

孔助光纤 (Hole-assisted lightguide fiber) 色散和双折射特性的研究*

栗岩锋 王清月 刘博文 胡明列

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

摘要 通过改变包层中空气孔的参数, 孔助光纤(hole-assisted lightguide fiber)具有比传统光纤更容易调节的色散和双折射特性. 采用有限差分法研究了包层空气孔数目、大小和位置等参数对孔助光纤色散和双折射特性的影响. 数值计算结果表明: 增加空气孔的数目和尺寸以及减小空气孔到纤芯的距离都能够使得零色散向短波长方向移动, 减小空气孔与纤芯的距离有助于获得更大的双折射.

关键词 孔助光纤(hole-assisted lightguide fiber); 微结构光纤; 有限差分法; 色散; 双折射

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 微结构光纤 (microstructured optical fiber), 又称为光子晶体光纤 (photonic crystal fiber) 或多孔光纤 (holey fiber), 由于具有诸多传统光纤所不具备的特性而受到广泛的关注^[1,2], 并已经能够像传统光纤^[3]那样做成光纤激光器^[4]. 微结构光纤通常由一种材料 (熔石英^[1] 或聚合物^[5]) 拉制而成, 其导光原理为改进的全内反射 (modified total internal reflection) 或光子带隙效应 (photonic bandgap effect)^[2]. 依赖于改进的全内反射导光的微结构光纤, 因为目前的拉制工艺尚不完善以及其模式从严格意义上说是泄漏模^[6], 所以其损耗尚不能降低到传统光纤的损耗水平. 为此, Hasegawa 等在依赖于改进的全内反射导光的微结构光纤的基础上提出了一种新的微结构光纤 - 孔助光纤 (hole-assisted lightguide fiber, HALF) 的概念^[7], 它仍旧利用传统光纤的全内反射来实现光的传导, 但是结合了微结构光纤和传统光纤两者的优点, 将波长 1550 nm 处的损耗降低到传统光纤的损耗水平 -0.41 dB/km.

孔助光纤通过掺杂使芯层和包层具有一定的折射率差来实现光的传导, 这与传统光纤的全内反射原理相同, 而包层中引入一层规则排布的空气孔则是借鉴了微结构光纤的特点. 由于利用全内反射原理实现光的传导并且减少了包层中空气孔的数目, 孔助光纤包层空气孔中光场的功率大大降低, 因而降低了损耗^[7]. 孔助光纤包层中的这层空气孔的参数像微结构光纤中那样在很大程度上可以调节, 比

如改变空气孔的数目、大小和位置等, 因而能够呈现出类似于微结构光纤、比传统光纤更容易调节的色散和双折射特性, 因而研究这些参数对孔助光纤的色散和双折射特性对该种光纤的优化设计具有实际意义.

1 有限差分法模型

有限差分法是光波导分析中广为采用的数值方法之一, 它利用台劳展开将有限差分式代替波动方程中的微分式, 得到关于场分量的有限差分方程.

可以像研究微结构光纤那样^[8], 采用基于半矢量波动方程的差分法对孔助光纤进行研究. 在纵向 (z 向) 均匀分布的光纤中, 假定电场的两个偏振分量 E_x 和 E_y 中的某一个偏振分量为零, 那么横向的波动方程将变为两个独立的分别关于两个偏振分量 E_x 和 E_y 的半矢量形式的波动方程

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial \epsilon_r}{\partial x} E_x \right) + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k_0^2 \epsilon_r - \beta^2) E_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial \epsilon_r}{\partial y} E_y \right) + \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k_0^2 \epsilon_r - \beta^2) E_y = 0 \quad (2)$$

式中, E_x 和 E_y 是电场的两个偏振分量, ϵ_r 是相对介电常数, k_0 是真空中波数, $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$ 为传播常数, n_{eff} 为模式有效折射率.

在 x, y 方向采用相同的网格间距 h , 利用五点差分格式可以建立基于半矢量波动方程 (1)、(2) 的差分方程^[9]

$$\alpha_w E_{p-1,q} + \alpha_e E_{p+1,q} + \alpha_n E_{p,q-1} + \alpha_s E_{p,q+1} + (\alpha_x + \alpha_y) E_{p,q} + \{k_0^2 \epsilon_r(p,q) - \beta^2\} E_{p,q} = 0 \quad (3)$$

式中 E 为 E_x 或 E_y , p, q 为网格点编号.

对于 E_x , 各项系数为

$$\alpha_w = \frac{2}{h^2} \frac{\epsilon_r(p-1,q)}{\epsilon_r(p,q) + \epsilon_r(p-1,q)},$$

*国家自然科学基金(批准号:60278003)和国家重大基础研究项目(批准号:G1999075201)资助课题
Tel:022-27404204 Email:li-yanfeng@163.com
收稿日期:2003-09-24

$$\alpha_e = \frac{2}{h^2} \frac{\epsilon_r(p+1, q)}{\epsilon_r(p, q) + \epsilon_r(p+1, q)}, \alpha_n = \frac{1}{h^2}, \alpha_s = \frac{1}{h^2},$$

$$\alpha_x = -\frac{4}{h^2} + \alpha_e + \alpha_w, \alpha_y = -\alpha_n - \alpha_s,$$

对于 E_z , 各项系数为: $\alpha_w = \frac{1}{h^2}, \alpha_e = \frac{1}{h^2}$

$$\alpha_n = \frac{2}{h^2} \frac{\epsilon_r(p, q-1)}{\epsilon_r(p, q) + \epsilon_r(p, q-1)}$$

$$\alpha_s = \frac{2}{h^2} \frac{\epsilon_r(p, q+1)}{\epsilon_r(p, q) + \epsilon_r(p, q+1)}, \alpha_x = -\alpha_e - \alpha_w$$

$$\alpha_y = -\frac{4}{h^2} + \alpha_n + \alpha_s,$$

方程(3)可化为特征值方程

$$[A] \{E\} = \beta^2 \{E\} = k_0^2 n_{\text{eff}}^2 \{E\} \quad (4)$$

式中 A 为系数矩阵, E 为由各网格点构成的向量.

2 数值计算结果及讨论

2.1 孔助光纤色散特性的研究

孔助光纤的结构及参数如图 1 所示. 像微结构光纤那样, 孔助光纤包层中空气孔的引入使得包层的有效折射率减小, 因而波导色散的贡献增大, 结果零色散点能够向短波长方向移动, 在通讯波段具有更大的反常色散.

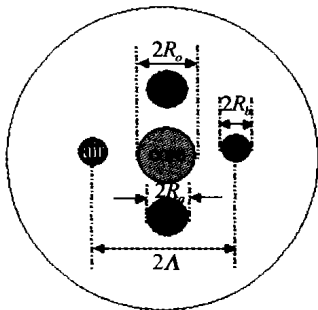


图 1 孔助光纤横截面结构及其参数示意图

Fig. 1 Schematic of the cross section of a HALF and its parameters

首先, 研究包层中空气孔的数目和大小对孔助光纤色散特性的影响, 计算中所取的光纤参数为 $n_{\text{core}} = n_{\text{silica}}, \Delta n = n_{\text{core}} - n_{\text{clad}} = 0.01, \Lambda = 5 \mu\text{m}, R_c = 2 \mu\text{m}$. 图 2 给出了 $R_a = R_b = 2 \mu\text{m}$, 空气孔数目分别为 4、6、8 时的色散曲线, 图中还给出了石英的材料

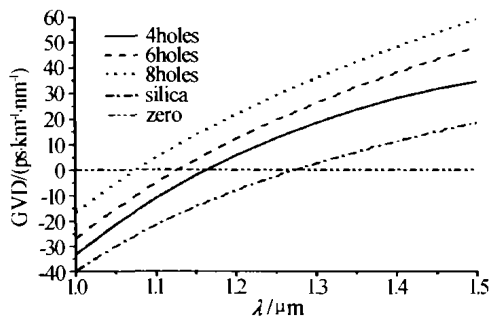


图 2 孔助光纤色散随空气孔数目的变化

Fig. 2 Dispersion of HALF as a function of air hole number

色散. 可见随着包层空气孔数目的增多, 由于波导色散贡献增大, 孔助光纤的零色散点向短波长方向移动. 同增加空气孔的数目一样, 可以预见增加空气孔的尺寸同样能够使得孔助光纤的零色散点向短波长方向移动. 图 3 给出了空气孔数目为 6, $R_a = R_b$ 分别为 $1.5 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 时光纤的色散曲线. 这都与文献[10]中的曲线规律一致.

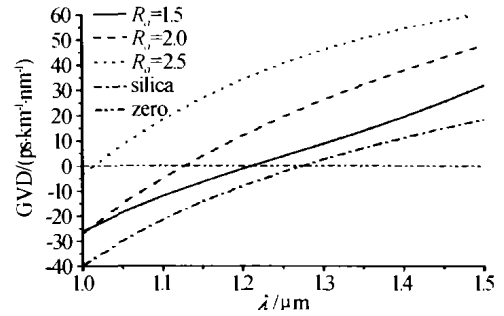


图 3 孔助光纤色散随空气孔大小的变化

Fig. 3 Dispersion of HALF as a function of air hole size

其次, 空气孔的位置同样对孔助光纤的色散能够产生影响, 如图 4 所示. 其中, 空气孔数目为 6, $R_a = R_b = 2 \mu\text{m}, \Lambda$ 分别为 $5 \mu\text{m}, 5.5 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$. 可见, 空气孔与纤芯距离的增大降低了空气孔的作用, 包层的有效折射率增大, 从而波导色散的贡献减小, 零色散点向长波长方向移动.

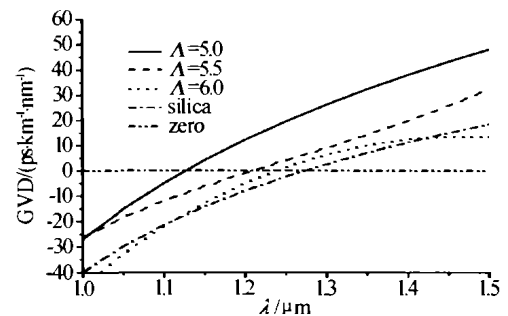


图 4 孔助光纤色散随空气孔位置的变化

Fig. 4 Dispersion of HALF as a function of air hole position

2.2 孔助光纤双折射特性的研究

包层空气孔排布具有 2 次以上对称结构的微结构光纤的基模是简并的^[11,12], 打破这种对称结构, 比如包层某一方向的空气孔具有不同的尺寸或者空气孔成椭圆形都能够使微结构光纤具有很强的双折射特性, 而且这种形状双折射可以比传统光纤的双折射高一个数量级. 类似地, 采用同样的方法, 改变孔助光纤包层中空气孔的排布和参数很容易实现与传统光纤相当的双折射^[10].

以包层中具有 4 个空气孔的孔助光纤为例, 研究空气孔的大小和位置对孔助光纤双折射特性的影响. 如图 1 所示, x 方向和 y 方向的空气孔大小不同, 参数为 $n_{\text{core}} = n_{\text{silica}}, \Delta n = n_{\text{core}} - n_{\text{clad}} = 0.01, \Lambda = 5 \mu\text{m}, R_c = 2 \mu\text{m}, R_a = 2 \mu\text{m}$. 图 5 绘出了 y 方向的空气孔大小 R_a 保持不变, 而仅改变 x 方向空气孔的大

小 R_b 时孔助光纤双折射 $B = |n_x - n_y|$ 的变化情况, 其中忽略了材料色散的影响. 当 $R_b < R_0$ 时, 随着 R_b 的减小, 孔助光纤的双折射随 R_b 的变化不十分明显, 而 $R_b > R_0$ 时, 随着 R_b 的增大, 孔助光纤的双折射随 R_b 的变化加剧, 这与文献[10]中的规律也是一致的. 当 $R_b > R_0$ 时, R_b 的增大意味着空气孔越靠近纤芯, 这样更多的光场能够分布在空气孔中, x 方向和 y 方向偏振的光场分布的不同使得空气孔的相对大小对孔助光纤双折射影响更加显著. 相反, 当 $R_b < R_0$ 时, R_b 的减小使得空气孔远离纤芯, 结果导致光场在空气孔中的分布变弱, 因而孔的相对大小对孔助光纤双折射的影响减小.

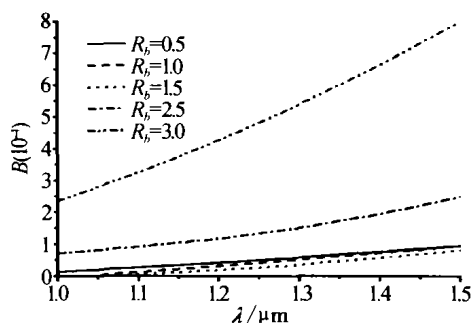


图5 改变 x 方向空气孔大小时双折射的变化情况
Fig. 5 Birefringence of HALF as a function of air hole size in the x direction

图6表示 $R_b = 1 \mu\text{m}$ 时, 孔助光纤双折射随空气孔位置 Λ 的变化情况. 与改变空气孔大小时规律一致, Λ 增大意味着空气孔远离纤芯, 因而孔助光纤的双折射变小, Λ 减小时空气孔靠近纤芯, 孔助光纤的双折射变大.

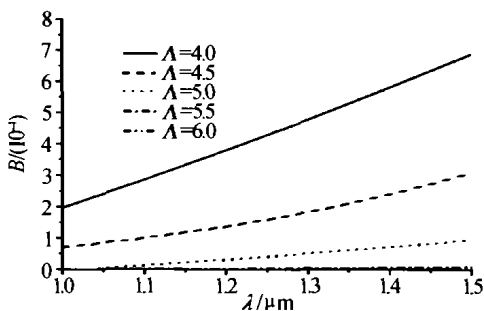


图6 改变空气孔位置时双折射的变化情况
Fig. 6 Birefringence of HALF as a function of air hole position

这样, 包层空气孔的相对大小和位置等参数为双折射孔助光纤的设计提供了比传统光纤更多的自由度.

3 结论

孔助光纤结合了传统光纤和微结构光纤两者的优点, 具有损耗低、比传统光纤容易调节的色散和双

折射等特性. 采用有限差分法研究了孔助光纤包层中空气孔的数目、大小和位置等参数对其色散和双折射特性的影响, 数值计算结果表明: 增加空气孔的数目和尺寸以及减小空气孔到纤芯的距离都能够使得零色散向短波长方向移动, 减小空气孔与纤芯的距离有助于获得更大的双折射. 研究结果对该类光纤的优化和设计具有指导意义.

参考文献

- 1 Knight J C, Birks T A, Russell P St J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Optics Letters*, 1996, **21**(19): 1547 ~ 1549
- 2 Russell P. Photonic crystal fibers. *Science*, 2003, **299**(5605): 358 ~ 362
- 3 侯国付, 李乙钢, 吕可诚, 等. 宽带可调谐掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的研究. *光子学报*, 2002, **31**(12): 1510 ~ 1513
Hou G F, Li Y G, Lü K C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(12): 1510 ~ 1513
- 4 Furusawa K, Malinowski A, Price J H V, et al. Cladding pumped Ytterbium-doped fiber laser with holey inner and outer cladding. *Optics Express*, 2001, **9**(13): 714 ~ 720
- 5 van Eijkelenborg M A, Large M C J, Argyros A, et al. Microstructured polymer optical fibre. *Optics Express*, 2001, **9**(7): 319 ~ 327
- 6 White T P, McPhedran R C, de Sterke C M, et al. Confinement losses in microstructured optical fibers. *Optics Letters*, 2001, **26**(21): 1660 ~ 1662
- 7 Hasegawa T, Sasaoka E, Onishi M, et al. Hole-assisted lightguide fiber for large anomalous dispersion and low optical loss. *Optics Express*, 2001, **9**(13): 681 ~ 686
- 8 De Francisco C A, Borges B V, Romero M A. A semivectorial method for the modeling of photonic crystal fibers. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, **38**(5): 418 ~ 421
- 9 Kawano K, Kitoh T. Introduction to Optical Waveguide Analysis: Solving Maxwell's Equations and the Schrödinger Equation. New York: John Wiley & Sons, 2001. 117 ~ 164
- 10 Zhu Z, Brown T G. Multipole analysis of hole-assisted optical fibers. *Optics Communications*, 2002, **206**(4-6): 333 ~ 339
- 11 Steel M J, White T P, de Sterke C M, et al. Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers. *Optics Letters*, 2001, **26**(8): 488 ~ 490
- 12 Koshiba M, Saitoh K. Numerical verification of degeneracy in hexagonal photonic crystal fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(12): 1313 ~ 1315

Study of Dispersion and Birefringence Properties of Hole-assisted Lightguide Fiber

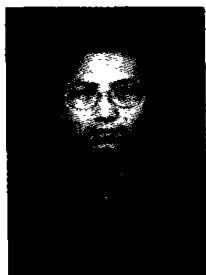
Li Yanfeng, Wang Qingyue, Liu Bowen, Hu Minglie

Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science, Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072

Received date: 2003-09-24

Abstract By changing the air hole parameters in the cladding region, hole-assisted lightguide fiber can display more tailorable dispersion and birefringence than conventional fibers. The finite difference method is used to investigate how the dispersion and birefringence properties of hole-assisted lightguide fibers are influenced by the size, number, and position of the air holes in the fiber cladding. Numerical results indicate that the zero dispersion point can be shifted towards the short wavelength side by increasing the number or size of the air holes and by reducing the distance between the air holes and the fiber core, and that reducing the distance between the air holes and the fiber core can achieve higher birefringence.

Keywords Hole-assisted lightguide fiber; Microstructured optical fiber; Finite difference method; Dispersion; Birefringence



Li Yanfeng was born in 1977, in Hebei Province, China. He received the B. E. degree in optoelectronics from Tianjin University in 1999. He is a Ph. D. candidate in optical engineering with Ultrafast Laser Laboratory and Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science (Ministry of Education), Tianjin University, where he is currently engaged in the research of ultrafast laser and its applications in information science.