率, 以达到获得所需导光特性、模式特性或其他相关结构参数特性的目的. 本文是将上述两种技术结合起来, 设计出一种单层高折射率棒和多层空气孔的混合导引型PCF, 然后通过填充或灌注技术改变纤芯折射率. 利用全矢量有限元法详细讨论了该光纤内的导光机理随纤芯折射率变化的演变过程和模式特性, 这对于全面了解两种PCF技术导致的特殊PCF导光机理和设计出不同功能的混合导引机理的PCF具有指导意义.

## 2. 混合导引型PCF设计

我们设计的混合导引型PCF的横截面如图1

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB806002, 2010CB327604)、国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA03Z447)、国家自然科学基金(批准号:60678012, 60978022, 60838004)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20070056083, 20070056073)、教育部科学技术研究计划重点项目(批准号:108032)和教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-07-0597)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: lu\_chai@tju.edu.cn

所示,其包层由两种结构组成,即单环高折射率棒内包层和多环空气孔外包层. 整个光纤的基质为折射率  $n = 1.45$  的硅材料;纤芯则采用不同掺杂介质和掺杂浓度的材料填充方式,使纤芯折射率( $n_1$ )的大小可以调节;混合包层的最内层采用折射率  $n_2 = 1.65$  掺杂高折射率棒;外包层为四层空气孔,空气孔的折射率  $n_0 = 1.00$ . 包层中空气孔和最内层高折射率棒均采用相同的直径  $D$  和孔间距  $\Lambda$ ,这里取  $D = 2.24 \mu\text{m}$  和  $\Lambda = 2.80 \mu\text{m}$ ;纤芯直径为  $D_1 = 2.80 \mu\text{m}$ .

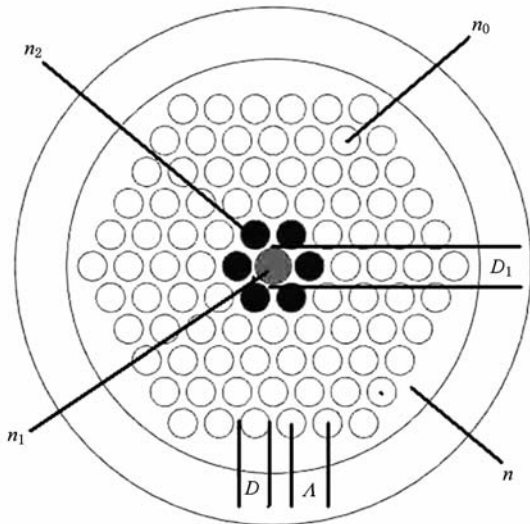


图1 混合导引型 PCF 的横截面图 其中: $n_0, n, n_1$  和  $n_2$  分别为空气孔、基质、纤芯和高折射率棒的折射率; $D$  和  $D_1$  分别为包层孔(棒)和纤芯直径; $\Lambda$  为包层孔(棒)间距

### 3. 数值模拟结果与讨论

由于目前现有计算方法都无法直接算出混合包层的有效折射率,因此我们采用全矢量有限元法计算“芯模”(传输模式)的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ <sup>[10,19]</sup>. 本文中,混合包层的结构保持不变,当纤芯的折射率  $n_1$  变化时,混合导引型 PCF 的导光机理随之改变,从而导致“芯模”有效折射率发生变化. 通过研究“芯模”有效折射率随芯区折射率变化的特性,就可以间接了解混合包层对导引光波模式的影响.

利用全矢量有限元法,在波长变化  $0.6\text{—}1.8 \mu\text{m}$  范围内,对图 1 所示的混合导引型 PCF 的传输模式(芯模的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ )随纤芯折射率  $n_1$  变化的演变过程进行了详细研究. 考虑到不失一般性和计算时间的原因为,模拟时  $n_1$  的改变量取为  $0.0225$ ,

并在绘图时仅仅考虑芯模中基模图像作为本文的典型图例,结果如图 2 所示. 需要说明的是,图 2 中表示出的是主带隙结构,次要带隙结构没有画出. 我们可以清楚看出,整个图 2 自上而下可以分成三个大区: I 区(图 2 中虚线 1 以上的区域); II 区(图 2 中两条虚线之间的区域); III 区(图 2 中虚线 2 以下的区域). 三个区域的两个分界区分别用虚线 1, 2 表示. 由于计算时取值间隔的限制,转变边界很难精确的确定,该虚线是通过图 2 所示的模式演变趋势中的两个转变区拟合而得,其中:虚线 1 的  $n_{\text{eff}}$  在  $1.6\text{—}1.626$  范围,虚线 2 的  $n_{\text{eff}}$  在  $1.4\text{—}1.425$  范围. 特别是通过将这两个转变带的  $n_{\text{eff}}$  值与光纤的基质折射率  $1.45$  和高折射率棒的折射率  $1.65$  对照,可以推断出这两个转变区与这两个参数是对应关系,所以我们可以定性地分析图 2 中三个芯模导引区间的物理机理. 在 I 区内,没有带隙存在,表明  $n_{\text{eff}}$  已经大于混合包层的有效折射率,此时该光纤的导引机理为单一的“全内反射型”;在 II 区内,已经出现带隙结构,考虑到  $n_{\text{eff}}$  是处于两个虚线之间区域,这表明  $n_{\text{eff}}$  是大于混合包层中的空气孔包层结构的有效折射率,而小于高折射率棒包层结构的有效折射率,此时该光纤的导引机理应为空气孔包层结构导致的“全内反射型”和高折射率棒包层结构导致的“带隙导引型”的混合作用;在 III 区内,考虑到  $n_{\text{eff}}$  小于虚线 2,这表明  $n_{\text{eff}}$  已经小于混合包层中的有效折射率,此时该光纤的导引机理应为“双带隙导引型”,即:为空气孔包层结构和高折射率棒包层结构分别导致的“带隙导引型”的混合作用. 在三大区域中,  $n_{\text{eff}}$  都是随波长的增加而逐渐变小,但其变化率在三大区域中不同, I 区最小, III 区最大,而且波长越短变化率越大. 对比 II、III 区,其主带隙(深色条状)的变化明显不同:除了上述的两区主带隙的变化率不同外, II 区的各个主带隙的平均宽度与  $n_1$  和波长关系不大,这是因为此时的带隙宽度是由高折射率棒包层的结构所决定<sup>[10]</sup>,而本研究中包层的结构保持不变,因此该参数变化不大;在 III 区中,各个主带隙的宽度、波长和  $n_1$  呈现明显相关,特别是在长波方向带隙宽度明显增大,这是由于此时的带隙结构是由混合包层中两种带隙共同作用而形成,而从这两种结构包层的 PBGF 带隙分析可知,越向长波方向,两种带隙的重叠区就越小,即带隙共同作用区增大,等效于带隙加宽.

为进一步说明上述混合 PCF 的导引机理随  $n_1$

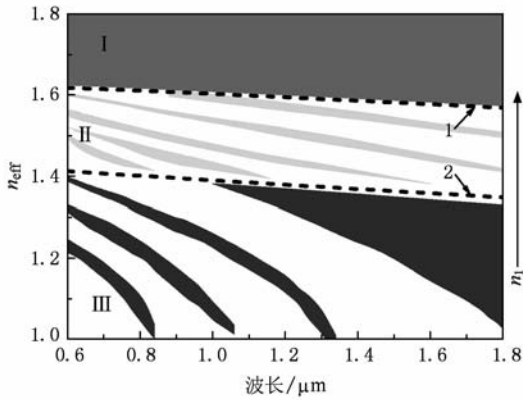


图2 混合导引型 PCF 芯模中基模有效折射率  $n_{eff}$  和纤芯折射率  $n_1$  随波长的变化关系图 其中: I, II, III 区分别对应“单全内反射导引型”、“单全内反射+单带隙导引型”和“双带隙导引型”导光机理. 虚线 1 和 2 表示上述三个区之间的转变带

变化的特点,我们又对处于图 2 中三个大区内的光波基模的传输模式进行了模拟,典型结果如图 3 所示. 图 3(a)为图 2 中 I 区的典型传输模式,其中  $n_1$  取为 1.8. 由于仅有“全内反射型”导光机制,所以在考察波段内所有波长的光都被限制在纤芯内. 而对于位于图 2 中 II 区内的传输模式,分别检验了各个带隙内、外所对应波长光的传输模式,发现所有带

隙内、外的传输模式都各自相近,所以仅取一个典型值( $n_1 = 1.55$ )为例,见图 3(b) 和 3(c). 图 3(b)是取波长为  $1.16 \mu\text{m}$ ,正好位于带隙内,该光被限制在纤芯内;图 3(c)是取波长为  $1.28 \mu\text{m}$ ,正好位于带隙外,该光被排斥出纤芯. 从“带隙导引型”和“反谐振作用”的机理可知,位于带隙区的光将被限制在纤芯中,而在非带隙区(图中空白区)的光将被排斥出“芯区”,并被限制在包层的高折射率棒内. 同理,对图 2 中的 III 区带隙内、外所对应波段的典型模拟结果如图 3(d)和 3(e) 所示. 图 3(d),3(e)是取  $n_1 = 1.4$ ,波长分别为  $1.32 \mu\text{m}$ (位于带隙内)和  $0.9 \mu\text{m}$ (位于带隙外); III 区带隙内、外的传输模式特征与 II 区相似. 仔细对比图 3(a),3(b) 和 3(d)可以看出,“全内反射型”对芯模的限制作用最好,即泄露损耗最少;“双带隙导引型”与“单带隙+全内反射导引型”相比,后者对芯模的限制作用比前者更好,反映出“全内反射导引”比“带隙导引”损耗小的一般规律;当取  $n_1 = 1.65$  时,即纤芯和高折射率棒的折射率相同,此时是一个特例,其传输模式如图 3(f) 所示. 此时光纤中的固体棒和纤芯组成了“七芯结构”的芯区,外层为空气孔包层,芯模基模的模场由“全内反射型”导引机理限制在整个“七芯结构”

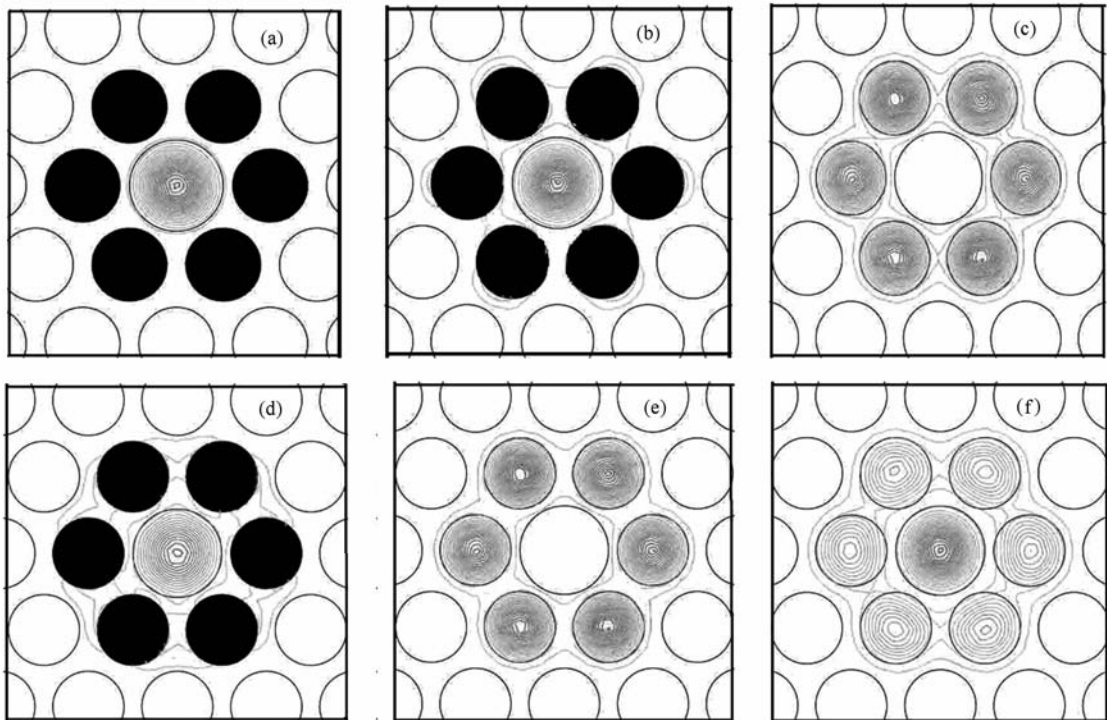


图3 混合导引型 PCF 的芯模基模的典型模式分布图 (a) 对应图 2 中的 I 区,(b),(c) 分别对应图 2 中的 II 区的带隙内、外,(d),(e) 分别对应图 2 中的 III 区的带隙内、外,(f) 对应图 2 中的转变区 I 中的一个特例( $n_1 = n_2$ )

区域内,但中心纤芯内的模场最强.

#### 4. 结 论

通过对不同纤芯折射率下的芯模有效折射率和传输模式的分析,得到了混合导引型 PCF 中“带隙型”与“全内反射型”两种导引机理随纤芯折射率变化时的作用特点.当纤芯折射率小于混合包层中空气孔包层的有效折射率时,芯模的导光机理为“双带隙导引型”;当纤芯折射率位于空气孔和高折射率两套包层的有效折射率之间时,芯模的导光机理为“单带隙 + 全内反射导引型”;当纤

芯折射率大于高折射率棒包层的有效折射率时,芯模的导光机理为“全内反射导引型”.在不同类型混合导引的作用下,位于带隙外的光波只能在包层的高折射率棒中传输,而位于带隙内的光波将被两类不同的导引机理共同作用,限制在纤芯中传输.传输芯模的带隙位置和宽度与纤芯折射率和波长密切相关.

目前在工艺上已经可以通过掺杂或填充改变纤芯的折射率,因此本文提出的混合导引型 PCF 及其导引机理随纤芯折射率转化的规律对于今后采用 PCF 制作多波段传感器、滤波器和光电器件等具有指导意义.

- [1] Li Y F, Wang C Y, Hu M L 2004 *Opt. Commun.* **238** 29
- [2] Yan F P, Li Y F, Wang L, Gong T R, Liu P, Liu Y, Tao P L, Qu M X, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5735 (in Chinese) [延凤平、李一凡、王琳、龚桃荣、刘鹏、刘洋、陶沛琳、曲美霞、简水生 2008 物理学报 **57** 5735]
- [3] Tombelaine V, Christelle B L, Leproux P, Couderc V, Melin G 2008 *Opt. Lett.* **33** 2011
- [4] Knight J C, Skryabin D V 2007 *Opt. Expr.* **15** 15365
- [5] Li Z Y, Wang H H, Jiang N, Cheng S L, Zhao L, Yu X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3821 (in Chinese) [李政颖、王洪海、姜宁、程松林、赵磊、余鑫 2009 物理学报 **58** 3821]
- [6] Broeng J, Barkou S, Søndergaard T, Bjarklev A 2000 *Opt. Lett.* **25** 96
- [7] Yan M, Shum P, Hu J 2005 *Opt. Lett.* **30** 465
- [8] Zhang D S, Dong X Y, Zhang W G, Wang Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1235 (in Chinese) [张德生、董孝义、张伟刚、王志 2005 物理学报 **54** 1235]
- [9] Litchinitser N M, Dunn S, Steinvurzel P, Eggleton B J, White T, McPhedran R, Martijn de Sterke C 2004 *Opt. Expr.* **12** 1540
- [10] White T, McPhedran R, Martijn de Sterke C, Litchinitser N M, Eggleton B J 2002 *Opt. Lett.* **27** 1977
- [11] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, Eggleton B J 2002 *Opt. Lett.* **27** 1592
- [12] Perrin M, Quiquempois Y, Bouwmans G, Douay M 2007 *Opt. Expr.* **15** 13783
- [13] Zhang Z H, Shi Y F, Bian B M, Lu J 2008 *Opt. Expr.* **16** 1915
- [14] Arismar Cerqueira Jr S, Cordeiro C M B, Biancalana F, Roberts P J, Hernandez-Figueroa H E 2008 *Opt. Lett.* **33** 2080
- [15] Arismar Cerqueira Jr S, Luan F, Cordeiro C M B, George A K, Knight J C 2006 *Opt. Expr.* **14** 926
- [16] Mortensen N A, Nielsen M D, Folkenberg J R, Jakobsen C, Simonsen H 2004 *Opt. Expr.* **12** 468
- [17] Li J, Zhang W G, Du J B, Jiang M, Zhang Q, Liu Y P, Liu Z L, Qu K N, Liu Y G, Wang Z 2009 *Chinese Journal of Lasers* **36** 705 (in Chinese) [李婧、张伟刚、杜江兵、姜萌、张绮、刘亚萍、刘卓琳、屈柯楠、刘艳格、王志 2009 中国激光 **36** 705]
- [18] Xiao L, Jin W, Demokan M S, Ho H, Hoo Y, Zhao C 2005 *Opt. Expr.* **13** 9014
- [19] Xiao L, Jin W, Demokan M S 2007 *Opt. Expr.* **15** 15637

## Guidance characteristics correlated to the core refractive index in a hybrid photonic crystal fiber\*

Cheng Tong-Lei Chai Lu<sup>†</sup> Li Yan-Feng Hu Ming-Lie Wang Qing-Yue

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 13 January 2010; revised manuscript received 15 April 2010)

### Abstract

The properties of light guiding mechanism and modes relating to the core refractive index in a hybrid photonic crystal fiber (PCF) are numerically investigated by the full-vectorial finite element method. The light guiding mechanism of core mode is the double-bandgap-guiding when the core refractive index is smaller than the effective index of the air-hole cladding in the hybrid-PCF. If the core refractive index is between the refractive indexes of the two kinds of hybrid-claddings, there is a co-operative action of the index-guiding and the bandgap-guiding on the guide mode in the core. Only the total internal reflection guiding occurs in the fiber when the core refractive index is greater than the effective index of the high-index rod cladding. Comparison of these guiding properties in the hybrid-PCF are also carried out. The results provide guidance for the design of hybrid photonic crystal fiber for special purposes.

**Keywords:** hybrid photonic crystal fiber, bandgap, mode

**PACS:** 42.70.Qs, 42.81.Cn, 42.90.+m

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2006CB806002, 2010CB327604), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z447), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60678012, 60978022, 60838004), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant Nos. 20070056083, 20070056073), the Key Program of Science and Technology Research of Ministry of Education, China (Grant No. 108032), and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-07-0597).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lu\_chai@tju.edu.cn