

空气孔正方形排列的低损耗高双折射光子晶体光纤的数值模拟^{*}

李曙光^{1)†} 邢光龙¹⁾ 周桂耀¹⁾ 侯蓝田^{1)‡}

1) 燕山大学理学院红外光纤与传感研究所, 秦皇岛 066004)

2) 燕山大学亚稳材料制备技术与科学重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2005 年 2 月 23 日收到, 2005 年 3 月 31 日收到修改稿)

提出了一种正方形排列渐增空气孔高双折射光子晶体光纤, 并利用多极方法对光纤基模的模场分布、色散、双折射以及损耗特性进行了数值模拟. 模拟结果表明利用这种结构可以在包层空气孔层数较少的情况下实现极低的限制损耗, 通过调节内层空气孔的分布可以有效地控制光纤的双折射和色散特性. 本结果对高双折射光子晶体光纤的制备具有一定的指导意义.

关键词: 光子晶体光纤, 双折射, 限制损耗, 多极方法

PACC: 4280M, 4281D, 4281F, 8120J

1. 引言

近年来, 兴起了研究光子晶体光纤(photonic crystal fibre, PCF)的热潮, 可以利用 PCF 高度可调的结构设计实现传统光纤所不能够具有的各种特性, 如使零色散波长向短波方向移动、色散平坦、色散补偿、高非线性以及双折射等^[1-20]. PCF 的波导双折射主要来源于光纤的几何结构, 通过改变 PCF 的结构参数从而破坏其对称性就可以制作出具有高双折射效应的 PCF, 这是传统保偏(polarization-maintaining)光纤所不及的. 常用的方法有采用双芯或多芯结构、改变纤芯或空气孔的形状以及改变空气孔的分布等^[5-14]. 英国 Bath 大学最新研制的双折射 PCF 的双折射度可达 $0.00258^{[11]}$. 高双折射 PCF 可以用于光纤传感和干涉仪, 在光电子器件中也有很多应用, 比如偏振分束器等^[7-12]. 此外, 还可以根据需要设计高双折射强非线性 PCF^[9], 使得同一根 PCF 既有高双折射特性又有强非线性效应, 也可以设计具有大面积的保偏 PCF^[12]. 这使得 PCF 的特性集成化, 可应用于拉曼放大、偏振的超连续谱产生、四波混频和

交叉相位调制等^[21-25]. 高双折射 PCF 的研制必然会进一步推动新型光电子器件的开发和应用.

在 PCF 的制备过程中, 我们发现保持理想的光纤结构与 PCF 包层空气孔的层数是一对矛盾^[21], 一般来说层数越多其限制损耗会越小, 但是增加层数又会引起空气孔的畸变给光纤的制备带来困难. 因此通过理论研究探讨一种在包层空气孔层数较少但又能够保持低损耗和较高双折射的光纤结构是一个很有意义的课题. 以前人们研究的 PCF 大多数是基于三角形排列的空气孔结构^[9-12], 姜淑琴等曾提出类矩形芯光子晶体光纤结构^[18], 本文提出一种正方形排列渐增空气孔双折射 PCF 结构. 利用多极法(multipole method)进行数值模拟. 模拟发现这种结构的光纤可以在空气孔层数较少的情况下实现高双折射和低限制损耗的目的.

2. 基本理论

利用多极法对微结构光纤的色散及损耗特性进行数值模拟最早是由 White 和 Kuhlmeiy 等^[26-28]提出的. 这种方法适合于快速计算由圆柱形空气孔构成

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2003CB314905)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2003AA311011)和海湾安全技术有限公司博士后工作站资助的课题.

[†] E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn

的微结构光纤,可以同时产生模式传播常数的实部和虚部,利用其实部可以计算色散,而利用虚部可以计算有限包层空气孔情况下的限制损耗,并且可以计算折射率传导型的实芯 PCF 或空芯的光子带隙型 PCF 的模式特性及损耗,利用这种方法可以根据设定的波长求得其传播常数,因此可以利用 Sellmeier 公式在数值模拟过程中系统地考虑材料色散.因此,多极法是一种对 PCF 特性进行模拟的有效而快捷的方法.

利用多极方法模场可以展开成柱函数(Bessel 函数)的形式^[26-29],在第 l 个空气孔的内部,其纵向电场可以在极坐标系下展开成

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m^{(l)} J_m(k_{\perp}^i r_l) \exp(im\phi_l) \exp(i\beta z). \quad (1)$$

在第 l 个空气孔近邻的介质中,其纵向电场可以表示成

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [b_m^{(l)} J_m(k_{\perp}^e r_l) + c_m^{(l)} H_m^1(k_{\perp}^e r_l)] \times \exp(im\phi_l) \exp(i\beta z), \quad (2)$$

其中, $k_{\perp}^i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$, $k_{\perp}^e = (k_0^2 n_e^2 - \beta^2)^{1/2}$, 空气的折射率 $n_i = 1$, n_e 是石英折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是自由空间的波数. 磁场分量 H_z 的表达式与此类似.

通过在空气孔的界面上利用电磁场的边界条件,可以得到关于 $a_m^{(l)}$, $b_m^{(l)}$ 和 $c_m^{(l)}$ 的表达式,在实际运算中选择适当的截断值 M (取 $-M \leq m \leq M$) 可以优化计算速度和精度,进一步通过 $\beta = n_{\text{eff}} k_0$ 求得所求模式的有效折射率 n_{eff} .

通过模式有效折射率 n_{eff} 的虚部可以得到该模式所对应的光纤的限制损耗^[27] (其单位为 dB/m)

$$L = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6, \quad (3)$$

式中 λ 的单位是 μm , 可以由 n_{eff} 的实部得到色散系数^[27]

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}. \quad (4)$$

光纤的归一化双折射率 B 为^[5-7]

$$B = n_{\text{eff}}^s - n_{\text{eff}}^f, \quad (5)$$

其中 n_{eff}^s 和 n_{eff}^f 分别是基模的两个正交偏振态慢轴和快轴所对应的模式有效折射率,两个正交偏振模之间的偏振拍长度为

$$L_B = \frac{\lambda}{B}. \quad (6)$$

3. 数值模拟结果与分析

本文设计的光纤结构是一种渐增空气孔正方形排列结构,中心去掉一个空气孔而形成纤芯,光纤的外包层与传统光纤相同仍然为圆形.空气孔节距(在水平或竖直方向上相邻两个空气孔中心的距离) $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, 包层是由 3 层空气孔构成,由内到外空气孔直径逐渐增大,分别为 $d_1 = 1.6 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.8 \mu\text{m}$, $d_3 = 2.0 \mu\text{m}$, 为了形成双折射沿 x 轴的空气孔尺度较小,其直径由内到外分别为 $d'_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $d'_2 = 1.0 \mu\text{m}$, $d'_3 = 1.2 \mu\text{m}$. 光纤截面如图 1 所示,为了便于标注将此光纤定义为 PCF1.

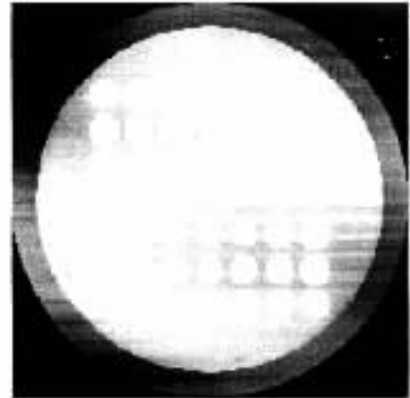


图 1 正方形排列空气孔高双折射 PCF 的截面设计

本文采用多极方法对所设计的 PCF 的模式色散、双折射、损耗特性进行数值模拟.图 2 给出了 PCF1 在波长 $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$ 的基模模场分布图 (a), (b) (c) 分别为慢轴所对应的 $|E_z|$, $|H_z|$, $|S_z|$ 的模场分布 (d) (e) (f) 分别为快轴所对应的 $|E_z|$, $|H_z|$, $|S_z|$ 的模场分布.从图 2 (c) 和 (f) 可以看出,由于沿 x 轴的空气孔较小不管是快轴还是慢轴模所对应的坡印亭矢量的 z 分量 $|S_z|$ 的分布均表现出了沿 x 轴方向的模场扩展,同时也显示出了正方形空气孔排列结构的模场特点,即其模场的坡印亭矢量也成近似矩形分布.

为了进一步考察本文所提出的空气孔渐增结构 PCF1 的优势,同时对空气孔大小不随层数变化的结构进行模拟,即 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $d_1 = d_2 = d_3 = 1.6 \mu\text{m}$, $d'_1 = d'_2 = d'_3 = 0.8 \mu\text{m}$ 的光纤,将此结构的光纤标注为 PCF2.图 3 给出了两种结构光纤的双折射特性,图 3 (a) 表示归一化双折射率 B , 图 3 (b) 表示拍长

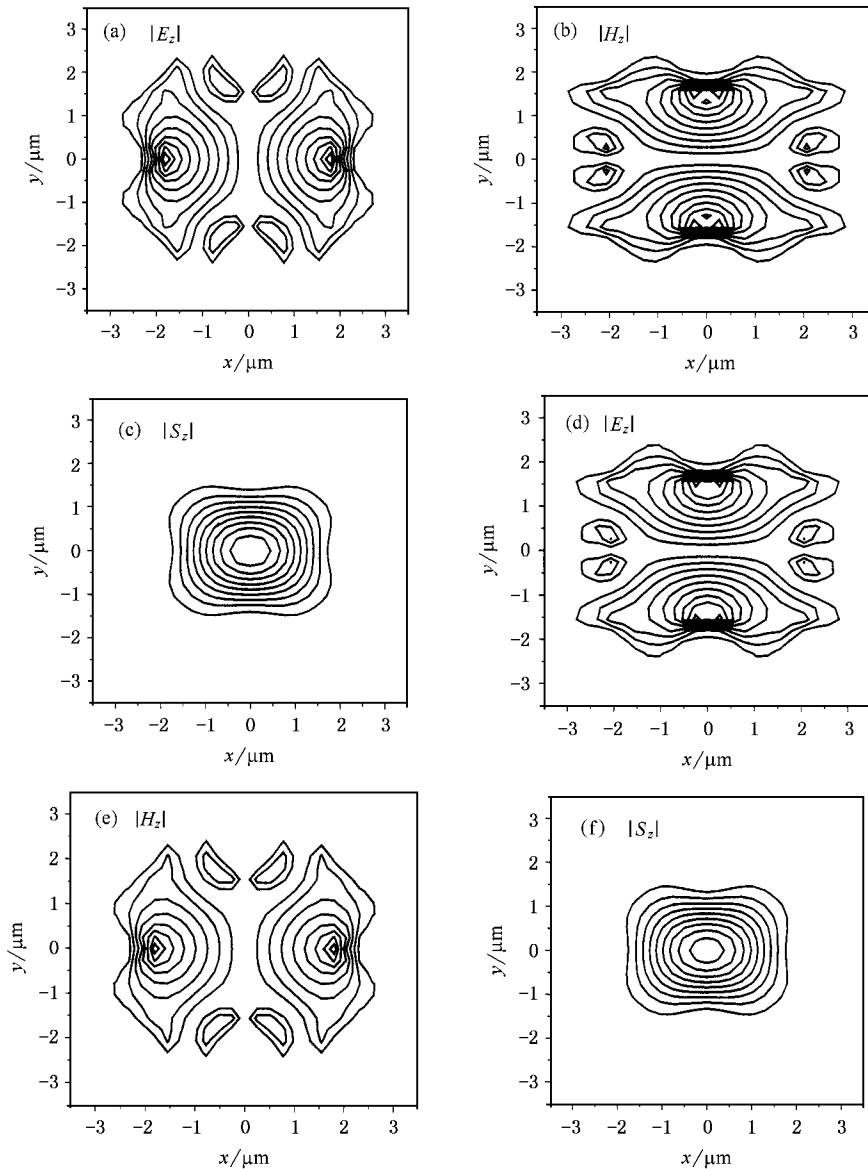


图2 PCF1在波长 $\lambda=1.0\mu\text{m}$ 基模模场分布图 (a)(b)(c)分别为慢轴所对应的 $|E_z|$ 、 $|H_z|$ 、 $|S_2|$ 的模场分布 (d)(e)(f)分别为快轴所对应的 $|E_z|$ 、 $|H_z|$ 、 $|S_2|$ 的模场分布

度 L_B .从图中可以看出两种结构光纤的归一化双折射率和拍长度相差很小,它们随波长变化的曲线基本重合,这是由于这两种光纤的节距和最内层空气孔相同,这说明正方形空气孔排列PCF的双折射特性是由最内层空气孔决定的;另外,从图中可以看出随着波长的增大光纤的归一化双折射率增大、拍长度减小,在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处光纤的归一化双折射率为 $B=8.3\times 10^{-4}$,属于高双折射光纤.

图4给出了PCF色散系数 D 随波长的变化关系,其中(b)是(a)的局部放大,从图中可以看出PCF1和PCF2的快轴模(或慢轴模)的色散曲线基本

重合,可见内层空气孔对光纤的色散起主要作用,这是由于光纤的基模模场主要局域在纤芯中,随着波长的增大色散系数的差距增大,受外层空气孔的影响增大.从图4(b)可以看出PCF1和PCF2的快轴模的零色散点都要比慢轴模的零色散点所对应的波长小,PCF1的快轴模和慢轴模的零色散点分别为 $0.958\mu\text{m}$ 和 $0.972\mu\text{m}$,这一点也表现出了明显的双折射特性.

图5给出了光纤的限制损耗 L 随波长的变化关系,从图中可以看出不管是快轴模还是慢轴模对于确定的波长PCF1的限制损耗要比PCF2的限制

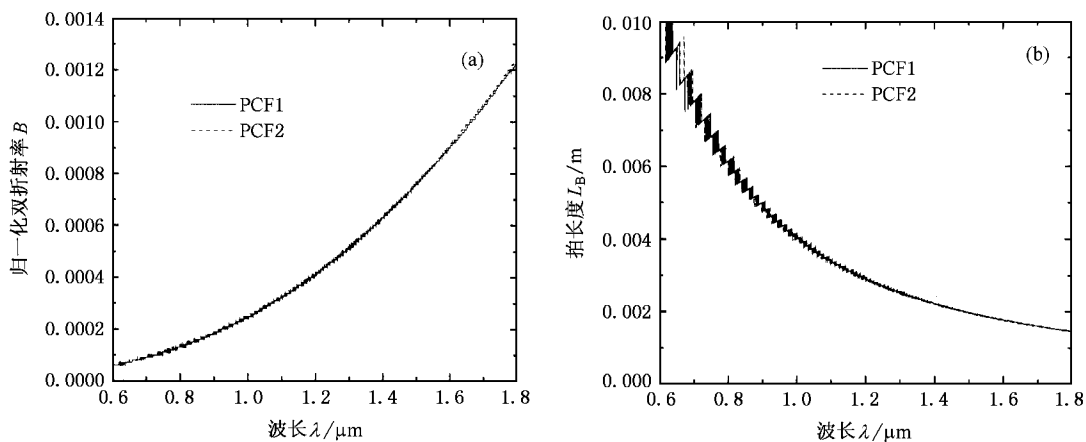


图3 正方形排列 PCF 的双折射特性随波长变化的关系 (a) 归一化双折射率 B (b) 拍长度 L_B

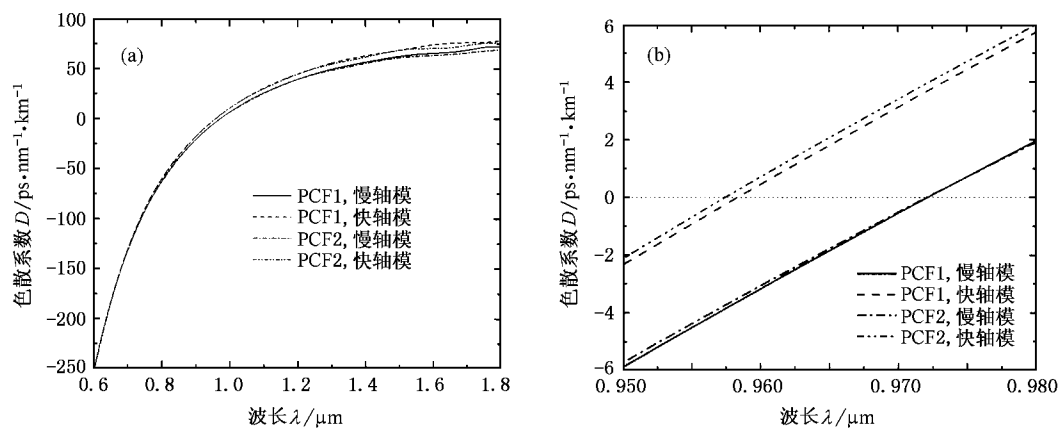


图4 正方形空气孔排列 PCF 色散系数 D 随波长的变化关系 (b) 是 (a) 的局部放大

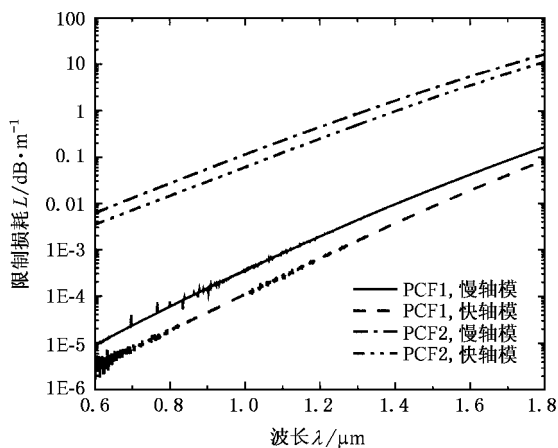


图5 正方形 PCF 的限制损耗 L 随波长的变化关系

损耗小两个数量级以上, PCF1 和 PCF2 的快轴模的限制损耗都要比慢轴模的限制损耗小一些, PCF1 的快轴模和慢轴模的限制损耗在 $1.55 \mu\text{m}$ 处分别为

0.013 dB/m 和 0.029 dB/m , 在各自的零色散波长处分别为 $7.5 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ 和 $2.8 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$. 可见, 采用空气孔渐增的正方形排列结构可以在保持 PCF 色散和双折射特性基本不变的情况下极大地减小模式的限制损耗, 即这种空气孔渐增结构可以在空气孔层数较少的情况下实现较低的限制损耗. 实际制备过程中可以采用低熔点温度的大块石英利用模具挤压成型的方法制作预制棒.

4. 结 论

本文提出了一种渐增空气孔正方形排列双折射 PCF 结构, 并利用多极方法对其模场分布、色散、双折射以及限制损耗进行了数值模拟. 模拟发现这种结构的光纤可以在包层空气孔层数较少的情况下实现极低的限制损耗, 仅用 3 层空气孔就可以在快轴模和慢轴模的零色散波长处分别达到 7.5×10^{-5}

dB/m 和 2.8×10^{-4} dB/m 的低限制损耗. 而光纤的双折射和色散特性主要由最内层空气孔的分布决定, 通过调节最内层空气孔的大小可以有效地控制 PCF

的色散和双折射特性, 在空气孔层数较少的情况下利用正方形排列渐增空气孔双折射结构可以同时达到高双折射和低限制损耗的目的.

- [1] Knight J C , Birks T A , Russell P St J *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [2] Li S G , Liu X D , Hou L T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2811 (in Chinese) 李曙光、刘晓东、侯蓝田 2003 物理学报 **52** 2811]
- [3] Li S G , Liu X D , Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1873 (in Chinese) 李曙光、刘晓东、侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1873]
- [4] Li S G , Liu X D , Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1880 (in Chinese) 李曙光、刘晓东、侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1880]
- [5] Hansen T P , Broeng J , Stig E B *et al* 2001 *IEEE Photonics Technology Letters* **13** 588
- [6] Peyrilloux A , Chartier T , Hideur A *et al* 2003 *J. Lightwave Technology* **21** 536
- [7] Kunimasa S , Masanori K 2002 *IEEE Photonics Technology Letters* **14** 1291
- [8] Kerbage C , Steinvurzel P , Reyes P *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 842
- [9] Arturo O B , Antonio D , Martina D P *et al* 2004 *IEEE Photonics Technology Letters* **16** 1667
- [10] Ju J , Jin W , Demokan M S 2003 *IEEE Photonics Technology Letters* **15** 1375
- [11] Kakarantzas G , Ortigosa B A , Birks T A *et al* 2003 *Opt. Lett.* **28** 158
- [12] Folkenberg J R , Nielsen M D , Mortensen N A *et al* 2004 *Opt. Express* **12** 956
- [13] Dong H , Wu C Q , Fu S N 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1934 (in Chinese) 董 晖、吴重庆、付松年 2003 物理学报 **52** 1934]
- [14] Ren G B , Wang Z , Lou S Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 484 (in Chinese) 任国斌、王 智、娄淑琴 等 2004 物理学报 **53** 484]
- [15] Ren G B , Wang Z , Lou S Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1856 (in Chinese) 任国斌、王 智、娄淑琴 等 2004 物理学报 **53** 1856]
- [16] Ren G B , Wang Z , Lou S Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1862 (in Chinese) 任国斌、王 智、娄淑琴 等 2004 物理学报 **53** 1862]
- [17] Ren G B , Wang Z , Lou S Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2600 (in Chinese) 任国斌、王 智、娄淑琴 等 2004 物理学报 **53** 2600]
- [18] Lou S Q , Ren G B , Yan F P *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1229 (in Chinese) 娄淑琴、任国斌、延凤平等 2005 物理学报 **54** 1229]
- [19] Zhang D S , Dong X Y , Zhang W G *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1235 (in Chinese) 张德生、董孝义、张伟刚 等 2005 物理学报 **54** 1235]
- [20] Dong H , Wu C Q , Fu S N 2004 *Chin. Phys.* **13** 2082
- [21] Li S G , Ji Y L , Zhou G Y *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 478 (in Chinese) 李曙光、冀玉领、周桂耀 等 2004 物理学报 **53** 478]
- [22] Hu M L , Wang Q Y , Li Y F *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4252 (in Chinese) [胡明列、王清月、栗岩锋 等 2004 物理学报 **53** 4252]
- [23] Hu M L , Wang Ch Y , Chai L *et al* 2004 *Laser Phys. Lett.* **1** 299
- [24] Hu M L , Wang Ch Y , Chai L *et al* 2004 *Optics Express* **12** 1932
- [25] Hu M L , Wang Ch Y , Li Y F *et al* 2004 *Laser Physics* **14** 776
- [26] White T P , Kuhlmeiy B T , McPhedran R C *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2322
- [27] Kuhlmeiy B T , White T P , Renversez G *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2331
- [28] White T P , McPhedran R C , Botten L C *et al* 2001 *Optics Express* **9** 721
- [29] Zhu Z M , Brown T G 2002 *Opt. Commun.* **206** 333

Numerical simulation of square-lattice photonic crystal fiber with high birefringence and low confinement loss^{*}

Li Shu-Guang^{1)†} Xing Guang-Long¹⁾ Zhou Gui-Yao¹⁾ Hou Lan-Tian^{1)‡}

¹⁾ *Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

²⁾ *Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

(Received 23 February 2005 ; revised manuscript received 31 March 2005)

Abstract

In this paper a square-lattice photonic crystal fiber with gradually increasing air-holes in a silica matrix has been put forward for the first time. The model field, dispersion, birefringence and confinement loss of the fibre fundamental mode are simulated by multipole method. It is found that low confinement loss can be realized under condition of fewer rings of air holes. Simulation shows that birefringence and dispersion of this square-lattice PCF are dominated by inner-ring air holes in the fibre. The simulation results of this paper are highly instructive for the fabrication of birefringent photonic crystal fibers.

Keywords : photonic crystal fibre, birefringence, confinement loss, multipole method

PACC : 4280M, 4281D, 4281F, 8120J

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2003CB314905), the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2003AA311011) and the Postdoctoral Workstation Research Program of Gulf Security Technology Co. , Ltd.

[†] E-mail : shuguangli@ysu.edu.cn