

## 八边形光子晶体光纤色散补偿特性分析\*

张立超 侯蓝田<sup>†</sup> 周桂耀

(燕山大学红外光纤与传感技术研究所, 秦皇岛 066004)

(2010年6月12日收到; 2010年7月21日收到修改稿)

利用多极法对八边形光子晶体光纤的色散补偿特性进行数值模拟, 分析了结构参数变化对色散补偿特性的影响; 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和非线性系数; 研究表明八边形光子晶体光纤比六边形结构的光子晶体光纤的大负色散特性明显提高, 非线性系数低, 更有利于进行色散补偿. 因此, 本文设计了一种新型的八边形色散补偿光纤, 在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  时色散值为  $-1434.9 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 色散斜率为  $-4.6338 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ , 其补偿能力远大于常规光纤, 能够很好的实现宽带色散补偿.

**关键词:** 光子晶体光纤, 多极法, 色散斜率, 色散补偿

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.cn, 03.50.De

## 1. 引言

在光纤通信系统中, 影响光纤传输的主要因素是损耗和色散, 随着掺铒光纤放大器的实用化, 已经基本上解决了损耗的问题, 但却加剧了色散的累积, 使得色散问题更加突出, 产生色散的原因在于不同的波长在同一介质中的传播速度不同, 即群速度色散(它在不发生混淆的情况下被简称为“色散”), 而色散补偿是通过在内附加负色散, 以抵消传输光纤的累积色散, 改善信号质量. 因此如何克服该类系统的色散便成为当前光纤通信系统的一个研究热点.

随着人们对光子晶体光纤(PCF)的制作和理论研究的不断深入, 人们发现通过调整光纤微结构的设计, 可以极大地调节光纤的色散特性<sup>[1,2]</sup>.

近年来关于空气孔包层结构呈六边形分布的色散补偿光纤已经有很多研究<sup>[3,4]</sup>, Yang等<sup>[5]</sup>设计的微结构光纤可以实现负色散曲线在C波段范围内由  $-380 - 420 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  变化; Wang等<sup>[6]</sup>设计的微结构光纤在工作波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处实现了  $-1725.1 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的大负色散值. 关于八边形结构的光子晶体光纤的特性也已经有了好几篇文献<sup>[7-9]</sup>进行了报道, 但是对于其补偿特性还

没有深入研究过. 本文利用多极法对八边形结构的PCF的色散补偿特性进行考察, 特别是针对PCF在中心波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  窗口的色散补偿特性进行了详细的数值模拟, 再与具有相同参数的六边形结构的PCF进行比较分析, 为色散补偿光子晶体光纤的设计提供一定的理论依据.

## 2. 理论基础

最早利用多极法对微结构光纤的色散特性进行数值模拟的是 White 和 Kuhlmeier 等人<sup>[10-12]</sup>. 这种方法适合于快速计算由圆柱空气孔构成的微结构光纤, 可以同时产生模式和传播常数的实部和虚部, 利用实部可以计算光纤的色散, 利用虚部可以计算有限包层空气孔情况下的限制损耗. 此方法的关键是将每一个微结构或者孔都当成是散射源, 在它们的附近把电磁场表示出来. 应用麦克斯韦约束条件将这些独立的场表达出来, 形成了一个方程组. 利用柱型贝塞尔函数(Bessel)就可以求解出在极坐标系下第  $L$  个空气孔内部纵向电场展开式:

$$E_z = \sum_m A_{ml} J_m(k_{\perp}^l r) \exp(im\theta_l) \exp(i\beta z). \quad (1)$$

在此圆柱周围, 电场的纵向分量可用以圆柱  $L$  为中心的局部极坐标展开, 即

\* 国家重点基础研究发展计划(973)(批准号:2003CB14905)和国家自然科学基金重点项目(批准号:60637010)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信联系人. E-mail: hlt8068853@163.com

$$E_z = \sum_m [B_{ml} J_m(k_{\perp}^e r) + C_{ml} H_m^{(1)}(k_{\perp}^e r)] \times \exp(im\theta_l) \exp(i\beta z), \quad (2)$$

其中,  $k_{\perp}^i = (k_0^2 n_0^2 - \beta^2)^{1/2}$ ,  $k_{\perp}^e = (k_0^2 n_e^2 - \beta^2)^{1/2}$ , 其中  $n_0 = 1$  为空气孔的折射率,  $n_e$  为石英的折射率,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  是自由空间的波数. 磁场纵向分量  $H_z$  的表达式与此类似. 利用边界条件可以求解出  $A_{ml} B_{ml}$  和  $C_{ml}$  的表达式. 在实际的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  $\beta = n_{\text{eff}} k_0$  求得模式的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ . 由模式的有效折射率的实部可以求得色散系数

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

根据 (3) 式进一步可以得光纤色散斜率  $D_{\text{slope}}$  随波长的变化关系

$$D_{\text{slope}}(\lambda) = \frac{dD(\lambda)}{d\lambda}. \quad (4)$$

(3) 式中  $c$  为光真空中的速度. 由于光纤的色散系数  $D$  随波长变化, 为了适应宽带色散补偿的需要, 必须考虑对色散系数  $D_1$  和色散斜率  $D_{\text{slope}}$  同时进行补偿, 因此宽带色散补偿条件为  $D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0$ ,  $D_{\text{slope}1} L_1 + D_{\text{slope}2} L_2 = 0$ , 其中  $L_1, D_{\text{slope}1}$  和  $D_1$  为被补偿光纤的长度、色散斜率和色散系数. 由此可知色散补偿光纤的长度应满足  $L_2 = -D_1 L_1 / D_2$ , 可见要达到色散补偿的目的,  $D_1$  与  $D_2$  以及  $D_{\text{slope}1}$  与  $D_{\text{slope}2}$  的符号应该相反, 并且补偿光纤的色散  $D_2$  的绝对值越大, 它的补偿效率越高. 为了同时考虑色散系数和色散斜率的因素, 人们定义了一个新的参数卡帕 ( $\kappa$ ) (Kappa, 其单位为 nm), 其表达式为

$$\kappa = D / D_{\text{slope}}, \quad (5)$$

它表示器件对光纤色散和色散斜率的同时补偿能力. 如果要达到理想的宽带色散补偿, 一般要求色散补偿光纤的卡帕值与被补偿光纤接近或相等.

不同类型的传输光纤其色散特性不同, 要对它们进行合理的色散补偿就需要设计相应的色散补偿光纤, 光子晶体光纤的高度色散可调特性为色散补偿光纤的设计提供了新的机遇, 下面通过数值模拟讨论八边形光子晶体光纤的色散补偿特性.

### 3. 数值模拟

由单一材料(石英)制成的、中心去掉一个空气孔而形成纤芯的具有八角形排列的光子晶体光纤,

如图 1 所示. 其主要参数为包层空气孔间距  $\Lambda$  和包层空气孔半径  $r$ , 只要这两个参数确定了, 其等效纤芯半径和包层空气填充率 就可以惟一地确定.

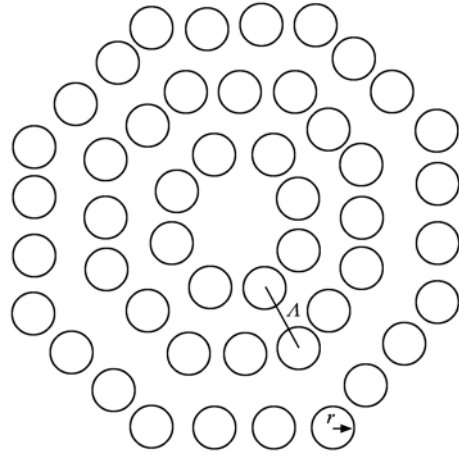


图 1 八边形光子晶体光纤结构图

#### 3.1. 光子晶体光纤孔间距 $\Lambda$ 固定, 空气孔半径 $r$ 变化时的分析

利用 CUDOS 对包层为正八边形空气孔排列,  $Nr = 3$ ,  $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$ , 空气孔半径  $r$  分别为  $0.21, 0.23, 0.25, 0.27 \mu\text{m}$  时的光子晶体光纤进行模拟, 用 Matlab 软件进行数值处理得到图 2 所示的基模色散系数  $D$  和色散斜率  $D_{\text{slope}}$  随波长  $\lambda$  的变化关系. 从图 2(a) 可以看出, 在孔间距  $\Lambda$  一定的情况下, 随着空气孔半径的增大, 在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处色散值  $|D|$  值逐渐增大, 值依次为  $-211.7230, -281.7726, -341.5807$  和  $-375.4078 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ . 可见在保持  $\Lambda$  不变的情况下, 增大  $r$  可以获得大的负色散值, 这有利于提高  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  的光纤色散补偿效率. 同时从图 2(a) 可以看到, 随着  $r$  的增大, PCF 色散的极小值是向长波方向移动的, 即整个色散曲线是向右移动.

图 2(b) 给出了在  $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$  情况下色散斜率  $D_{\text{slope}}$  随波长  $\lambda$  的变化情况, 从图 2(b) 可以看出随着  $r$  的增大, 在  $1.55 \mu\text{m}$  处的  $D_{\text{slope}}$  逐渐减小, 分别为  $0.2481, 0.1660, -0.0769, -0.4386 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ , 其值由正变负. 具有正色散斜率值的色散补偿光纤对普通单模光纤在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  附近的一个较宽的波长范围内进行色散补偿是十分不利的. 因为传统 G. 625 光纤和 G. 655 光纤在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  附近是具有正色散斜率的.

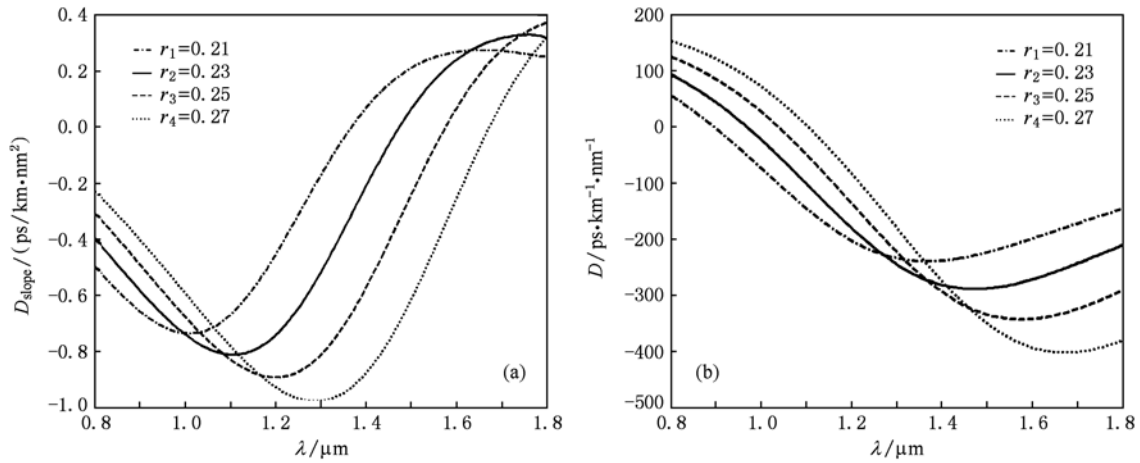


图2  $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$ ,  $r$  变化时色散系数和色散斜率的变化 (a) 色散系数  $D$  随波长  $\lambda$  的变化; (b) 色散斜率  $D_{\text{slope}}$  随波长的变化

### 3.2. 光子晶体光纤空气孔半径 $r$ 固定, 孔间距 $\Lambda$ 变化时的分析

利用多极法得到图 3 所示的  $Nr = 3, r = 0.25 \mu\text{m}$ , 孔间距  $\Lambda$  分别为  $0.8, 0.9, 1.0$  和  $1.1 \mu\text{m}$  时色散系数  $D$  和色散斜率  $D_{\text{slope}}$  随波长的变化关系. 由图 3(a) 可以看出在  $r$  不变的情况下, 增大  $\Lambda$ , 色散值  $D$  是逐渐增大的, 在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处色散分别为  $-693.0401, -486.0111, -341.5807,$

$-257.6416 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ; 由图 3(b) 可以看出增大  $D_{\text{slope}}$  先减小后增大, 在  $1.55 \mu\text{m}$  处  $D_{\text{slope}}$  分别为  $0.3590, -0.0101, -0.0769, -0.1413 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ . 虽然在  $r = 0.25 \mu\text{m}, \Lambda = 0.8 \mu\text{m}$  处  $D$  的绝对值最大, 但是它的色散斜率为正值, 用于普通单模光纤的宽带色散补偿是不利的. 可见要达到光纤的色散和色散斜率的同时补偿需要对光纤结构进行优化设计. 同时从图 3 中也可以看出增大  $\Lambda$ , PCF 色散的极小值是向长波方向移动的, 且色散曲线展宽.

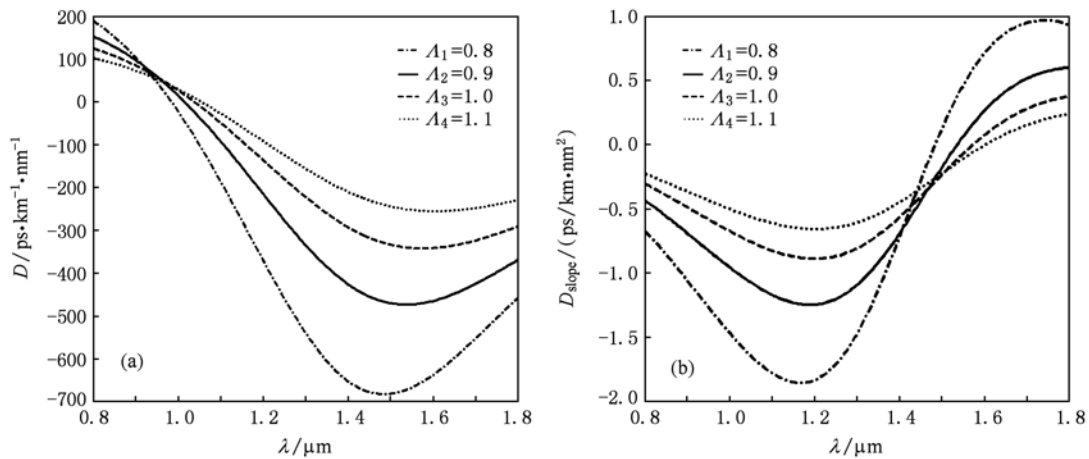


图3  $r = 0.25 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda$  变化时色散系数和色散斜率的变化 (a) 色散系数  $D$  随波长  $\lambda$  的变化; (b) 色散斜率  $D_{\text{slope}}$  随波长的变化

### 3.3. 八边形 PCF 结构参数的变化对 $\kappa$ 值的影响

为了考察光纤宽带补偿能力, 仅仅考虑大负色散特性是不够的, 需要全面的考虑它的色散系数和色散斜率值, 因此根据(5)式, 得到了考察宽带补偿

能力参数  $\kappa$  分别随  $r$  和  $\Lambda$  的变化图, 如图 4 所示.

对于 STM-28<sup>TM</sup> 传输光纤 ( $D = 17 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}, D_{\text{slope}} \approx 0.023 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ ) 的  $\kappa$  值约为  $740 \text{ nm}$ , 要想实现宽带补偿的要求补偿光纤的  $\kappa$  值与被补偿光纤的  $\kappa$  值接近或相等. 图 4 中的交叉点

即为补偿 STM-28<sup>TM</sup> 传输光纤的理想结构参数,图 4 (a) 在  $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$ ,  $r \approx 0.245 \mu\text{m}$  时满足条件. 图 4 (b) 在  $r = 0.25 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda > 1.1 \mu\text{m}$  时的  $\kappa$  值近似于

740 nm. 由此可知通过合理的调整 PCF 的结构参数就能设计出满足条件的补偿光纤,实现光纤宽带补偿.

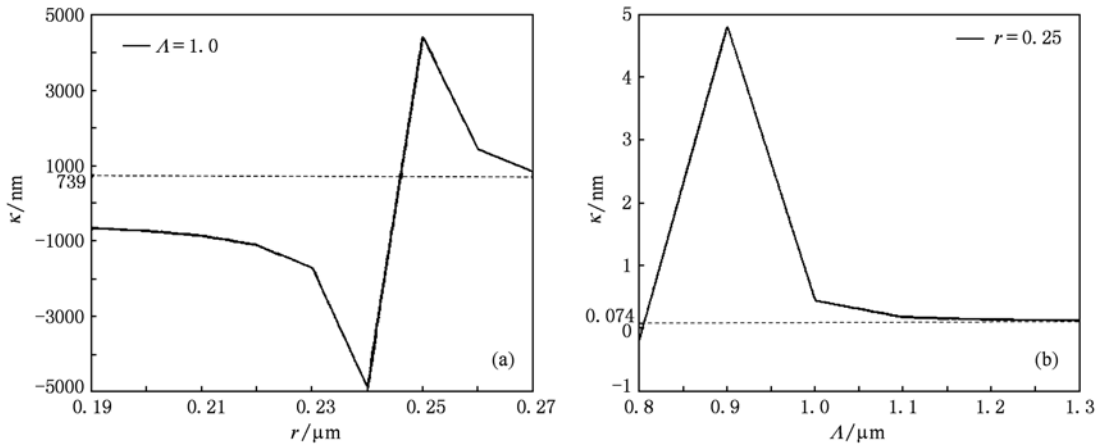


图 4  $\kappa$  值随 PCF 结构参数的变化 (a)  $\kappa$  值随  $r$  的变化; (b)  $\kappa$  值随  $\Lambda$  的变化

### 3.4. 八边形和六边形 PCF 的色散特性比较

为了更好的分析八边形 PCF 的色散补偿特性,我们对具有相同结构参数的正六边形结构的光子晶体光纤也进行了模拟. 并且引进一个新的参数即非线性系数<sup>[13]</sup>

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (6)$$

式中  $n_2$  为非线性折射率系数,对于石英,一般取  $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ,  $A_{\text{eff}}$  为纤芯有效截面. 光纤非线性效应是限制传输容量的主要因素,通常 PCF 的大负色散总是伴随着大的非线性效应.

通过多极法得到了在  $\Lambda = 0.9 \mu\text{m}$ ,  $r = 0.25 \mu\text{m}$

时的数值模拟结果,如图 5 所示. 图 5 (a) 给出了正八边形和正六边形 PCF 在相同结构参数下的色散系数  $D$  随波长的变化情况,由图可以看出在相同结构参数情况下,八边形 PCF 在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处的色散系数  $D$  要低于六边形的 PCF,分别是  $-472.7615 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $-301.5409 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ . 说明正八边形结构的光子晶体光纤更易获得大的负色散值. 由图 5 (b) 可以看出在相同结构参数情况下正八边形比正六边形的 PCF 的非线性系数  $\gamma$  要小,这对于色散补偿光纤是十分有利的. 因此我们可以知道,八边形结构的光子晶体光纤要比六边形结构的光子晶体光纤更容易获得低非线性系数的大负色散值的色散补偿光纤.

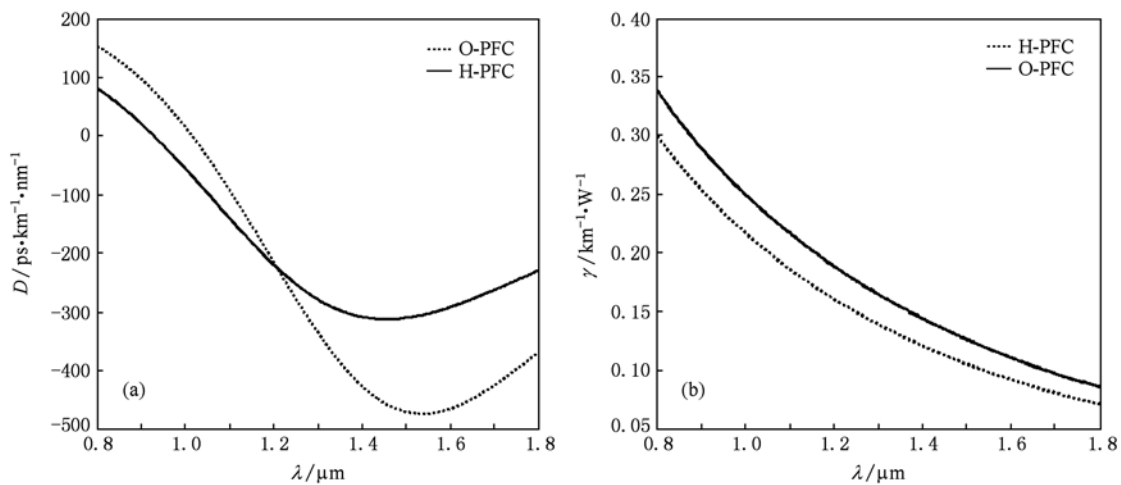


图 5 八边形和六边形 PCF 色散系数  $D$  和非线性系数  $\gamma$  的变化 (a) 色散系数  $D$  的变化; (b) 非线性系数  $\gamma$  的变化

#### 4. 新八边形色散补偿光纤的设计

依据上面的分析我们可以知道八边形更有利于设计成色散补偿光纤,结合相关的六边形色散补偿光纤的结构<sup>[14-18]</sup>的分析,本文提出了一种新型的八边形的宽带色散补偿光纤,其结构如图6所示.利用多极法进行模拟仿真得出当  $Nr = 4$ ,大孔半径  $r_1 = 0.39 \mu\text{m}$ ,小孔半径  $r_2 = 0.13 \mu\text{m}$ ,孔间距  $\Lambda = 1.08 \mu\text{m}$  时图7所示波长  $\lambda$  与色散值  $D$  和色散斜率  $D_{\text{slope}}$  的变化关系.

从图7(a)可以看出在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  的时候,补偿光纤的色散值为  $-1434.9 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,色散斜率为  $-4.6338 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ ,则卡  $\kappa$  值为  $309.7 \text{ nm}$ .与普通单模光纤 G. 652 ( $D \approx 17 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $D_{\text{slope}} \approx 0.058 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ ),  $\kappa$  值约为  $298 \text{ nm}$ ) 相近,能够很好的实现宽带色散补偿,且补偿效率很高.可以对相当于自身长度约 85 倍的单模

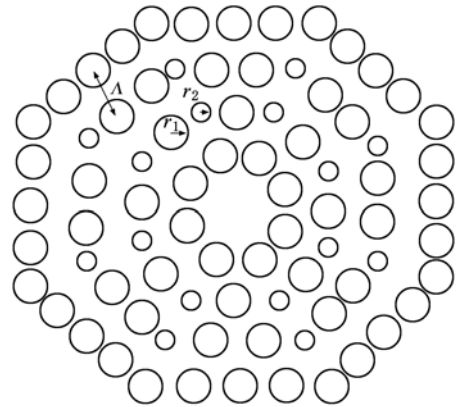


图6 新型八边形色散补偿光纤

光纤 G. 652 进行色散补偿. 这比文献[19]能够得出  $-1216 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的色散值,补偿效率要大很多.图6的结构所设置的参数只是为了证明在色散补偿方面八边形具有很大的潜力.在今后的研究中还需进一步的优化结构得出补偿效率更好的补偿光纤.

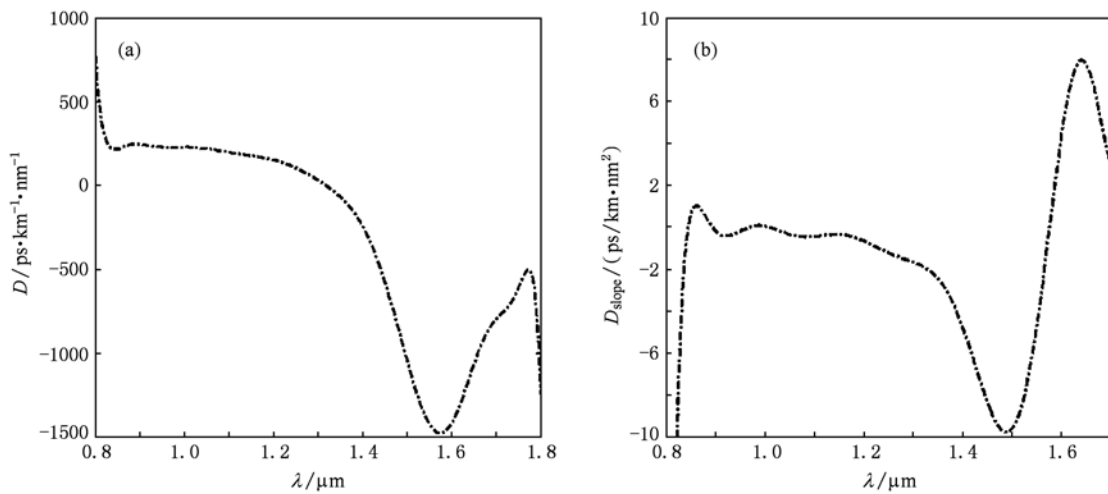


图7 色散值和色散斜率随波长的变化关系 (a)色散系数  $D$  的变化; (b)色散斜率  $D_{\text{slope}}$  的变化

#### 5. 结 论

本文利用多极法对八边形光子晶体光纤的补偿特性进行了分析,发现通过调节光纤的孔间距  $\Lambda$ ,孔半径  $r$  能够灵活地设计具有不同的色散系数  $D$ 、色散斜率  $D_{\text{slope}}$  和  $\kappa$  值的色散补偿光纤;在相同结构参数情况下,八边形结构的光子晶体光纤比六角形结构的具有更大的负色散值和更低的非线性系数,

更有利于进行色散补偿.最后本文设计出了一种新型的八边形色散补偿光纤,在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,补偿光纤的色散值为  $-1434.9 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,色散斜率为  $-4.6338 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ ,则  $\kappa$  值为  $309.7 \text{ nm}$ .能够很好的对 G. 652 的单模光纤进行宽带色散补偿,可以对相当于自身长度约 85 倍的单模光纤 G. 652 进行色散补偿.本文的理论研究可以为今后八边形色散补偿光纤的设计和制造提供一定的理论依据.

- [1] Shen L P, Huang W P, Jian S S 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 1664
- [2] Cui Y L, Hou L T 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 2571 (in Chinese) [崔艳玲、侯蓝田 2010 物理学报 **59** 2571]
- [3] Huttunen A, Torma P 2005 *Opt. Express* **13** 4286
- [4] Wu M, Huang D X, Liu H R, Tong W J 2008 *Chin. Opt. Lett.* **6** 22
- [5] Yang S G, Zhang Y J, He L N 2006 *Opt. Lett.* **31** 2830
- [6] Wang Z N, Ren X M, Zhang X 2006 *Chin. Opt. Lett.* **4** 625
- [7] Yan H F, Yu C Y, Tian H D, Liu Y M, Han L H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3273 (in Chinese) [闫海峰、俞重远、田宏达、刘玉敏、韩利红 2010 物理学报 **59** 3273]
- [8] Yang Q Q, Hou L T 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 8345 (in Chinese) [杨倩倩、侯蓝田 2009 物理学报 **58** 8345]
- [9] Jang 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]
- [10] White T P, Kuhlmcy B T, McPheran R C, Maystre D, Renverscz G, de Sterke C M, Botten L C 2002 *J. Opt. Soc. Am.* **19** 2322
- [11] Kuhlmcy B T, White T P, Renverscz G, Botten L C, de Sterke C M, McPheran R C 2002 *J. Opt. Soc. Am.* **19** 2331
- [12] White T P, McPheran R C, Botten L C, Smith G, de Sterke C M 2001 *Opt. Express* **9** 721
- [13] Qiu J C, Liu H K, Tian X X 2008 *Acta. Photonica Sinica* **2** 0297
- [14] Li Y F, Liu B W, Wang Z H 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 75
- [15] Li S G, Liu X D, Hou L T 2004 *Acta. Phys. Sin.* **53** 1180 (in Chinese) [李曙光、刘晓东、侯蓝田 2003 物理学报 **53** 1180]
- [16] Saitoh K, Koshiba M, Hasegawa T 2003 *Opt. Express* **11** 843
- [17] Poli F, Cucinotta A, Fucchi M 2003 *Opt. Soc. Am.* **20** 1958
- [18] Zsigri B, Laegsgaard J, Bjarklev A 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** 717
- [19] Castellani C E S, Cani S P N, Segatto M E V, Pontes M J, Romero M A 2009 *Opt. Express* **17** 023169

## Study on dispersion compensation property of octagonal photonic crystal fibers\*

Zhang Li-Chao   Hou Lan-Tian<sup>†</sup>   Zhou Gui-Yao

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

(Received 12 June 2010; revised manuscript received 21 July 2010)

### Abstract

The dispersion compensation property of octagonal photonic crystal fibers (PCFs) was simulated with multipole method in this paper. It was found that the dispersion, dispersion slope and Kappa parameter of PCFs can be designed precisely but changing the air hole size and the pitch in PCFs cladding. We compared photonic crystal fiber of hexagonal structure with that of octagonal structure, both of which have the same structure parameters. It was found that the octagonal structure easily obtains large negative dispersion and low non-linear coefficient. It was demonstrated that the octagonal structure has huge potential in designing dispersion compensation PCFs. So, we designed a novel PCF with octagonal structure. The PCF achieves a negative dispersion of  $-1434.9 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  and a negative dispersion slope of  $-4.6338 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$  at  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , which is far better than the conventional fibre.

**Keywords:** photonic crystal fiber, multipole method, dispersion slope, dispersion compensation

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.cn, 03.50.De

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (973) (Grant No. 2003CB314905), the Key Program of the National Natural Science Foundation of Chinese (Grant No. 60637010).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: hlt8068853@163.com