

C 波段具有平坦近零色散光子晶体光纤 的一种改进设计方法*

杨旺喜^{1)†} 周桂耀¹⁾²⁾³⁾ 夏长明¹⁾ 王伟¹⁾ 胡慧军¹⁾ 侯蓝田¹⁾²⁾

1) (燕山大学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国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

3) (华南师范大学信息光电子科技学院, 广州 510006)

(2010 年 9 月 24 日收到; 2010 年 12 月 10 日收到修改稿)

光子晶体光纤的最内层空气孔在拉制过程中容易发生形变, 从而严重影响色散. 基于多极法, 模拟了当最内层空气孔为不易发生形变的较小值时, 第二、三层空气孔对色散的影响, 结果表明这种简单的色散控制方法也可以实现零色散点的快速平移, 且保持色散平坦. 以此为基础, 设计了应用于 C 波段具有近零平坦色散的光子晶体光纤, 色散系数为 $-0.24 \sim -0.33 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$. 模拟表明, 从第五层开始增加空气孔的层数对已设计光纤的色散影响很小, 可以通过增加空气孔的层数得到理想的限制损耗. 这一方法亦适用于 S, L 波段具有类似性质 PCF 的设计.

关键词: 光子晶体光纤, 色散系数, 多极法, 限制损耗

PACS: 42.81Qb

1. 引言

光子晶体光纤^[1] (photonic crystal fiber, PCF), 其包层是由包围着实芯或空芯在横向上周期分布的空气孔构成. PCF 是二维的光子晶体, 芯区在横向上作为缺陷使得光被横向限制而纵向传播. PCF 有两种导光机理: 一种是实芯 PCF 中改进的全内反射机理; 另一种是空芯 PCF 中光子带隙导光机理.

PCF 有很多优良的特性^[2], 比如其可调的色散和较低的损耗以及无尽单模特性; PCF 预制棒的制作方法有: 堆积法、挤压法和超声波打孔法, 其中第一种方法最常用.

在光纤通信上, 色散^[3] 是一个决定通信质量和传输距离的重要参数, 由于 PCF 在色散方面的可调性^[4] 使得它在光纤通信的色散管理方面有很广泛的应用.

然而, 理论和实践表明 PCF 最内层空气孔对色散的影响很大, 同时在预制棒拉制成光纤的过程中最内层空气孔极易发生形变^[5], 使得精心设计的色散与实际偏离太大.

另外, 传统色散控制方法需调参数较多, 甚至某一层的空气孔都被设计成不同大小; 传统方法中成功设计具有理想色散的 PCF 所需尝试次数较多, 且大多并未考虑第一层空气孔在拉制过程中容易变形的实际; 一些较复杂的色散控制方法虽然在模拟时表现优良, 但给预制棒的制作带来困难. 基于以上原因, 设计将最内层空气孔定为一个在拉制过程中不易发生形变的较小值, 然后在孔节距不变的情况下探讨仅用第二、三层空气孔进行色散调节的简单方法.

2. 理论模型

2.1. 光纤模型

如图 1 所示, 光纤的最内层空气孔直径为 d_1 , 第二、三层空气孔直径分别为 d_2, d_3 . 孔间距 Λ , d_1 在整个模拟过程中都不变, 分别为 $2, 0.4 \text{ } \mu\text{m}$. 最外层空气孔直径 d 为 $0.8 \text{ } \mu\text{m}$. 当单独研究 d_2 与色散 D 的关系时, d_3 为 $0.8 \text{ } \mu\text{m}$; 当单独研究 d_3 与色散 D 的关系时, d_2 为 $0.8 \text{ } \mu\text{m}$.

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60637010) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327604) 资助的课题.

† E-mail: yanshanywx@sohu.com.

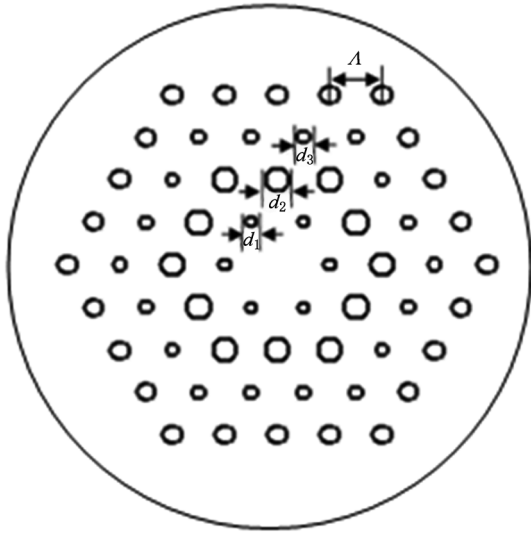


图1 光子晶体光纤横截面和结构参数示意图

d_1 定为较小值不仅能减小预制棒在拉制过程中最内层空气孔的变形,而且能减小非线性效应,孔间距 Λ 设为较大的 $2\text{ }\mu\text{m}$,也能减小非线性效应.整个光纤的孔间距 Λ 不变,进一步使预制棒堆积变得简单.

2.2. 多极法理论^[6-8]

多极法由 White 和 Kuhlmeier 等^[6,7]提出,适合于较精确模拟由圆形空气孔构成的 PCF. 多极法不仅能计算模式有效折射率(其实部可以用来计算色散,虚部可以计算损耗),还能模拟光纤中电磁场在各个方向的模场分布. 根据多极法,在第 1 个空气孔中模场可以展开为 Bessel 函数形式,其电场纵向分量在极坐标下可以表示为

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

在第 1 个空气孔邻近的介质中,其电场纵向分量可以表示成

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

(1), (2) 式中 $k_{\perp}^i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$, $k_{\perp}^e = (k_0^2 n_e^2 - \beta^2)^{1/2}$, 空气折射率 $n_i = 1$, n_e 为石英折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间的波数. 磁场分量与此类似. 在空气孔的边界上,利用电磁场边界条件,可以得到关于 $a_m^{(l)}$, $b_m^{(l)}$ 和 $c_m^{(l)}$ 的表达式,进一步通过 $n_{\text{eff}} = \beta/k$,

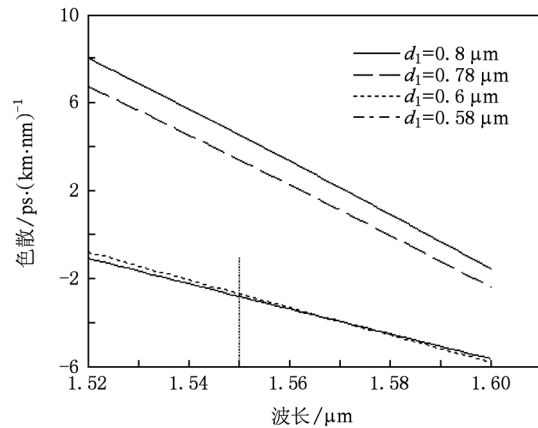
求得光纤的基模有效折射率 n_{eff} ,进而可求得 PCF 的色散系数

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2}, \quad (3)$$

式中, λ 为在光纤中传输光的波长, c 为真空中的光速. 由(3)式可以算出波导色散,本文就 PCF 的波导色散进行讨论.

3. 模拟过程与结果分析

从图 2 可以看出 d_1 对基模色散系数的影响很大,而且随着 d_1 的增大,色散系数对 d_1 有微小变化的敏感性也增大. 在实际 PCF 拉制过程中,第一层空气孔也是易变形的,尤其是当 d_1 较大时;另外,模拟表明第一层空气孔直径减小时还能使色散曲线斜率的绝对值变小:当 d_1 为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 时,曲线在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波长处色散斜率绝对值为 $|-0.04\text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)|$,当 d_1 减为 $0.36\text{ }\mu\text{m}$ 时,色散斜率绝对值单调减小为 $|-0.008\text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)|$. 模拟还发现,基模色散曲线斜率也主要由第一层空气孔大小决定. 考虑到当第一层空气孔太小时,容易在拉制过程中发生坍塌,后面的设计将 d_1 定为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$.


 图2 在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 微米处不同 d_1 对应的基模色散系数(除 d_1 外,PCF 一切参数不变)

如图 3(a) 和 (b) 所示,同样的 d_2/d_1 或 d_3/d_1 下,色散系数都随波长的增大并非表现为单调减小,而是先减小后又增大,色散斜率先负后正,色散系数存在极小值;在某些特定波长处的 D 值亦与 d_2/d_1 或 d_3/d_1 不成单调关系,即曲线有交叉,尤其表现在第二层空气孔与基模色散系数的关系中. 在短波区,色散系数为正,表现为反常色散;随着波长的增

大,部分 d_2/d_1 和全部 d_3/d_1 所对应色散系数由正变为负值,表现为正常色散;波长继续增大后,可以从图中预见色散系数会重新变为正值,表现为反常色散.

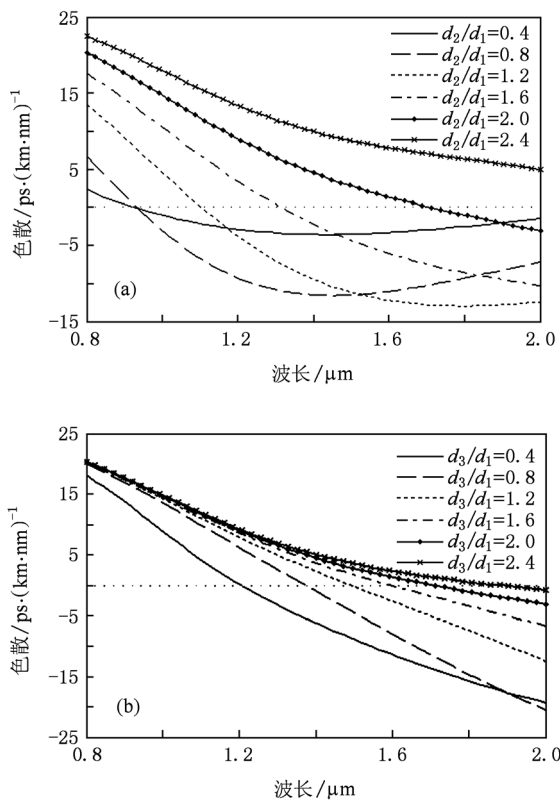


图3 (a)在 $\lambda = 2 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_3 = d = 0.8 \mu\text{m}$ 下,不同 d_2/d_1 所对应的色散系数;(b)在 $\lambda = 2 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_2 = d = 0.8 \mu\text{m}$ 下,不同 d_3/d_1 所对应的色散系数

从图3(a)也可以看出,距芯区较近的第二层空气孔对色散的影响仍然很大,完全可以用来调节零色散点的平移,并且可调范围很大,覆盖从近红外到 $2 \mu\text{m}$ 的波长范围;

从图3(b)中可看出,相对于第二层空气孔来说,第三层空气孔对色散的影响减弱,表现为两方面:第一,零色散点调节范围缩小,在 $d_2 = 0.8 \mu\text{m}$ 时,它的调节仅限于 $1.2 \mu\text{m}$ 之后的波长范围;第二,特定波长处对色散的影响减弱,在 $1.55 \mu\text{m}$ 处,当 d_2/d_1 从 0.4 增大到 2.4 ,对应的 D 的变化为从 $-12 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 到 $12 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$,而当 d_3/d_1 从 0.4 增大到 2.4 ,对应的 D 的变化仅为 $-12 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 到 $2 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$,且曲线分布较集中,这一现象在短波区表现得更为明显.

值得注意的是,在短波区,当 d_3 不是太小时几乎对 D 没有影响,这是因为在短波长处,模场较好地

被限制于第三层空气孔之内,而在长波区,模场面积增大,第三层空气孔才对色散有了明显的影响;但当 d_3/d_1 较小时(如图 $d_3/d_1 = 0.4$),即便在短波区,第三层空气孔亦有对色散不可忽略的影响,其原因可能是第三层空气孔太小时,形成了文献[9, 10]所述的双芯结构,即芯区光场与第三层空气孔邻近区域的玻璃介质区发生了耦合作用.

图4(a)和(b)是由各 d_2/d_1 或 d_3/d_1 在 $1.55 \mu\text{m}$ 处对应的色散系数值进行二乘法曲线拟合而成,它们从另一侧面描述了第二、三层空气孔对PCF色散的影响:在 $1.55 \mu\text{m}$ 处, D 随着 d_2/d_1 或 d_3/d_1 的增大也呈先减小后增大的趋势,在 $d_2/d_1 = 1$ 和 $d_3/d_1 = 0.5$ 处分别取得极小值,从中也能反映出波导色散随着空气孔的增大不呈单调变化,对于第二层空气孔来说尤为突出. 另外也可看出当 d_3/d_1 较小时,曲线斜率较大,说明当第三层空气孔较小时对 D 的影响很大,与图3(b)的结果相一致. 从图4(a)可看出,当 d_2/d_1 为 1.9 时 D 近零. 也可以

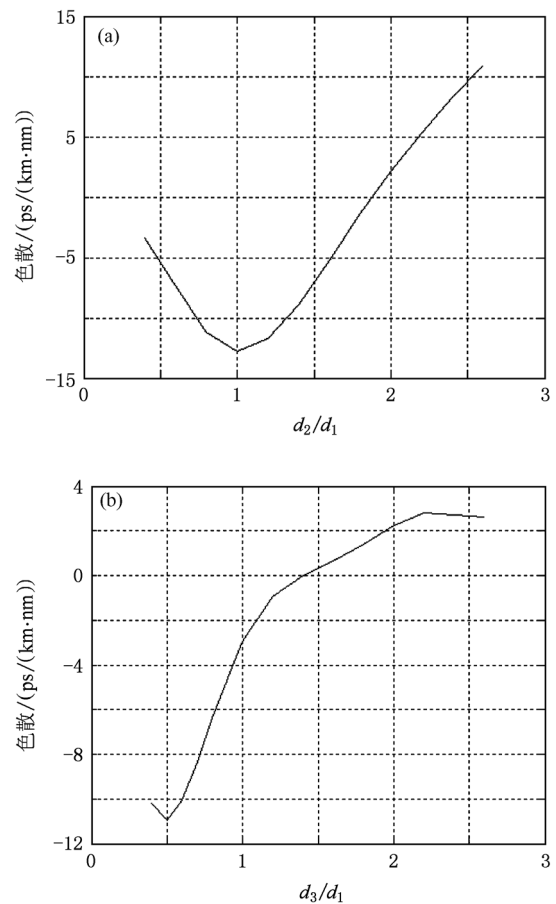


图4 (a)在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处, $d_3 = 0.8 \mu\text{m}$ 时,不同 d_2/d_1 下的色散系数;(b)在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处, $d_2 = 0.8 \mu\text{m}$ 时,不同 d_3/d_1 下的色散系数

从其它波长处的 $D-d_2/d_1$ 曲线确定零色散点所对应的 d_2/d_1 值.

模拟中还发现,当 d_1, d_2 确定后再改变 d_3 时,色散曲线近乎平移,而保持形状不变,这一特点使得零色散点可以在 C 波段中平移,而保持色散斜率基本不变. 可以用第二层空气孔对零色散点进行“粗调”,将零色散点大致定位,再用第三层空气孔对其进行“微调”.

4. C 波段平坦近零色散 PCF 设计与性能分析^[11,12]

第一步:将第一层空气孔定为一个较小值,一方面可以避免由于大空气孔在拉制过程中的形变,另一方面也可以使色散曲线平坦;

第二步:绘制某一波长处 D 随 d_2/d_1 的变化趋势图,从图中可以大致确定零色散点对应的 d_2 值;

第三步:微调第三层空气孔,使色散曲线平移定位.

根据图 4(a) 曲线,选择 $d_2/d_1 = 1.9$, 即 $d_2 = 0.76 \mu\text{m}$, 然后再微调 d_3 , 使零色散点移动到 $1.55 \mu\text{m}$, 这时的 $d_3 = 0.764 \mu\text{m}$, 即 $d_3/d_1 = 1.91$. 值得注意的是,在图 4(b) 中 $d_3/d_1 = 1.91$ 处并未对应于 $D = 0$, 这是因为第二、三层空气孔在对色散的影响上并非独立,图 4(b) 中的曲线是 $d_2 = 0.8 \mu\text{m}$ 时 d_3/d_1 对 D 的影响曲线.

如图 5 所示为波长为 $1.5 \mu\text{m}$ 处所设计光纤的基模图.

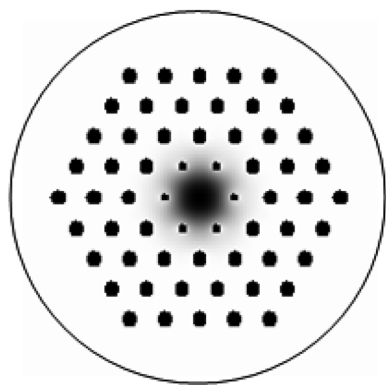


图 5 基模图 ($d_1 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.76 \mu\text{m}$, $d_3 = 0.764 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$)

如图 6 是基模在 C 波段附近的色散,从中可以看出,在 1.530 到 $1.565 \mu\text{m}$ 的 C 波段,色散系数范

围为 $0.33 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 到 $-0.24 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 并且零色散点位于 $1.55 \mu\text{m}$ 低损耗窗口,在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的色散系数斜率的绝对值仅为 $|-0.016 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)|$. 这一结果已经超过了文献[13—16]在色散平坦上得到的结果,与文献[17]得到的结果相当.

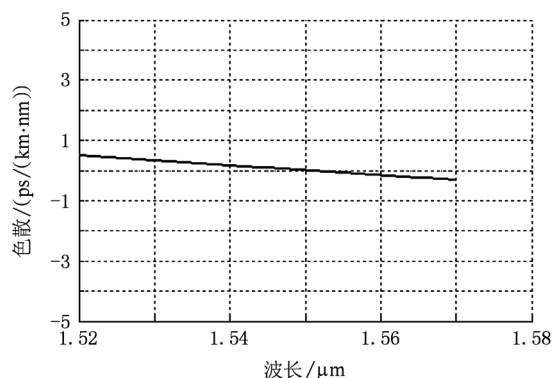


图 6 基模在 C 波段附近的色散

为了减小限制损耗,模拟了从第五层开始增加空气孔后的 PCF 色散(所加空气孔的直径都为 $0.8 \mu\text{m}$),结果如图 7 所示:在 $1.55 \mu\text{m}$ 处,空气孔由四层变为五层后,所设计光纤色散系数约减小了 $2 \times 10^{-3} \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$,空气孔由五层变为六层后,所设计光纤的色散系数约减小了 $1 \times 10^{-4} \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$,可见空气孔层数的增加对已设计光纤的色散影响很小,可以预见,继续增加空气孔的层数对光纤的色散会有更小的影响. 在实际预制棒排布过程中还可以进一步增加空气孔层数以减小限制损耗.

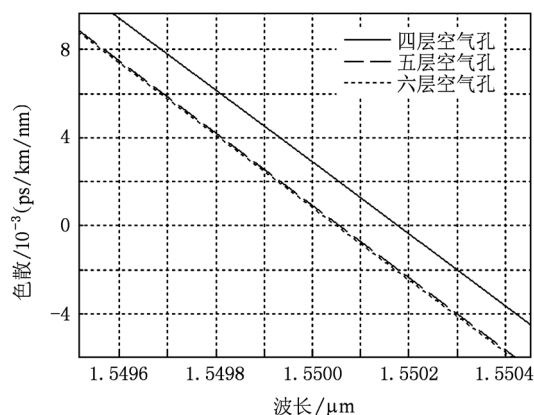


图 7 不同层数空气孔 PCF 的色散

5. 结 论

设计了应用于 C 波段近零平坦色散的光子晶

体光纤,得到了 C 波段色散系数介于 $-0.24-0.33$ $\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$, $1.55\ \mu\text{m}$ 处色散斜率绝对值为 $|-0.016\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)|$ 的近零平坦色散曲线. 此 PCF 从第五层起增加空气孔的层数,对已设计 PCF 的色散几乎没有影响,可以继续增加空气孔层数以

得到理想的限制损耗. 这种光子晶体光纤可以应用于 C 波段要求低色散、低损耗、非线性弱的场合,如波分复用系统. 这一设计方法基于拉制实际,且方便、快速,亦适用于 S, L 波段具有类似性质 PCF 的设计.

-
- [1] Knight J C, Russell P S 2002 *Science* **296** 276
 - [2] Fan H T, Li Q J 2007 *Micronanoelectronic Technology* **9** 900 (in Chinese) [范海涛、李秋菊 2007 微电子器件与技术 **9** 900]
 - [3] Huang J J, Li G, Chen M, Pang Q S, Bi X J 2006 *Laser Technology* **30** 432 (in Chinese) [黄建军、李 港、陈 檬、庞庆生、毕向军 2006 激光技术 **30** 432]
 - [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] Zhou G Y, Hou Z Y, Li S G, Han Y, Hou L T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6486 (in Chinese) [周桂耀、侯峙云、李曙光、韩 颖、侯蓝田 2007 物理学报 **56** 6486]
 - [6] White T P, Kuhlmei B T, McPhedran R C, Maystre D, Renversez G, de Sterke C M, Botten L C 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2322
 - [7] Kuhlmei 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
 - [8] Du H L, Zheng Y, Li K, Fu X Y, Yan X 2008 *Laser & Infrared* **38** 161 (in Chinese) [杜海龙、郑 义、李 坤、傅修远、闫 昕 2008 激光与红外 **38** 161]
 - [9] Song Z Y, Hou L T, Zhao X T, Wei D B, Liu X D, Liu Z L 2009 *Brazilian Journal of Physics* **39** 519
 - [10] Wang H H, Xue W R, Zhang W M, 2008 *Acta Optica Sinica* **28** 27 (in Chinese) [王红华、薛文瑞、张文梅 2008 光学学报 **28** 27]
 - [11] Liang D H, Guo H C, Wang F Z, Li R, Hou L T 2010 *Semiconductor Optoelectronics* **31** 112 (in Chinese) [梁丹华、郭慧超、王福增、李 蕊、侯蓝田 2010 半导体光电 **31** 112]
 - [12] Liang D H, Hou L T, Wang W, Liu Z L 2009 *Semiconductor Optoelectronics* **30** 590 (in Chinese) [梁丹华、侯蓝田、王 伟、刘兆伦 2009 半导体光电 **30** 590]
 - [13] Wang Z H, Wang Q Y, Li L F, Hu M L 2005 *Journal of Optoelectronics·Laser* **16** 629 (in Chinese) [王子涵、王清月、栗岩锋、胡明烈 2005 光电子·激光 **16** 629]
 - [14] Wang Z H, Li Y F, Hu M L, Wang Q Y 2005 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **22** 771 (in Chinese) [王子涵、栗岩锋、胡明烈、王清月 2005 量子电子学报 **22** 771]
 - [15] Wu W Q, Chen X W, Zhou H, Zhou K F, Lin X K, Lan S 2006 *Acta Optica Sinica* **35** 110 (in Chinese) [吴维庆、陈雄文、周辉、周开锋、林旭开、兰 胜 2006 光子学报 **35** 110]
 - [16] Shi Z H, Yan K Z 2007 *Acta Sinica Quantum Optica* **13** 224 (in Chinese) [石宗、闫珂柱 2007 量子光学学报 **13** 224]
 - [17] Qiu J C, Liu H K, Tian X X, Yuan F L 2008 *Semiconductor Optoelectronics* **29** 407 (in Chinese) [邱俊才、刘汉奎、田小兴、袁福来 2008 半导体光电 **29** 407]

An improved design method for C-band photonic crystal fibers with flat near-zero dispersion *

Yang Wang-Xi^{1)†} Zhou Gui-Yao¹⁾²⁾³⁾ Xia Chang-Ming¹⁾ Wang Wei¹⁾ Hu Hui-Jun¹⁾ Hou Lan-Tian¹⁾²⁾

1) (Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2) (State Key Laboratory of Metastable Material Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

3) (School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

(Received 24 September 2010; revised manuscript received 10 December 2010)

Abstract

The innermost air holes of photonic crystal fibers deform easily during the draw process, resulting in serious influence on the practical fiber dispersion. Based on the multipole method, the simulation in the paper only changes the air holes in the second layer and the third layer to adjust the dispersion, while the innermost air holes each are set to have a smaller parameter. The simulation shows that this simple dispersion control method can also make zero-dispersion point quickly move and keep the dispersion flat. Based on the detailed analysis, we propose C-band near-zero flat dispersion photonic crystal fiber with the dispersion coefficient varying from $-0.24 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ to $0.33 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$. Simulation shows that the air holes increasing from the fifth layer have little influence on the dispersion of previously proposed fiber, So by increasing the layers of air holes we can obtain an ideal confinement loss. This method is also applicable for the design of PCF operating in S and L bands with similar properties.

Keywords: photonic crystal Fiber, dispersion coefficient, the multipole method, the confinement loss

PACS: 42.81.Qb

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 6037010) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2010CB327604).

† E-mail: yanshanywx@sohu.com