

文章编号: 0253-2239(2004)11-1477-4

# 空气孔辅助光纤的模式截止

任国斌<sup>1,2</sup> 王 智<sup>1</sup> 娄淑琴<sup>1</sup> 简水生<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京交通大学光波所, 北京 100044  
<sup>2</sup> 海北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

**摘要:** 光纤的截止波长是光纤设计的重要参量之一。利用全矢量正交函数模型对空气孔辅助光纤的模式截止特性进行了讨论。分析表明: 由于光纤包层中存在空气孔, 即使不考虑材料色散, 包层的有效折射率也与波长有关; 包层有效折射率由包层中空气孔的大小和波长决定, 与芯子的掺杂浓度无关。在所研究的波长范围之内, 与传统的 W 型光纤类似, 在包层中空气孔的相对尺寸  $d/\Lambda$  较大时出现了基模截止现象。 $d/\Lambda$  从 0.2 到 0.9 变化时, 光纤的各阶模式的截止波长都随之减小; 各阶模式的截止波长随  $d/\Lambda$  变化曲线的斜率随模式阶次的升高而降低。

**关键词:** 微光学; 微结构光纤; 空气孔辅助光纤; 模式; 截止

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## Mode Cutoff in Hole-Assisted Optical Fibers

Ren Guobin<sup>1,2</sup> Wang Zhi<sup>1</sup> Lou Shuqin<sup>1</sup> Jian Shuisheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)  
(<sup>2</sup> Physics and Technology College, Hebei University, Baoding 071002)

(Received 30 October 2003; revised 22 December 2003)

**Abstract:** Cutoff wavelength is an important parameter for optical fiber. The cutoff properties of hole-assisted optical fibers that comprise six air holes in cladding are investigated by a full vector orthogonal function model. It is shown that when the material dispersion is neglected, the effective cladding index is a function of wavelength due to the introduction of air hole into the cladding of fiber; the effective cladding index is determined by the relative air hole size in cladding, and independent of the relative index difference of doped core. The fundamental mode cutoff occurs only if  $d/\Lambda$  is large enough, which is similar to the case of traditional W-shaped refractive index fibers. The cutoff wavelength of each mode decreases as the relative air hole size  $d/\Lambda$  increases from 0.2 to 0.9; the slope of cutoff wavelength versus  $d/\Lambda$  curve decreases as the order of mode increases.

**Key words:** micro optics; microstructured optical fiber; hole-assisted optical fibers; mode; cutoff

## 1 引 言

微结构光纤 (Microstructured optical fiber, MOF) 通常指在光纤包层中引入纵向均匀的空气孔而构成的单一材料光纤。微结构光纤又称作光子晶体光纤或多孔光纤。由于具备独特的光学传输特性<sup>[1~3]</sup>, 以及在光纤通信和光纤传感领域的广阔应用前景, 近几年对微结构光纤的理论和实验研究引起了极大的关注。目前已广泛应用于光通信与光电子学的前沿研究<sup>[4~6]</sup>。

微结构光纤的一种设计方案是在光纤包层中只引入一层空气孔, 空气孔的排列方式为正四边形、五边形或六边形, 在光纤芯子位置可以引入掺杂区, 如图 1 所示。可以称这种光纤为空气孔辅助光纤 (Hole-assisted optical fibers, HOF), 目前已有基于这种光纤的光纤光栅、可调谐光学衰减器、耦合器等实验报道<sup>[7,8]</sup>。截止波长是光纤的重要参量之一, 它决定了光纤中的模式数量。但到目前为止, 关于空气孔辅助光纤的模式特征, 尤其是模式的截止特性研究还未见报道。本文讨论了六孔空气孔辅助光纤的模式特征, 研究了空气孔辅助光纤中的模式截止问题, 得到了光纤的截止波长与结构参量之间的关系。

E-mail: guobin\_ren@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-10-30; 收到修改稿日期: 2003-12-22

## 2 空气孔辅助光纤的模式

应用全矢量正交函数模型分析其模式截止特征。对于纵向(传播方向)均匀的空气孔辅助光纤,其横向

折射率分布可以用余弦函数展开并选取厄米-高斯函数将模式电场展开。横向模式电场  $e_x(x, y)$ 、 $e_y(x, y)$  的耦合波动方程就转化为本征方程<sup>[9,10]</sup>:

$$\begin{bmatrix} I_{abcd}^{(1)} + k^2 I_{abcd}^{(2)} + I_{abcd}^{(3)x} & I_{abcd}^{(4)x} \\ I_{abcd}^{(4)y} & I_{abcd}^{(1)} + k^2 I_{abcd}^{(2)} + I_{abcd}^{(3)y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

交叠积分  $I^{(1)}, I^{(2)}, I^{(3)}, I^{(4)}$  存在解析的表达式。通过在给定的波长求解本征方程(1),就可以得到对应模式的本征值及相应的本征向量,进而求得相应的传播常量与模场分布。

本文讨论的空气孔辅助光纤的折射率分布如图1所示,光纤的芯子半径为  $R$ ,掺杂区的相对折射率差为  $\Delta$ ; 光纤包层中存在6个大小相同的圆形空气

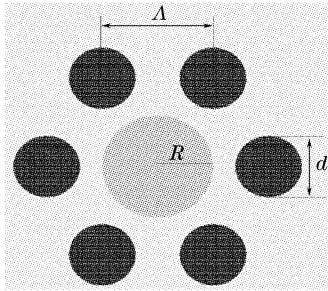


Fig. 1 Schematic diagram of HOF

孔,以芯子为中心,呈正六边形排列,空气孔的直径为  $d$ ,空气孔的间距为  $\Lambda$ 。为了验证数值方法的可靠性,计算了阶跃光纤的截止波长,参量为:光纤芯子半径  $R = 3 \mu\text{m}$ ,相对折射率差  $\Delta = 0.5\%$ 。计算得到光纤二阶模和三阶模截止波长为:  $1.12578 \mu\text{m}$ ,  $0.71231 \mu\text{m}$ ,和理论值  $1.13185 \mu\text{m}$ ,  $0.71037 \mu\text{m}$  比较,相对误差分别为  $0.54\%$ ,  $0.27\%$ 。由此可以认为该算法是可靠的。选取空气孔辅助光纤结构参量为:  $\Delta = 0.5\%$ ,  $\Lambda = 6 \mu\text{m}$ ,  $R = 3 \mu\text{m}$ ,相对空气孔尺寸  $d/\Lambda = 0.8$ ,波长为  $\lambda = 0.81 \mu\text{m}$ 。计算表明此时空气孔辅助光纤中只存在基模和二阶模,图2为空气孔辅助光纤中的基模、二阶模的二维电矢量分布图。我们注意到空气孔辅助光纤中的模式与阶跃光纤的矢量模相似,按其电矢量分布,可分别称之为  $\text{HE}_{11}$ ,  $\text{HE}_{21}$ ,  $\text{TE}_{01}$ ,  $\text{TM}_{01}$  模。 $\text{HE}_{11}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的简并模式在这里不再给出。

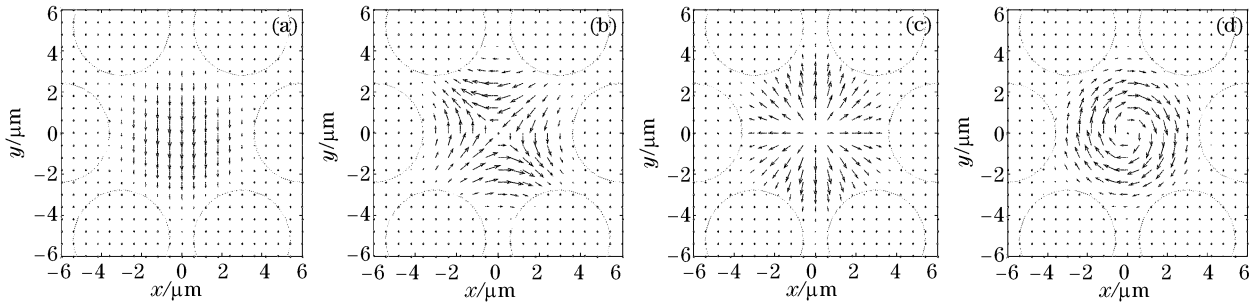


Fig. 2 Electric vector distributions for fundamental mode and second order modes of HOF. They correspond to (a)  $\text{HE}_{11}$ , (b)  $\text{HE}_{21}$ , (c)  $\text{TM}_{01}$ , (d)  $\text{TE}_{01}$

## 3 模式截止

为讨论空气孔辅助光纤的模式截止问题,在给定光纤结构参量的条件下,计算得到不同波长的各阶模式的模式折射率,见图3。空气孔辅助光纤的结构参量的选取与第2节中相同。计算时忽略光纤的材料色散并假设石英的折射率  $n_{\text{SiO}_2} = 1.444$ 。模式  $\text{HE}_{11}$  对应标量近似的  $\text{LP}_{01}$  模,为光纤的基模;模式  $\text{HE}_{21}$ ,  $\text{TE}_{01}$  和  $\text{TM}_{01}$  近似简并成为标量  $\text{LP}_{11}$  模,为光纤的二阶模;而  $\text{EH}_{11}$  和  $\text{HE}_{31}$  模对应着标量  $\text{LP}_{21}$  模,为光纤的三阶模。值得注意的是由于  $\text{HE}_{31}$  模具有与波导结

构相同的对称性  $C_{6v}$ ,在所研究的空气孔辅助光纤中,  $\text{HE}_{31}$  模的简并被破坏而形成两个非简并的模式<sup>[10]</sup>。由于模式  $\text{HE}_{21}$ ,  $\text{TE}_{01}$  和  $\text{TM}_{01}$  以及  $\text{EH}_{11}$  和  $\text{HE}_{31}$  模的模式折射率非常接近,在图中难以区分。

图3中模式折射率随波长变化存在3个明显特征:第一,无论基模、二阶模还是三阶模,都在某一波长位置出现了突变,这意味着在这些波长位置,相应的模式出现了截止。对应基模、二阶模和三阶模,截止波长分别为  $1.81 \mu\text{m}$ 、 $0.955 \mu\text{m}$  和  $0.67 \mu\text{m}$ 。以二阶模为例,图4是这样得到的:在给定的波长解本

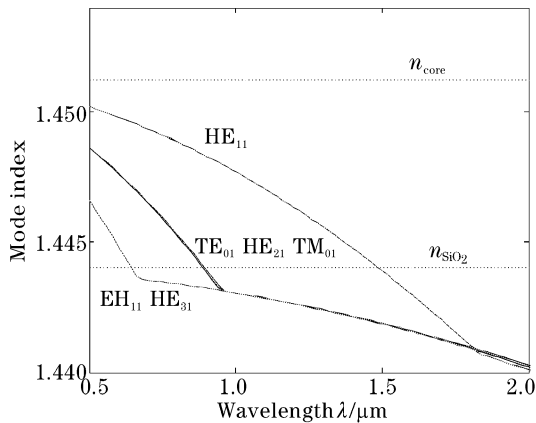


Fig. 3 Mode refractive indexes of first six modes for HOF  
征方程(1),得到相应的传播常量和特征向量,特征

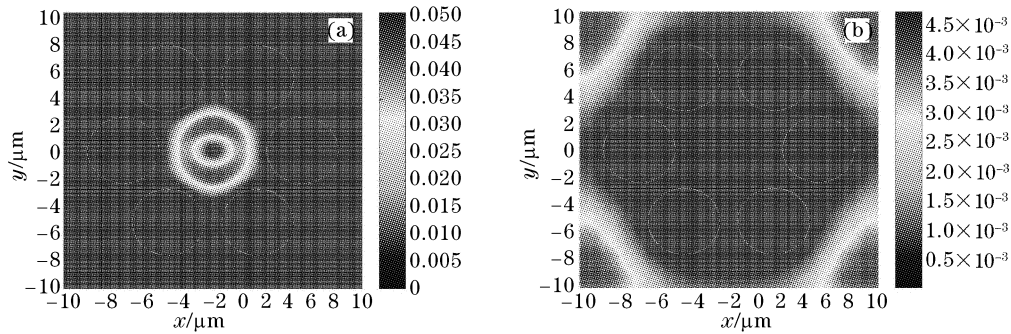


Fig. 4 Intensity of electric field for mode  $HE_{21}$  at wavelength (a)  $0.95 \mu\text{m}$ , (b)  $0.96 \mu\text{m}$

第二,图3中,模式截止之后模式折射率都趋于同一条曲线。类比阶跃光纤,可以认为这条曲线即为包含6个空气孔的包层的有效折射率  $n_{\text{cliff}}$ ,当光纤中的模式折射率低于包层有效折射率时,模式截止。注意到包层有效折射率是波长的函数,有效折射率随波长的增大而减小。由于空气孔辅助光纤包层由包含6个空气孔的石英材料构成,在假定石英材料折射率不变的情况下,当光纤的芯径不变时,空气孔辅助光纤包层的有效折射率  $n_{\text{cliff}}$  由空气孔的尺寸( $d/\Lambda$ )决定,并与波长有关;在空气孔尺寸相同的情况下,包层有效折射率相同。为了验证此推论,我们分析了保持参量  $\Lambda=6 \mu\text{m}$ ,  $R=3 \mu\text{m}$  不变,掺杂浓度( $\Delta$ )及空气孔尺寸不同时的包层有效折射率,如图5。在空气孔尺寸不变( $d/\Lambda=0.8$ ), $\Delta$ 分别为0.5%、0.4%、0.3%时, $n_{\text{cliff}}$ 图中曲线几乎完全重叠,即包层有效折射率不变。图中同时给出了 $\Delta$ 不变,空气孔尺寸不同的 $n_{\text{cliff}}$ 的比较。在给定的波长位置,空气孔越大,包层有效折射率越小。此外对于特定结构的空气孔辅助光纤, $n_{\text{cliff}}$ 随波长的增大而减小。

空气孔辅助光纤模式的第三个重要特点是基模会在长波长出现截止现象。这一现象也存在于传统

向量对应的是模式场的展开式系数<sup>[10]</sup>,将展开式系数代入模式场的展开式就得到了模式电场的分布。在截止波长处, $HE_{21}$ 模的电场分布迅速由空气孔辅助光纤芯子内转移到包层(空气孔的外侧),模式由束缚模转变为非束缚模,导致了模式的截止。在阶跃光纤中,某一模式的模式折射率  $n_{\text{eff}}=\beta/k_0$  ( $\beta$ 、 $k_0$ 为模式的传播常量和真空波矢量)小于包层的折射率  $n_{\text{cl}}$ 时,光纤的径向传播常量变为实数,即光场会沿径向向外传播,模式成为辐射模。对于空气孔辅助光纤,其模式折射率  $n_{\text{eff}}$ 小于包层中纯石英折射率时仍然可以是导模,这是由于包层中空气孔的存在降低了其有效折射率。为便于比较,图3中给出了光纤掺杂芯子和纯石英的折射率  $n_{\text{core}}$ 和  $n_{\text{SiO}_2}$ 。

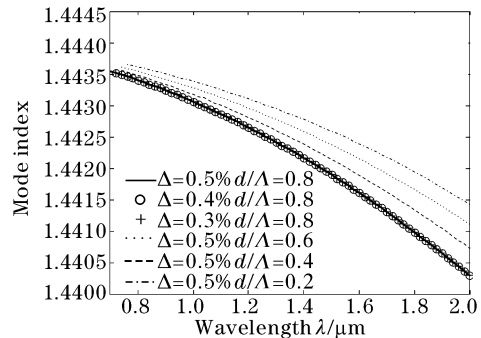


Fig. 5 Effective index of cladding for HOF

的W型光纤中<sup>[11]</sup>。随着波长的增大,光场将会向包层中扩展,当波长增大到一定尺度,光波电磁场所感受到光纤的芯子由掺杂区变为包含空气孔的整个低折射率区域,由于这一区域的平均折射率低于石英的折射率,导致了基模的截止。

#### 4 截止波长与结构参量 $d/\Lambda$ 的关系

分析表明,空气孔辅助光纤各阶模的截止波长与其结构参量,掺杂 $\Delta$ 、掺杂区大小 $R$ ,相对空气孔尺寸 $d/\Lambda$ 等有关。由于麦克斯韦方程的比例性质,对截止波长,我们用无量纲的归一化截止波长  $\lambda_c/\Lambda$

表示。图 6 为空气孔辅助光纤的  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  模的归一化截止波长与相对空气孔尺寸  $d/\Lambda$  的关系, 其他参量选取与图 2 相同。在  $d/\Lambda$  从 0.2 到 0.9 的范围内, 随空气孔的增大, 各阶模式的截止波长减小。这个结论和将空气孔辅助光纤等效为阶跃光纤得到的结果似乎存在矛盾。对于阶跃光纤,  $V$  参量定义为

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2},$$

其中  $a$  为光纤的芯子半径;  $n_{\text{core}}$  为芯子(掺杂区)的折射率;  $n_{\text{clad}}$  为光纤包层折射率。注意到  $n_{\text{clad}}$  越小, 光纤的截止波长越大。而对于空气孔辅助光纤,  $n_{\text{clad}}$  对应包层有效折射率  $n_{\text{cl,eff}}$ 。由图 5, 包层空气孔越大, 包层有效折射率  $n_{\text{cl,eff}}$  越小, 相应地截止波长也应增大。但空气孔辅助光纤各阶模式的截止波长随空气孔的增大而减小。实际上,  $V$  参量中的  $a$  也应视为等效芯径, 它是相对空气孔尺寸  $d/\Lambda$  的函数, 并随  $d/\Lambda$  的增大而减小。正是因为等效芯径随  $d/\Lambda$  的变化导致了各阶模式的截止波长随空气孔的增大而减小。

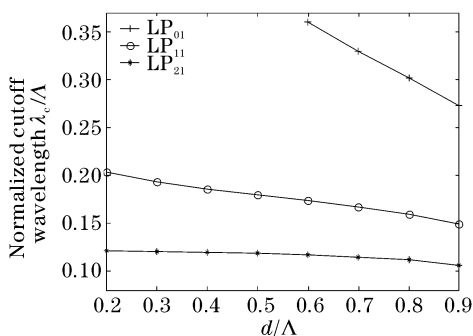


Fig. 6 The dependence of normalized cutoff wavelength on relative air hole size  $d/\Lambda$

图 6 中,  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  模的归一化截止波长随  $d/\Lambda$  变化的速率不同: 基模  $LP_{01}$  随  $d/\Lambda$  变化的速度最快, 二阶模  $LP_{11}$  次之, 三阶模  $LP_{21}$  最慢。图 6 中的 3 条曲线将空气孔辅助光纤的工作区域分为几部分: 基模截止曲线之上为截止区, 即在这个区域不存在任何模式; 基模截止曲线和二阶模截止曲线之间为基模区, 在这里空气孔辅助光纤为单模光纤; 二阶模截止曲线和三阶模截止曲线之间存在基模和二阶模。由于当空气孔辅助光纤中空气孔较小(例如小于 0.2)时, 要求计算精度极高, 计算量很大。

由于光纤包层中引入了空气孔, 空气孔辅助光纤展现出与阶跃光纤不同的截止特性。调节光纤的结构参量可以设计其截止波长。此外, 通过对空气孔辅助光纤结构进行设计可以实现对光纤传输特性

如色散、有效面积、双折射等的特殊要求。

**结论** 在给定的波长范围, 截止波长决定了光纤中的模式数量。应用全矢量正交函数模型对空气孔辅助光纤的截止特性进行了讨论。与阶跃光纤类似, 空气孔辅助光纤中存在  $HE_{11}$ ,  $HE_{21}$ ,  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  等模式。在包层空气孔较大时, 这些模式都会出现截止现象。由于包层中存在空气孔, 不考虑材料色散的情况下, 包层的有效折射率不再是常量, 成为与波长有关的函数。包层有效折射率由包层中空气孔的尺寸决定, 与芯子的掺杂浓度无关。随波长的增大, 包层有效折射率降低; 在特定的波长, 空气孔越大, 包层有效折射率越低。在包层中空气孔的相对尺寸  $d/\Lambda$  从 0.2 到 0.9 变化时, 光纤的二阶模, 三阶模的截止波长都随之减小。在所研究的波长范围之内, 只有  $d/\Lambda$  较大时才会出现基模截止。随模式阶数的升高, 模式截止波长随  $d/\Lambda$  变化的速度减小: 基模  $LP_{01}$  随  $d/\Lambda$  变化的速度最快, 二阶模  $LP_{11}$  次之, 三阶模  $LP_{21}$  更次之。

#### 参 考 文 献

- 1 Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 2 Wadsworth W J, Knight J C *et al.*. Soliton effects in photonic crystal fibers at 800 nm. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(1): 53~55
- 3 Ferrando A, Silvestre E, Miret J J *et al.*. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(12): 790~792
- 4 Wadsworth W J, Percival R M, Bouwmans G *et al.*. High power air-clad photonic crystal fibre laser. *Opt. Express*, 2003, **11**(1): 48~53
- 5 Eggleton B J, Westbrook P S *et al.*. Grating resonances in air-silica microstructured optical fibers. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1460~1462
- 6 Kakarantzas G, Ortigosa-Blanch A *et al.*. Structural rocking filters in highly birefringent photonic crystal fiber. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3): 158~160
- 7 Eggleton B J, Kerbage C *et al.*. Microstructured optical fiber devices. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 698~731
- 8 Kerbage C, Ging J *et al.*. Air-silica microstructure fiber based variable optical attenuator device. OFC 2002, ThK4
- 9 Zhi W, Guobin R, Shuqin L *et al.*. Novel supercell lattice method for the photonic crystal fibers. *Opt. Express*, 2003, **11**(9): 980~991
- 10 Guobin R, Zhi W, Shuqin L *et al.*. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers. *Opt. Express*, 2003, **11**(11): 1310~1321
- 11 Kawakami S, Nishida S. Characteristics of a doubly clad optical fiber with a low-index inner cladding. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1974, **QE-10**(12): 879~887