

## 空心光纤的矢量模式特性分析

邢尔军, 刘艳, 姜姗姗

(北京交通大学 电子信息工程学院 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 以全矢量波动方程理论为基础精确地推导出 HOF 中矢量模式的色散关系表达式, 电场分量  $H_z$  和  $E_z$  在空心、纤芯以及包层区域的表达式; 并推导出模式的传播常数以及导模的横向电场的表达式; 在此基础上, 重点分析研究了改变空心光纤的主要参数对模式特性产生的影响, 包括: 有效折射率与波长、空心半径、纤芯厚度之间的关系以及包层数量的变化对模式特性的影响规律, 为进一步研究和扩展空心光纤的应用提供了依据。

**关键词:** 空心光纤; 波长; 有效折射率; 空心半径; 纤芯厚度

**中图分类号:** TN012 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2795-05

## Analysis of characteristic of vector mode based on hollow optical fiber

Xing Erjun, Liu Yan, Jiang Shanshan

(key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on the full vector wave equations, the dispersion formulas of vectorial modes were accurately established, and the expressions of field components were deduced in the hollow region, core region and cladding region. Then, the transverse electric field of the fundamental mode and the propagation constant were investigated. Based on the above analysis, the characteristics of mode were analyzed in detail by changing the main parameters of HOF, such as, the relationship between  $n_{\text{neff}}$  and wavelength, radius of air hole, thickness of core. The raw of mode characteristics based on the varying number of cladding provides a basis for further research and application of hollow fiber.

**Key words:** HOF; wavelength;  $n_{\text{neff}}$ ; hollow radius; core thickness

收稿日期: 2015-01-25; 修订日期: 2015-02-13

基金项目: 北京高等学校青年英才计划项目(YETP0530); 中央高校基本科研业务费专项(2013JBM005)

作者简介: 邢尔军(1985-), 男, 硕士生, 主要从事光纤通信方面的研究。Email: 12120165@bjtu.edu.cn

导师简介: 刘艳(1978-), 女, 副教授, 主要从事光纤通信与光纤传感方面的研究。Email: yanliu@bjtu.edu.cn

### 0 引言

空心光纤作为一种新型的具有潜在发展前景的光纤材料,是近年来国内外光纤领域研究的热点;2014 年上海交通大学首次在空心光纤中实现单光子级宽带光存储,这标志着向实现可集成化的量子信息存储器件迈出了重要的一步;在国外,最近 MODE-GAP 项目实现了空心带隙光纤数据传输,成为世界上最高的光纤传输速率(57.6 Tbps),比之前的传输记录快 50 倍;并且空心光纤在一些领域的应用已初见成效,如参考文献[1]中利用空心光纤独特的波导结构可以制作出模式耦合转换器,甚至全光纤光子器件;而在参考文献[2]中利用空心光纤的弯曲损耗特性,可以将激光技术与空心光纤结合应用到内镜治疗中;显而易见,在这些方面的成功应用,离不开对空心光纤结构的合理设计;然而,无论国内还是国外,针对空心光纤结构参数的变化对矢量模式特性的影响的文献并不多;如 Sejin Lee<sup>[1]</sup>做了一些横向电磁场分析,但并不深入。而杨红等人<sup>[3]</sup>是从纯理论角度来分析空心光纤的矢量模式的;因此,文中正是基于以上几方面的考虑,深入分析了空心光纤结构参数的变化对矢量模式特性的影响,为进一步研制出特殊性能的空心光纤并扩展空心光纤的应用提供了依据。

### 1 空心光纤介绍

典型空心光纤的横截面以及对应区域的折射率分布如图 1 所示。

其中,  $n_{air}$ ,  $n_{clad}$ ,  $n_{core}$  分别代表空心、包层、纤芯区域的折射率;  $r_{air}$ ,  $r_{core}$ ,  $r_{clad}$  分别代表空心、纤芯、包层的半径;纤芯的厚度为  $d=r_{core}-r_{air}$ ,而包层的直径与芯层的直径比较,可以认为是无限大的。

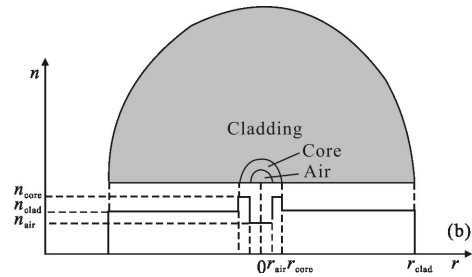
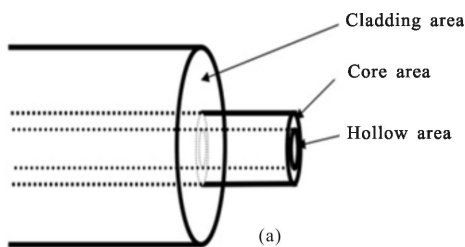


图 1 空心光纤横截面和对应折射率分布图

Fig.1 Cross section of a HOF and refractive index profile of a HOF

值得注意的是,空心光纤可以显示出独特的环形电场分布的特性,而此现象在传统石英光纤中是不存在的,如图 2 所示。

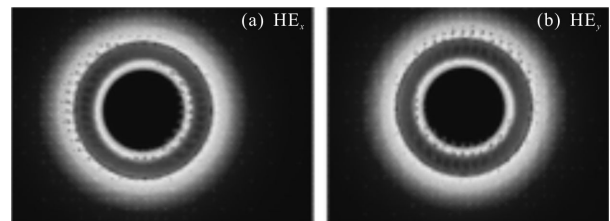


图 2 HE<sub>11</sub> 模式的模场分布图

Fig.2 Mode field distribution of the fundamental mode

从两者的电场方向可以看出基模属于线偏振模。

### 2 矢量模式分析

由于 HOF 结构的旋转对称特性,电磁场采用 z 轴与光纤同向的圆柱坐标系来描述。

从麦克斯韦方程的矢量模型出发,空心光纤中纵向电场  $E_z$  在极坐标中表示为:

$$E_z(r, \theta, z, t) = E_z(r, \theta) \exp[i(\omega t - \beta z)] + c.c. \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为角频率;  $c.c.$  为相应的共轭部分,且

$$E_z(r, \theta) = \begin{cases} AI_m(vr)e^{im\theta} \\ [BJ_m(ur) + CY_m(ur)]e^{im\theta} \\ DK_m(wr)e^{im\theta} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $v = (\beta^2 - k^2)^{1/2}$ ,  $u = (k^2 n_{core}^2 - \beta^2)^{1/2}$  和  $w = (\beta^2 - k^2 n_{clad}^2)^{1/2}$  分别是三个特征常数;  $\beta$  为传播常数,  $k_0 = \omega c = \omega(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}$  为自由空间的波数。  $J_m$  和  $Y_m$  分别表示第一类贝塞耳函数和第二类  $m$  阶贝塞耳函数;  $I_m$  和  $K_m$  分别表示修正的贝塞耳函数。

对应磁场  $H_z$  的纵向分布表示为:

$$H_z(r, \theta, z, t) = H_z(r, \theta) \exp[i(\omega t - \beta z)] + c.c. \quad (3)$$

且

$$H_z(r, \theta) = \begin{cases} GI_m(vr)e^{im\theta} \\ [PJ_m(ur)+QY_m(ur)]e^{im\theta} \\ RK_m(wr)e^{im\theta} \end{cases} \quad (4)$$

求出以上方程的解,也就是模式的解,在此称之为  $TE_{0m}$  模,  $TM_{0m}$  模,  $HE_{ml}$  模或者  $EH_{ml}$  模。

假定  $m=1, l=1$  时,方程(2),(4)可以化简为:

$$E_z(r, \theta) = \begin{cases} AI_1(vr)e^{i\theta} \\ [BJ_1(ur)+CY_1(ur)]e^{i\theta} \\ DK_1(wr)e^{i\theta} \end{cases} \quad (5)$$

和

$$H_z(r, \theta) = \begin{cases} GI_1(vr)e^{i\theta} \\ [PJ_1(ur)+QY_1(ur)]e^{i\theta} \\ RK_1(wr)e^{i\theta} \end{cases} \quad (6)$$

因为电场部分远远大于磁场部分,因此把方程的解即最低阶模式称之为  $HE_{11}$  模式。在边界  $r=r_{air}$ ,  $r=r_{core}$  处,由于边界连续性条件<sup>[3-5]</sup>,对于方程(5)、(6)可以得到相应的空心光纤  $HE_{11}$  模式的传播方程:

$$\begin{vmatrix} I_1(vr_{air})-J_1(ur_{air})-Y_1(ur_{air}) & 0 \\ vI_1'(vr_{air})-uJ_1'(ur_{air})-uY_1'(ur_{air}) & 0 \\ 0 & J_1(vr_{core})Y_2(ur_{core})-K_1(wr_{core}) \\ 0 & uJ_1'(ur_{core})uY_1'(ur_{core})-wK_1'(wr_{core}) \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

求解此方程,就可以得到传播常数  $\beta$ ,然后以此可以求解出特征常数  $v, u, w$ ; 再根据  $r=r_{air}, r=r_{core}$  边界处连续性条件,就可以求解出方程(5)、(6)中的八个系数  $A, B, C, D, G, P, Q$  以及  $R$ ; 同样将这个八个系数代回原方程中,可以计算出空心光纤中  $HE_{11}$  模式的电场分布<sup>[5-9]</sup>。

利用以上求解结果,可以进一步得出  $TE$  模和  $TM$  模的色散关系式<sup>[5-6]</sup>:

$$\frac{\{\tilde{I}(v)-\tilde{J}(x)\}\{\tilde{K}(w)+\tilde{Y}(u)\}}{\{\tilde{I}(v)-\tilde{Y}(x)\}\{\tilde{K}(w)+\tilde{J}(u)\}} = \frac{Y_0(x)J_0(u)}{J_0(x)Y_0(u)} \quad (8)$$

和

$$\frac{\{n_{air}^2 \cdot \tilde{I}(v) - n_{core}^2 \cdot \tilde{J}(x)\} \{n_{clad}^2 \cdot \tilde{K}(w) + n_{air}^2 \cdot \tilde{Y}(u)\}}{\{n_{air}^2 \cdot \tilde{I}(v) - n_{core}^2 \cdot \tilde{Y}(x)\} \{n_{clad}^2 \cdot \tilde{K}(w) + n_{air}^2 \cdot \tilde{J}(u)\}} = \frac{Y_0(x)J_0(u)}{J_0(x)Y_0(u)} \quad (9)$$

### 3 结果与讨论

以第二节的计算模型为理论基础,该小节主要利用 Comsol 和 Matlab 仿真软件来创建仿真模型,分

析空心光纤结构参数的变化对模式特性的影响。

首先考虑空心半径与基模有效折率的关系,设定  $n_{air}=1.0, n_{core}=1.449$  以及  $n_{clad}=1.444$ , 纤芯厚度为  $3.2 \mu m$ , 波长为  $1.55 \mu m$ , 绘制出空心半径与有效折率的关系图,如图 3 所示。

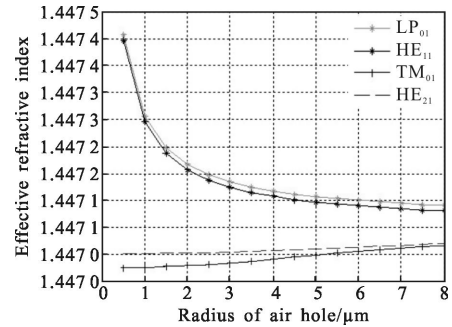


图 3  $LP_{01}, HE_{11}, TM_{01}, HE_{21}$  模式的有效折率与空心半径的关系图

Fig.3 Relationship between the effective refractive of  $LP_{01}, HE_{11}, TM_{01}, HE_{21}$  and the hollow radius

上图表明在芯区厚度为固定值  $3.2 \mu m$  时,随着空心半径  $r_{air}$  由零增加到  $1 \mu m$  左右时,  $LP_{01}$  和  $HE_{11}$  模式的有效折率急剧下滑,而之后随着  $r_{air}$  的不断增加,两者的有效折率趋于稳定,接近于包层的折率;而且从上图的曲线可以看出  $LP_{01}$  和  $HE_{11}$  模式的有效折率几乎相等,这充分说明标量解在 HOF 中仍然为一种可靠的近似。另一方面,从  $TM_{01}, HE_{21}$  模式的折率曲线可以看出<sup>[9-10]</sup>,空心半径的增加对激发模式  $TM_{01}, HE_{21}$  的有效折率的影响并不很大,而只是对基模产生了很大的影响。

进一步分析在空心半径不断增加时,空心半径的大小是否影响空心光纤的模式特性。如图 4 所示。

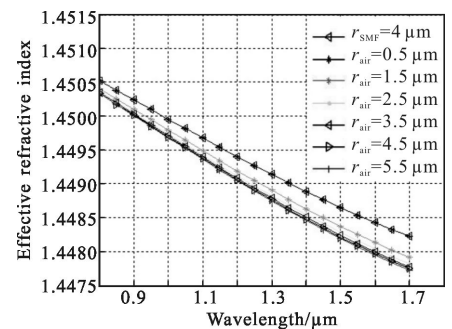


图 4 基模  $HE_{11}$  的有效折率与波长的关系(空心半径由  $0.5 \mu m$  增加到  $5.5 \mu m$ )

Fig.4 Relationship between wavelength and the effective refractive of  $HE_{11}$ (hollow radius increases from  $0.5 \mu m$  to  $5.5 \mu m$ )

主要参数为  $n_{air}=1.0, n_{core}=1.452$  以及  $n_{clad}=1.447$ , 其中 SMF 为传统单模光纤。

从图 4 中的七种状态可以看出, 无论是传统单模光纤还是空心光纤, 基模的有效折射率都是随着波长的增加呈现线性下滑趋势; 并且当空心半径小于  $0.5 \mu\text{m}$  时, 基模的有效折率的变化趋势与传统单模光纤非常接近; 这表明在此种计算模型下, 空心区域的存在并没有对空心光纤的模式特性产生很大的影响; 当空心半径为  $1.5 \mu\text{m}$  时, 基模的有效折射率曲线整体变化趋势比空心半径为  $0.5 \mu\text{m}$  时有很大的下滑趋势; 这说明在此种计算模型下, 空心区域的存在的确对空心光纤的模式特性产生了影响; 当空心半径继续增加时, 基模的有效折射率曲线整体上变化不是非常明显, 基本上重叠在一起; 这表明在其他参数保持不变的情况下, 空心半径的增加不会对空心光纤的模式特性产生持续的影响。

可见, 空心半径的大小是存在临界值的, 因此在设计合理的空心光纤时, 空心半径的大小必须作为一项重要的参数进行控制。

进一步分析空心光纤中纤芯厚度的变化对模式特性的影响, 如图 5 所示是有效折射率与纤芯厚度之间的变化规律。

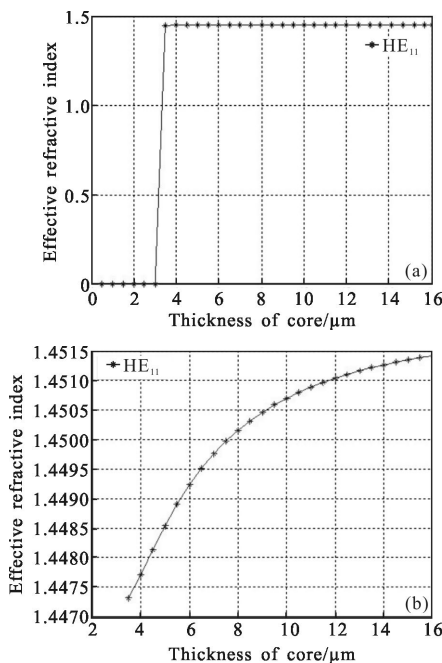


图 5  $HE_{11}$  模式的有效折射率与纤芯厚度之间的关系

Fig.5 Relationship between the effective refractive of  $HE_{11}$  and the core thickness in HOF

假定  $n_{air}=1.0, n_{core}=1.452, n_{clad}=1.447$ , 结合上面的

研究结果, 在此将空心半径设定为  $4.5 \mu\text{m}$ ; 从图 5 中可以看出对于标准单模光纤基模  $HE_{11}$  始终是存在的, 而对于空心光纤, 从图 5(a) 中可以观察出在纤芯厚度小于  $3 \mu\text{m}$  左右时, 纤芯中不存在  $HE_{11}$ , 而纤芯厚度超过  $3 \mu\text{m}$  时, 纤芯中才出现  $HE_{11}$ ; 图 5(b) 是对图 5(a) 中, 纤芯厚度由  $3 \mu\text{m}$  到  $16 \mu\text{m}$  的放大效果, 从曲线可以看出, 随着纤芯厚度不断增加, 基模的有效折射率也缓慢增加; 因此纤芯厚度的变化对基模  $HE_{11}$  的产生有很大的影响, 这一点不同于普通光纤, 值得深入地研究空心半径与纤芯厚度之间的关系。

图 6 所示为基模以及激发模式的有效折射率与波长之间的关系图。

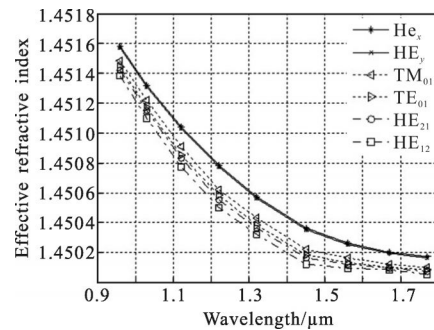


图 6 基模以及激发模式的有效折射率与波长的关系

Fig.6 Relationship between wavelength and the effective index of the fundamental mode and the excited modes in HOF

设定  $n_{air}=1.0, n_{core}=1.452, n_{clad}=1.447, r_{air}=4.5 \mu\text{m}$ , 纤芯厚度为  $4 \mu\text{m}$  时, 从图 6 中可以看出,  $HE_{11}$  模式属于二重简并, 类似于传统的石英纤芯光纤; 然而, 激发模式并不再保持简并方式, 而是分解成具有明显偏振特性的  $TM_{01}$  模式,  $TE_{01}$  模式以及  $HE_{21}$  模式<sup>[7-9]</sup>。

接下来分析包层个数的变化对基模特性的影响; 设定  $n_{air}=1.0, n_{core}=1.452, n_{clad}=1.447, r_{air}=4.5 \mu\text{m}$ , 包层的个数由 1 层增加到 6 层, 包层之间的相对折射率差为  $\Delta=0.3\%$ ; 图 7 代表包层为 3 时的各层折射率结构图。

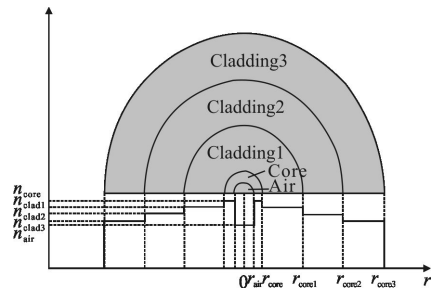


图 7 折射率结构分布图

Fig.7 Refractive index profile of a HOF

其中,三个包层的厚度都是  $18\ \mu\text{m}$ 。

而图8表示随着包层个数不断增加的状态下, $\text{HE}_{11}$ 模式波长与有效折射率的关系。

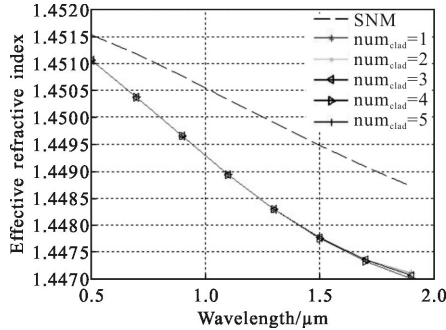


图8  $\text{HE}_{11}$ 模式波长与有效折射率的关系(包层数由1增加到5)  
Fig.8 Relationship between wavelength and effective indexes of  $\text{HE}_{11}$  in HOF(cladding layer number increased from 1 to 5)

随着包层个数由1层增加到5层时, $\text{HE}_{11}$ 模式一直存在,在波长不断增加时,有效折射率不断减小;并且从图中可以很明显地得出,包层个数的增加对有效折射率曲线基本上无影响;因为模式基本上都被限制在纤芯区域内,因此包层个数变化对模式特性基本无影响。

因此当邻近纤芯区域的包层与纤芯区域之间的有效折射率差设计合理时,包层个数的变化对模式特性的影响可以忽略掉。

#### 4 总结

文中对HOF的基模特性进行了深入的研究,获得了HOF中TE、TM模式的色散关系表达式,以及电场分量 $H_z$ 和 $E_z$ 在不同区域的表达式;并利用矢量方法计算出模式的传输常数以及基模的横向电场;重点分析研究了空心光纤的结构参数的变化对模式特性的影响(如增加纤芯的厚度、空心半径的增加,包层个数的变化等);研究结果表明,空心光纤的纤芯厚度、空心半径、波长的变化都会对模式特性产生一定的影响;而在模式都被限定在纤芯区域时,包层数量的变化对模式特性的影响可以忽略不计。因此在设计合理的空心光纤时,必须对空心光纤的主要

参数进行控制。

#### 参考文献:

- [1] Sejin Lee, Jiyoung Park, Yoonseob Jeong, et al. Guided wave analysis of hollow optical fiber for mode-coupling device applications [J]. *J Lightw Technol*, 2009, 27 (22): 4919–4926.
- [2] Daisuke Kusakari, Hisanao Hazama, Rinna Kawaguchi, et al. Evaluation of the bending loss of the hollow optical fiber for application of the carbon dioxide laser to endoscopic therapy [J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(4): 14–19.
- [3] Yang Hong, Sun Xiaohan, Zhang Mingde. Experiment and theory analysis of hollow [J]. *Electronic Components & Materials*, 2003, 22(5): 17–20. (in Chinese)  
杨红, 孙小菡, 张明德. 空心光纤特性分析与实验研究[J]. *电子元件与材料*, 2003, 22(5): 17–20.
- [4] Partha Roy Chaudhuri, Lu C, Xiaoyan W. Scalar modal and exact vectorial description for the design analysis of hollow optical fiber components [J]. *Optics Communications*, 2003, 228: 285–293.
- [5] P Roy Chaudhuri, C Lu, W Xiaoyan. Guided modes of hollow optical fiber based components: analytical solutions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23: 159–160.
- [6] Zhao Chujun, Tang Zhixiang, Ye Yunxia, et al. Field and dispersion properties of subwavelength-diameter hollow optical fiber[J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 1143–1149.
- [7] Choi S, Oh K, Shin W, et al. Novel mode converter based on hollow optical fiber for gigabit LAN communication[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(2): 248–250.
- [8] Yang Hong, Sun Xiaohan. Experiment and theory analysis of hollow optical fiber[J]. *Electronic Components & Materials*, 2012, 2(5): 17–21.
- [9] Li Mingjun, Chen Xin, Liu Anping, et al. Limit of effective area for single-mode operation in step-index large mode area laser fibers[J]. *J Lightw Technol*, 2009, 27(15): 3010–3016.
- [10] Kwang Taek Kim, Hyo Kyeom kim. Characterization of evanescent wave coupling in side-polished hollow optical fiber and its application as a broadband coupler [J]. *Optics Communications*, 2005, 245: 145–151.