

八边形结构的双折射光子晶体光纤^{*}

杨倩倩^{1)†} 侯蓝田¹⁾²⁾

1) 燕山大学红外光纤与传感技术研究所, 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)

(2009 年 3 月 3 日收到, 2009 年 3 月 27 日收到修改稿)

提出一种新型的双折射光子晶体光纤, 在正八边形的基础上改变纤芯附近的几个空气孔的直径产生双折射. 利用多极法对该光纤基模的模场分布、色散、限制损耗及双折射特性进行数值分析, 并且分析了一些参数对双折射的影响. 计算了具有相同参数的六边形结构光子晶体光纤的色散系数、限制损耗及双折射率. 研究表明, 具有相同参数的八边形结构光子晶体光纤比六边形结构光子晶体光纤的双折射率明显提高, 限制损耗大幅度减小, 零色散波长也向短波方向移动.

关键词: 光子晶体光纤, 双折射, 色散, 限制损耗

PACC: 4280M, 4281D, 8120J

1. 引 言

近年来, 光子晶体光纤(PCF)由于其独特的性质受到了广泛的关注, 已成为当前研究的一个热点^[1]. PCF 特殊的结构使得它具有许多传统光纤不具备的特点, 诸如无截止单模特性、高非线性、大有效模场面积、高双折射率、奇异色散特性等^[2-4].

传统的偏振保持光纤(简称保偏光纤)可以获得 10^{-4} 量级的双折射率. PCF 的出现为在 SiO_2 光纤中引入大的双折射提供了可能. 基于 PCF 制成的双折射光纤无论在设计自由度和传输特性上都具有传统双折射光纤无可比拟的优越性, 所以近年来备受关注^[5-11]. PCF 主要是通过破坏结构的对称性获得较高的双折射率, 数量级可达 10^{-3} , 因此获得双折射的方法很多, 如增大纤芯附近的一些空气孔直径、制作椭圆形芯或引入椭圆孔等.

以前人们研究的大部分都是六边形结构的 PCF^[12-15]. 本文提出一种新型的八边形结构的 PCF, 通过改变纤芯附近的一些空气孔的直径来产生双折射. 并利用多极法对该光纤结构的双折射、色散、限制损耗特性进行数值模拟, 再与具有相同参数的六边形结构的 PCF 进行比较分析.

2. 运用多极法理论分析 PCF 的双折射特性

2.1. 多极法理论

最早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是由 White 和 Kuhlmeier 等^[16-18]提出的. 这种方法适合于快速计算由圆柱形空气孔构成的微结构光纤, 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 或空心的光子带隙型 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.

利用多极法, 模场可以展开成柱函数(Bessel 函数)^[19]的形式, 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

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

在第 l 个空气孔邻近的介质中, 其纵向电场可以表

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号: 60637010)资助的课题.

[†] E-mail: xiaoyangqianqian@sina.com

示为

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

这里

$$k_{\perp}^i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2},$$

$$k_{\perp}^e = (k_0^2 n_e^2 - \beta^2)^{1/2},$$

其中空气的折射率 $n_i = 1$, n_e 是石英的折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 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 $a_m^{(1)}$, $b_m^{(1)}$ 和 $c_m^{(1)}$ 的表达式,在实际运算中选择适当的截断值 M ($-M \leq m \leq M$) 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光纤的限制损耗(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 为波长,单位是 μm . 可以由 n_{eff} 的实部得到色散系数

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

光纤的归一化双折射率 B 可表示为^[20-23]

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

其中 n_{eff}^s 和 n_{eff}^f 分别是基模的两个正交偏振态的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为

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

2.2. 基模的模场分布

本文设计的结构是由圆形空气孔构成的正八边形排列的 PCF, 中间去掉一个空气孔形成纤芯, 并增大纤芯附近 x 方向上的 6 个空气孔的直径, 降低了 x 方向上的有效折射率, 使两个正交方向产生大的折射率差, 从而产生双折射. 结构的横截面图如图 1 所示. 相邻的两层空气孔的间距 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, 包层由三层空气孔构成, 其中所有小孔的直径为 $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, 大孔的直径为 $d_2 = 1.4 \mu\text{m}$.

利用多极法对该结构的基模模场分布进行模拟, 图 2 给出了该 PCF 结构在波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处基模的模场分布. 图 2(a)(b)(c) 分别对应快轴模的

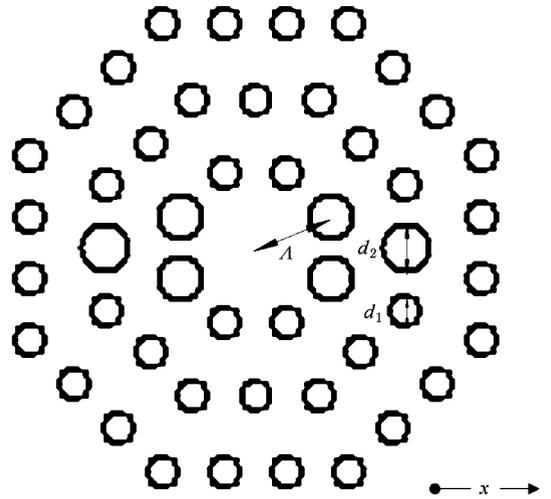


图 1 八边形 PCF 截面示意图

$|S_z|$, $|E_z|$, $|H_z|$; 图 2(d)(e)(f) 分别对应慢轴模的 $|S_z|$, $|E_z|$, $|H_z|$ 的模场分布. 在纤芯内, 快轴模沿着 x 方向, 慢轴模沿着 y 方向. 从图(a)和(d)可以看出, 快轴模和慢轴模的 $|S_z|$ 的分布均表现出沿 y 方向的模场延伸, 呈现出椭圆形状. 这是由于在 x 方向引入 6 个大的空气孔, 使得 x 方向的有效折射率比 y 轴方向的有效折射率小, 从而模场向 y 方向延伸.

2.3. 结构的色散、限制损耗及双折射

由以上所述可知, 多极法适合于快速计算由圆柱形空气孔构成的微结构光纤, 可同时产生一系列波长下模式传播常数的实部和虚部, 利用其实部可以计算色散, 如(4)式所示, 利用其虚部可以计算有限包层空气孔情况下的限制损耗, 如(3)式所示. 双折射率和拍长分别由(5)和(6)式计算得到.

利用多极法对图 1 所示的光纤结构的色散系数、限制损耗、双折射率和拍长进行数值模拟. 图 3 展示了图 1 结构的色散系数随着波长的变化关系. 从图 3(b) 可以看出, 无论是慢轴模还是快轴模, 色散系数均随着波长的增加而增加, 变化规律是相似的. 而且快轴模的色散系数值比慢轴模的色散系数值要大, 它们对应的零色散波长分别为 0.907 和 $0.918 \mu\text{m}$. 这一点也表现出明显的双折射特性.

图 4 展示了该光纤结构的限制损耗. 显然, 慢轴模的限制损耗小于快轴模的限制损耗. 在波长 $\lambda < 1.6 \mu\text{m}$ 时, 二者的限制损耗都小于 1 dB/m , 当 $\lambda > 1.6 \mu\text{m}$ 时损耗呈指数规律增加, 严重限制了光的传

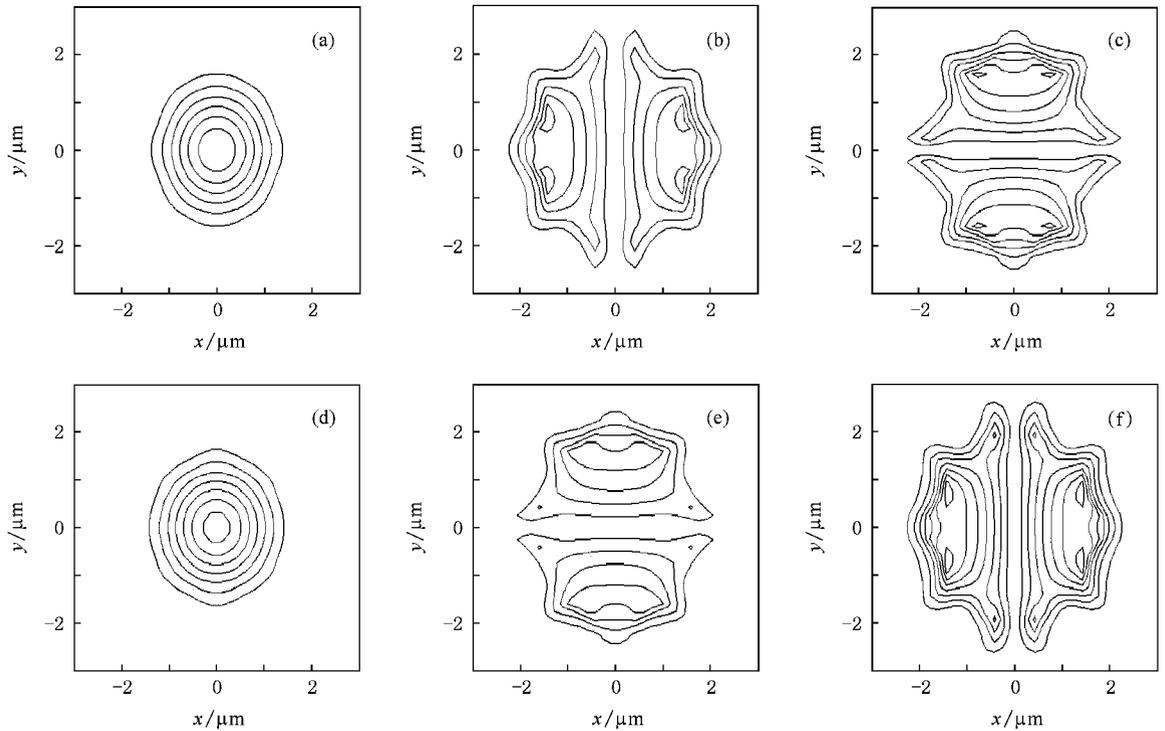


图2 利用多极法对基模场分布进行模拟的结果 (a)(b)(c)分别对应快轴模的 $|S_z|$, $|E_z|$, $|H_z|$ (d)(e)(f)分别对应慢轴模的 $|S_z|$, $|E_z|$, $|H_z|$

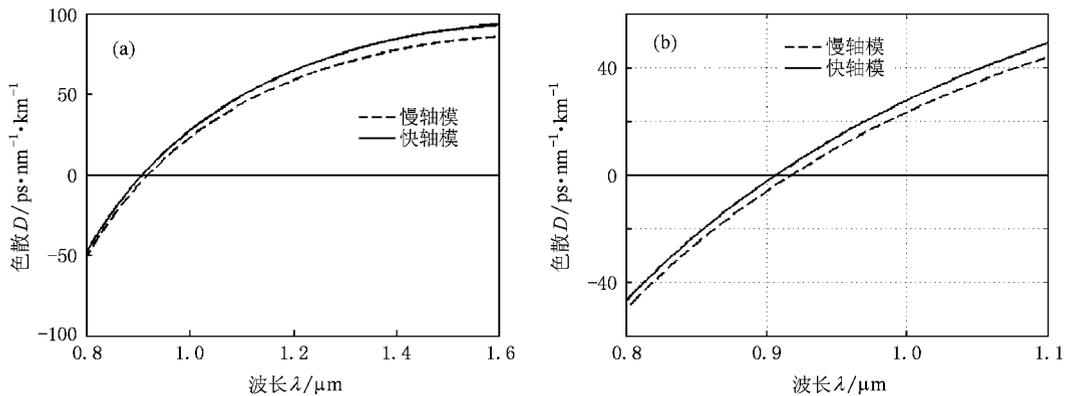


图3 色散系数随波长的变化关系 (b)是(a)的局部放大

输距离.我们可以根据这个结论合理地选择工作波长范围(波长较小的范围),从而有利于光的长距离传输.

图5示出了该光纤的双折射率随波长的变化关系.显然,双折射率值随着波长的增加而迅速增加.在波长 $2.0 \mu\text{m}$ 处数值达到 1.704×10^{-3} ,可见该结构可以获得较高的双折射率值.其拍长变化关系与双折射正好相反,如图6所示.在波长 $2.0 \mu\text{m}$ 处,其拍长度趋近于 1 mm .

2.4. 结构参数对双折射率的影响

首先考虑大孔直径对双折射率的影响.取 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$,小孔的直径固定为 $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$,大孔的直径依次变化为 $d_2 = 1.52, 1.46, 1.40, 1.34 \mu\text{m}$,数值模拟结果如图7所示.显然不管大孔直径的大小如何,双折射率随波长的变化规律基本相同,并且大孔的直径越大双折射率越高.这是因为增大大孔直径,x方向的有效折射率进一步降低,使得两个正交方向

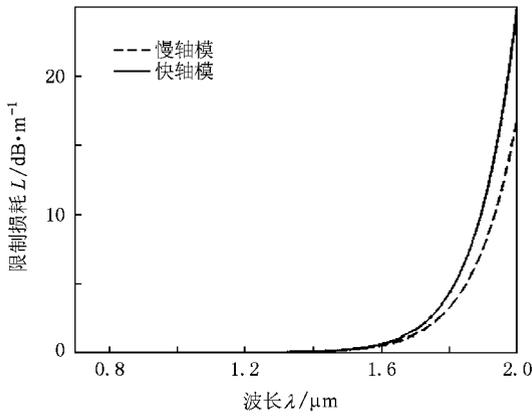


图 4 限制损耗随波长的变化关系

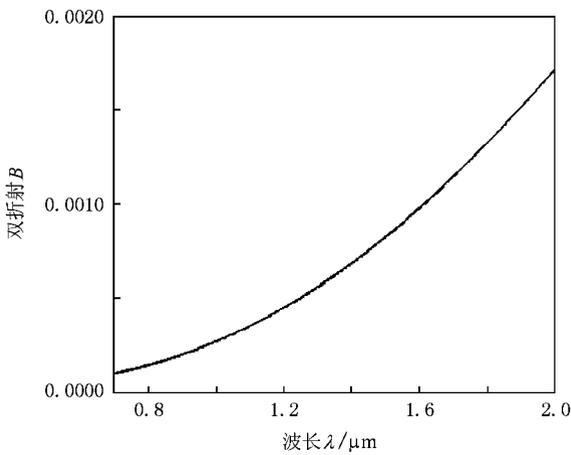


图 5 双折射率随波长的变化关系

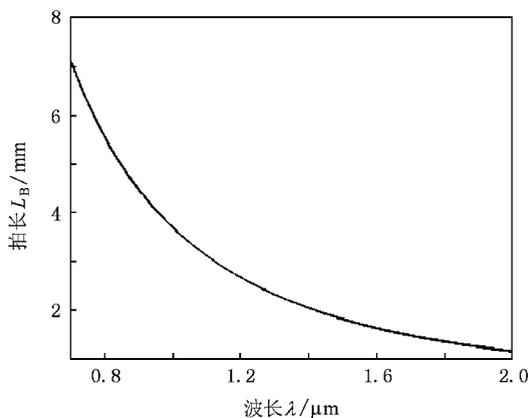


图 6 拍长随波长的变化关系

加大孔的直径.相对而言,也可以同时减小小孔的直径,但是这样会降低空气的占空比系数,使得光纤的限制损耗大大增加,因此减小小孔直径不是一个很好的办法.

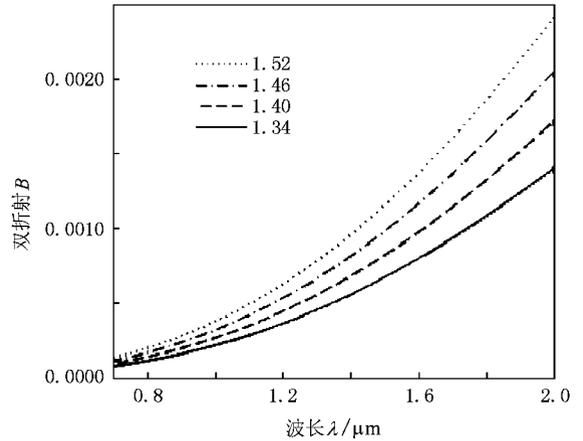


图 7 取 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$ 和小孔直径 $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$,大孔直径 $d_2 = 1.52, 1.46, 1.40, 1.34 \mu\text{m}$ 时,双折射率随波长的变化关系

其次考虑相邻两层空气孔的间距对双折射的影响.固定大孔直径 $d_2 = 1.4 \mu\text{m}$,小孔直径 $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$,孔间距为 $2.2, 2.3, 2.4 \mu\text{m}$,模拟结果如图 8 所示.容易看出,在固定大孔孔径和小孔孔径的情况下,各层空气孔的间距越小,其双折射率越大.

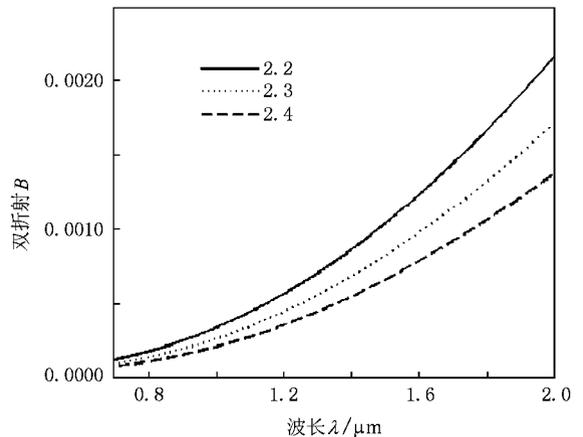


图 8 固定大孔直径 $d_2 = 1.4 \mu\text{m}$ 和小孔直径 $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$ 时,改变 $\Lambda = 2.2, 2.3, 2.4 \mu\text{m}$ 时,双折射率随波长的变化关系

综上所述,增大大孔直径和减小相邻两层孔的间距均可以增大双折射率.据此我们可以优化结构参数,使光纤结构的双折射特性更加优越.

上的有效折射率差值进一步增大,因此产生更大的双折射率.可见增大双折射率的有效办法之一是增



3. 六边形与八边形结构的 PCF 比较

下面对六边形结构的 PCF 进行了模拟,它与八边形结构的 PCF 具有相同的结构参数.纤芯由一个缺失的圆孔构成,包层由三层空气孔构成,并增大纤芯附近 x 方向上的 4 个圆孔直径.相邻的两层空气孔的间距 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$,其中小孔的直径 $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$,大孔直径 $d_2 = 1.4 \mu\text{m}$,结构端面如图 9 所示.

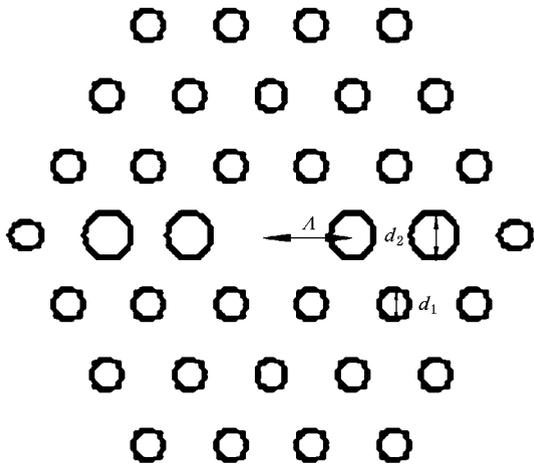


图 9 六边形 PCF 截面示意图 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.4 \mu\text{m}$

对该结构的色散系数、限制损耗及双折射率进行了模拟,分别如图 10—12 所示.从图 10 可以看出,六边形结构 PCF 的快轴模和慢轴模的色散系数变化规律与八边形结构类似,但它们对应的零色散波长分别为 0.950 和 $0.958 \mu\text{m}$,显然八边形结构可以使零色散波长向短波方向移动.图 11 示出了六边形结构 PCF 的限制损耗,其值要比八边形结构 PCF 的限制损耗值大很多.图 12 示出了六边形结构 PCF 的双折射率,在波长 $2.0 \mu\text{m}$ 处最高值为 0.847×10^{-3} ,而该波长下的八边形结构 PCF 双折射率可达 1.704×10^{-3} ,数值提高了约一倍.

如图 1 和图 9 所示参数相同的八边形和六边形结构 PCF,它们的空气填充率分别为 79.5% 和 60.9% ,八边形结构 PCF 的空气填充率明显要大得多.因为 PCF 的零色散波长随着空气填充率的增大向短波长方向移动^[24],所以八边形结构 PCF 的零色散波长更趋向于较短波段.同时八边形结构 PCF 中包层空气填充率的增加,提高了光纤纤芯与包层之间的折射率差,有效减少了光的泄露,因此大幅度减

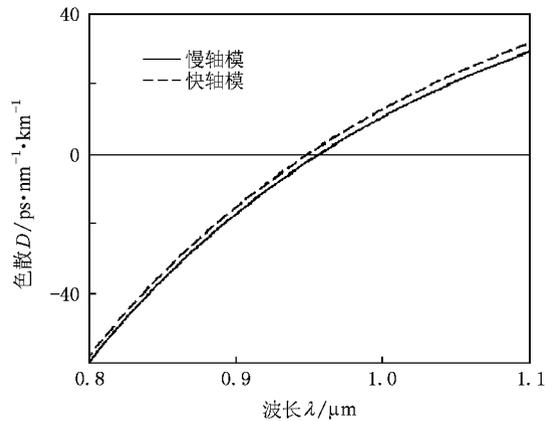


图 10 六边形 PCF 的色散系数随波长的变化关系

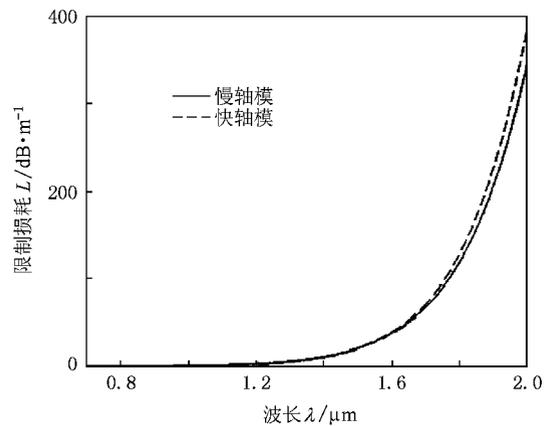


图 11 六边形 PCF 的限制损耗随波长的变化关系

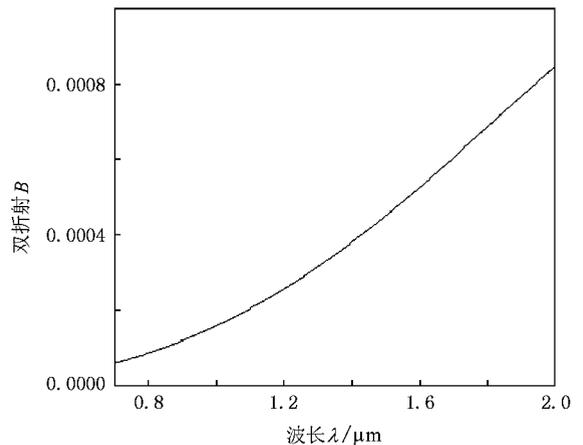


图 12 六边形 PCF 的双折射率随波长的变化关系

小了限制损耗.此外,由图 1 和图 9 可以看出,与六边形结构 PCF 相比,八边形结构 PCF 的 x 方向和 y 方向的折射率差明显提高了,因此可以产生较大的

双折射率.

综上所述,相对于六边形结构 PCF,八边形结构的双折射 PCF 可以大幅度提高双折射率,有效减小限制损耗,并使零色散波长向短波方向移动.

4. 结 论

提出一种新型的 PCF 结构,它是基于正八边形

排列的,通过增大纤芯附近的一些空气孔的直径获得双折射.利用多极法对基模的模场分布、结构的色散系数、限制损耗、双折射率和拍长进行了数值模拟,还计算了具有相同参数的六边形结构 PCF 的色散系数、限制损耗及双折射率.通过比较发现,具有相同参数的八边形结构 PCF 比六边形结构 PCF 的双折射率值提高了一倍,限制损耗大幅度减小了,零色散波长也向短波方向移动了约 $0.04 \mu\text{m}$.

- [1] Knight J C , Birks T A , Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1549
- [2] Birks T A , Knight J C 1997 *Opt. Lett.* **22** 963
- [3] Birks T A , Mogilevtsev D , Knight J C , Russell P S J 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 676
- [4] Zhao X T , Hou L T , Liu Z L , Wang W , Wei H Y , Ma J R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2275 (in Chinese) [赵兴涛、侯蓝田、刘兆伦、王伟、魏红彦、马景瑞 2007 物理学报 **56** 2275]
- [5] Hansen T P , Broeng J , Libori S E B , Knudsen E , Bjarklev A , Jensen J R , Simon H 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 588
- [6] Lou S Q , Wang Z , Ren G B , Jian S S 2004 *Chin. Phys.* **13** 1052
- [7] Steel M J , Osgood R M 2001 *Opt. Lett.* **26** 229
- [8] Ortigosa-Blanch A , Knight J C , Wadsworth W J , Arriaga J , Mangan B J , Birks T A , Russell P S J 2000 *Opt. Lett.* **25** 1325
- [9] Zhang D S , Dong X Y , Zhang W G , Wang Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1235 (in Chinese) [张德生、董孝义、张伟刚、王智 2005 物理学报 **54** 1235]
- [10] Hu M L , Wang Q Y , Li Y F , Ni X C , Zhang Z G , Wang Z , Chai L , Hou L T , Zhou G Y , Li S G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4252 (in Chinese) [胡明列、王清月、栗岩峰、倪晓昌、张志刚、王专、柴路、侯蓝田、周桂耀、李曙光 2004 物理学报 **53** 4252]
- [11] Hansen T P , Broeng J , Libori S E B , Knudsen E , Bjarklev A , Jensen J R , Simonsen H 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 590
- [12] Ortigosa-Blanch A , Diez A , Delgado-Pinar M , Cruz J L , Andres M V 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1667
- [13] Ju J , Jin W , Demokan M S 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1375
- [14] Kakarantzas G , Ortigosa-Blanch A , Birks T A , Russell P S J , Farr L , Couny F , Mangan B J 2003 *Opt. Lett.* **28** 158
- [15] Folkenberg J R , Nielsen M D , Mortensen N A , Jakobsen C , Simonsen H R 2004 *Opt. Express* **12** 956
- [16] White T P , Kuhlmeiy B T , McPhedran R C , Maystre D , Renversez G , de Sterke C M , Botten L C 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2322
- [17] Kuhlmeiy B T , White T P , Renversez G , Maystre D , Botten L C , de Sterke C M , McPhedran R C 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2331
- [18] White T P , McPhedran R C , Botten L C , Smith G , de Sterke C M 2001 *Opt. Express* **9** 721
- [19] Zhu Z M , Brown T G 2002 *Opt. Commun.* **206** 333
- [20] Peyrilloux A , Chartier T , Hideur A , Berthelot L , Melin G , Lempereur S , Pagnoux D , Roy P 2003 *Lightwave Technol.* **21** 536
- [21] Kunimasa S , Masaniri K 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 1291
- [22] Jia W G , Yang X Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1053 (in Chinese) [贾维国、杨性愉 2005 物理学报 **54** 1053]
- [23] Jia W G , Shi P M , Yang X Y , Zhang J P , Fan G L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4575 (in Chinese) [贾维国、史培明、杨性愉、张俊萍、樊国梁 2006 物理学报 **55** 4575]
- [24] Chen Y Z , Li Y Z , Qu G , Xu W C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 717 (in Chinese) [陈泳竹、李玉忠、屈圭、徐文成 2006 物理学报 **55** 717]

Octagonal photonic crystal fiber of birefringence^{*}

Yang Qian-Qian¹† Hou Lan-Tian¹‡

¹ *✉ Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

² *✉ Key Laboratory of Metastable Material Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

(Received 3 March 2009 ; revised manuscript received 27 March 2009)

Abstract

In this paper we propose a novel octagonal birefringent photonic crystal fiber, which shows birefringence when the size of several holes near the core is enlarged. The modal field, dispersion, confinement loss, birefringence of the fiber fundamental mode and the influence on birefringence of some parameters are simulated by multipole method. The dispersion, confinement loss, birefringence of the hexagonal photonic crystal fiber having the same parameters were also computed. By comparison, we conclude that the octagonal photonic crystal fiber have larger birefringence, smaller confinement loss and shorter wavelength of zero dispersion than the hexagonal photonic crystal fiber with the same parameters.

Keywords : photonic crystal fiber, birefringence, dispersion, confinement loss

PACC : 4280M, 4281D, 8120J

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60637010).

[†] E-mail : xiaoyangqianqian@sina.com