

低损耗低非线性高负色散光子晶体光纤的优化设计*

张亚妮†

(宝鸡文理学院物理与信息技术系, 宝鸡 721007)

(2011年10月31日收到; 2011年12月13日收到修改稿)

设计了一种同轴双芯六角点阵光子晶体光纤, 该光纤中心缺失一根空气柱形成内纤芯, 通过减小第4环空气孔的直径形成外纤芯. 采用全矢量有限元法并结合各向异性完美匹配层边界条件, 对其色散、非线性、约束损耗和模场等特性进行了数值模拟. 结果发现, 该光纤呈现高负色散可调效应和较强的模场约束能力, 约束损耗接近 $10^{-2} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$. 调整光纤结构参数 (即空气孔间隔 Λ , 小孔直径 d_1 和相对孔间隔比 f), 可以控制其高负色散工作波长. 若调整光纤结构参数 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, $f = 0.917$, $d_1 = 0.515 \mu\text{m}$ 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 $-1 \sim -6 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\text{nm}^{-2}$ 范围内波动, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处负色散值为 $-3400 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\text{nm}^{-1}$, 模场面积高达 $43 \mu\text{m}^2$, 非线性系数仅有 $3.6 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$. 该光纤在 C 波段呈现的低损耗低非线性高负色散特性, 具有很好的色散补偿能力, 将在长距离大容量高功率高速光通信系统中获得很好的应用.

关键词: 导波与光纤光学, 全矢量有限元法, 负色散, 约束损耗

PACS: 42.81.-i, 02.70.Dh, 42.90.+m, 42.81.Dp

1 引言

普通单模光纤中色散引起的脉冲展宽问题一直困扰着长距离大容量高速光通信系统的发展. 降低光纤色散的最好方法是采用色散补偿光纤 (dispersion compensating fiber, 简记为 DCF). 一般情况下, DCF 被设计为具有两个独立的同轴纤芯与包层进行匹配^[1-3]. 为了获得较大的负色散并保证单模传输, 所设计光纤应该具有高有效折射率和小纤芯直径, 这样就会导致纤芯有效模面积较小 (一般是 $15 \sim 20 \mu\text{m}^2$) 而产生相应的非线性效应^[4]. 采用纤芯掺杂的方法可以提高纤芯有效折射率, 但这样又导致光纤制备工艺复杂, 进而增加 DCF 中高负色散的实现难度. 目前, 商用 DCF 的负色散值一般在 $-100 \sim -150 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\text{km}^{-1}$.

与普通的掺杂光纤相比, 光子晶体光纤 (PCF) 由于结构设计上的灵活性, 通过包层有效折射率的调制很容易实现色散的有效控制^[5-7]. 通过调整 PCF 外包层结构和参数实现色散补偿光子晶体

光纤 (DCPCF) 的研究报道已有很多^[8-10]. 然而, 在这些研究工作中, 有的 DCPCF 负色散的波段受到限制^[11,12], 有的 DCPCF 的约束损耗过大或者是模场面积太小, 有的虽然具有很好的色散补偿特征但是光纤结构复杂导致制备困难^[13,14]. 为此, 本文通过调整 PCF 的结构参数, 优化设计了一种同轴双芯 PCF, 在光纤中心缺失一根空气柱形成内芯, 通过减小包层第4环空气孔的直径形成同轴外芯. 采用全矢量有限元法 (full vector finite element method, 简记为 FV-FEM)^[15] 并结合完美匹配层 (perfectly matched layers, 简记为 PMLs) 吸收边界条件, 对其色散、非线性和约束损耗等特性进行了数值模拟. 结果发现, 该同轴双芯 PCF 具有很强的模场约束能力和极低的模约束损耗, 并在 C 波段呈现高负色散低非线性效应. 通过调整光纤结构参数 (空气孔间隔 Λ 、相对孔间隔比 f 以及大小空气孔的直径比) 可以调节该光纤高负色散工作波长. 若调整光纤结构参数 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, $f = 0.92$, 小孔与大孔直径之比 $d_1/d = 0.47$, 该光纤在 C 波段 ($1.53 \sim$

* 国家留学基金委员会西部人才计划 (批准号: 20095004)、陕西省科技攻关计划 (批准号: 2010K01-078)、陕西省教育厅自然科学基金 (批准号: 2010JK403) 和宝鸡市科技计划 (批准号: 2010BJ02) 资助的课题.

† E-mail: yanizhang1@163.com

1.565 μm) 呈现高负色散和负色散斜率, 且约束损耗接近 10^{-2} 量级, 模场面积高达 $43 \mu\text{m}^2$, 非线性系数仅为 $3.6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. 本文所设计的光纤因具有大模场面积和高负色散特性将在高功率脉冲传输系统和纤芯掺杂光纤放大器系统的色散补偿方面有重要的应用.

2 设计原理与理论模型

新设计的同轴双芯 PCF 端面如图 1 所示, 整个光纤以石英为基材, 中心抽取一根空气柱产生的实心区域构成内芯, 靠近内芯的 3 环空气孔组成内包层. 减小第 4 环空气孔的直径局部增加其有效折射率而形成与内芯同轴的环形外芯. 包层空气孔按照对称六角点阵排列, 光纤结构参数采用空气孔间隔 Λ , 相对孔间隔比 $f = d/\Lambda$, 大孔直径 d 和小孔直径 d_1 描述, 背景材料折射率为 1.45.

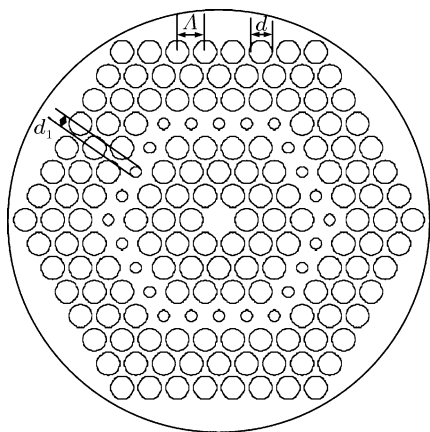


图 1 低损耗高负色散 PCF 端面结构

为了对新设计光纤进行数值模拟, 采用 FV-FEM 并结合 PMLs 吸收边界条件. 根据 Maxwell 方程, 有限元法的基本方程为 [16]

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

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相对磁导率. 采用 FV-FEM 分析 PCF 时, 为了精确模拟空气孔边界, 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元胞, 利用 (1) 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

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

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_{eff} 为有效折射率. 根据 $[K]$ 和 $[M]$ 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, PCF 的总色散 $D(\lambda)$ 等于波导色散 $D_w(\lambda)$ 和材料色散 $D_m(\lambda)$ 之和 [17], 即

$$D(\lambda) = D_w(\lambda) + D_m(\lambda), \quad (3)$$

波导色散 $D_w(\lambda)$ 取决于光纤的波导结构. 与波导色散相比, 材料色散 $D_m(\lambda)$ 由于数值很小, 因而可以被忽略. 于是, PCF 的色散 $D(\lambda)$ 可表示为 [18]

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

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} 的虚部, 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 [19]

$$L_c(\lambda) = \frac{2 \times 10^7}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}[n_{\text{eff}}], \quad (5)$$

式中, c 为真空中的光速, λ 为光波长. 因此, 一旦基模有效折射率 n_{eff} 确定, 色散 $D(\lambda)$ 和模约束损耗 $L_c(\lambda)$ 均可以确定. 另外, 在讨论 DCPCF 设计中的非线性效应时, 有效模场面积 A_{eff} 也是一个非常重要的参数, 因为有效模场面积的大小直接决定了非线性系数的大小. PCF 的非线性系数可表示为 [20]

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

式中 $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ 为材料的非线性折射率. 有效模场面积 A_{eff} 可以通过下式进行计算 [21]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy}, \quad (7)$$

式中的积分区域是整个光纤端面. 显然, 非线性系数与有效模场面积成反比, 有效模场面积越大, 非线性系数就越小.

3 结果及讨论

3.1 同轴双芯 PCF 色散参数的优化设计

为了使所设计的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. 一般情况下, PCF 波导色散 $D_w(\lambda)$ 与光纤结构参数之间的关系可表示为^[22]

$$D_w(\lambda; M, A, f) = \frac{1}{M} D_w\left(\frac{\lambda}{M}; A, f\right). \quad (8)$$

式中 M 为孔间隔放大比例. (8) 式表明, 对于相同的 f , PCF 包层孔间隔缩小 M 倍, 在 λ/M 处的波导色散将减小到原来的 $1/M$. 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 $D(\lambda)$. 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, 为了使所设计的光纤呈现较大的负色散值, 空气孔间隔 A 不能选取太大.

首先, 选取相对孔间隔比 $f = 0.82$, 小孔与大孔直径之比 $d_1/d = 0.5$ 不变, A 从 $1.1 \mu\text{m}$ 变化到 $1.3 \mu\text{m}$, 变化步长取 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 色散随波长的变化关系如图 2 所示. 从图 2 可以看出: 随着 A 的增加, 最大负色散的位置发生红移, 且最大负色散绝对值减小. 当选取 $A = 1.2 \mu\text{m}$ 时, 最大负色散所对应的波长接近低损耗通信波长 $1.5 \mu\text{m}$. 因此, 选取 $A = 1.2 \mu\text{m}$ 作为设计光纤的最佳孔间隔参数.

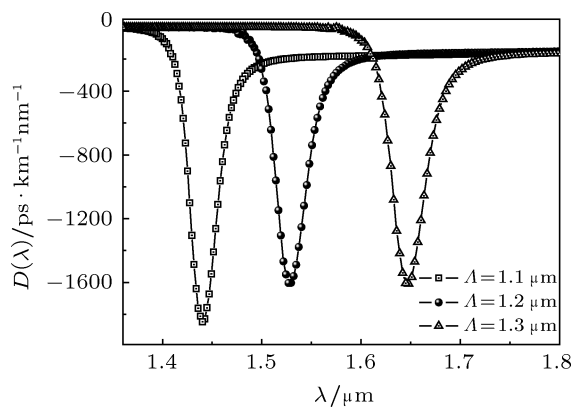


图 2 当 $f = 0.82$, $d_1/d = 0.5$, 孔间隔 A 取不同值时, 同轴双芯 PCF 色散 D 随波长 λ 的变化

其次, 选取 $A = 1.2 \mu\text{m}$, $f = 0.82$ 不变, 小孔直径 d_1 从 $0.47 \mu\text{m}$ 变化到 $0.51 \mu\text{m}$, 变化步长取 $0.01 \mu\text{m}$ 时, 色散随波长的变化关系如图 3 所示. 从图 3 可以看出: 随着 d_1 的增加, 最大负色散绝对值相应增加, 最大负色散的位置发生红移. 当选取 $d_1 = 0.49 \mu\text{m}$ 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. 因此, 为了满足低损耗通信波段长距离通信中色散补偿的需要, 小孔直径的最佳设计参数选取

为 $d_1 = 0.49 \mu\text{m}$.

最后, 选取 $A = 1.2 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.49 \mu\text{m}$ 不变, 改变相对孔间隔比 f 和小孔与大孔直径之比 d_1/d 时, 色散随波长的变化关系如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 随着相对孔间隔比 f 的增大, 尽管最大负色散绝对值逐渐增大, 而最大负色散的位置移向高频段, 相应的大小孔直径之比也随之减小. 同理, 为了满足低损耗通信窗口附近长距离通信过程中色散补偿的需求, 选取最佳相对孔间隔比 $f = 0.82$.

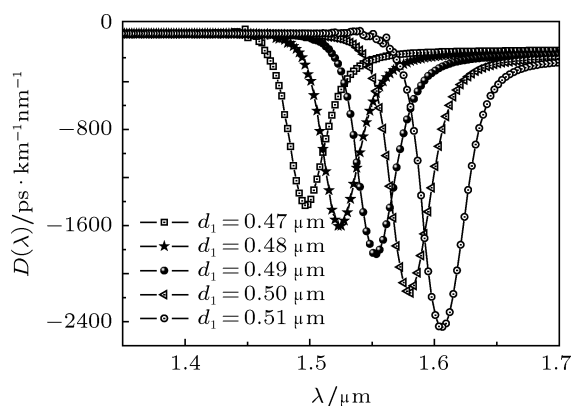


图 3 当 $f = 0.82$, $A = 1.2 \mu\text{m}$, 小孔直径 d_1 取不同值时, 同轴双芯 PCF 色散 D 随波长 λ 的变化

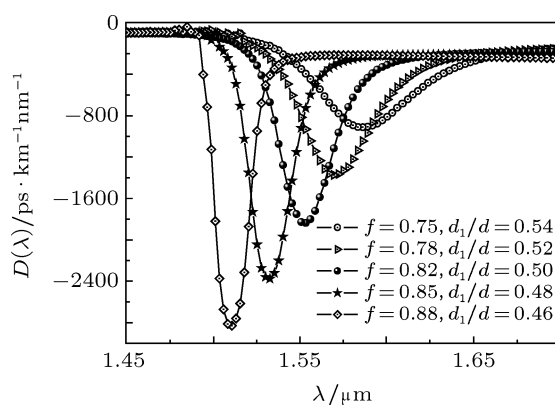


图 4 当 $A = 1.2 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.49 \mu\text{m}$, 相对孔间隔比 f 和小孔与大孔直径比 d_1/d 取不同值时, 同轴双芯 PCF 色散 D 随波长 λ 的变化

根据以上分析可知, 同轴双芯 PCF 的色散与光纤结构参数密切相关, 增大相对孔间隔比或者减小大小孔直径之比, 可以产生更大的最大负色散以满足长距离通信过程中色散补偿的要求, 但当相对孔间隔比太大时, 最大负色散的位置将发生蓝移. 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 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, 相对孔间隔比 $f = 0.82$, 小孔直径 $d_1 = 0.49 \mu\text{m}$, 大小孔直径之比 $d_1/d = 0.50$. 此时, 该光纤在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 对应的最大负色散为 $-1828 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\text{nm}^{-1}$.

3.2 低损耗高负色散补偿 PCF 的色散特性分析

从图 4 分析可知, 较大的相对孔间隔比将导致较大的负色散绝对值并使最大负色散的位置发生蓝移. 但是, 增加大小孔直径之比又会使最大负色散的位置产生红移. 因此, 为了在低损耗通信窗口 C 波段附近获得最佳的色散补偿效果, 采用 FV-FEM 对同轴双芯 PCF 进行了进一步的优化设计. 当选取孔间隔 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, 大孔直径 $d = 1.1 \mu\text{m}$, 即相对孔间隔比 $f = 0.917$, 然后逐渐增加小孔直径以调整小孔与大孔直径之比, 模拟得到的色散随波长的变化曲线如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 当孔间隔和相对孔间隔比不变时, 最大负色散绝对值基本不变, 但随着小孔直径的增大, 最大负色散的位置移向低频段. 当选取小孔直径 $d_1 = 0.515 \mu\text{m}$ 时, 设计得到高负色散补偿光纤的最大负色散的位置红移到低损耗通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近, 对应最大负色散值高达 $-3400 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\text{nm}^{-1}$, 色散斜率 $s_D(\lambda)$ 在低损耗通信窗口 C 波段附近随波长变化关系如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 整个 C 波段色散斜率在 $-1 \sim -6 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\text{nm}^{-2}$ 范围内波动. 综合分析图 5 和图 6 可知, 该光纤在整个 C 波段呈现负色散和负色散斜率, 极高的负色散和负色散斜率为其在大容量高速高能量长距离通信系统中的色散补偿奠定了重要的基础 [23].

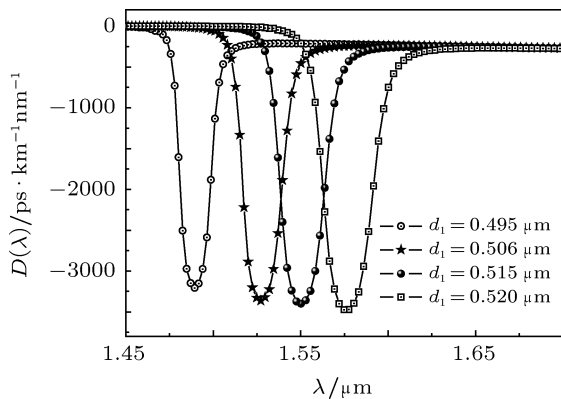


图 5 当 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, $d = 1.1 \mu\text{m}$, 小孔直径 d_1 取不同值时, 同轴双芯 PCF 色散 D 随波长 λ 的变化

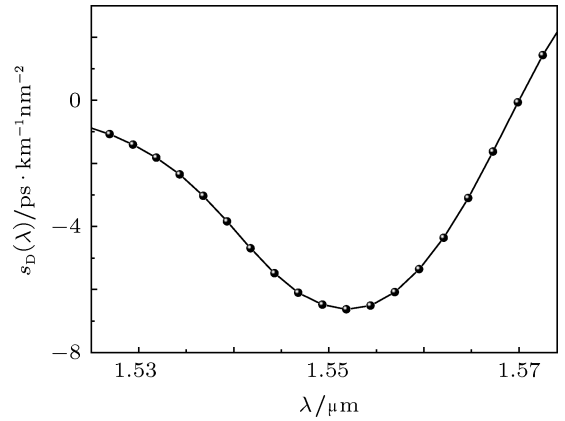


图 6 当 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, $d = 1.1 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.515 \mu\text{m}$ 时, 同轴双芯 PCF 色散斜率 s_D 随波长 λ 的变化

进一步采用 FV-FEM 并结合最佳 PMLs 对设计光纤的非线性系数、模场面积及约束损耗进行了分析, 结果如图 7 所示. 图 7(a) 给出了设计光纤的有效模场面积 $A_{\text{eff}}(\lambda)$ 和非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 在低损耗通信窗口 C 波段随波长 λ 的变化关系. 从图 7(a) 可以明显看出非线性系数与模场面积之间的反比关系, 随着波长的增加, 低频段模场逐渐向包层泄露,

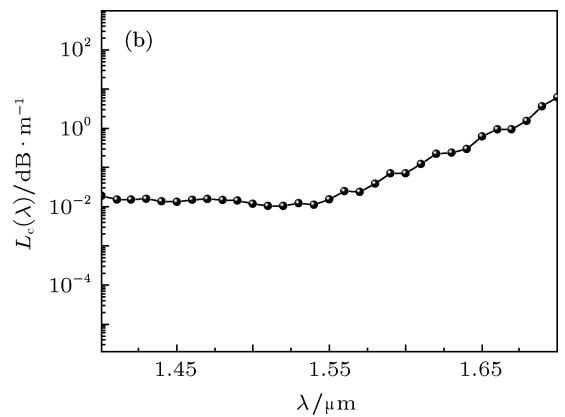
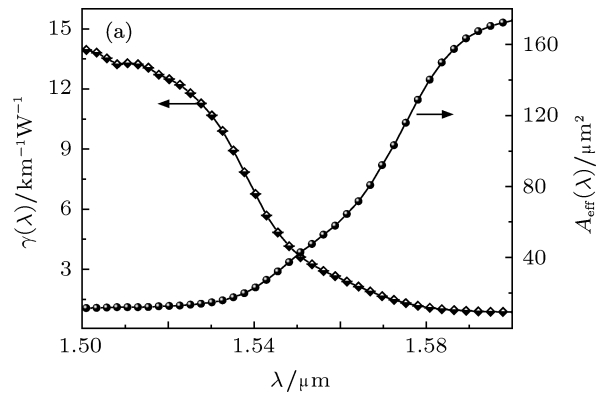


图 7 同轴双芯 PCF 非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 、有效模场面积 $A_{\text{eff}}(\lambda)$ 和约束损耗 $L_c(\lambda)$ 随波长 λ 的变化关系 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, $d = 1.2 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.1 \mu\text{m}$. (a) $\gamma(\lambda)$ 和 $A_{\text{eff}}(\lambda)$; (b) $L_c(\lambda)$

进而导致模场面积逐渐增大,相应的非线性系数明显减小,在低损耗通信波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近非线性系数只有 $3.6\ \text{km}^{-1}\ \text{W}^{-1}$,而模场面积则高达 $43\ \mu\text{m}^2$.这种大模场面积低非线性高负色散 PCF,可以有效抑制色散补偿过程中四波混频等非线性效应^[24],将在高功率脉冲传输系统和掺杂光纤放大器中实现色散补偿有重要的应用^[25].此外,如果在耗散型孤子 (dissipative soliton) 激光器系统中用该设计光纤取代传统的单模光纤,不仅能大幅度提高脉冲能量,还能缩小腔的长度,极大提高重复频率^[26,27].图 7(b) 示出了设计光纤约束损耗 $L_c(\lambda)$ 随波长 λ 的变化.从图 7 可以明显看出,随着波长的增加,约束损耗逐渐增大,但是在低损耗通信窗口 C 波段附近,设计光纤的约束损耗接近 $10^{-2}\ \text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$,呈现低约束损耗特性.这将大大增强光纤在色散补偿过程中的传输效率.

图 8 为新型同轴双芯低损耗低非线性高负色散 PCF 在低损耗通信窗口 C 波段 $1.53, 1.55$ 和 $1.58\ \mu\text{m}$ 波长处的模场分布情况.从图 8 可以看出,在短波长区域,模场被很好地约束在内芯,随着波长的增加,模场逐渐从内芯向外芯过渡.在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近,模场过渡到外芯并形成稳定的外部模场图 (图 8(c)).正是由于模场的这种过渡引起设计光纤有效折射率的变化进而导致高负色散效应的产生;同时,模场从内芯扩散到外芯也会使有效模场面积增加,因此,非线性系数明显减小.

另外,新设计的同轴双芯高负色散 PCF 中包层孔结构的六角点阵排列方式采用毛细管堆积技术很容易实现^[28],而不必采用复杂的溶胶-凝胶法或预制棒钻孔法^[29],因而新设计 PCF 的制备相对较为容易.

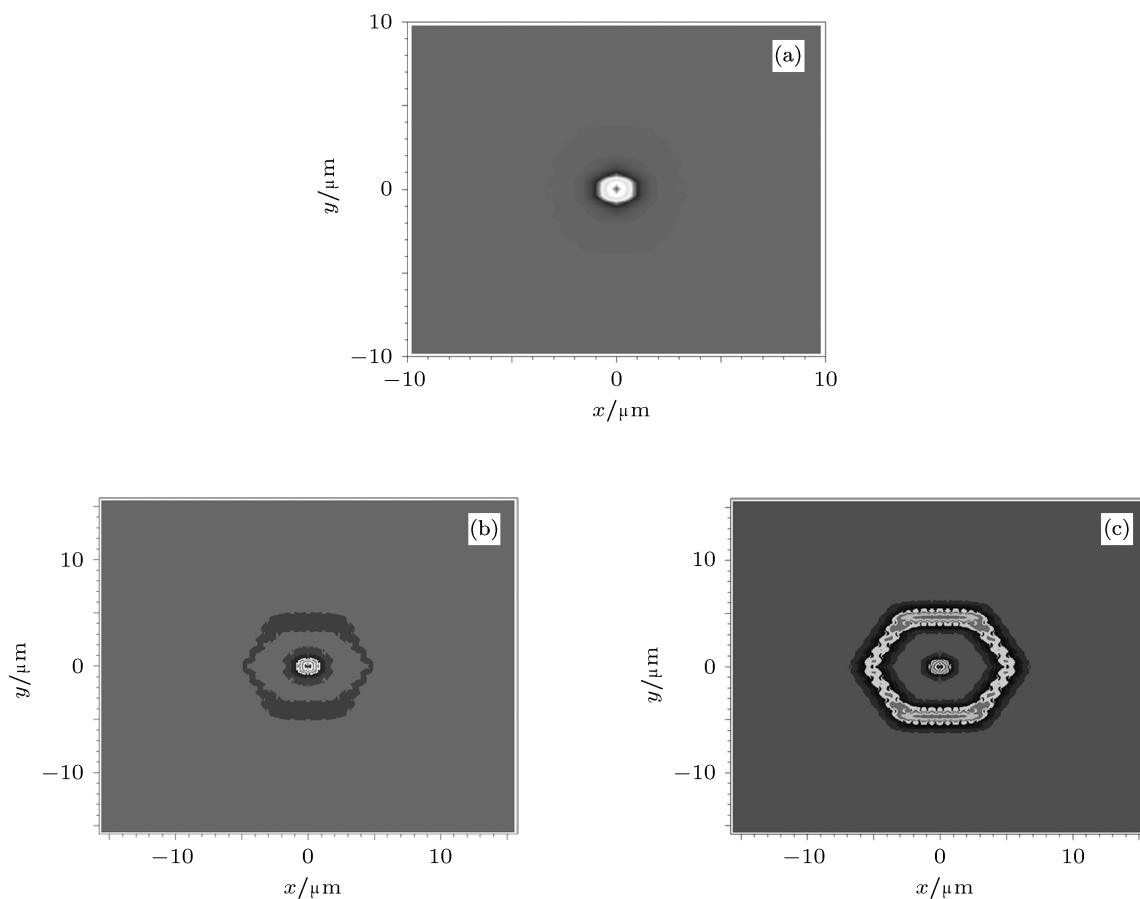


图 8 同轴双芯高负色散 PCF 在 C 波段的模场演化情况 (a) $\lambda = 1.53\ \mu\text{m}$; (b) $\lambda = 1.55\ \mu\text{m}$; (c) $\lambda = 1.58\ \mu\text{m}$

4 结论

通过在光纤中心抽取一根空气孔形成内纤芯,减小第4环孔直径形成外纤芯,从而构成同轴双芯结构,光纤包层采用圆形空气孔六角点阵排列方式,设计了一种同轴双芯结构 PCF. 以石英为基材,采用 FV-FEM, 对其色散、非线性、约束损耗和模场等进行了数值模拟. 研究表明,新设计的同轴双芯 PCF 呈现高负色散可调效应,调整光纤结构参数(空气孔间隔 Λ , 小孔直径 d_1 和相对孔间隔比 f) 可以控制其高负色散工作波长范围. 孔间隔 Λ 越小,最大负色散绝对值越大,但是最大负色散的位置发生蓝移;减小相对孔间隔比 f , 最大负色散的位置则发生红移,同时最大负色散绝对值减小;若增大小孔直径 d_1 , 最大负色散绝对值相应增加,最大负色

散的位置移向低频段. 为此,选取该光纤结构参数为孔间隔 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, 小孔直径 $d_1 = 0.515 \mu\text{m}$, 相对孔间隔比 $f = 0.917$, 即大孔直径 $d = 1.1 \mu\text{m}$ 时,设计光纤在低损耗通信窗口 C 波段呈现负色散和负色散斜率,色散斜率在 $-1 \sim -6 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\text{nm}^{-2}$ 范围内波动,并在低损耗通信窗口中心波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处负色散值高达 $-3400 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\text{nm}^{-1}$, 约束损耗接近 $10^{-2} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$, 模场面积高达 $43 \mu\text{m}^2$, 非线性系数仅有 $3.6 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$, 呈现很好的低损耗、低非线性和高负色散特性. 设计光纤具有的这种大模场面积、低非线性、低损耗和高负色散特性,能够有效抑制色散补偿过程中的四波混频等非线性效应,将在 C 波段的长距离大容量高功率高速光通信系统和 Raman 放大器系统^[30] 的色散补偿方面呈现广阔的应用前景.

- [1] Gruner-Nielsen L, Knudsen S N, Edvold B, Veng T, Magnussen D, Larsen C C, Damsgaard H 2000 *Opt. Fiber Technol.* **6** 164
- [2] Auguste J L, Blondy J M, Maury J, Marcou J, Dussardier B, Monnom G, Jindal R, Thyagarajan K, Pal B P 2002 *Opt. Fiber Technol.* **8** 89
- [3] Grüner-Nielsen L, Wandel M, Kristensen P, Jørgensen C, Jørgensen L V, Edvold B, Pálsdóttir B, Jakobsen D 2005 *IEEE J. Lightwave Technol.* **23** 3566
- [4] Yang S G, Zhang Y J, Peng X Z, Lu Y, Xie S Z, Li J Y, Chen W, Jiang Z W, Peng J G, Li H Q 2006 *Opt. Express* **14** 3015
- [5] Zhang Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4050 (in Chinese) [张亚妮 2010 物理学报 **59** 4050]
- [6] Zhang Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8632 (in Chinese) [张亚妮 2010 物理学报 **59** 8632]
- [7] 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]
- [8] Gérôme F, Auguste J L, Blondy J M 2004 *Opt. Lett.* **29** 2725
- [9] Ni Y, An L, Peng J, Fan C 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1516
- [10] 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]
- [11] Zsigri B, Laegsgaard J, Bjarklev A 2004 *J. Opt. A* **6** 717
- [12] Huttunen A, Törmä P 2005 *Opt. Express* **13** 627
- [13] Mangan B J, Couny F, Farr L, Langford A, Roberts P J, Williams D P, Banham M, Mason M W, Murphy D F, Brown E A M, Sabert H, Birks T A, Knight J C, Russell P St J 2004 *Lasers and Electro-Optics* **2** 1069
- [14] Zhang Y J, Yang S G, Peng X Z, Lu Y, Chen X F, Xie S Z 2005 *Proc. SPIE* **5950** 43
- [15] Zhu Z, Brown T 2002 *Opt. Express* **10** 853
- [16] Zhang Y N, Ren L Y, Gong Y K, Li X H, Wang L R, Sun C D 2010 *Appl. Opt.* **49** 3208
- [17] Zhang Y N 2011 *Appl. Opt.* **50** E125
- [18] Saitoh K, Koshiba M, Hasegawa T, Sasaoka E 2003 *Opt. Express* **11** 843
- [19] Liu Y C, Lai Y 2005 *Opt. Express* **13** 225
- [20] Poli F, Cucinotta A, Selleri S, Bouk A H 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1065
- [21] Liu X M, Zhou X Q, Lu C 2005 *Phys. Rev. A* **72** 013811
- [22] Ferrando A, Silvestre E, Andres P, Miret J J, Andres M V 2001 *Opt. Express* **9** 687
- [23] Begum F, Namihira Y, Razzak S M A, Kaijage S, Hai N H, Kinjo T, Miyagi K, Zou N 2009 *Opt. Laser Technol.* **41** 679
- [24] Huttunen A, Törmä P 2005 *Opt. Express* **13** 627
- [25] Liu X M 2010 *Phys. Rev. A* **81** 053819
- [26] Liu X M 2010 *Phys. Rev. A* **81** 023811
- [27] Fujisawa T, Saitoh K, Wada K, Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 893
- [28] Chen M Y, Yu R J, Zhao A P 2004 *J. Opt. A* **6** 997
- [29] Issa N A, van Eijkelenborg M A, Fellew M, Cox F, Henry G, Large M C J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1336
- [30] Varshney S K, Saitoh K, Koshiba M, Roberts P J 2007 *Opt. Fiber Technol.* **13** 174

Design and optimization of low-loss low-nonlinear high negative-dispersion photonic crystal fiber*

Zhang Ya-Ni[†]

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

(Received 31 October 2011; revised manuscript received 13 December 2011)

Abstract

A novel hexangular lattice dual-concentric-core photonic crystal fiber is proposed, which is composed of a central defect core, an outer ring core by introducing small air-holes on the forth ring and double cladding circle air-holes along the direction of fiber length. Based on full vector finite element method with anisotropic perfectly matched layers, its dispersion, nonlinear, leakage loss and mode field are numerically investigated. Numerical results indicate that the proposed fiber shows higher negative dispersion tunable effect and stronger confinement ability of guided mode, which the leakage loss is close to 10^{-2} dB·m⁻¹. The wavelength for high negative dispersion value can be adjusted by artificially choosing the parameters of proposed fiber, i.e. A , d_1 and f . Both its dispersion and dispersion slope are negative, the dispersion slope values are between -1 — -6 ps·km⁻¹nm⁻² over C band, and its negative dispersion value is -3400 ps·km⁻¹nm⁻¹, the nonlinear coefficient is only 3.6 km⁻¹W⁻¹, and the corresponding area of mode field is 43 μm² at wavelength of 1.55 μm, if the parameter is selected as $A = 1.2$ μm, $f = 0.917$, $d_1 = 0.515$ μm. Obviously, it has a good dispersion compensation, therefore it has admirable applications in the field of high-speed large-capacity high-power pulses long-distance communication system.

Keywords: fiber optics and waveguides, full vector finite element method, negative dispersion, confinement loss

PACS: 42.81.-i, 02.70.Dh, 42.90.+m, 42.81.Dp

* Project supported by the Western Talent Program of China Scholarship Council (Grant No. 20095004), the Key Science and Technology Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010K01-078), the Natural Science Foundation of the Education Bureau of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JK403), and the Science and Technology Program of Baoji, China (Grant No. 2010BJ02).

[†] E-mail: yanizhang1@163.com