

# 新型矩形点阵光子晶体光纤的 高双折射负色散效应\*

张亚妮<sup>†</sup>

(宝鸡文理学院物理与信息技术系, 宝鸡 721007)

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2010 年 2 月 25 日收到; 2010 年 7 月 29 日收到修改稿)

设计了一种新型矩形点阵光子晶体光纤, 该光纤纤芯缺失一根空气柱, 包层沿光纤长度方向在普通矩形点阵光子晶体光纤中每两列之间隔一行插入一列空气孔而形成正方形网孔结构. 采用全矢量有限元法并结合各向异性完美匹配边界条件, 对该光纤的色散、双折射和约束损耗进行了数值模拟. 结果发现, 该光纤具有高双折射负色散效应和较强的模约束能力, 约束损耗小于  $10^{-2} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ , 通过改变光纤结构参数 (即空气孔间隔  $\Lambda$  和相对孔间隔  $d/\Lambda$ ), 可以调节该光纤高双折射负色散工作波长. 若调整光纤结构参数  $\Lambda = 2.0 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$ , 该光纤在 C 波段 ( $1.53\text{--}1.565 \text{ } \mu\text{m}$ ) 呈现负色散并具有负色散斜率, 双折射高达  $10^{-2}$ , 非线性系数接近  $55 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ . 该光纤将在保偏光通信、色散补偿以及基于四波混频的波长转换器设计等方面具有重要的应用.

**关键词:** 光纤光学与光通信, 全矢量有限元法, 高双折射负色散, 约束损耗

**PACC:** 4281, 4281D, 4281F

## 1. 引 言

近年来, 光子晶体光纤 (PCF) 由于具有无限单模、超平坦色散、高双折射和独特的非线性效应等特性而备受青睐. 对于 PCF 的研究, 有人关注其超低超平坦色散性能<sup>[1, 2]</sup>; 有人则专注于其高双折射<sup>[3]</sup>或单偏振单模特性<sup>[4-6]</sup>. 然而, 很少有同时关于 PCF 高双折射和色散特性的报道. 我们知道, PCF 色散特性的设计可以通过调整光纤结构参数而得以实现; 同时, PCF 高双折射特性的设计也可以通过改变两个正交方向空气孔间隔<sup>[7]</sup>, 或在纤芯缺失若干空气孔形成椭圆芯<sup>[8, 9]</sup>, 或用椭圆孔代替包层圆孔而破坏六角对称性加以实现<sup>[10, 11]</sup>. 显然, 不管是色散特性还是双折射特性均强烈地依赖于光纤结构参数, 如孔大小和孔间隔等. 对称性理论研究表明, PCF 中矩形点阵排列的各向异性比三角点阵或六角蜂窝点阵排列的各向异性更强<sup>[12]</sup>, 普通矩形

点阵 PCF 的双折射可以达到  $10^{-3}$  量级, 矩形点阵中椭圆孔设计的 PCF, 其双折射可以达到  $10^{-2}$  量级<sup>[13, 14]</sup>. 然而, 矩形点阵 PCF 中由于模场泄漏致使其模约束损耗较高并影响其应用. 另外, 正方形点阵 PCF 的色散研究表明<sup>[15]</sup>, 在孔间隔接近  $1 \text{ } \mu\text{m}$  时该光纤在光通信波长 ( $1.55 \text{ } \mu\text{m}$ ) 附近呈现负色散和负色散斜率, 可以弥补普通单模光纤中的正色散和正色散斜率以实现色散补偿.

本文设计了一种新型结构矩形点阵 PCF, 纤芯缺失一根空气柱, 包层在普通矩形点阵 PCF 中两稀疏列之间每隔一个点阵插入一列空气孔形成正方形网孔包层结构以改善矩形点阵 PCF 的模场约束能力. 采用全矢量有限元法 (FV-FEM)<sup>[16]</sup>, 对新设计光纤的色散、双折射和非线性特性进行了数值模拟, 并结合完美匹配层 (PML) 吸收边界条件<sup>[17]</sup>, 对其约束损耗进行了研究. 结果发现, 该新型矩形点阵 PCF 呈现高双折射负色散效应, 具有更强的模场约束能力和极低的模约束损耗以及 C 波段的高非

\* 中国博士后科学基金 (批准号: 20080431258)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室研究基金 (批准号: SKLST200913) 和宝鸡文理学院科研计划重点项目 (批准号: ZK0841) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhangyn@opt.ac.cn

线性特性和色散补偿性能. 通过改变光纤结构参数 (即空气孔间隔  $\Lambda$  和相对孔间隔  $d/\Lambda$ ), 可以调节该光纤高双折射负色散工作波长. 若调整光纤结构参数  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$ , 该光纤在 C 波段 (1.53—1.565  $\mu\text{m}$ ) 呈现负色散和负色散斜率, 双折射高达  $10^{-2}$ , 非线性系数接近  $55 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ , 具有很强的非线性效应和偏振保持、色散补偿能力.

## 2. 设计原理与理论模型

普通矩形点阵 PCF 端面结构如图 1(a) 所示, 通过设计  $x$  方向孔间隔为  $y$  方向孔间隔的 2 倍以破坏包层对称性而增强各向异性实现高双折射性能. 但是, 由于该结构 PCF 在  $y$  方向严重的模场泄漏<sup>[11]</sup>,

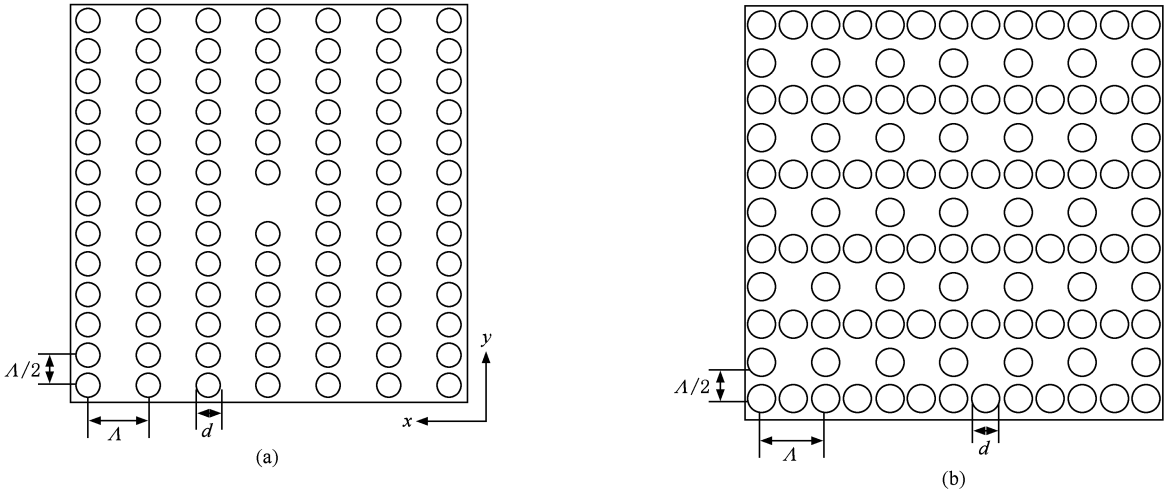


图 1 光纤端面分布 (a) 普通矩形点阵 PCF, (b) 新型矩形点阵 PCF

一般而言, 模双折射  $B(\lambda)$  是描述光纤偏振特性的重要参量,  $B(\lambda)$  可表示为

$$B(\lambda) = |\text{Re}(n_{\text{eff}}^y(\lambda)) - \text{Re}(n_{\text{eff}}^x(\lambda))|, \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}^y$  和  $n_{\text{eff}}^x$  为两正交偏振基模的有效折射率,  $\lambda$  为光波长. 同时, PCF 的色散  $D(\lambda)$  亦与基模有效折射率  $n_{\text{eff}}$  有关,  $D(\lambda)$  可表示为

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 |\text{Re}(n_{\text{eff}})|}{\partial \lambda^2}, \quad (2)$$

式中  $c$  为真空中的光速. 另外, PCF 的模约束损耗  $L_c(\lambda)$  与有效折射率  $n_{\text{eff}}$  之间的关系可表示为<sup>[13]</sup>

$$L_c(\lambda) = \frac{2 \times 10^7}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}[n_{\text{eff}}]. \quad (3)$$

因此, 一旦基模有效折射率  $n_{\text{eff}}^{x,y}$  确定, 模双折射

进而使得模约束损耗较大. 同时, 其在通信波段的色散较高且色散曲线斜率呈现正值. 为了改善矩形点阵 PCF 的模场约束能力和色散补偿能力, 设计的新型矩形点阵 PCF 端面如图 1(b) 所示, 通过在  $x$  方向每两列之间隔一行引入一个空气孔形成正方形网孔包层来增强其模场约束能力. 光纤结构参数采用  $x$  方向孔间隔  $\Lambda$ , 相对孔间隔  $d/\Lambda$  描述,  $y$  方向孔间隔定义为  $\Lambda/2$ . 背景材料折射率为 1.45. 这种正方形网孔包层设计, 一方面通过引入空气孔使得  $x$  方向空气孔间隔变小而增加了设计光纤的色散补偿能力; 另一方面通过引入空气孔使得纤芯和包层的折射率对比增大, 容易获得较高的几何双折射; 同时, 新增空气孔也增强了新设计 PCF 的模场约束能力, 模约束损耗明显减小.

$B(\lambda)$ 、色散  $D(\lambda)$  和模约束损耗  $L_c(\lambda)$  均可以确定.

为了对新设计的光纤进行数值模拟, 本文采用 FV-FEM 并结合 PML 吸收边界条件. 根据 Maxwell 方程, 有限元法的基本方程为

$$\nabla \times ([\mu_r]^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 [\epsilon_r] \mathbf{E} = 0, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{E}$  为电场强度,  $[\epsilon_r]$  和  $[\mu_r]$  分别为介质相对介电常数和介质相对磁导率. 采用 FV-FEM 分析 PCF 时, 为了精确地模拟空气孔边界, 常选取曲线混合边界或节点为模拟元胞, 将光纤端面分成许多曲线混合元胞, 利用 (4) 式对这些元胞进行求解, 可以得到关于元胞的本征值方程, 即

$$[K] \{E\} = k_0^2 n_{\text{eff}}^2 [M] \{E\}, \quad (5)$$

式中  $[K]$  和  $[M]$  为有限元矩阵,  $\{E\}$  是由边界和节

点组成的离散化电场强度矢量,  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率. 利用各向异性 PML 作为吸收边界条件可以计算约束损耗, 同时, 根据  $[K]$  和  $[M]$  的稀疏矩阵属性对本征值方程进行求解, 得到设计光纤模有效折射率, 进而根据 (1) — (3) 式计算双折射、色散和模约束损耗.

### 3. 结果及讨论

#### 3.1. 新型矩形点阵 PCF 的特性

首先采用 FV-FEM 对普通矩形点阵 PCF 和新型矩形点阵 PCF 的模场、双折射和色散、约束损耗进行数值模拟. 当  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$  时, 图 2

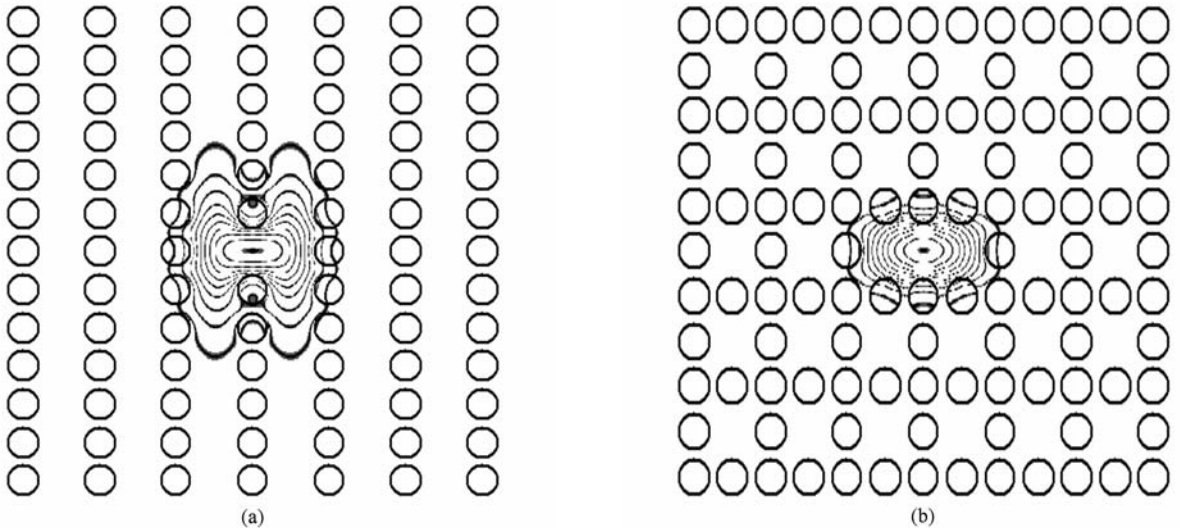


图 2 PCF 的基模模场轮廓  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$ . (a) 普通矩形点阵 PCF, (b) 新型矩形点阵 PCF

新型矩形点阵 PCF 与普通矩形点阵 PCF 的模约束损耗和色散模拟对比分别如图 3(b) 和 (c) 所示. 从图 3(b) 可以看出, 在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处, 新型矩形点阵 PCF 的约束损耗  $L_c(\lambda)$  大约为  $10^{-2} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ , 是普通矩形点阵 PCF 约束损耗的 1/1000 左右. 由图 3(c) 可以看出, 在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处, 新型矩形点阵 PCF 的色散为负值, 且具有负色散曲线斜率, 呈现很好的色散补偿特性, 而普通矩形点阵 PCF 色散则为正, 且色散曲线斜率亦为正值. 因此, 新型矩形点阵 PCF 通过在普通矩形点阵 PCF 中每两列之间隔行引入一列空气孔, 实现了包层的正方向网孔结构, 并将孔与孔之间的间隔修正为  $1 \mu\text{m}$ , 进而达到了色散补偿的目的, 这一点与文献

给出了普通矩形点阵 PCF 和新型矩形点阵 PCF 在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  位置处的基模模场轮廓. 显然, 新型矩形点阵 PCF 的模场被很好地约束在芯区, 而普通矩形点阵 PCF 模场则呈现明显的包层泄漏现象. 正是由于新型矩形点阵 PCF 很好的模约束特性, 才使其呈现高双折射、低约束损耗以及负色散特性.

光纤结构参数取  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$  时, 普通矩形点阵 PCF 与新型矩形点阵 PCF 的模式双折射随波长的变化如图 3(a) 所示. 从图 3(a) 可以看出, 新型矩形点阵 PCF 由于模场被很好地约束在纤芯, 致使其模式双折射  $B(\lambda)$  在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处增加到  $10^{-2}$  以上, 同时, 其双折射随波长的增加幅度明显高于普通矩形点阵 PCF 的增加幅度.

[14] 的研究结论相符.

#### 3.2. 光纤结构参数对双折射和色散的影响

为了使设计的新矩形点阵 PCF 在较宽的波长范围内实现高双折射负色散效应, 进一步采用 FV-FEM 研究了光纤结构参数  $\Lambda$  和  $d/\Lambda$  对双折射和色散的影响. 图 4(a) 给出了当  $d/\Lambda = 0.4$ , 孔间隔  $\Lambda$  以  $0.2 \mu\text{m}$  步长从  $1.6 \mu\text{m}$  增加到  $2.4 \mu\text{m}$  时, 新型矩形点阵 PCF 模双折射  $B(\lambda)$  随波长  $\lambda$  的变化. 从图 4(a) 可以看出, 随着波长的增大, 双折射  $B(\lambda)$  增大到最大值, 然后逐渐减小; 同时, 随着孔间隔  $\Lambda$  的增加, 最大双折射发生红移, 且模式双折射呈现减小趋势, 这是由于孔间隔的增大使得纤芯折

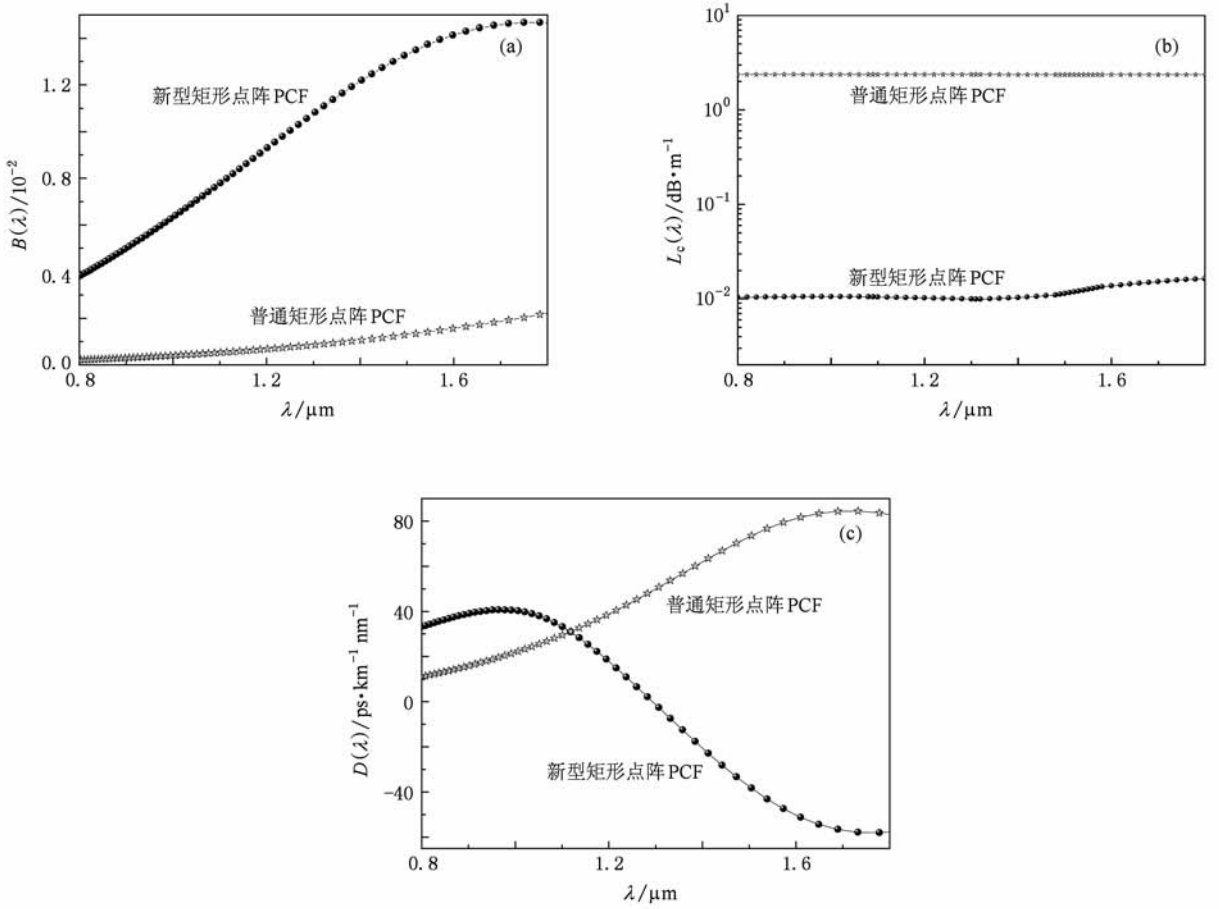


图3 新型矩形点阵 PCF 与普通矩形点阵 PCF 性能对比  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}, d/\Lambda = 0.4$ . (a) 模双折射, (b) 约束损耗, (c) 色散

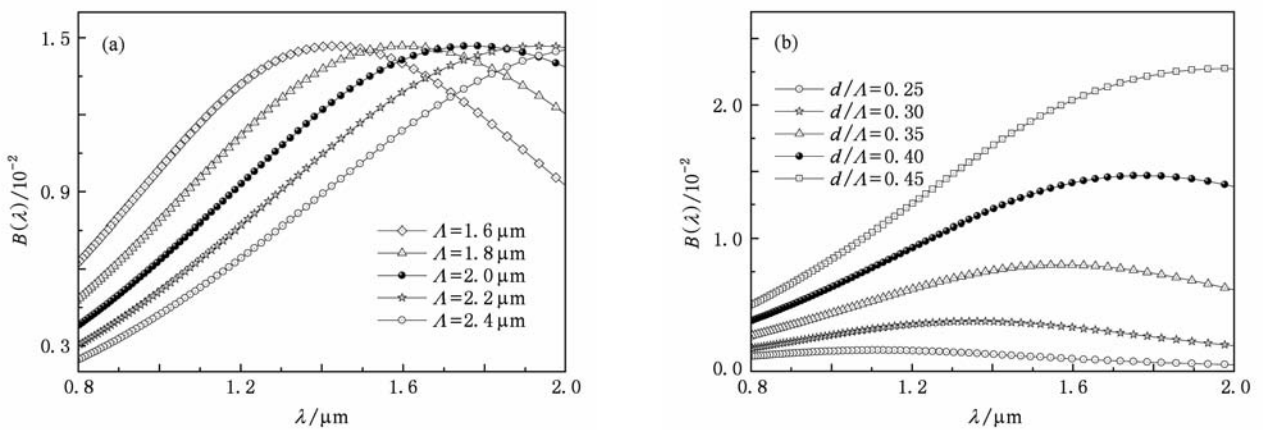


图4 新型矩形点阵 PCF 双折射  $B(\lambda)$  随波长  $\lambda$  的变化 (a) 当  $d/\Lambda = 0.4$ , 改变  $\Lambda$  时,  $B(\lambda)$  随波长  $\lambda$  的变化; (b) 当  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ , 改变  $d/\Lambda$  时,  $B(\lambda)$  随波长  $\lambda$  的变化

射率与包层折射率之比减小, 进而导致双折射  $B(\lambda)$  减小. 因此, 在光通信波长 ( $1.55 \mu\text{m}$ ) 附近,  $\Lambda = 1.6 \mu\text{m}$  对应的双折射  $B(\lambda)$  并不是最大值. 图 4(b) 为孔间隔  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda$  以步长

0.05 从 0.25 增加到 0.45 时模式双折射  $B(\lambda)$  随波长的变化. 从图 4(b) 可以看出, 随着  $d/\Lambda$  的增加, 双折射  $B(\lambda)$  亦随之增加, 且双折射在长波长段增加幅度更为明显. 因此, 为了使得新型

矩形点阵 PCF 具有  $10^{-2}$  的双折射, 光纤几何参数应选取  $\Lambda < 2.1 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda > 0.38$ , 考虑到光纤的单模特性, 取  $d/\Lambda = 0.4$ .

下面进一步讨论光纤几何参数  $\Lambda$  和  $d/\Lambda$  对新型矩形点阵 PCF 色散特性的影响, 图 5 给出了该光纤在孔间隔  $\Lambda$  分别取  $1.6, 2.0$  和  $2.4 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda$  从  $0.25$  增大到  $0.45$  时, 色散  $D(\lambda)$  随波长  $\lambda$  的变化. 由图 5 可知, 在波长的某一变化范围内, 色散随着波长的增加由正值变为负值, 色散曲线斜率呈现负值, 但是随着  $d/\Lambda$  的减小, 色散曲线趋于平坦, 致使色散曲线斜率减小. 图 5(a) 表明, 当  $\Lambda = 1.6 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.45, 0.4, 0.35, 0.3, 0.25$  时, 在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处可以获得最小负色散分别为  $-78, -57, -16, -4.3, -0.056 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , 对应色散曲线的斜率只有  $d/\Lambda = 0.45$  时为负值, 其值为  $-0.13 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-2}$ , 随着  $d/\Lambda$  从  $0.4$  减小到  $0.25$ , 色散曲线斜率也相应地从  $0.032$

$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-2}$  依次减小为  $0.0028 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-2}$ . 因此, 当孔间隔  $\Lambda$  较小时, 若要获得较好的色散补偿, 则要求  $d/\Lambda \geq 0.45$ . 随着孔间隔  $\Lambda$  的增大, 若选取  $d/\Lambda \geq 0.3$ , 则色散和色散曲线斜率在 C 波段均为负值. 如图 5(b) 所示, 当  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda$  分别取  $0.45, 0.4$  和  $0.35$  时, 在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处色散分别为  $-8.2, -34$  和  $-31 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , 色散曲线斜率分别为  $-0.2, -0.12$ , 和  $-0.003 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-2}$ . 图 5(c) 则表明, 当  $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda$  分别取  $0.35$  和  $0.3$  时, 在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处色散分别为  $-12.6$  和  $-13.3 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , 色散曲线斜率分别为  $-0.084$  和  $-0.0048 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-2}$ , 当  $d/\Lambda$  分别取  $0.45$  和  $0.4$  时, 尽管色散曲线斜率分别为  $-0.13$  和  $-0.14 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-2}$ , 色散曲线斜率均是负值且非常小, 但色散分别为  $36$  和  $9.2 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ , 均为正值, 削弱了色散补偿效果.

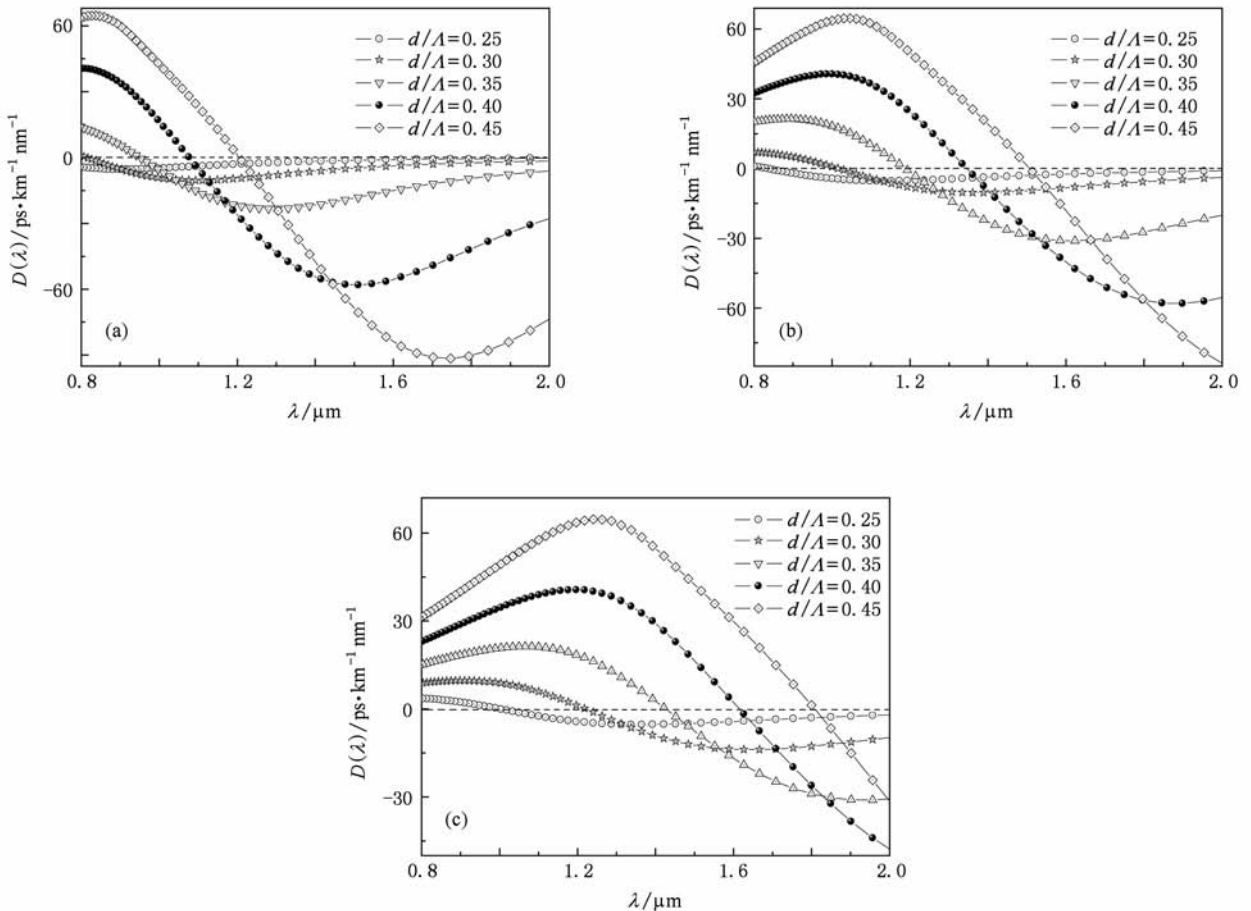


图 5 当  $d/\Lambda = 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45$ ,  $\Lambda$  取不同值时, 新型矩形点阵 PCF 色散  $D(\lambda)$  随波长  $\lambda$  的变化 (a)  $\Lambda = 1.6 \mu\text{m}$ , (b)  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ , (c)  $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$

综上所述可知,为了使得设计的新型矩形点阵 PCF 具有很好的色散补偿效果,应选取光纤结构参数  $\Lambda < 2.4 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda \geq 0.3$ . 从图 5(b)可以看出,当选取光纤参数  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$  时,设计光纤在 C 波段的色散和色散曲线斜率均为负值,同时设计光纤在 C 波段的双折射也达到最大值(图 4). 新型矩形点阵 PCF 所呈现的高双折射负色散效应将在光纤色散补偿、光纤传感<sup>[18]</sup>和保偏光纤传输等方面获得很好的应用.

理论和实验研究表明,低色散高非线性 PCF 容易产生四波混频(FWM)效应<sup>[19,20]</sup>,进而有效减缓光纤通信链路掺铒光纤放大器中的增益竞争以增强信号频率的均匀性和稳定性<sup>[21,22]</sup>. FWM 的产生基于两个重要因素,即非线性和色散. 非线性系数越大,FWM 越强;色散越低,FWM 越强. 普通单模光纤通信波段的色散  $D(\lambda) \approx 17 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ ,从图 5 可以看出,当选取合适的结构参数(如  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda$  分别取 0.25 和 0.3)时,设计的光纤具有接近零的超平坦色散. 同时,PCF 的非线性系数  $\gamma(\lambda)$  可用下式计算<sup>[23]</sup>:

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

式中  $A_{\text{eff}}$  是有效模面积,  $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$  是石英非线性折射率.

图 6 给出了该光纤选取结构参数  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda$  分别取 0.4, 0.35, 0.3 和 0.25 时,非线性系数  $\gamma(\lambda)$  随波长  $\lambda$  的变化关系. 从图 6 可以看出:非线性系数随着波长呈现下降趋势,但是随着  $d/\Lambda$  的增大,非线性系数明显增加;当  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$  时,在 C 波段(1.53—1.565  $\mu\text{m}$ )的非线性系数接近  $55 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ . 该设计光纤所呈现的高非线性低色散效应,为其在基于 FWM 的宽带波长转换器<sup>[24,25]</sup>或多波长光纤激光器<sup>[26,27]</sup>设计中的应用奠定了基础.

另外,新型矩形点阵 PCF 中包层孔结构的正方形网孔设计,很容易采用毛细管堆积技术实现<sup>[12]</sup>,而不必采用复杂的溶胶-凝胶法或预制棒钻孔法<sup>[28]</sup>,使得新型矩形点阵 PCF 的制备相对较为容易.

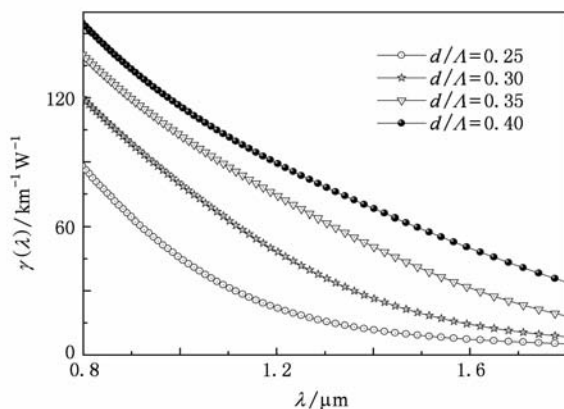


图 6 当  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda$  取不同值时,新型矩形点阵 PCF 非线性系数  $\gamma(\lambda)$  随波长  $\lambda$  的变化

## 4. 结 论

通过在普通矩形点阵 PCF 包层每两列空气孔之间隔一行插入一列空气孔,使之成为正方形网孔分布结构,优化设计了一种新型矩形点阵 PCF. 采用 FV-FEM,对其色散、双折射和约束损耗进行了数值模拟. 研究表明,新设计的光纤具有高双折射、负色散和负色散曲线斜率和高非线性系数,且模约束能力增强,约束损耗明显降低. 通过调整光纤结构参数(即  $\Lambda$  和  $d/\Lambda$ ),可以控制其高双折射负色散工作波长范围. 孔间隔  $\Lambda$  越小,  $d/\Lambda$  越大,新设计的光纤在 C 波段的色散就越小,色散曲线斜率亦越大,但孔间隔的减小会使最大双折射对应的波段向短波长方向移动,增大孔间隔则需要减小  $d/\Lambda$  以调节负色散、色散曲线斜率和双折射的最佳值均在 C 波段. 当选取  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$  时,新设计的光纤在 C 波段的色散和色散曲线斜率均为负值,在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处双折射高达  $1.2 \times 10^{-2}$ ,约束损耗低于  $10^{-2}$ ,非线性系数接近  $55 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ ,呈现很好的色散补偿能力和模约束能力. 新设计的光纤所呈现的高双折射负色散和高非线性低色散效应将在 C 波段的保偏光通信、色散补偿和基于 FWM 的波长转换器或多波长光纤激光器设计等方面具有很好的应用前景.

- [1] Saitoh K, Koshiba M 2003 *Opt. Express* **11** 843
- [2] 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]
- [3] Wang J, Lei N G, Yu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 946 (in Chinese) [王健、雷乃光、余重秀 2007 物理学报 **56** 946]
- [4] Zhang F D, Liu X Y, Zhang M, Ye P D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6447 (in Chinese) [张方迪、刘小毅、张民、叶培大 2006 物理学报 **55** 6447]
- [5] Ren L Y, Wang H Y, Zhang Y N, Yao B L, Zhao W 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1298
- [6] Zhang Y 2008 *J. Mod. Opt.* **55** 3563
- [7] Suzuki K, Kubota H, Kawanishi S, Tanaka M, Fujita M 2001 *Opt. Express* **9** 676
- [8] Zhang C S, Kai G Y, Wang Z, Wang C, Sun T T, Zhang W G, Liu Y G, Liu J F, Yuan S Z, Dong X Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2758 (in Chinese) [张春书、开桂云、王志、王超、孙婷婷、张伟刚、刘艳格、刘剑飞、袁树忠、董孝义 2005 物理学报 **54** 2758]
- [9] Zhang Y N, Miao R C, Ren L Y, Wang H Y, Wang L, Zhao W 2007 *Chin. Phys.* **16** 17198
- [10] Yan F P, Li Y F, Wang L, Gong T R, Liu P, Liu Y, Tao P L, Qu M X, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5735 (in Chinese) [延凤平、李一凡、王琳、龚桃荣、刘鹏、刘洋、陶沛琳、曲美霞、简水生 2008 物理学报 **57** 5735]
- [11] Zhang Y N 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5729 (in Chinese) [张亚妮 2008 物理学报 **57** 5729]
- [12] Chen M Y, Yu R J, Zhao A P 2004 *J. Opt. A* **6** 997
- [13] Liu Y C, Lai Y 2005 *Opt. Express* **13** 225
- [14] Wang L, Yang D 2007 *Opt. Express* **15** 8892
- [15] Bouk A H, Cucinotta A, Poli F, Selleri S 2004 *Opt. Express* **12** 941
- [16] Koshiba M, Saitoh K 2003 *Appl. Opt.* **42** 6267
- [17] Koshiba M, Tsuji Y 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 737
- [18] Yang X, Zhao C L, Peng Q, Zhou X, Lu C 2005 *Opt. Commun.* **250** 63
- [19] Liu X M 2008 *Phys. Rev. A* **77** 043818
- [20] Liu W H, Song X Z, Wang Y S, Liu H J, Zhao W, Liu X M, Peng Q J, Xu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 917 (in Chinese) [刘卫华、宋啸中、王屹山、刘红军、赵卫、刘雪明、彭钦军、许祖彦 2008 物理学报 **57** 917]
- [21] Liu X M, Zhou X, Tang X, Ng J, Hao J, Chai T, Leong E 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1626
- [22] Liu X M, Yang X F, Lu F Y, Ng J, Zhou X Q, Lu C 2005 *Opt. Express* **13** 142
- [23] 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]
- [24] Liu X M, Zhou X Q, Lu C 2005 *Phys. Rev. A* **72** 013811
- [25] Chow K K, Shu C, Lin C L 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 624
- [26] Liu X M 2006 *Opt. Commun.* **260** 554
- [27] Zhang A L, Demokan M S 2005 *Opt. Lett.* **30** 2375
- [28] Issa N A, van Eijkelenborg M A, Fellow M, Cox F, Henry G, Large M C J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1336

# High-birefringence negative dispersion effect of novel rectangular lattice photonic crystal fiber\*

Zhang Ya-Ni<sup>†</sup>

(*Department of Physics and Information Technology, Baoji College of Arts and Science, Baoji 721007, China*)

(*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(Received 25 February 2010; revised manuscript received 29 July 2010)

## Abstract

A novel rectangular lattice photonic crystal fiber is proposed which is composed of a central defect core and a cladding with square mesh structure by introducing another air hole row between two air hole rows for every other line into a conventional rectangular lattice photonic crystal fiber. Its dispersion, birefringence and confinement loss are numerically investigated by full vector finite element method with anisotropic perfectly matched layers. Numerical results indicate that the proposed fiber shows higher birefringence negative dispersion effect and stronger confinement ability of guided mode, in which the confinement loss is lower than  $10^{-2} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ . The wavelength for high birefringence negative dispersion can be optimized by adjusting the parameters of proposed fiber, such as  $\Lambda$  and  $d/\Lambda$ . The dispersion and the dispersion slope are both negative, the birefringence is higher than  $10^{-2}$ , and nonlinear parameter is close to  $55 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$  over C band (i. e.  $1.53\text{--}1.565 \mu\text{m}$ ) under the condition of  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$  and  $d/\Lambda = 0.4$ . This fiber will have important applications in the fields of polarization maintaining transmission system and dispersion compensation, and also in the design of widely tunable wavelength converter based on four-wave mixing.

**Keywords:** fiber optics and optical communication, full vector finite element method, high-birefringence negative dispersion, confinement loss

**PACC:** 4281, 4281D, 4281F

---

\* Project supported by the Science Foundation for Postdoctor of China (Grant No. 20080431258), the Research Foundation of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, China (Grant No. SKLST200913) and the Key Program of Scientific Research of Baoji College of Arts and Science, China (Grant No. ZK0841).

<sup>†</sup> E-mail: zhangyn@opt.ac.cn