

色散补偿光子晶体光纤结构参数对其色散的影响*

陈翔 张心贲 祝贤 程兰 彭景刚 戴能利 李海清 李进延†

(华中科技大学, 国家光电实验室, 武汉 430074)

(2012年7月10日收到; 2012年8月22日收到修改稿)

光子晶体光纤由于其灵活可调的色散特性用作色散补偿具有极大的应用潜力. 设计了一种色散补偿光子晶体光纤, 并运用频域有限差分法模拟了其色散特性, 从理论上分析了其结构参数孔间距 Λ 和空气占空比 d/Λ 对该光子晶体光纤的色散系数的影响, 并且实际制备出了 3 种不同结构参数的光子晶体光纤. 通过对其色散曲线对比分析表明: 当光子晶体光纤孔间距在 $1\ \mu\text{m}$ 附近时, 其色散系数随着孔间距 Λ 和占空比 d/Λ 的增大而增加, 但对于孔间距 Λ 的变化比占空比 d/Λ 更为敏感, 并且随着孔间距 Λ 的增加, 其对色散系数的影响能力逐渐减小. 设计并制备的光子晶体光纤在 $1550\ \text{nm}$ 处的色散系数为 $-241.5\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 相对色散斜率为 0.0018 , 具有较好的色散补偿能力.

关键词: 色散, 色散补偿, 光子晶体光纤, 结构参数

PACS: 42.81.-i, 42.81.Cn, 81.05.Ni

DOI: 10.7498/aps.62.044222

1 引言

在现代高速光纤通信系统中, 色散已经取代损耗成为光纤通信系统的主要制约因素. 由于色散补偿光纤^[1]是一种无源器件, 可放在光纤线路中任何位置, 安装方便, 能与标准单模光纤兼容, 能得到较小的插入损耗, 因此受到普遍的重视, 成为当今的研究热点. 但普通色散补偿光纤其补偿能力有限, 很难实现宽带补偿, 并且成本较高, 无法兼顾偏振模色散补偿. 光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF)^[2]的出现提供了一种全新的色散补偿方法. PCF 由沿着光纤长度方向的一个中心缺陷及多个围绕着缺陷的空气孔构成, 近年来, PCF 因为其具有在传统光纤中无法达到的独特性能而引起了广泛的关注, 其灵活可调的色散特性就是其中一个非常重要的特性, 通过改变孔间距 Λ 和空气占空比 d/Λ 能够在特定的波段实现正常色散、反常色散^[3,4]以及偏振模色散^[5]. 其实际应用如 PCF 用于超连续谱产生^[6,7]、色散平坦 PCF^[8]、色散补偿 PCF^[9,10]等. PCF 用作色散补偿具有极大的应用潜

力. 2004 年, Gerome 等^[11]设计了一种同轴双芯色散补偿 PCF, 该 PCF 在 $1550\ \text{nm}$ 处有很高的负色散系数; 2006 年, Fujisuma 等^[12]对同轴双芯 PCF 在 C 波段的色散系数与其结构参数的关系进行了分析, 并对其结构参数进行了优化. 但是这些研究都是在理论模拟的基础上进行的分析, 结合实际制备光纤的研究很少报道. 本文从理论分析和实际制备两方面对光子晶体光纤结构参数对其色散性能的影响进行了研究, 对实际设计和制备色散补偿光子晶体光纤具有非常重要的指导意义.

2 光纤设计

本文设计了一种色散补偿 PCF, 理论设计光纤横截面如图 1(a) 所示, 灰色和白色区域分别表示二氧化硅和空气, 纤芯直径约 $1.2\ \mu\text{m}$, 空气占空比 d/Λ 和孔间距 Λ 分别为 0.6 和 $1\ \mu\text{m}$, 模拟结果表明该光纤在 $1550\ \text{nm}$ 处具有很高的负色散系数 ($-329\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$), 相对色散斜率 (relative dispersion slope, RDS) 为 0.0019 , 其色散曲线如图 1(b) 所示, 具有很好的宽带色散补偿能力.

* 国家自然科学基金 (批准号: 81100701) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ljj@mail.hust.edu.cn

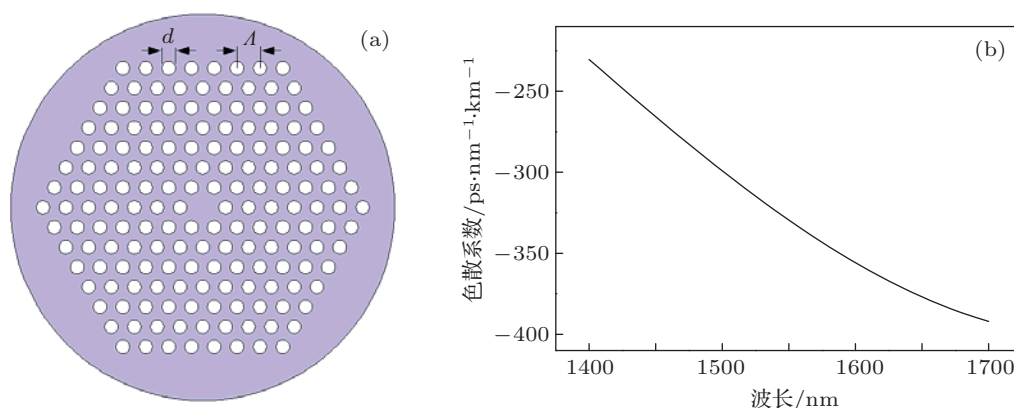


图1 (a) PCF 横截面; (b) PCF 色散曲线

光子晶体光纤由一种材料制备而成, 因此材料色散可以不予考虑, 只考虑波导色散, 所以其色散能由其结构参数决定. 为了验证空气占空比 d/Λ 及孔间距 Λ 对 PCF 色散的影响, 我们用频域有限差分 (finite-difference frequency-domain, FDFD) 法对其色散系数进行了模拟 [13].

首先, 在 Λ 为 $1\ \mu\text{m}$ 保持不变的情况下, 模拟了 d/Λ 从 0.6 变化到 0.9 对色散系数的影响, 模拟结果如图 2 所示.

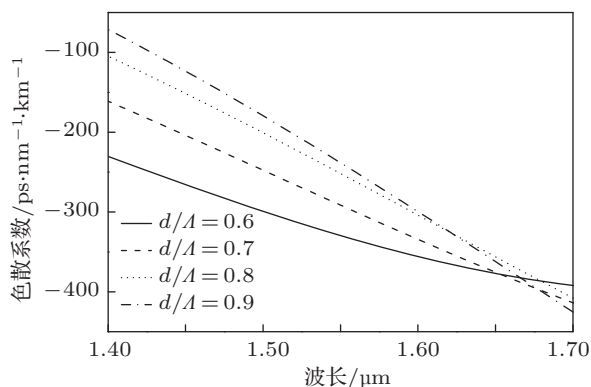


图2 d/Λ 改变模拟结果

在 1550 处, Λ 为 $1\ \mu\text{m}$, d/Λ 不同的 PCF 色散值具体如表 1.

表1 $\Lambda = 1\ \mu\text{m}$, 占空比改变时 PCF 的色散系数

d/Λ	色散系数/ $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$
0.6	-329.52
0.7	-291.42
0.8	-251.77
0.9	-238.32

从图 2 和表 1 中可以看出, 在 Λ 不变的情况下, d/Λ 改变对色散数值影响很大. 当 d/Λ 从 0.6 增加到 0.7 时, 其在 1550 nm 处色散值从 $-329.52\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 增加到 $-238.32\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 增长率为 11.6%, 当 d/Λ 从 0.8 增加到 0.9 时, 其在 1550 nm 处的色散值从 $-251.77\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 增加到 $-238.32\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 增长率为 5.3%. 这表明, 在 1550 nm 处色散随着 d/Λ 的增加而增加, 同时, d/Λ 对色散的影响能力随着 d/Λ 的增加而减小, 因此可以通过调节占空比来调节色散.

在 d/Λ 不变的情况下, Λ 从 $1.0\ \mu\text{m}$ 变化到 $1.5\ \mu\text{m}$ 时的色散模拟结果如图 3 所示.

图 3(a) 为 d/Λ 为 0.6 不变时, Λ 由 $1.0\ \mu\text{m}$ 变化到 $1.5\ \mu\text{m}$ 的色散变化曲线; 图 3(b) 为占空比 0.8 不变时, 孔间距由 $1.0\ \mu\text{m}$ 变化到 $1.5\ \mu\text{m}$ 的色散变化曲线. 在 1550 nm 处, 色散值随 Λ 的变化如表 2.

表2 占空比不变情况下, 孔间距改变时 PCF 的色散系数

$\Lambda/\mu\text{m}$	色散系数/ $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$	
	$d/\Lambda = 0.6$	$d/\Lambda = 0.8$
1.0	-329.52	-251.77
1.1	-204.31	-91.73
1.2	-106.41	7.83
1.3	-36.71	67.53
1.4	10.67	102.29
1.5	41.96	121.72

从表 2 中可知, 在 d/Λ 为 0.6 时, Λ 从 1.0 增加到 1.1, 色散系数由 $-329.52\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 增长为 $-204.31\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 当 Λ 增长 10% 时

色散增长率约为 38%; 在 d/Λ 为 0.8 时, Λ 同样变化, 色散系数由 $-251.77 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 增加到 $-91.73 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 增长率为 63.5%. 可见, 当 Λ 在 $1 \mu\text{m}$ 附近时, 色散系数对 Λ 变化极其敏感, 然而, 当 Λ 逐渐增大时, 色散的变化量逐渐减小, 表 2 中可以看出, Λ 从 $1.4 \mu\text{m}$ 增加到 $1.5 \mu\text{m}$ 时, 色散值的增加远比 Λ 从 $1.0 \mu\text{m}$ 变化到 $1.1 \mu\text{m}$ 色散值的增加要小. 但与此同时, 色散的数值已经为正, 表明该结构 PCF 的色散对结构参数的精确要求相当高, 制造工艺困难.

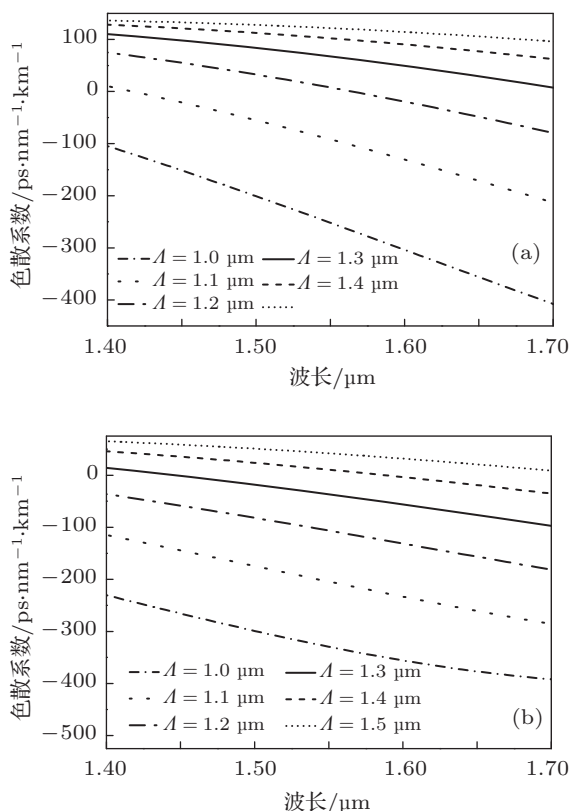


图 3 d/Λ 不变时, Λ 改变对色散系数的影响 (a) $d/\Lambda = 0.6$; (b) $d/\Lambda = 0.8$

3 光纤的制备与性能

PCF 由毛细管堆叠拉制而成, 主要包括以下步骤: 1) 选用合适占空比的套管, 经处理后拉制合适直径的毛细管; 2) 挑选直径一致的毛细管及石英棒集束排列成预制棒; 3) 对预制棒进行套管, 然后拉制光纤.

本文制备了三种光子晶体光纤, 分别编号为 PCF1, PCF2, PCF3, 其电镜扫描图分别如图 4 所示. 经测量, PCF1, PCF2, PCF3 的结构参数分别为: $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.6$; $\Lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.7$; $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.8$; 光纤直径均为 $125 \mu\text{m}$. 并

根据电镜扫描图所测量的结构参数分别模拟了这 3 种光纤的色散曲线, 结果如图 5 和图 6 所示.

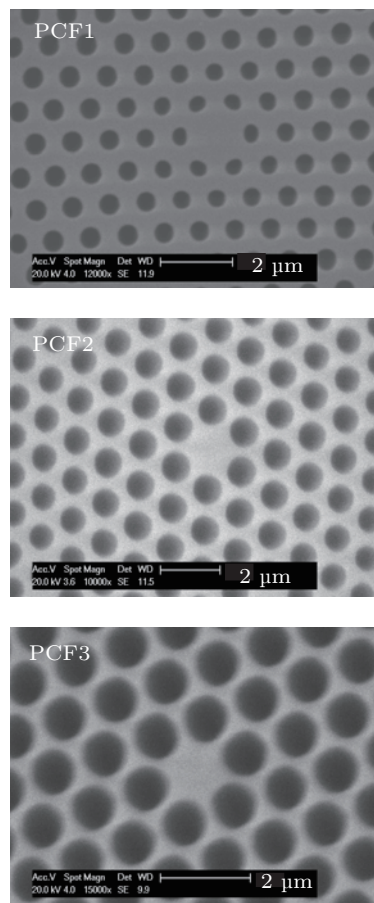


图 4 三种 PCF 的电镜扫描图

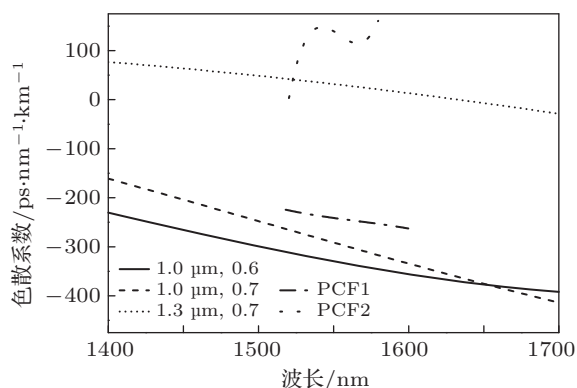


图 5 PCF1 和 PCF2 的模拟及测试结果

图 5 为 PCF1 和 PCF2 的对比模拟结果, 实线、划线、点线分别表示结构参数 $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.6$; $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.7$; $\Lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.7$ 的 PCF 在 $1400\text{--}1700 \text{ nm}$ 波段范围内的色散系数. 从图 5 中可以看出, 当 Λ 保持 1.0

μm 不变时, d/Λ 从 0.6 增加到 0.7 时, PCF 在 1550 nm 处的色散系数从 $-329.5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 增大为 $-291.4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$; 而 d/Λ 保持 0.7 不变, Λ 从 1.0 μm 增加到 1.3 μm 时, PCF 在 1550 nm 处的色散系数由 $-291.4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 急剧增大为 $31.8 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. 图 6 为 PCF1 和 PCF3 的对比模拟结果, 实线、划线、点线分别表示结构参数 $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.6$; $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.8$; $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.8$ 的 PCF 在 1400—1700 nm 波段范围内的色散系数. 同样从图 6 中可以看出, 当 Λ 保持 1.0 μm 不变, d/Λ 从 0.6 增加到 0.8 时, PCF 在 1550 nm 处的色散系数从 $-329.5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 变为 $-251.8 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 而 d/Λ 保持 0.8 不变时, Λ 从 1.0 μm 增加到 1.2 μm 时, PCF 在 1550 nm 处的色散系数由 $-251.8 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 急剧增大为 $7.8 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. 由此可以推断出, 当仅改变 d/Λ 时, 色散系数的变化并不明显, 改变 Λ 时, 变化很敏感. 我们分别测量了三种 PCF 在 1520—1580 nm 波长段的色散系数, 色散的测试结果也与计算的色散曲线比较符合. 在 1550 nm 处, PCF1 的色散系数为 $-241.5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, PCF2 的色散系数为 $139.2 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, PCF3 的色散系数为 $10.5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, PCF 的色散系数随着 Λ 的增加而增大. 从之前的分析可以得出, d/Λ 改变对 PCF 色散系数的影响并不是很大. 三种 PCF 之间微小的孔间距 Λ 差异, 导致三种 PCF 的色散系数差别如此之大, 从而验证了 Λ 对色散系数的影响比 d/Λ 的影响要大得多, 实际制造这种光纤非常困难.

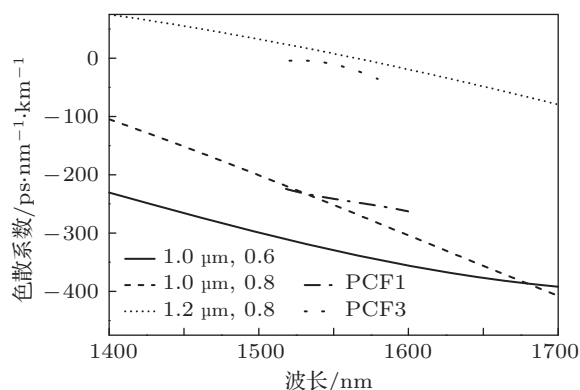


图 6 PCF1 和 PCF3 的模拟及测试结果

三种 PCF 中, PCF1 比较接近理想设计的结构: $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.6$. 但是由于控制过程中对空气孔内气压的控制程度不够, 导致内层空气

孔的占空比略小于外层空气孔. 从实际测试结果来看, 这对 PCF 的色散系数影响并不明显, PCF1 在 1550 nm 处的色散系数为 $-241.5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 具有比较好的色散补偿能力. 但是对于高速传输的密集波分复用系统而言, 不仅要对色散值进行补偿, 同时也要对光纤的色散斜率进行补偿, 也就是说, 需要对光纤在某波段内的色散同时进行补偿. 用色散补偿光纤实现这种全色散补偿时, 在被补偿的波段内, 需要满足以下条件:

$$L_{\text{CF}} \cdot D_{\text{CF}} + L_{\text{DCF}} \cdot D_{\text{DCF}} = 0, \quad (1)$$

式中 L_{CF} 为被补偿的光纤的长度; D_{CF} 为被补偿的光纤的色散值; L_{DCF} 为色散补偿的光纤的长度; D_{DCF} 为色散补偿的光纤的色散值.

因此, 相对色散斜率 RDS 定义为

$$\text{RDS} = S_{\text{CF}}/D_{\text{CF}} = S_{\text{DCF}}/D_{\text{DCF}}, \quad (2)$$

S_{CF} 为被补偿光纤的色散斜率; S_{DCF} 为色散补偿的光纤的色散斜率; 即色散补偿光纤与被补偿光纤的相对色散斜率接近或是相等^[14].

常用通信光纤 G652 在 C 波段的 RDS 为 0.0036, 而 PCF1 的 RDS 为 0.0018, 表明此种光纤具有良好的宽带色散补偿能力. RDS 的计算式为

$$\text{RDS}_{1550 \text{ nm}} = \frac{D(1570) - D(1530)}{D(1550) \times 40 \text{ nm}}, \quad (3)$$

其中 $D(1530)$, $D(1550)$, $D(1570)$ 分别为光纤在 1530, 1550, 1570 nm 的色散值.

结果表明提出的这种 PCF 结构具有一定的宽带色散补偿能力, 并且能够通过调节其结构参数在期望的波长范围内达到特定的色散要求. 值得一提的是, 其色散对孔间距 Λ 的变化比占空比 d/Λ 更为敏感. 但是这种 PCF 制备工艺困难, 占空比 d/Λ 在实际堆叠拉制法中是确定了的, 为了精确控制 PCF 的色散, 我们应该更多关注孔间距 Λ , 色散系数对孔间距 Λ 非常敏感, 然而, 在实际制备过程之中, 孔间距 Λ 的大小受到拉制过程中温度和速度的影响是不可控的, 但是我们可以通过轻微的改变光纤的直径, 精确控制孔间距 Λ 的大小, 从而精确控制 PCF 的色散系数.

4 结论

通过理论计算和实际测试结果的对比分析, 研究了色散补偿 PCF 的结构参数对其色散的影响, 发现色散系数对于孔间距 Λ 的变化比占空比 d/Λ

更为敏感, 并且随着孔间距 Λ 的增加, 其对色散系数的影响逐渐减小. 为了精确控制光子晶体光纤的色散, 我们可以在设计色散补偿 PCF 时增大其孔间距 Λ 或者在实际拉制过程中调节 PCF 的直径以达到精确控制孔间距 Λ 的目的. 实际制备出的色散补偿光子晶体光纤, 其结构参数为 $\Lambda =$

$1.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.6$, 其在 1550 nm 处的色散系数为 $-241.5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 该 PCF 的 RDS 为 0.0018, 表明此种光纤具有良好的宽带色散补偿能力, 对实际设计和制备色散补偿光子晶体光纤具有一定的指导意义.

-
- [1] Gruner-Nielsen L, Wandel M, Kristensen P, Jorgensen C, Jorgensen L V, Edvold B, Palsdottir B, Jakobsen D 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 3566
- [2] Russell P S J 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4729
- [3] Yang S, Zhang Y J, Peng X Z, Lu Y, Xie S H 2006 *Opt. Express* **14** 3015
- [4] Jiang L H, Hou L T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1095 (in Chinese) [姜凌红, 侯蓝田 2010 物理学报 **59** 1095]
- [5] Ritari T, Niemi T, Ludvigsen H, Wegmuller M, Gisin N, Folkner J R, Petterson A 2003 *Opt. Commun.* **226** 233
- [6] Jing Q, Zhang X, Ma H F, Huang Y Q, Ren X M 2012 *Opt. Laser Technol.* **44** 1660
- [7] Dudley J M, Genty G, Coen S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1135
- [8] Saitoh K, Koshiba M, Hasegawa T, Sasaoka E 2003 *Opt. Express* **11** 843
- [9] Shen L P, Huang W P, Chen G X, Jian S S 2003 *IEEE Photonic. Tech. L* **15** 540
- [10] Wang Z A, Ren X M, Zhang X, Xu Y Z, Huang Y Q 2007 *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* **9** 435
- [11] Gerome F, Auguste J L, Blondy J M 2004 *Opt. Lett.* **29** 2725
- [12] Fujisawa T, Saitoh K, Wada K, Koshiba M 2006 *Opt. Express* **14** 893
- [13] Pourmahyabadi M, Nejad S M 2009 *Iranian J. Electr. Electron. Eng.* **5** 170
- [14] 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]

Effects of structure parameters on the dispersion properties of dispersion compensation photonic crystal fiber*

Chen Xiang Zhang Xin-Ben Zhu Xian Cheng Lan Peng Jing-Gang
Dai Neng-Li Li Hai-Qing Li Jin-Yan[†]

(Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 10 July 2012; revised manuscript received 22 August 2012)

Abstract

Photonic crystal fiber has great potential applications such as dispersion compensation due to its adjustable and flexible dispersion characteristics. In this paper, we design a dispersion compensation photonic crystal fiber, simulate the dispersion characteristics by the finite-difference frequency-domain method, and analyse the effects of the structure parameters air hole spacing Λ and air-filling fraction d/Λ on the dispersion of photonic crystal fiber theoretically. And we also fabricate three photonic crystal fibers with different structural parameters. Through the comparison and analysis of their dispersion curves, we have the following conclusions: the dispersion coefficient increases with air hole spacing Λ and air-filling fraction d/Λ increasing when the air hole spacing of photonic crystal fiber is about 1 μm , but the dispersion is more sensitive to the change of air hole spacing Λ than to air-filling fraction d/Λ , and the effect of air hole spacing on the dispersion coefficient decreases with the increase of air hole spacing. One of the photonic crystal fibers realizes the designed structure: its dispersion coefficient is $241.5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, relative dispersion slope is 0.0018 at 1550 nm, it has good ability in dispersion compensation.

Keywords: dispersion, dispersion compensation, photonic crystal fiber, structure parameters

PACS: 42.81.-i, 42.81.Cn, 81.05.Ni

DOI: 10.7498/aps.62.044222

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 81100701).

[†] Corresponding author. E-mail: ljy@mail.hust.edu.cn