

文章编号: 0253-2239(2006)01-0025-4

## 椭圆六角分布微结构光纤中的双折射\*

张 霞 王子南 杨广强 黄永清 任晓敏

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 利用全矢量有限元方法,对椭圆六角对称分布微结构光纤(MF)的双折射特性进行了理论分析,得到了双折射大小与结构参量、入射波长间的依赖关系。分析表明:合理设计结构参量可得到  $10^{-3}$  量级大小的双折射;微结构光纤的双折射对光波波长极其敏感,并出现随波长变化快慢轴交换的现象。采用统计的方法对双折射与微结构光纤空气孔直径随机变化的统计相关性进行了理论分析,假定空气孔直径为高斯分布,获得了双折射大小的平均值和标准偏差与随机变化孔径的统计关系。结果表明,由孔径分布不规则所产生的双折射的大小主要取决于空气孔直径的平均值。

**关键词:** 光纤光学; 微结构光纤; 双折射; 不规则度

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## Birefringence in Squeezed Hexagonal Lattice Microstructure Fiber

Zhang Xia Wang Zinan Yang Guangqiang Huang Yongqing Ren Xiaomin

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Education Ministry of China, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract:** Based on the full-vector finite element method, the birefringence in microstructure fiber with squeezed hexagonal lattice is numerically analyzed. The correlation between the birefringence and the structural parameters, incidence wavelength is obtained. The numerical results show that the birefringence is sensitive to wavelength, and can be achieved by a magnitude of  $10^{-3}$  with a proper design and the fast and slow axes can swap as incidence wavelength is changed. To simulate the practical situation, each air hole diameter is assumed with a Gaussian distribution. The birefringence is found to be largely dependent on the variation of air hole diameter. In the statistical analyses, the correlation between the variation of air hole diameters and the birefringence in such microstructure fiber is obtained. One important result is that the non-intentional birefringence depends on the mean air hole diameter, and a increase of the size of the fiber structure the birefringence.

**Key words:** fiber optics; microstructure fiber; birefringence; irregularity

### 1 引 言

微结构光纤(MF)又称光子晶体光纤<sup>[1,2]</sup>,包层由在二维方向上紧密排列的具有波长量级的微孔组成。微结构光纤展示出许多有别于传统光纤的光学特性<sup>[3~6]</sup>,例如大波长范围内无尽单模传输,在可见和近红外波段色散可控特性,大有效模场面积以及强光学非线性等。近来,微结构光纤的偏振特性受到研究者的广泛关注。由于一般三角格子全内反射(TIR)微结构光纤具有六重旋转对称性,在理论上基模是简并的<sup>[7]</sup>,所以,为实现高模式双折射就要破

坏微结构光纤的六重旋转对称性<sup>[8]</sup>;改变纤芯区域的形状为椭圆或双芯;改变圆空气孔为椭圆等。对于包层为对称结构的高双折射微结构光纤,其双折射集中于纤芯,而空气孔为椭圆时的双折射是全局的,并且双折射随着波长增大而增加。

对微结构光纤进行理论分析的模型和方法有:等效折射率模型、平面波方展开法、基于双正交基的全矢量模型、本地正交函数方法、传输矩阵法、时域有限差分法、有限元法等电磁场计算中的常用方法。其中等效折射率模型方法<sup>[9,10]</sup>非常简单,但是很难对复杂

\* 国家重点基础研究发展计划(2003CB314900)、国家 863 计划(2003AA311010)和教育部科学技术研究重大项目(104046)资助课题。

作者简介: 张 霞(1973~),女,河北人,博士,主要从事光纤通信系统关键技术的研究。E-mail: xzhang@bupt.edu.cn

收稿日期: 2005-03-01; 收到修改稿日期: 2005-04-30

结构得到有效结论。有限元法是一种解决复杂几何结构问题的有效工具,并能够提供全矢量分析。

本文利用全矢量有限元方法对椭圆六角对称分布的微结构光纤的双折射特性进行了分析,并对双折射与空气孔随机不规则度的统计相关性进行了分析。

## 2 微结构光纤的双折射

图 1 所示为椭圆六角对称分布微结构光纤的横截面图。其中,直径为  $d$  的圆形空气孔位于三角形的顶点位置。与传统六角对称分布微结构光纤不同之处是  $x$  轴方向的孔距  $\Lambda_x$  和  $y$  轴方向的孔距  $\Lambda_y$  不同。

有限元方法通过对求解区域离散并根据泛函变分原理,磁场的矢量波动方程化为代数特征值方程<sup>[11]</sup>:

$$\{[A] - n_{\text{eff}}^2[B]\}\{h\} = 0, \quad (1)$$

其中  $[A]$  和  $[B]$  是代数矩阵,特征矢量  $\{h\}$  和特征值  $n_{\text{eff}}^2$  分别代表横截面的全矢量磁场分布和模式的有效折射率的平方。求解此代数特征值方程可以计算光纤的传输模式和模场分布。

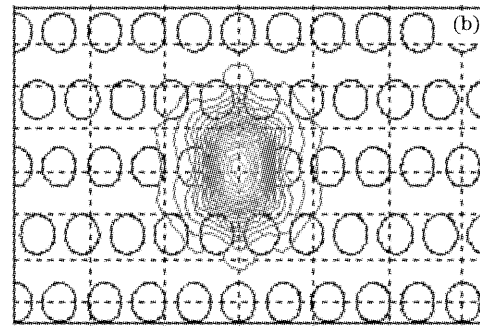
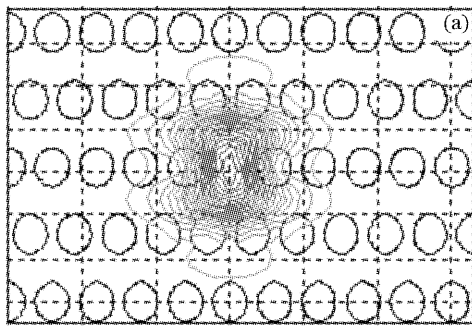


图 2 椭圆六角分布微结构光纤基模两个偏振方向的模场分布。(a)  $|E_x|^2$ , (b)  $|E_y|^2$

Fig. 2  $x$ -polarized and  $y$ -polarized modal field for squeezed hexagonal lattice microstructure fiber. (a)  $|E_x|^2$ , (b)  $|E_y|^2$

模式双折射  $\Delta n$  随  $x$  轴方向孔距  $\Lambda_x$  的变化关系如图 3 所示,孔距  $\Lambda_x$  的变化范围为 0.9 ~

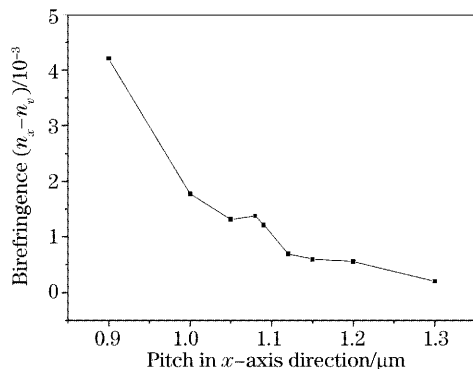


图 3 双折射随  $\Lambda_x$  的变化关系

Fig. 3 Birefringence versus  $\Lambda_x$  for microstructure fiber

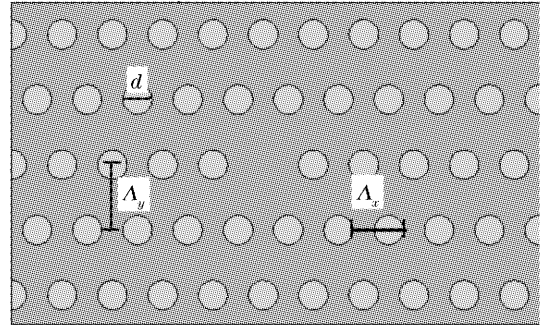


图 1 椭圆六角分布微结构光纤的横截面

Fig. 1 The cross section of the microstructure fiber with squeezed hexagonal lattice

由于结构对称性发生变化,椭圆六角分布微结构光纤基模的两个偏振模式简并被打破。图 2 是利用全矢量的有限元方法计算得到的椭圆六角分布微结构光纤基模两个偏振态的模场分布。具体参量为:二氧化硅折射率为 1.4457,空气孔直径  $d=0.9 \mu\text{m}$ ,孔间距  $\Lambda_x=1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_y=1.56 \mu\text{m}$ ,入射波长  $\lambda=1550 \text{ nm}$ 。 $y$  方向与  $x$  方向偏振模式的有效折射率的差值定义为模式双折射  $\Delta n=n_x-n_y=0.180 \times 10^{-3}$ 。

1.3  $\mu\text{m}$ 。其中,空气孔直径  $d$  为常数  $0.82 \mu\text{m}$ ,入射波长  $\lambda=1550 \text{ nm}$ 。从图 3 可以看出,模式双折射随着  $\Lambda_x$  的减小而显著增大。这是因为  $\Lambda_x$  越小,也就是微结构光纤  $x$  方向和  $y$  方向的周期结构差异越大,致使两个正交偏振方向的有效折射率差异越大,所以会产生更大的模式双折射。

图 4 为椭圆六角微结构光纤的双折射与空气孔直径  $d$  的关系, $d$  的变化范围从  $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 。从图 4 可以看出,随着空气孔直径的增大,双折射先是从负值逐渐减小至 0 后增大为正值,即发生了快慢轴的交换;随后双折射增大到一定程度后又开始逐渐减小至 0 并再次改变符号,此时发生了快慢轴的第二次交换,此后随着空气孔直径的进一步增大,双折射单调增大。微结构光纤的空气孔直径越大对光

的束缚能力越强,也就是光越集中于纤芯区域,此时双折射的产生主要来源于纤芯的椭圆结构;当空气孔直径变小时,纤芯对光的束缚能力减弱,双折射主要来源于包层的椭圆对称结构;空气孔直径继续减小,光弥散于纤芯和包层中,纤芯区域再次起到主导作用。

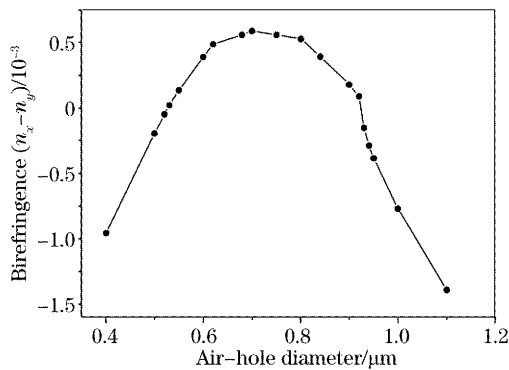


图 4 双折射随空气孔直径  $d$  的变化关系。

结构参量:  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_y = 1.56 \mu\text{m}$

Fig. 4 Birefringence versus air-hole diameter  $d$  for microstructure fiber with  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_y = 1.56 \mu\text{m}$

椭圆六角微结构光纤的双折射随入射波长  $\lambda$  的变化关系如图 5 所示,二氧化硅材料折射率随入射波长变化符合塞耳迈耶方程,选择入射波长的变化范围为  $0.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 。从图 5 可以看出,随着入射波长的增加,双折射先是缓慢增大然后开始减小,经过一个零双折射点后快慢轴交换,双折射从负值变为正值;入射波长为长波长时对双折射的影响比短波长时要大很多。微结构光纤  $x$  轴和  $y$  轴方向上各自的色散特性如图 6 所示,从图中可知: $x$  轴和  $y$  轴方向上的色散值大小相差不大,在入射波长为  $1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$  处基本重合。

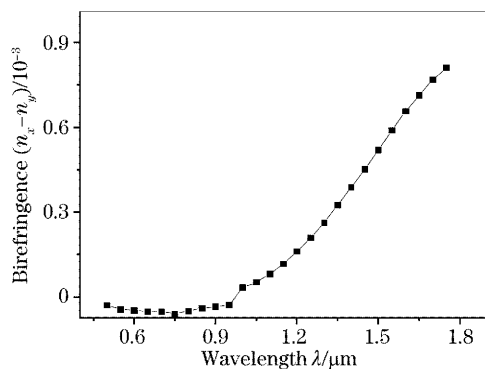


图 5 双折射随入射波长  $\lambda$  的变化关系。

结构参量:  $d = 0.82 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_y = 1.56 \mu\text{m}$

Fig. 5 Birefringence versus wavelength  $\lambda$  for microstructure fiber with  $d = 0.82 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_y = 1.56 \mu\text{m}$

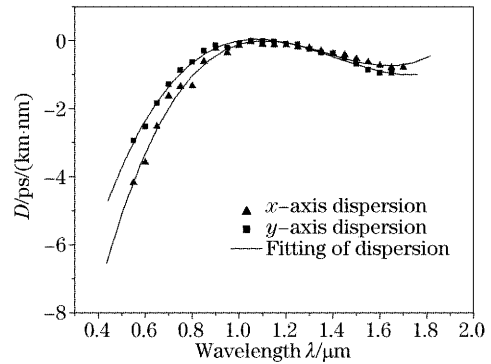


图 6  $x$  轴和  $y$  轴方向上的色散特性

Fig. 6 The dispersion in  $x$ -polarized and  $y$ -polarized direction

### 3 光纤结构不规则造成的双折射

由于不规则结构给光纤部分参量带来的随机性,必须用统计的方法分析双折射与结构不规则性的关系。在给定的不规则结构中,双折射将以概率密度的形式表示。

微结构光纤中常见的不规则性体现在空气孔直径的波动上。我们假设各空气孔直径出现概率为高斯分布,其均值  $d$  为  $0.7 \mu\text{m}$ ,并采用标准差与均值的比值  $\delta d/d$  作为描述不规则度的参量。给定  $\delta d/d$ , 随机得到 15 种微结构光纤的端面结构,利用全矢量有限元方法对其双折射加以计算。由于此时双折射的计算结果不能简单表示为空气孔直径的函数,因此用双折射的均值和标准差描述双折射的分布。不规则度  $\delta d/d$  选取不同值时的计算结果,如图 7 所示,  $\delta d/d$  的取值范围从  $0\% \sim 5\%$ ,入射波长为  $1550 \text{ nm}$ 。其中双折射分布的均值和标准差分别用圆点和误差条表示,虚线则由对双折射分布的均值进行线性拟合而得。为了便于比较,我们将  $d = 0.94 \mu\text{m}$

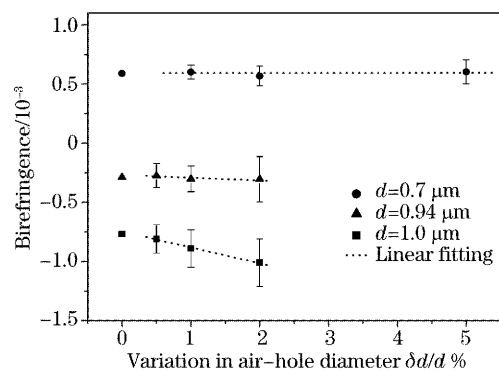


图 7 双折射随光纤结构不规则度的变化。

结构参量:  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_y = 1.56 \mu\text{m}$

Fig. 7 Birefringence error versus the irregular degree for microstructure fiber with  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_y = 1.56 \mu\text{m}$

和 $d=1.0\ \mu\text{m}$ 时,双折射和孔径不规则度的关系同时在图7中表示出来。

从图7中可以看出,对双折射随空气孔直径不规则度 $\delta d/d$ 的变化关系,可以得到一个半经验的线性公式:

$$\Delta n = A(\delta d/d) + B, \quad (2)$$

其中 $A$ 和 $B$ 为拟合系数,在 $d$ 不同时取值不同。

图8为空气孔直径不规则度 $\delta d/d$ 分别为1%和2%时,双折射分布的标准差与空气孔直径 $d$ 的关系。从图8中可以得出一个重要的结论,由孔径分布不规则所产生的双折射的大小主要取决于空气孔直径的均值 $d$ 。在增加光纤尺寸的同时减小空气孔直径的不规则性,将显著减小双折射。

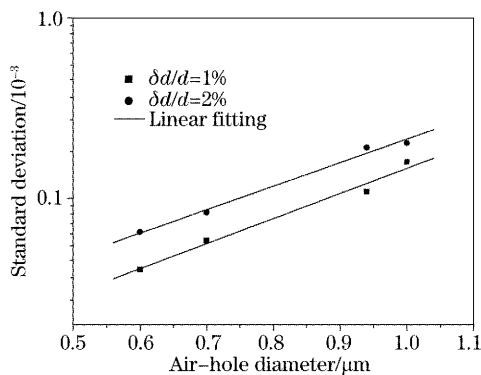


图8 双折射分布的标准差与空气孔直径的关系

Fig. 8 The standard deviation of the birefringence versus of air-hole diameter

## 4 结 论

通过全矢量有限元方法,计算了椭圆六角分布微结构光纤的双折射特性。计算结果表明,椭圆六角分布微结构光纤的双折射很大程度上取决于入射波长与微结构光纤的孔间距、空气孔直径等参量,波长或空气孔直径的变化甚至可以造成偏振快慢轴的

两次交换;双折射与孔径不规则度之间具有统计相关性,由空气孔直径随机变化造成的双折射变化的分布特性与空气孔直径有直接关系。本文的结论可用于估算微结构光纤中的双折射以及低双折射微结构光纤的设计。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 Philip Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 3 T. A. Birks, J. C. Knight, . S. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 4 J. C. Knight, J. Arriaga, T. A. Birks *et al.*. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7): 807~809
- 5 N. G. R. Broderick, T. M. Monro, P. J. Bennett *et al.*. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(20): 1395~1397
- 6 Yi Ni, Lei Zhang, Jingde Peng. Optimization of holey fiber for dispersion compensation [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 385~387
- 7 M. J. Steel, T. P. White, C. M. Sterke *et al.*. Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(8): 488~490
- 8 Guy Millot, Alexandre Sauter, John M. Dudley *et al.*. Polarization mode dispersion and vectorial modulational instability in air silica microstructure fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 695~697
- 9 Ren Guobin, Lou Shuqin, Wang Zhi *et al.*. Study on dispersion properties of photonic crystal fiber by equivalent index model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 319~323 (in Chinese)
- 任国斌, 娄淑琴, 王 智 等. 等效折射率模型研究光子晶体光纤的色散特性 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 319~323
- 10 Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin *et al.*. Study on photonic crystal fibers by effective index model [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(6): 723~727 (in Chinese)
- 任国斌, 王 智, 娄淑琴 等. 应用等效折射率模型研究光子晶体光纤 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 723~727
- 11 A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti *et al.*. Holey fiber analysis through the finite-element method [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(11): 1530~1532