

文章编号: 0258-7025(2009)04-0884-05

结构偏差对保偏光子晶体光纤色散特性的影响

孙伟民 付枫华 刘晓颀 姜宇 张建中

(哈尔滨工程大学理学院光信息科学与技术系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 光子晶体光纤(PCF)具有很多特殊性质,这些性质强烈依赖其具体结构。由于光子晶体光纤制作过程复杂,容易造成各种变形,包括包层气孔的位置偏移或变形等,从而明显影响该光子晶体光纤的性能。选用商品保偏单模光子晶体光纤作为研究对象,改变了环绕中心石英芯的两个大空气孔之一的形状和尺寸。固定气孔尺寸和形状,改变其位置;再固定其位置,改变一个大空气孔的直径;最后同时改变二者,分析其交叉影响。仿真结果显示当一个气孔变形或偏移后,光子晶体光纤的等效折射率、零色散波长、偏振拍长、导模场形状等参数均发生变化,说明结构偏差对保偏光子晶体光纤性质有明显影响。

关键词 导波光学; 光子晶体光纤; 计算机仿真; 保偏光纤; 结构变形

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0884

Influence of Structure Deformation on Dispersion Character of Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fibers

Sun Weimin Fu Fenghua Liu Xiaoqi Jiang Yu Zhang Jianzhong

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Photonic crystal fiber (PCF) has many special characteristics, which strongly depend on its structure. The location error or deformation of the cladding holes can be introduced readily during the complex fabrication process, which will change the characteristics of the PCF intensely. A commercial single-mode polarization-maintaining PCF was investigated when the size and location of one of the two larger side holes were changed. In order to give relationship between the location error or deformation of the cladding holes and the dispersion characteristics, the simulations of the PCF dispersion characteristic were given for the case that the location of one side larger hole was changed while the size and form kept invariable. Secondly the case, that the size of one side larger hole was changed without shifting, was simulated. The simulation results for the case of changing both location and size of this hole were demonstrated at last. All the simulation results show that the structure deformation affects the properties of the polarization-maintaining PCF strongly because the effective index of refraction, zero group velocity dispersion wavelength, polarization beating length, mode structure etc. are changed.

Key words guided wave optics; photonic crystal fiber; computer simulations; polarization-maintaining fiber; deformation of structure

1 引言

光子晶体光纤(PCF)最早由英国南安普顿大学 J. Knight 等在 1996 年制成^[1],随后人们又发现了其很多特殊性质,如无截止波长的单模传输^[2]、空芯光纤空气导光^[3]、超强的非线性特性^[4]、明显的超连续光谱特性^[5]等,这些非凡的性质使人们加大了对

这种新型光子学器件的深入研究。这种光纤的制作方法多种多样^[6],主要包括毛细管堆积法、钻孔法、挤出法、高分子铸造法、喷射造型法等,这些方法都是制作一个位置精确、形状设定的光子晶体光纤预制棒,再进行拉丝制作。在拉丝过程中,气压的控制是至关重要的技术,过大或过小的气压均会改变制

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 黑龙江省青年学术骨干支持计划(1151G071)和哈尔滨市科技创新人才研究专项(RC2007LX009001)资助课题。

作者简介: 孙伟民(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光学工程和精密仪器及机械等方面的研究。

E-mail: weimin_sun2003@yahoo.com.cn

成光子晶体光纤的形状,而光子晶体光纤的结构与形状又是决定其光学性质的重要因素,因此少许的结构偏差都会对制成的光子晶体光纤性质产生明显的影响。

在对光子晶体光纤性能进行分析的各种方法中,理论仿真是一种重要的指导性方法,可以使我们在制作光子晶体光纤之前分析可能得到的光学特性,根据需要设计特殊结构等。可以采用的软件也是多种多样,主要是采用各种方法求解光子晶体光纤结构下的麦克斯韦方程组。国际上人们采用多种软件进行这些方程的求解,如 FDTD 软件、Comsol 软件、Beamprob 软件等商用软件,很多学校也开发了自己的软件,如 MIT、澳大利亚 CUDOS 组、巴斯大学 CPPM 组等。其中 CUDOS 软件专门为光子晶体光纤而开发,具有免费、易用等优点,是一种值得推广的专用仿真软件。本文采用 CUDOS 软件对对称气孔结构的保偏光子晶体光纤进行仿真研究,

分析了对称大气孔结构偏差对这种光子晶体光纤模场结构、色散性质及偏振性质的影响,对设计、制作与分析该种光纤具有指导意义。

2 保偏光子晶体光纤结构及性质

保偏光子晶体光纤(PMPCF)的结构有很多种,其中制作最为方便,最为常见的为对称双气孔结构^[7,8],可以通过调整大小气孔的直径和比值,以及气孔间距等参数来改变这种保偏光子晶体光纤的偏振拍长、模场形状以及色散性质等。

采用如图 1 所示结构,其中气孔间距为 $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$,小孔直径为 $d_1 = 2.2 \mu\text{m}$,大孔直径为 $d_2 = 4.5 \mu\text{m}$,这是 Thorlabs 公司的商品保偏光子晶体光纤 PM-1550-01 的结构^[12]。在保偏光子晶体光纤的制作过程中,主要利用控制不同气孔的气压来得到这种均匀对称的结构,任何气压的偏差均会影响最后得到的光子晶体光纤的微结构。

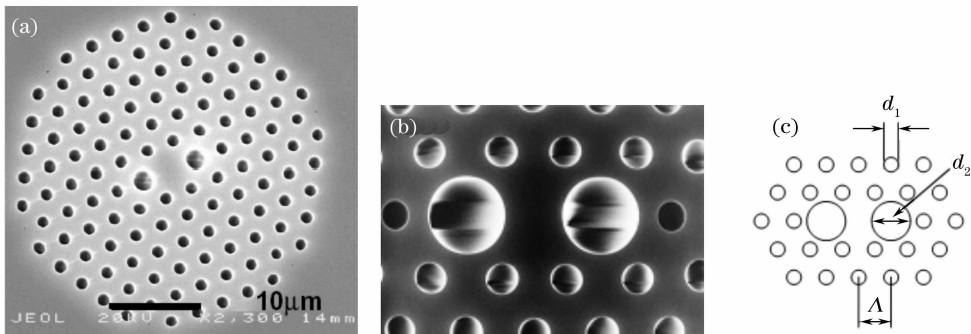


图 1 保偏光子晶体光纤截面图^[7,8]。(a) 保偏光子晶体光纤截面图^[7]; (b) 保偏光子晶体光纤气孔结构^[8]; (c) 光纤结构参数说明

Fig. 1 Cross section of the polarization-maintaining photonic crystal fiber (PMPCF)^[7,8]. (a) cross-section of PMPCF; (b) air-hole structure of PMPCF; (c) parameters of fiber structure

在利用 CUDOS 软件计算了两个偏振态[沿图 1(c)中水平及垂直方向]的有效折射率[如图 2(a)所示]后,根据色散公式^[13]

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

计算了该结构保偏光子晶体光纤的色散[如

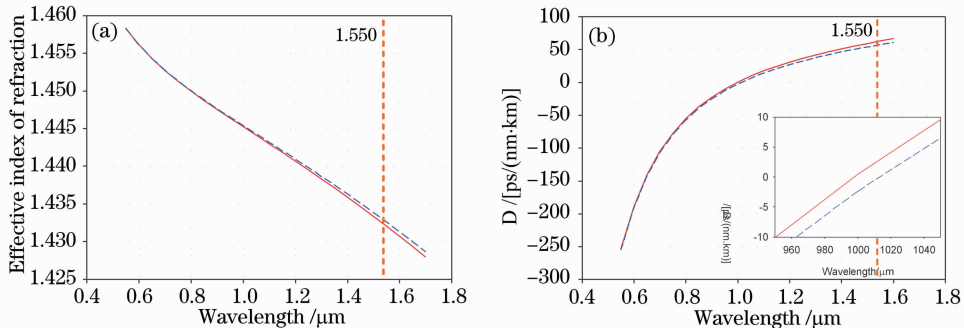


图 2 标准保偏光子晶体光纤的色散曲线。(a) 两偏振模式的折射率分布; (b) 色散曲线(其中小图为零点附近情况)

Fig. 2 Dispersion curve of the standard polarization-maintaining photonic crystal fiber. (a) refractive index of two polarized modes; (b) dispersion curve (embedded figure show the detail around zero)

图 2(b)所示],可以看出两个相互垂直的偏振模式的色散零点并不在一起,分别为 $0.9970 \mu\text{m}$ (快轴)和 $1.0123 \mu\text{m}$ (慢轴)。因此如果利用该零色散点进行超连续光谱产生或其它应用时,需要考虑两个不同偏振态的不同参数。图 2 中竖直虚线对应 $1.55 \mu\text{m}$ 波长,Thorlab 公司 PM-1550-01 光纤标称色散值分别为 $54 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 和 $59 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。

然后又分析了这种结构的保偏光子晶体光纤的偏振特性。分别计算了双折射参数 $B = |n_x - n_y|$ 和偏振拍长 $L_B = \lambda/B$ (如图 3 所示),从仿真结果可以

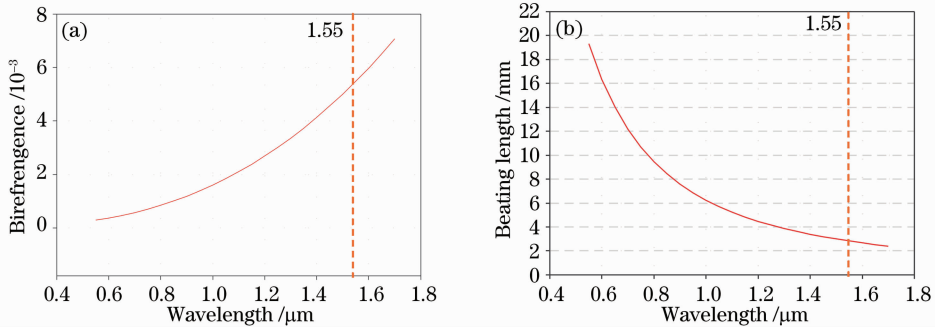


图 3 标准保偏光子晶体光纤的偏振特性。(a) 双折射参数;(b) 偏振拍长

Fig. 3 Polarization character of the standard polarization-maintaining photonic crystal fiber. (a) birefringence; (b) beating length

3 气孔尺寸偏差对保偏光子晶体光纤性能的影响

在制作保偏光子晶体光纤时,如果气孔气压控制不稳,或者双孔密封效果不一致,就可能产生双孔尺度不均匀的问题。假设保偏光子晶体光纤中一个气孔直径为标准尺度 $4.5 \mu\text{m}$ 不变,而另一个气孔的直径在 $2.4 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 之间变化,研究其模场性质、色散性质及偏振性质的变化规律。

计算了群速度色散零点随不同单侧大孔直径变化的规律[图 4(a)所示],发现其零色散波长随大孔

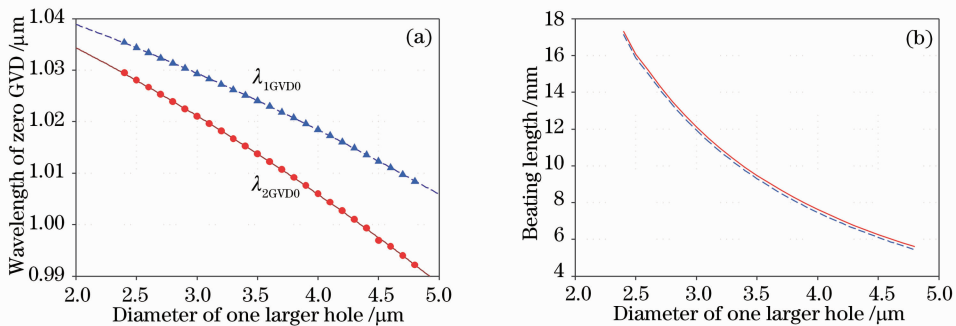


图 4 大孔直径变化对保偏光子晶体光纤色散及偏振性能影响。(a) 群速度色散零点波长;(b) 零色散点的偏振拍长

Fig. 4 Influences of the diameter of one larger hole on dispersion and polarization characters of PMPCF. (a) zero-dispersion wavelength of group velocity; (b) beating length at zero-dispersion wavelength

明显看出对于不同的波长其双折射参数及偏振拍长明显依赖于波长。在零色散点附近其偏振拍长约为 6 mm ,而随着光波长的增加,偏振拍长随之减少。图 3 中竖直虚线对应 $1.55 \mu\text{m}$ 波长,Thorlab 公司 PM-1550-01 光纤标称拍长小于 4 mm 。

所有仿真结果与 Thorlab 公司提供的数据^[12]非常相符[图 2(b)和图 3(b)所示],说明该仿真结果是合理的。采用同样的方法对产生结构偏差的保偏光子晶体光纤进行仿真分析。

直径变小而增加,二者的依赖关系可以拟合为一个二次函数

$$\begin{aligned} \lambda_{1\text{GVDO}} &= 1.054467 - 7.996 \times 10^{-3} d - \\ & 1.0382 \times 10^{-3} d^2, \\ \lambda_{2\text{GVDO}} &= 1.054230 - 6.293 \times 10^{-3} d - \\ & 6.669 \times 10^{-4} d^2, \end{aligned} \quad (2)$$

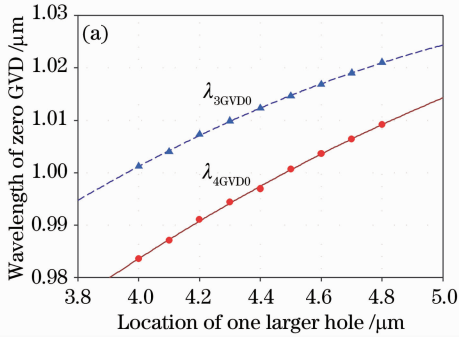
又计算了在零色散波长处偏振拍长随单侧气孔的变化规律[如图 4(b)所示]。随着气孔尺寸的增加,偏振拍长在明显缩短。这种结果可以理解为,当一侧气孔尺寸逐步增加时,光子晶体光纤的纤芯处的不

对称性随之增加,双折射增强,偏振拍长自然缩短。

4 气孔位置偏差对保偏光子晶体光纤性能的影响

在保偏光子晶体光纤的制作过程中,可能由于光纤预制棒制作偏差(如毛细管堆积偏差、钻孔位置偏差等)而导致气孔偏离预定位置,分析这种偏差带来的影响。

可以看出零色散波长随着大孔偏离中心而增长[如图 5(a)所示],可以拟合为二次函数



$$\begin{aligned} \lambda_{3GVD0} &= 0.731030 + 8.9091 \times 10^{-2} d - 6.4877 \times 10^{-3} d^2, \\ \lambda_{4GVD0} &= 0.752509 + 9.3391 \times 10^{-3} d - 7.8039 \times 10^{-3} d^2, \end{aligned} \tag{3}$$

偏振拍长随大孔偏离中心也是呈递增的趋势[如图 5(b)所示],拟合公式为

$$\begin{aligned} LB_1 &= 21.58 - 11.04d + 1.718d^2, \\ LB_2 &= 21.63 - 11.12d + 1.724d^2, \end{aligned} \tag{4}$$

可以看出,随着大孔偏离中心,纤芯区形状的对称性变好,对应的偏振拍长自然上升。

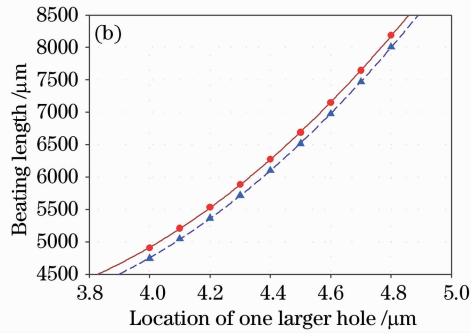


图 5 大孔位置变化对保偏光子晶体光纤色散及偏振性能影响。(a) 群速度色散零点波长; (b) 零色散点的偏振拍长
Fig. 5 Influences of the position of one larger hole on dispersion and polarization characters of PMPCF. (a) zero-dispersion wavelength of group velocity; (b) beating length at zero-dispersion wavelength

5 气孔尺寸、位置综合偏差对保偏光子晶体光纤模场形状的影响

为进一步分析尺寸及位置对该光纤性能的影响,同时改变了单侧大气孔的位置和尺寸,得到了如

图 6 所示的模场变化,可以看出随着单侧大孔尺寸变化或位置变化,产生的基模形状发生了较为明显的变化,对称性明显退化,基模光场趋向于占满纤芯空间。而如果其中一个气孔偏小时,这种模场变形

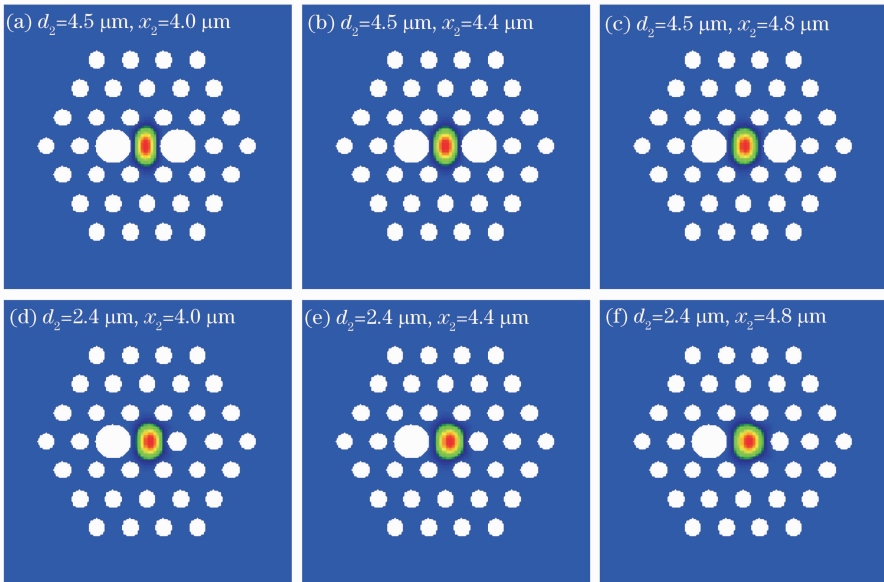


图 6 不同结构下光场模式
Fig. 6 Mode structures of PMPCF with different sturctures

就更明显。从图 6(f)可以看出,其模场形状出现了明显的左右不对称。

6 结 论

通过对商用保偏光子晶体光纤导模的计算机仿真,分析了其零色散点及偏振拍长等性质。考虑到在加工制作保偏光子晶体光纤时可能由于多种原因造成结构偏差,分析了保偏光子晶体光纤中单侧大孔尺寸及位置偏差对该光纤性能的影响。分析结果显示,结构偏差对保偏光子晶体光纤的色散性质、模场性质、偏振性质均产生了明显的影响。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly singlemode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 3 R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
- 4 Tingting Sun, Guiyun Kai, Zhi Wang *et al.*. Enhanced nonlinearity in photonic crystal fiber by germanium doping in the core region[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 93~95
- 5 J. M. Dudley. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Review of Modern Physics*, 2006, **78**: 1135~1184
- 6 P. S. Russell. Photonic-crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4729~4749
- 7 C. Xiong, W. J. Wadsworth. Polarized supercontinuum in birefringent photonic crystal fibre pumped at 1064 nm and application to tuneable visible/UV generation[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2438~2445
- 8 Kazunori Suzuki, Hirokazu Kubota, Satoki Kawanishi. Optical properties of low-loss polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 676~680
- 9 Wu Yanrong, Guo Lixia, Xue Wenrui *et al.*. Photonic crystal fiber with single polarization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 593~597
武延荣,郭丽霞,薛文瑞等. 单偏振光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 593~597
- 10 Hong Fang, Shuqin Lou, Tieying Guo *et al.*. Novel-high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 202~206
方宏,娄淑琴,郭铁英等. 一种新结构高双折射光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 202~206
- 11 Weimin Sun, Xiaoqi Liu, Fenghua Fu *et al.*. Fabrication of fiber-embedded multi-core photonic crystal fibers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 715~717
- 12 http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=910&pn=PM-1550-01
- 13 Ming Wu, Hairong Liu, Dexiu Huang. Dispersion property in highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 539~542
吴铭,刘海荣,黄德修. 高非线性光子晶体光纤色散特性的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 539~542