

六角点阵蜂窝状包层光子晶体光纤中的高双折射负色散效应*

许强^{1)2)†} 苗润才¹⁾ 张亚妮²⁾

1) (陕西师范大学物理与信息技术学院, 西安 710062)

2) (宝鸡文理学院物理与信息技术系, 宝鸡 721016)

(2012年3月20日收到; 2012年4月27日收到修改稿)

设计了一种六角点阵蜂窝状包层光子晶体光纤, 该光纤中心缺失一根空气柱形成纤芯, 包层由椭圆空气孔和小圆空气孔组成. 基于全矢量有限元法并结合各向异性完美匹配层边界条件, 对其双折射、色散、非线性系数、约束损耗和模场等特性进行了数值模拟; 计算了具有相同参数的椭圆状包层光子晶体光纤的双折射、色散及非线性系数. 结果发现, 若调整光纤结构参数为孔间隔 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, 空气孔椭圆率 $\eta = 0.5$, 相对孔间隔比 $f = 0.48$, 小圆孔直径 $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ 时, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 该光纤的双折射 B 高达 1.02×10^{-2} , 比传统光纤高约两个数量级, 同时, 该光纤在低损耗通信窗口 C 波段呈现负色散和负色散斜率, 其色散斜率在整个 C 波段附近在 -0.132 — $-0.121 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$ 范围内波动, 非线性系数为 $45.7 \text{ km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$, 约束损耗接近 $10^2 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$. 蜂窝状包层比椭圆状包层光子晶体光纤的双折射及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.

关键词: 导波与光纤光学, 高双折射, 全矢量有限元法, 负色散

PACS: 42.81.-i, 42.81.Gs, 02.70.Dh, 81.05.Ni

1 引言

光子晶体光纤^[1](photonic crystal fibers, PCF)是由纤芯缺陷区域和沿光纤轴方向在包层横截面上周期性排列的空气孔构成, 具有许多独特的光学性质, 如在可见和近红外波段的异常色散、较低的损耗、无截止单模、极强的双折射、可控的模式面积、高非线性、容易控制多芯结构等特性^[2-5]. 由于高双折射在光纤传感、精密光学器件及高速光通信等领域都有重要的应用, 因此引起人们的广泛关注. 同时, 色散^[6]在光纤通信上是一个决定通信质量和传输距离的重要参数, 如何克服该类系统的色散也成为当前光通信系统中的一个研究热点. 随着对 PCF 研究的进一步深入, 人们发现通过调整

光纤微结构参数, 可以极大地调节 PCF 的色散特性; 同时, PCF 高双折射特性的设计也可以通过改变空气孔间隔^[7]、引入椭圆孔或在纤芯缺失几个空气孔形成椭圆芯^[8]等方法, 使双折射数量级可以达到 10^{-3} 或者 10^{-2} 量级, 这是传统保偏光纤所不能实现的. 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. 已有研究表明, 有人关注 PCF 的高双折射特性^[2,7]; 有人则专注于其色散补偿特性^[9]. 然而, 很少有同时关于 PCF 高双折射和色散特性的报道.

本文采用全矢量有限元法 (full vector finite element method, FV-FEM)^[10], 并结合完美匹配层 (perfectly matched layers, PMLs) 吸收边界条件, 设计实现了一种六角点阵蜂窝状空气孔排列的 PCF, 并对其双折射、色散、非线性、约束损耗及模场等特

* 陕西省科技攻关计划 (批准号: 2011K02-08, 2010K01-078)、陕西省教育厅自然科学基金 (批准号: 2010JK403)、宝鸡市科技计划 (批准号: 2010bj02) 和宝鸡文理学院重点科研计划 (批准号: ZK11142) 资助的课题.

† E-mail: xuqiangwlx@sohu.com

性进行了数值模拟, 并与具有相同参数的椭圆状包层 (将蜂窝状包层中小圆空气孔替换为椭圆空气孔) PCF 进行了比较分析, 为色散补偿 PCF 的设计提供一定的理论依据.

2 设计原理与理论模型

新设计的六角点阵蜂窝状包层 PCF 端面结构如图 1 所示. 该光纤以石英为基材, 中心缺失一根空气孔而形成纤芯, 包层由椭圆孔和小圆孔组成. 空气孔的折射率 $n_0 = 1.00$. 光纤结构参数采用空气孔间隔 Λ , 椭圆率 $\eta = d/a$, 相对孔间隔比 $f = d/\Lambda$, 小圆孔直径 d_1 描述, 背景材料折射率为 1.45.

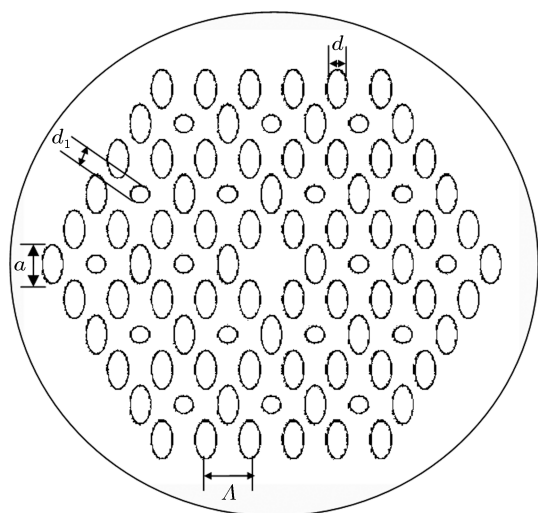


图 1 高双折射负色散 PCF 端面结构

已有多种数值模型用于光子晶体光纤的特性分析, 本文采用 FV-FEM 并结合 PMLs 吸收边界条件对所设计的光子晶体光纤模型的双折射、色散、非线性系数、约束损耗和模场等特性进行分析.

基于 Curl-curl 方程, 对于任何可用相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 描述的介质来说, 都可用下式表示:

$$\nabla \times (\epsilon_r^{-1} \nabla \times \bar{H}) - k_0^2 \mu_r \bar{H} = 0, \quad (1)$$

式中 H 为磁场强度, k_0 为真空中的波数, $k_0 = (\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}$. 应用标量有限元法, 方程 (1) 可转化为代数问题

$$([\mathbf{A}] - (n_{\text{eff}})^2 [\mathbf{B}]) \{\mathbf{H}\} = 0, \quad (2)$$

式中 $[\mathbf{A}]$ 和 $[\mathbf{B}]$ 为有限元矩阵, $\{\mathbf{H}\}$ 是由边界和节点组成的离散化磁场强度矢量, n_{eff} 为有效折射率. 根据 $[\mathbf{A}]$ 和 $[\mathbf{B}]$ 的稀疏矩阵属性对本征值方程进行求解, 得到所设计光纤的基模有效折射率 n_{eff} . 一般而言, 模双折射 $B(\lambda)$ 是描述光纤偏振特性的重要参量, 可表示为 [11]

$$B(\lambda) = |\text{Re}(n_{\text{eff}}^y(\lambda)) - \text{Re}(n_{\text{eff}}^x(\lambda))|, \quad (3)$$

这里, n_{eff}^y 和 n_{eff}^x 分别表示两正交偏振基模有效折射率. PCF 的色散 $D(\lambda)$ 可表示为 [12]

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

光纤色散斜率 [13] 是描述色散变化的主要变量, 与色散的关系为

$$D_{\text{slope}}(\lambda) = \frac{dD(\lambda)}{d\lambda}. \quad (5)$$

同时, 利用各向异性 PMLs 作为吸收边界条件对本征值方程进行求解, 可以得到 n_{eff} 虚部, 进而 PCF 的模约束损耗 $L_c(\lambda)$ 与有效折射率 n_{eff} 之间的关系可表示为 [14]

$$L_c(\lambda) = \frac{2 \times 10^7}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}[n_{\text{eff}}], \quad (6)$$

这里 c 为真空中的光速, λ 为光波长.

3 数值模拟与结果分析

3.1 双折射特性

高双折射光子晶体光纤被广泛用于光纤传感器的偏振控制、高精密光学器件及光通信系统 [15]. 为了使设计的六角点阵蜂窝状包层 PCF 在较宽的波长范围实现高双折射效应, 采用 FV-FEM 研究了光纤结构参数与双折射之间的关系. 由图 2(a) 可以看出, 固定 $f = 0.5$, $\eta = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, 孔间隔 Λ 从 $1.15 \mu\text{m}$ 变化到 $1.3 \mu\text{m}$, 变化步长取 $0.05 \mu\text{m}$ 时, 随波长的增加, 双折射 B 呈现增加趋势; 同时, 随着 Λ 的增加, 双折射 B 整体下移, 同一波长对应的双折射 B 逐渐减小, 这是由于孔间隔的增大降低了纤芯与包层的折射率对比, 进而导致双折射减小. 由图 2(b) 可以看出, 固定 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $f = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, 椭圆率 η 从 0.5 变化到 0.58, 变化步长取 0.02 时, 随波长的增加, 双折射 B 呈现增加的趋势, 并且随着 η 的增加, 双折射 B 整体下移, 同一波长对应的双折射 B 逐渐减小. 由图 2(c) 可

以看出, 固定 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, 相对孔间隔比 f 从 0.48 变化到 0.54, 变化步长取 0.02 时, 随波长的增加, 双折射 B 呈现增加的趋势, 并且随着 f 的增加, 双折射 B 整体下移, 同一波长对应的双折射 B 逐渐减小. 由图 2(d) 可以看出, 固定 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $f = 0.48$, 小圆孔直径 d_1 从 $0.4 \mu\text{m}$ 变化到 $0.8 \mu\text{m}$, 变化

步长取 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 随波长的增加, 双折射 B 有增加的趋势, 并且随着 d_1 的增加, 双折射 B 整体下移, 同一波长对应的双折射 B 也逐渐减小. 当孔间隔 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, 椭圆率 $\eta = 0.5$, 相对孔间隔比 $f = 0.48$, 小圆孔直径 $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ 时, 在光通信波段 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 双折射 B 高达 1.02×10^{-2} .

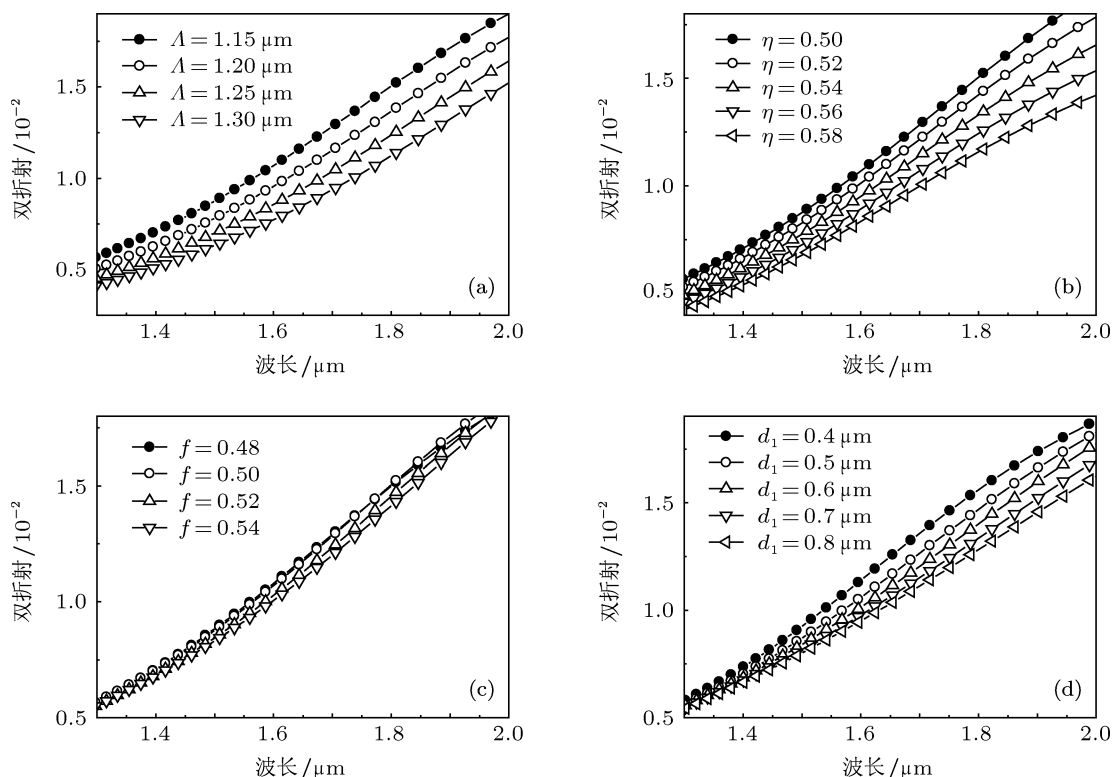


图 2 六角点阵蜂窝状包层 PCF 双折射随波长的变化 (a) 取 $f = 0.5$, $\eta = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, Λ 以步长 $0.05 \mu\text{m}$ 从 $1.15 \mu\text{m}$ 增加到 $1.3 \mu\text{m}$; (b) 取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $f = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, η 以步长 0.02 从 0.5 增加到 0.58 ; (c) 取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, f 以步长 0.02 从 0.48 增加到 0.54 ; (d) 取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $f = 0.48$, d_1 以步长 $0.1 \mu\text{m}$ 增加到 $0.8 \mu\text{m}$

3.2 色散特性

为了使所设计光纤能在低损耗通信窗口 C 波段附近一个较宽的波长范围内实现色散调控效应, 采用 FV-FEM 数值研究了该光纤色散与光纤结构参数之间的关系. 一般, PCF 色散 $D(\lambda)$ 与光纤结构参数之间的关系可表示为^[16]

$$D(\lambda; M\Lambda, f) = \frac{1}{M} D\left(\frac{\lambda}{M}; \Lambda, f\right), \quad (7)$$

(7) 式表明, 对于相同的 f , PCF 包层孔间隔缩小 M 倍, 在 λ/M 处的色散将减小到原来的 $1/M$, 其中, M 为孔间隔放大比例. 显然, 人为改变光纤包层的

结构参数很容易调整 PCF 的色散参数. 对于相同的相对孔间隔比 f , 孔间隔越小, 色散越小, 最大负色散对应波长相应蓝移. 因此, 为了使所设计光纤呈现较大的负色散值, 空气孔间隔 Λ 不能选取太大. 首先, 固定 $f = 0.5$, $\eta = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, 孔间隔 Λ 从 $1.15 \mu\text{m}$ 变化到 $1.3 \mu\text{m}$, 变化步长取 $0.05 \mu\text{m}$ 时, 色散随波长的变化关系如图 3(a) 所示. 从图 3(a) 可以看出, 随着 Λ 的增加, 最大负色散的位置发生红移. 当选取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$ 时, 最大负色散对应波长最接近低损耗通信波长 $1.55 \mu\text{m}$. 因此, 选取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$ 作为设计光纤的最佳孔间隔参数. 其次, 选取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $f = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$ 不变,

椭圆率 η 从 0.5 变化到 0.58, 变化步长取 0.02 时, 色散随波长的变化关系如图 3(b) 所示. 从图 3(b) 可以看出, 随着椭圆率 η 的增加, 最大负色散的位置发生蓝移, 当选取 $\eta = 0.5$ 时, 在低损耗通信窗口 C 波段的中心波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近负色散达到最大. 因此, 为了满足色散补偿的需要, 椭圆率 η 的最佳设计参数选取为 $\eta = 0.5$. 再次, 固定 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, 相对孔间隔比 f 从 0.48 变化到 0.54, 变化步长取 0.02 时, 色散随波长的变化关系如图 3(c) 所示. 从图 3(c) 可以看出, 随着 f 的增加, 最大负色散的位置发生红

移, 当选取 $f = 0.48$ 时, 在低损耗通信窗口 C 波段的中心波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近负色散达到最大. 同样, 为了满足色散补偿的需要, 相对孔间隔比 f 的最佳设计参数选取为 $f = 0.48$. 最后, 选取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $f = 0.48$, 小圆孔直径 d_1 从 $0.4 \mu\text{m}$ 变化到 $0.8 \mu\text{m}$, 变化步长取 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 色散随波长的变化关系如图 3(d) 所示. 从 3(d) 可以看出, 随着 d_1 的增加, 最大负色散的位置发生红移, 当选取 $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ 时, 最大负色散对应波长刚好在低损耗通信窗口 C 波段的中心波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近.

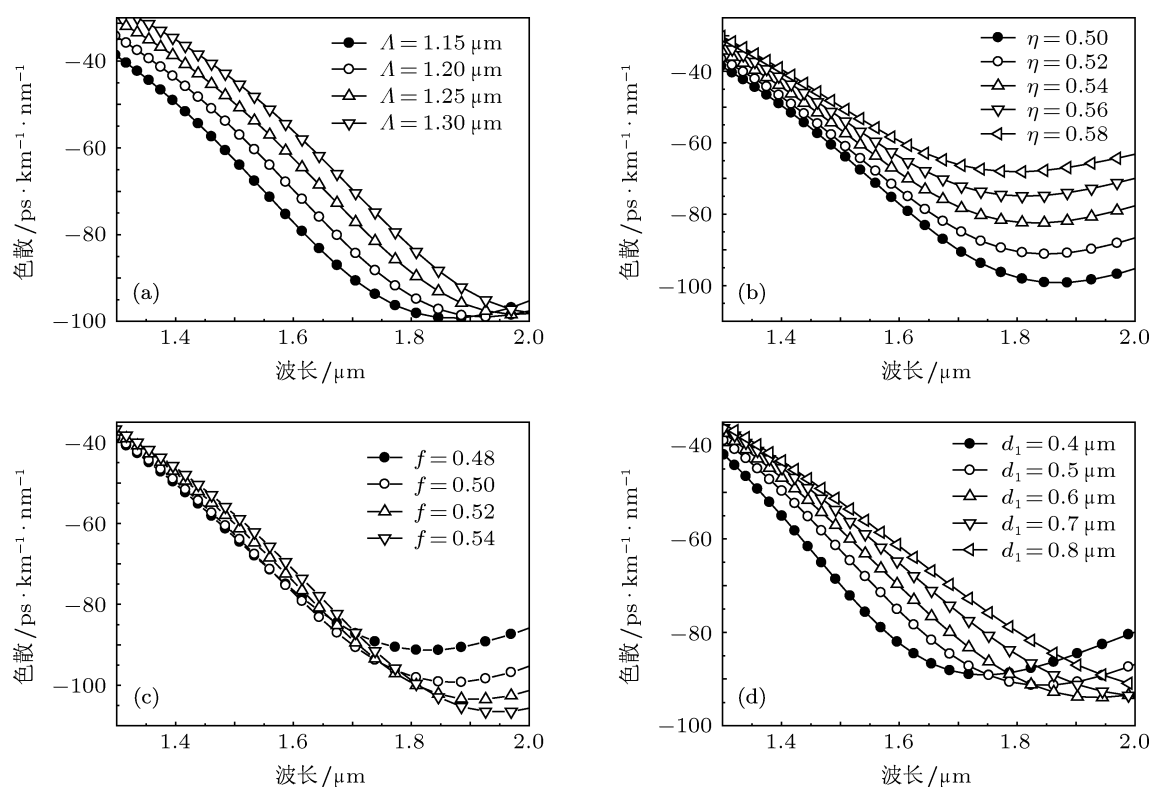


图 3 六角点阵蜂窝状包层 PCF 色散随波长的变化 (a) 取 $f = 0.5$, $\eta = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, Λ 以步长 $0.05 \mu\text{m}$ 从 $1.15 \mu\text{m}$ 增加到 $1.3 \mu\text{m}$; (b) 取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $f = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, η 以步长 0.02 从 0.5 增加到 0.58; (c) 取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, f 以步长 0.02 从 0.48 增加到 0.54; (d) 取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $f = 0.48$, d_1 以步长 $0.1 \mu\text{m}$ 从 $0.4 \mu\text{m}$ 增加到 $0.8 \mu\text{m}$

因此, 为了满足低损耗通信波段色散补偿的需要, 选取最佳色散补偿 PCF 的结构参数分别为孔间隔 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, 椭圆率 $\eta = 0.5$, 相对孔间隔比 $f = 0.48$, 小圆孔直径 $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$. 此时, 该光纤在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 对应的最大负色散为 $-75.7 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$. 色散斜率在整个 C 波段附近在 $-0.132 \sim -0.121 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$ 范围内波动, 如图 4(a) 所示. 该光纤在整个 C 波段呈现负色散和负色散斜率, 负色散和负色散斜率最

适用于宽带色散补偿. 例如, 对于 STM-28TM 传输光纤^[9] ($D = 17 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, $D_{\text{slope}} \approx 0.023 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$) 的 κ ($\kappa = D/D_{\text{slope}}$, 其单位为 nm) 值约为 740 nm , 要想实现宽带补偿的要求补偿光纤的 κ 值与被补偿光纤的 κ 值应接近. 我们设计光纤的 κ 值大约为 673 nm , 因此, 可以较好地 STM-28TM 传输光纤进行宽带补偿. 同时图 2 的分析证明了设计光纤在 C 波段的双折射达到最大值. 因此, 该新型 PCF 所呈现的高双折射负色散效

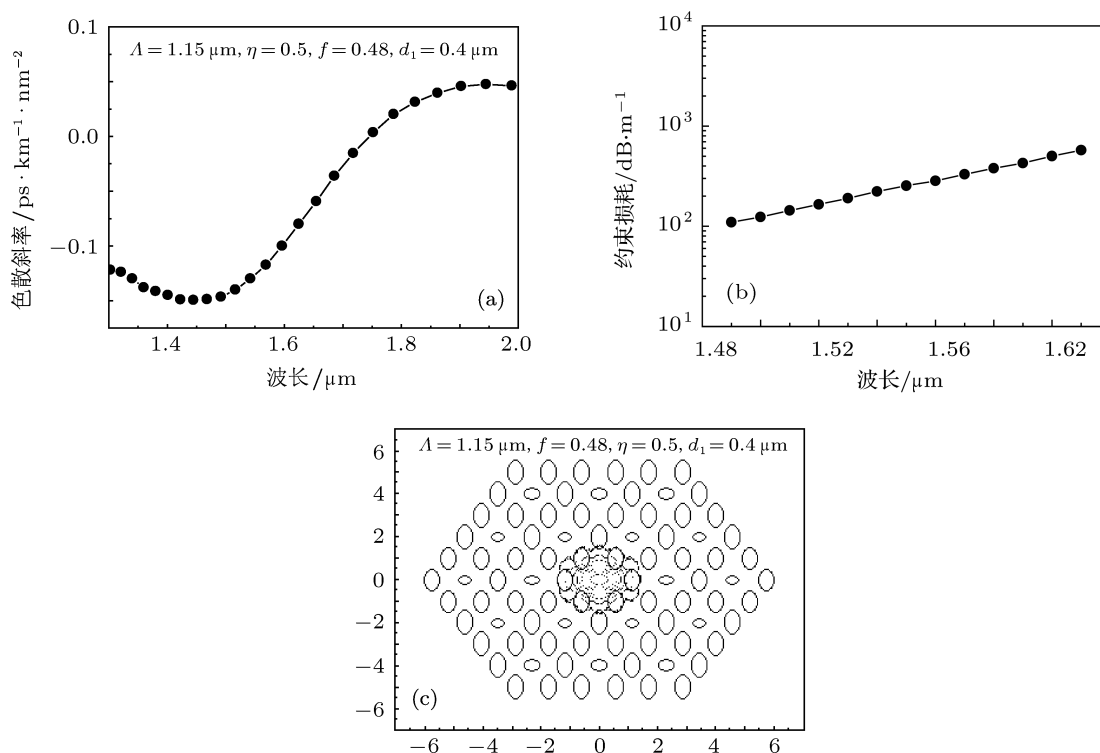


图4 六角点阵蜂窝状包层 PCF 的色散斜率, 约束损耗随波长的变化关系和基模模场轮廓分布 (a) 色散斜率; (b) 约束损耗; (c) $1.55 \mu\text{m}$ 处基模模场轮廓分布

应, 将在光纤色散补偿^[17,18]和光纤传感^[19]等方面获得很好的应用。

进一步采用 FV-FEM 并结合最佳 PMLs 对设计光纤的约束损耗及模场进行了分析。图 4(b) 描绘了设计光纤约束损耗 $L_c(\lambda)$ 随波长 λ 的变化, 显然, 随着波长的增加, 约束损耗逐渐增大, 但是在通信窗口 C 波段附近, 设计光纤的约束损耗接近 $10^2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 。图 4(c) 给出了六角点阵蜂窝状包层 PCF 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处的基模模场轮廓。从图 4(c) 可以看出, 该设计光纤的模场被很好地约束在芯区。另外, 该新型光纤的蜂窝状包层采用毛细管堆积技术或预制棒本体聚合技术很容易实现^[20], 而不必采用复杂的溶胶-凝胶法或预制棒钻孔法^[21], 因而新设计 PCF 的制备相对较为容易。

3.3 特殊结构下的不同包层结构 PCF 双折射和色散特性的比较分析

以下所分析的结构是 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $f = 0.48$, $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ 的蜂窝状包层和椭圆状包层 (将上述小圆空气孔替换为椭圆空气孔) PCF。

由图 5(a) 可以看出, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 蜂窝状包层比椭圆状包层 PCF 的双折射 B 要高, 分别为 1.02×10^{-2} 和 8.82×10^{-3} 。

为了更好地分析蜂窝状包层 PCF 的色散补偿特性, 模拟了椭圆状包层 PCF 色散特性, 并且引进一个新的参数, 即非线性系数^[22]

$$\gamma(\lambda) = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

式中 n_2 是石英的非线性折射率, 可以通过多种测量技术得到 (如自相位调制、交叉相位调制、四波混频), 本文采用文献 [9] ($n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$) 的结果; A_{eff} 为有效模面积, 可以通过下式进行计算^[23]

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint |E|^2 dx dy)^2}{\iint |E|^4 dx dy}, \quad (9)$$

式中的积分区域是整个光纤端面。显然, 非线性系数与其有效模面积成反比, 有效模面积越大, 非线性系数就越小。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。

由图 5(b) 可以看出, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 蜂窝状包层 PCF 的最大负色散要低于椭圆状包层 PCF,

分别为 -75.7 和 $-58.4 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$. 说明蜂窝状包层 PCF 更容易获得大的负色散值. 由图 5(c) 可以看出, 在相同的结构参数下, 蜂窝状包层比椭圆状包层 PCF 的非线性系数小, 分别为 45.7

和 $61.7 \text{ km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$, 这对色散补偿光纤是十分有利的. 因此, 蜂窝状包层比椭圆状包层 PCF 更容易获得较低非线性系数的高双折射大负色散值的色散补偿光纤.

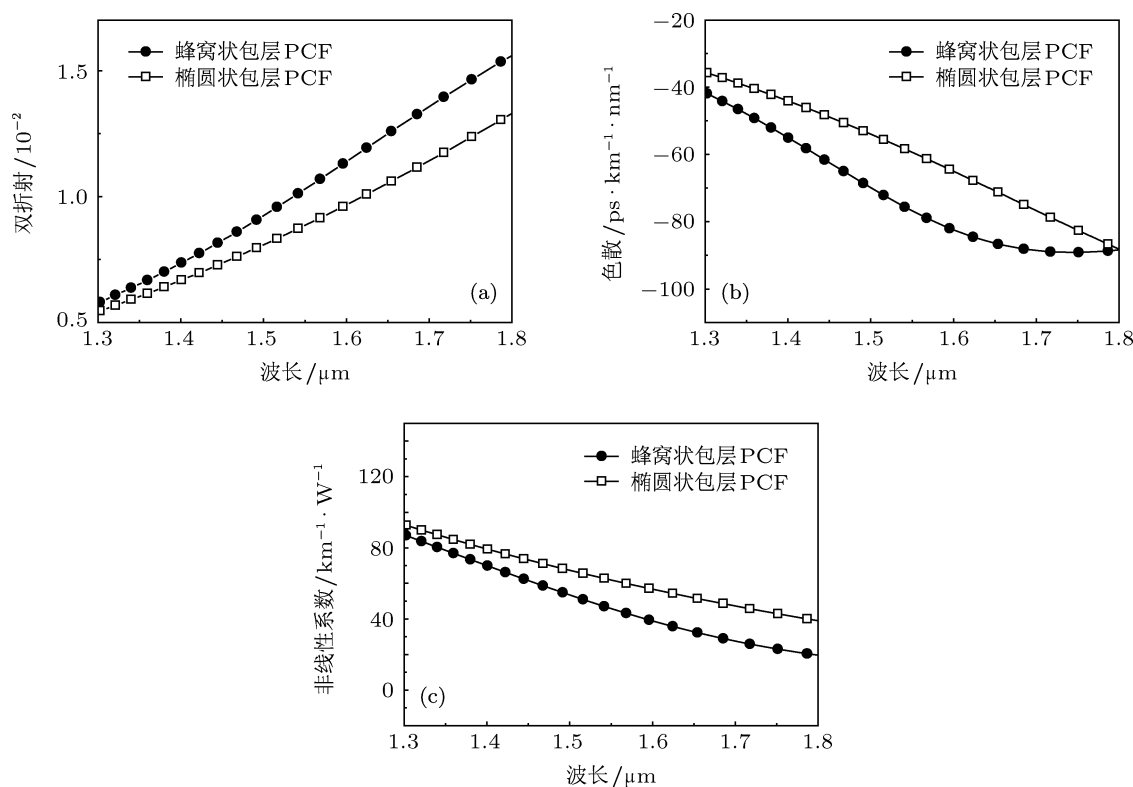


图 5 蜂窝状包层和椭圆状包层 PCF 双折射、色散及非线性系数随波长的变化关系 (a) 双折射; (b) 色散; (c) 非线性系数

4 结论

基于 FV-FEM, 并结合 PMLs 吸收边界条件, 优化设计了一种六角点阵蜂窝状包层 PCF, 通过调整光纤结构参数 (空气孔间隔 Λ , 椭圆率 η , 相对孔间隔比 f 以及小圆孔的直径 d_1), 可以控制其高双折射负色散工作波长范围. 当选取 $\Lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $\eta = 0.5$, $f = 0.48$, $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ 时, 新设计光纤在 C 波段呈现负色散和负色散斜率, 其色散斜率在整

个 C 波段附近在 $-0.132 \sim -0.121 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$ 范围内波动, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 该光纤的双折射 B 高达 1.02×10^{-2} , 约束损耗接近 $10^2 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$, 非线性系数为 $45.7 \text{ km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$. 在相同的结构参数情况下, 蜂窝状包层比椭圆状包层 PCF 具有更大的负色散值和较低的非线性系数, 更有利于进行色散补偿. 本文的理论研究为今后色散补偿光纤的设计和制造提供了一定的理论依据.

[1] Knight J C, Russell P S 2002 *Science* **296** 276
 [2] Xia C M, Zhou G Y, Han Y, Liu Z L, Hou L T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094213 (in Chinese) [夏长明, 周桂耀, 韩颖, 刘兆伦, 侯蓝田 2011 物理学报 **60** 094213]
 [3] 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]
 [4] 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]
 [5] 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]

- [6] 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]
- [7] Zhang Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8632 (in Chinese) [张亚妮 2010 物理学报 **59** 8632]
- [8] Zhang Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4050 (in Chinese) [张亚妮 2010 物理学报 **59** 4050]
- [9] Zhang L C, Zhou G Y, Hou L T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054217 (in Chinese) [张立超, 周桂耀, 侯蓝田 2011 物理学报 **60** 054217]
- [10] Selleri S, Petracek J 2001 *Opt. Quantum Electron.* **33** 378
- [11] Zhang Y N 2008 *J. Mod. Opt.* **55** 3563
- [12] Saitoh K, Koshiba M, Hasegawa T, Sasaoka E 2003 *Opt. Express* **11** 843
- [13] Jiang L H, Hou L T, Yang Q Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4726 (in Chinese) [姜凌红, 侯蓝田, 杨倩倩 2010 物理学报 **59** 4726]
- [14] Liu Y C, Lai Y 2005 *Opt. Express* **13** 225
- [15] Tan X L, Geng Y F, Zhou J 2011 *Opt. Laser Technol.* **43** 1331
- [16] Fujisawa T, Saitoh K, Wada K, Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 893
- [17] 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]
- [18] 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]
- [19] Yang X, Zhao C L, Peng Q, Zhou X, Lu C 2005 *Opt. Commun.* **250** 63
- [20] Chen M Y, Yu R J, Zhao A P 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** 997
- [21] Issa N A, van Eijkelenborg M A, Fellew M, Cox F, Henry G, Large M C 2004 *J. Opt. Lett.* **29** 1336
- [22] Poli F, Cucinotta A, Selleri S, Bouk A H 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1065
- [23] Liu X M, Zhou X Q, Lu C 2005 *Phys. Rev. A* **72** 013811

High birefringence and negative dispersion effect of hexagonal honeycomb lattice photonic crystal fiber*

Xu Qiang^{1)2)†} Miao Run-Cai¹⁾ Zhang Ya-Ni²⁾

1) (College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

2) (Department of Physics and Information Technology, Baoji College of Arts and Science, Baoji 721016, China)

(Received 20 March 2012; revised manuscript received 27 April 2012)

Abstract

A novel hexagonal honeycomb lattice photonic crystal fiber is proposed, which is composed of a central defect core, a cladding with elliptical air-hole and small round air-holes. Based on the full vector finite element method with anisotropic perfectly matched layers, its birefringence, dispersion, nonlinearity, leakage loss and mode field are numerically investigated. We compare hexagonal honeycomb lattice photonic crystal fiber and hexagonal elliptical lattice photonic crystal fiber, both of which have the same structure parameters. Numerical results indicate that the proposed fiber shows high birefringence and negative dispersion effect. The birefringence is 1.02×10^{-2} , both its dispersion and dispersion slope are negative, the dispersion slope values are between -0.132 – -0.121 $\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-2}$ over C band, the leakage loss is close to 10^2 $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ and the non-linear coefficient is 45.7 $\text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ at a wavelength of 1.55 μm , if the parameter is selected as $\Lambda = 1.15$ μm , $\eta = 0.5$, $f = 0.48$, and $d_1 = 0.4$ μm . It is found that the hexagonal honeycomb lattice photonic crystal fiber easily obtains high birefringence, large negative dispersion and low non-linear coefficient. It is demonstrated that the hexagonal honeycomb lattice photonic crystal fiber has huge potential in designing dispersion compensation photonic crystal fiber.

Keywords: fiber optics and waveguides, high birefringence, full vector finite element method, negative dispersion

PACS: 42.81.-i, 42.81.Gs, 02.70.Dh, 81.05.Ni

* Project supported by the Key Science and Technology Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2011K02-08, 2010K01-078), the Natural Science Foundation of the Education Department of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JK403), the Science and Technology Program of Baoji, China (Grant No. 2010bj02) and the Science Foundation of Baoji University of Science and Arts, China (Grant No. ZK11142).

† E-mail: xuqiangwx@sohu.com