

doi:10.3788/gzxb20184711.1106005

超低损耗低非线性平坦色散光子晶体光纤 优化设计

薛璐^{1,2}, 张亚妮^{1,2,3}, 朱雨雨^{1,2}, 郝亚茹^{1,2}, 许强^{1,2}, 梅森⁴, 孔德鹏⁴

(1 宝鸡文理学院 物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡 721016)

(2 宝鸡市超快激光与新材料工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721016)

(3 陕西科技大学 文理学院, 西安 710021)

(4 中国科学院西安光学精密机械研究所 信息光子学室, 西安 710119)

摘要:以二氧化硅为基材, 优化设计了一种圆空气孔六角点阵光子晶体光纤, 通过减小纤芯内层 6 个小空气孔以增加模场面积, 降低非线性系数. 采用时域有限差分法结合完美匹配层吸收边界条件, 对该光纤色散、非线性、约束损耗和基模模场与光纤结构参数之间的关系进行了数值分析. 结果表明, 该光纤呈现一定的超低损耗低非线性色散平坦特性, 其在最优结构参数下通信波长处的约束损耗小于 10^{-7} dB·km⁻¹, 在波长 1.55 μm 和 1.31 μm 处约束损耗分别为 2.93×10^{-8} dB·km⁻¹ 和 7.33×10^{-10} dB·km⁻¹, 且波长从 1.05 μm 到 1.65 μm 色散值大约为 0 ± 1.7 ps·km⁻¹·nm⁻¹, 呈现双零色散点和较长波长范围的色散平坦特性. 在低损耗通信波长 1.55 μm 附近非线性系数约为 4.88 km⁻¹W⁻¹. 该光纤呈现的超低损耗低非线性平坦色散能力, 可用于长距离大容量高速光通信系统.

关键词: 导波与光纤光学; 光子晶体光纤; 时域有限差分法; 低非线性; 低损耗; 平坦色散

中图分类号: O438; TN919.11; U285.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2018)11-1106005-9

Optimization Design of Ultra-low Loss Low Nonlinear Flatten Dispersion Photonic Crystal Fiber

XUE Lu^{1,2}, ZHANG Ya-ni^{1,2,3}, ZHU Yu-yu^{1,2}, XI Ya-ru^{1,2}, XU Qiang^{1,2}, MEI Sen⁴, KONG De-peng⁴

(1 School of Physics and Optoelectronics Technology, Baoji University of Arts & Science, Baoji, Shaanxi 721016, China)

(2 Baoji Engineering Technology Research Centre on Ultrafast Laser and New Materials, Baoji, Shaanxi 721016, China)

(3 School of Arts and Sciences, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

(4 Research Department of Information Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: A novel simple structure of photonic crystal fiber is optimized based on silica as the backing material, which has a cladding of hexagonal symmetric array uniform circle air hole and a larger the area of fiber core by missing central air column and reducing six air holes around the central core. Based on finite difference time domain method with the boundary conditions of anisotropic perfectly matched layers, its dispersion, nonlinear, confinement loss and fundamental mode field is numerically investigated. Numerical results indicate that the proposed fiber shows ultra-low loss, low non-linear and

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 11647008, 11504416), 陕西省国际科技合作与交流项目 (No. 2018KW-016), 宝鸡市重大科技专项计划项目 (No. 2015CXNL-1-3) 和陕西科技大学重点科研项目 (No. 2018WLXY-01-01) 资助

第一作者: 薛璐 (1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹波导设计与表征. Email: xuelu547579228@163.com

导师 (通讯作者): 张亚妮 (1966-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为微纳光子学与光子晶体光纤. Email: yanizhang1@163.com

收稿日期: 2018-06-13; **录用日期:** 2018-08-23

<http://www.photon.ac.cn>

flattened dispersion performance. Its confinement loss is less than 10^{-7} dB · km⁻¹ over communication band, which is 2.93×10^{-8} dB · km⁻¹ and 7.33×10^{-10} dB · km⁻¹ at wavelength of 1.55 μm and 1.31 μm, respectively. Furthermore, it appears double zero dispersion point and a certain ultra-flattened dispersion in the longer wavelength range, which flattened dispersion is 0 ± 1.7 ps · km⁻¹ · nm⁻¹ over 1.05~1.65 μm. Another, its non-linear coefficient is only 4.88 km⁻¹ W⁻¹ at wavelength of 1.55 μm. It is obviously to obtained admirable application in the field of long distance high speed optical communication system due to its ultra-low loss low non-linear and flatten dispersion capability.

Key words: Fiber optics and waveguides; Photonic crystal fiber; Finite-difference time-domain; Low non-linear; Confinement loss; Flatten dispersion

OCIS Codes: 060.5295; 130.5296; 260.2030; 130.4310

0 引言

光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fibers, PCFs)^[1] 以其灵活的包层设计而获得了普通光纤无法比拟的光学特性^[2], 如无限单模传输^[3]、色散可调^[4]、模场面积^[5]及非线性可调^[6]等, 并被广泛应用于光学器件及光通信等领域^[7-9]. 性能优越的长距离大容量高速光通信系统一直受制于普通单模光纤中色散引起的脉冲展宽影响. PCFs 由于结构设计的灵活性可实现低损耗低色散. 具有缺陷芯结构的 PCFs^[10] 色散近乎为零, 但在波长 1.55 μm 时约束损耗为 0.013 dB · km⁻¹; 以辐射状方向调节孔大小的 PCFs^[11] 虽然减少了包层孔环数, 但设计参数的增加致使约束损耗难以降低; 八边形包层 PCFs^[12,13] 色散可在一定波长范围内实现平坦控制, 而其约束损耗亦高于 10^{-3} dB · km⁻¹; 包层采用相同空气孔设计的 PCFs^[14-16] 即使在多层空气孔环数下其约束损耗亦无明显减小; 混合包层设计 PCFs^[17] 在光通信窗口带宽约束损耗虽有所下降 (约小于 5.0×10^{-3} dB · km⁻¹), 但色散特性并无改善; 一些其他特殊设计的 PCFs 要么模场面积太小或者约束损耗过大^[18,19]; 要么超平坦色散波段受限制^[20-22]; 要么设计参数多且空气孔尺寸调节复杂等^[23], 均导致 PCFs 的制备难度面临极大的挑战.

为此, 本文以二氧化硅 (SiO₂) 为基材, 通过调整 PCFs 结构参数, 优化设计了一种超低损耗低非线性平坦色散 PCFs, 该光纤采用六环六角点阵, 在光纤中心抽取一根空气柱形成纤芯, 减小纤芯内层 6 个空气孔直径以增加模场面积而降低非线性系数. 采用时域有限差分算法 (Finite Difference Time Domain, FDTD)^[24] 并结合完美匹配层 (Perfectly Matched Layers, PMLs)^[25] 吸收边界条件, 对其基模模场有效折射率、色散、约束损耗、有效模场面积、非线性系数等特性进行了数值模拟.

1 设计原理与理论模型

设计的 PCFs 端面结构如图 1 所示, 整个光纤以二氧化硅 (SiO₂) 为基材, 包层采用圆空气孔均匀六角点阵分布, 最外层圆环表示 PCFs 完美匹配层 (PMLs) 吸收边界条件; 光纤中心位置周期性破坏一根空气柱形成缺陷而构成纤芯, 光可以沿缺陷在纤芯中传播, 通过减小纤芯周围 6 个空气孔直径以增大模场面积而降低非线性. 光纤结构参数有中心小孔间隔 Δ_1 、小孔半径 d_1 、大孔间隔 Δ 、大孔半径 d . 空气折射率为 1, 背景基质材料取二氧化硅, 其折射率由 Sellmeier 公式确定, 即^[26]

$$n^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^j \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2} \quad (1)$$

式中, $j=3$, λ 为光波长, $n(\lambda)$ 为材料折射率, B_i 、 l_i 为 Sellmeier 系数. 图 2 是根据 Sellmeier 公式获得的材料有效折射率随波长的变化曲线. 由图可见, 二氧化硅的有效折射率随波长增加呈现减小趋势.

采用 FDTD 结合 PMLs 吸收边界条件对设计的光纤进行数值模拟. FDTD 的理论模型采用含时间变量的 Maxwell 旋度方程, 即^[12,27]

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{J}_m \quad (3)$$

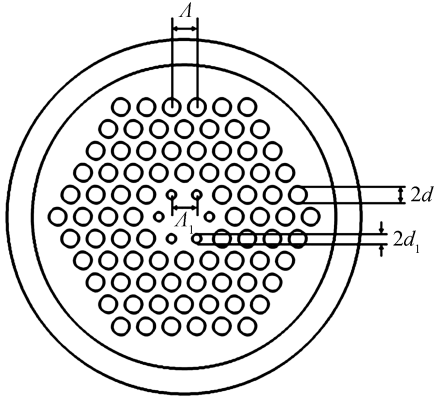


图1 光子晶体光纤的结构示意图

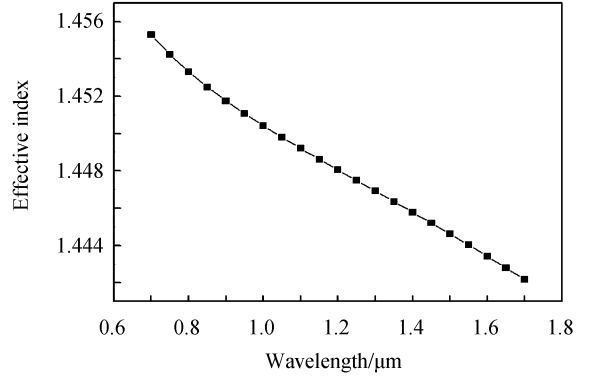


图2 二氧化硅有效折射率随波长的变化曲线

Fig.1 Schematic diagram of the proposed photonic crystal fibers

 Fig.2 Effective index of SiO₂ as a function of wavelength

式中, \mathbf{E} 代表电场强度, \mathbf{D} 代表电通量密度, \mathbf{H} 代表磁场强度, \mathbf{B} 代表磁通量密度, \mathbf{J} 代表电流密度, \mathbf{J}_m 代表磁流密度. 利用各向异性 PMLs 作为吸收边界条件对本特征方程进行求解, 得到有效折射率 n_{eff} (包含实部 Re 和虚部 Im). PCFs 总的色散值 $D(\lambda)$ 为波导色散 $D_w(\lambda)$ 和材料色散 $D_m(\lambda)$ 之和^[28]

$$D(\lambda) = D_w(\lambda) + D_m(\lambda) \quad (4)$$

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 $D_m(\lambda)$ 由于数值很小而被忽略. 于是, PCFs 的色散 $D(\lambda)$ 可表示为

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 |\text{Re}(n_{\text{eff}})|}{\partial \lambda^2} \quad (5)$$

同时, PCFs 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^[29]

$$L_c(\lambda) = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^3 \text{ (dB} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (6)$$

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 PCFs 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. PCFs 的非线性系数可表示为^[30]

$$\gamma(\lambda) = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (7)$$

式中, $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$ 为材料的非线性系数^[30]. 有效模场面积 A_{eff} 的计算公式为^[26]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |\mathbf{E}^2| dx dy \right)^2}{\iint |\mathbf{E}|^4 dx dy} \quad (8)$$

式中, \mathbf{E} 为电场强度, 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, 非线性系数越小.

2 结果与讨论

通常, 光纤几何结构参数中空气孔直径和孔间隔对光纤特性均有影响. 为了得到最优的结构参数, 重点分析纤芯小孔间隔 Δ_1 、小孔半径 d_1 、包层大孔间隔 Δ 和大孔半径 d 对约束损耗和色散的影响.

2.1 小孔半径 d_1 对光纤性能的影响

选取 $d = 0.75 \mu\text{m}$, $\Delta = \Delta_1 = 2 \mu\text{m}$ 保持不变, 改变小孔半径 d_1 的值, 从 $0.1 \mu\text{m}$ 以 $0.05 \mu\text{m}$ 的步长增加到 $0.35 \mu\text{m}$, 分析其对 PCFs 有效折射率、约束损耗和波导色散的影响. 图 3(a) 给出了选取不同小孔半径 d_1 时, 有效折射率 n_{eff} 随入射波长的改变. 从图 3(a) 可以看出, 随着 d_1 的增加, PCFs 基模 n_{eff} 逐渐减小, 且 n_{eff} 随着波长的增加呈现负增长趋势. 这是由于光纤中存在微结构孔, 在短波长段纤芯对模式约束比较好, 而在长波长段纤芯对模约束较差所致. 图 3(b) 给出了 d_1 的变化对约束损耗的影响, 可以看出 d_1 的改变对约束损耗的影响不大, 长波长段的约束损耗高于短波长段. 说明包层空气孔能很好地约束模场在纤芯, 而在短波长段包层

空气孔对模场的约束能力比长波长段更强. 图 3(c)给出了 d_1 改变时,色散随波长的变化关系.可以看出,当小孔半径 d_1 值很小(如 $0.1\ \mu\text{m}$ 和 $0.15\ \mu\text{m}$)时,色散随波长的增加而增加,小孔对色散几乎没有影响.为证实此现象,图 3(c)增加了去掉 6 个小空气孔时的色散变化(黑色点线),其色散变化趋势与 d_1 为 $0.1\ \mu\text{m}$ 和 $0.15\ \mu\text{m}$ 时类似,色散随着波长的增加而增大,此时大孔对色散调控起主导作用.而当 d_1 从 $0.2\ \mu\text{m}$ 增加到 $0.35\ \mu\text{m}$ 时,短波段色散逐渐增大,长波段曲线逐渐减小,色散整体呈现增加趋势且色散曲线趋于平坦.这是因为随着 d_1 的增大,空气填充比例随之增大,其对色散曲线的扰动也相应增大.值得注意的是,若选取小孔直径 $d_1=0.2\ \mu\text{m}$ 时,在较长的波长范围内可以获得平坦色散.因此,参数 d_1 能有效地控制色散特性并对色散平坦性产生影响.

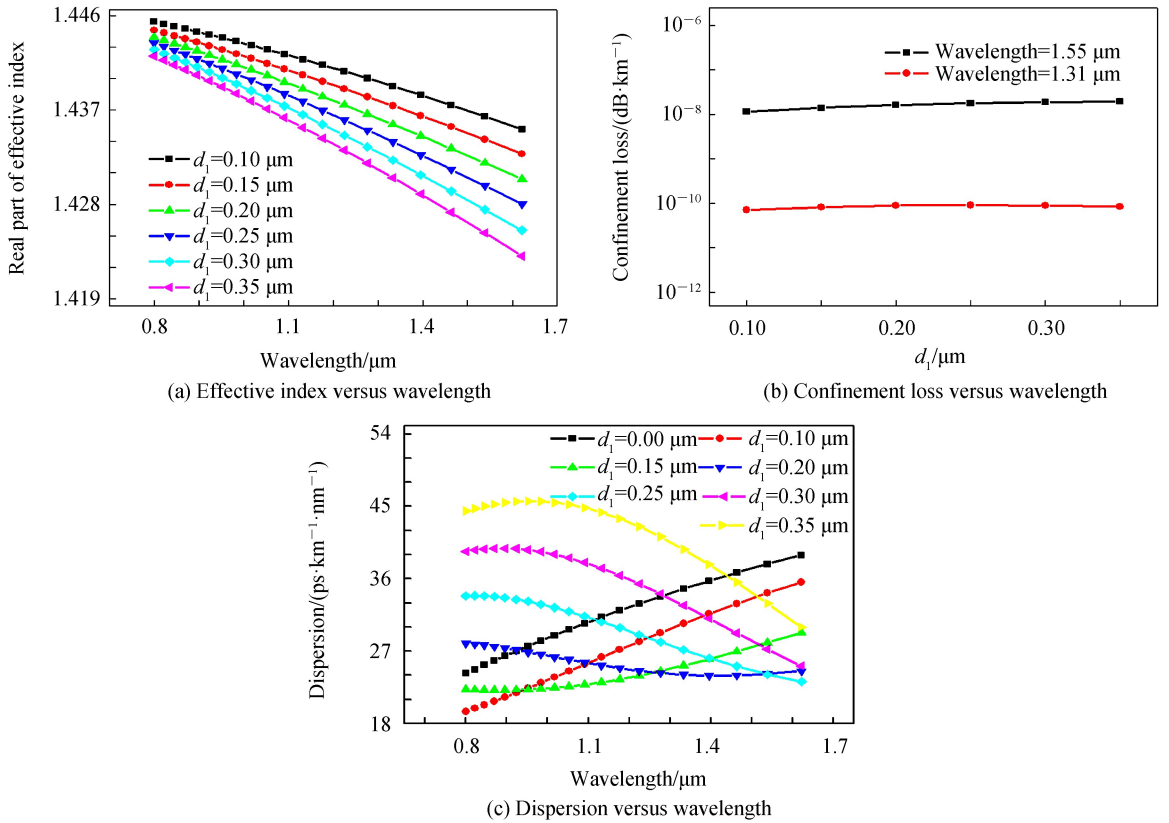


图 3 选取 $d=0.75\ \mu\text{m}$, $\Lambda=\Lambda_1=2\ \mu\text{m}$, 改变小孔半径 d_1 对光纤性能的影响

Fig.3 The effect of d_1 on property of the proposed PCFs when $d=0.75\ \mu\text{m}$, $\Lambda=\Lambda_1=2\ \mu\text{m}$

2.2 大孔半径 d 对光纤性能的影响

选取 $d_1=0.2\ \mu\text{m}$, 且 $\Lambda=\Lambda_1=2\ \mu\text{m}$ 固定不变, 改变大孔半径 d , 从 $0.65\ \mu\text{m}$ 以 $0.05\ \mu\text{m}$ 的步长值增加到 $0.9\ \mu\text{m}$ 时, 有效折射率、约束损耗和波导色散随波长的变化如图 4. 其中, 图 4(a) 为选取不同大孔半径 d 时, 有效折射率 n_{eff} 随波长的变化. 从图 4(a) 可知, 在 n_{eff} 随波长的增加而减小的总趋势下, 随着大孔半径 d 的增加, n_{eff} 呈现减小趋势, 但减小程度不是非常明显. 因此, 大孔半径 d 的改变对 PCFs 有效折射率的影响相对较弱. 图 4(b) 为相应的损耗曲线, 可以看出, 随着 d 的增加, 约束损耗呈现逐渐减小趋势, 这是因为包层 d 的增加使得空气孔填充比越大, 模场越来越集中于纤芯中. 图 4(c) 则是色散随波长的变化曲线, 可以看出, 随着包层空气孔 d 的增大, PCFs 色散值在同一波长条件下逐渐增大, 且色散随波长的变化趋于平坦. 根据以上分析, 考虑到色散和约束损耗对 d 依赖性, 折衷选取大孔半径 $d=0.85\ \mu\text{m}$ 作为最优参数.

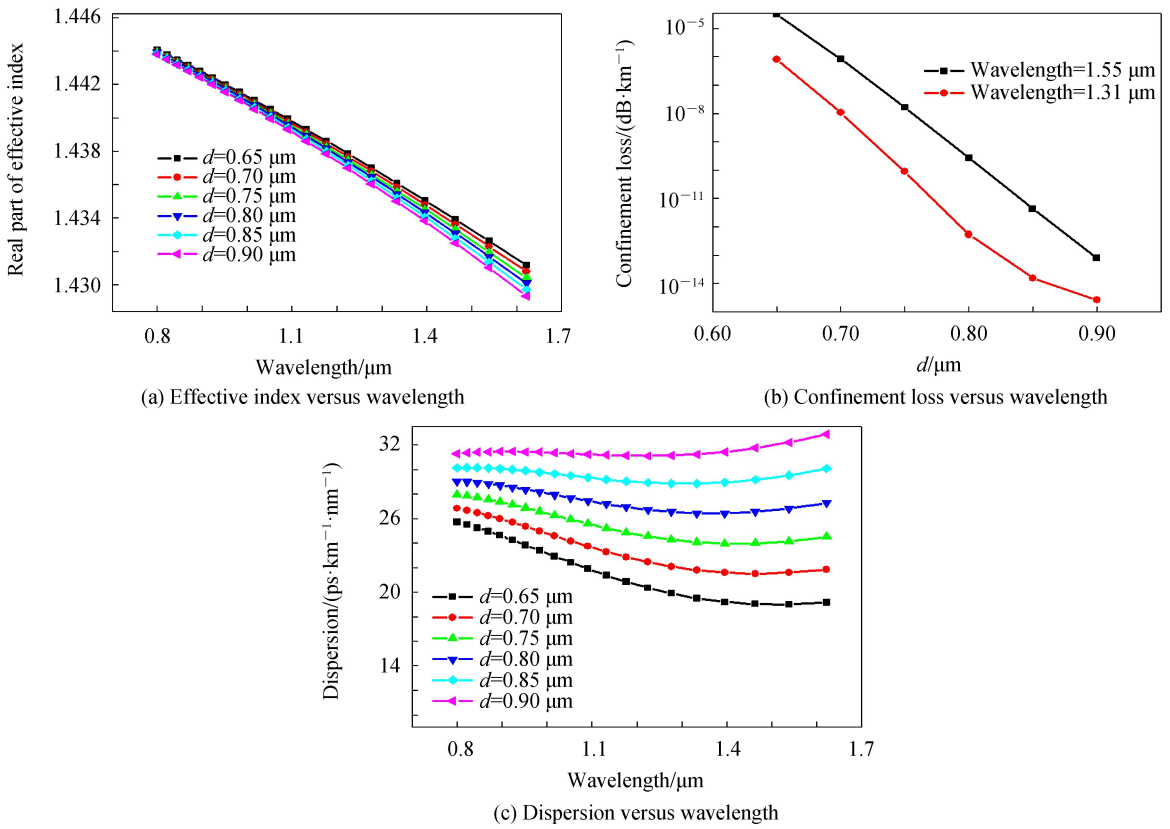
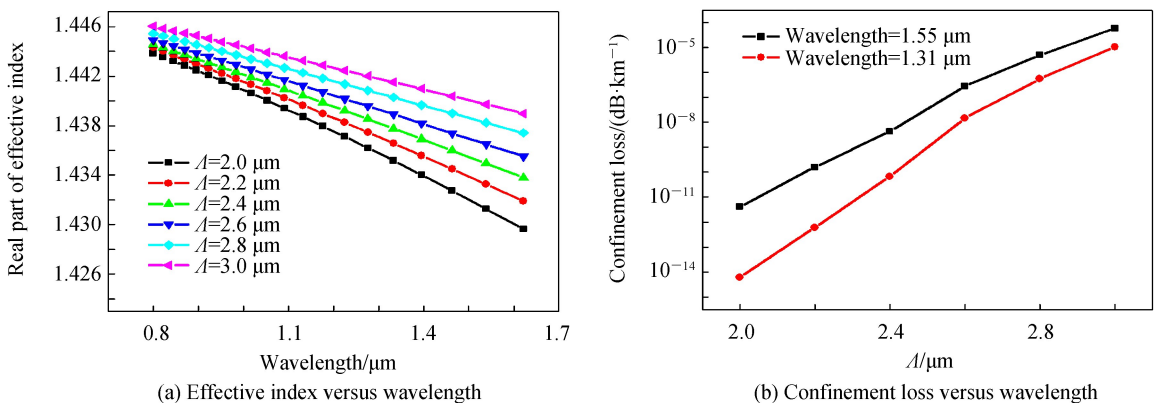


图4 选取 $d_1=0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda=\Lambda_1=2 \mu\text{m}$, 改变包层孔半径 d 对光纤性能的影响

Fig.4 The effect of cladding hole radius d on property of the proposed PCFs when $d_1=0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda=\Lambda_1=2 \mu\text{m}$

2.3 空气孔间隔对光纤性能的影响

选取 $d_1=0.2 \mu\text{m}$, $d=0.85 \mu\text{m}$ 为空气孔优化参数, 研究空气孔间隔对 PCFs 性能的影响. 首先, 固定 $\Lambda_1=2 \mu\text{m}$, 改变大孔间隔 Λ , 从 $2 \mu\text{m}$ 以 $0.2 \mu\text{m}$ 的步长值增加到 $3 \mu\text{m}$ 时, 观察 PCFs 性能的变化. 图 5(a)是有效折射率 n_{eff} 随波长的变化关系曲线, 可以看出, 在 n_{eff} 随着波长增大而逐渐减小的总趋势下, 随着 Λ 的增大, n_{eff} 将明显增加且增加量趋于减小, 即 n_{eff} 对波长的敏感性逐渐降低. 其约束损耗随波长的变化如图 5(b), 同理, 随着 Λ 的逐渐增大, 约束损耗明显增大, 这是因为空气孔间隔的增大致使 PCFs 的光场束缚能力减小, 且波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处的约束损耗高于波长 $1.31 \mu\text{m}$ 处. 图 5(c)是色散随波长的变化情况, 可以看出随着 Λ 的逐渐增加, 在波长扫描范围内 PCFs 的色散整体减小, 且随着波长的增加色散对孔间隔的依赖性减小. 这是由于短波长段模场集中于纤芯, 包层孔间隔影响不会很大, 但长波长模场部分渗透进包层中, 因此包层孔间隔致使色散减小. 考虑到色散的平坦性, 选取大孔间隔 $\Lambda=2.4 \mu\text{m}$ 作为最优参数.



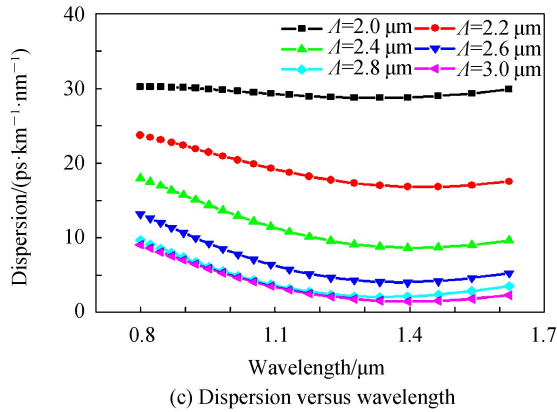


图5 选取 $d=0.85 \mu\text{m}$, $d_1=0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda_1=2 \mu\text{m}$, 改变大孔间隔 Λ 对光纤性能的影响

Fig.5 The effect of hole spacing Λ on property of the proposed PCFs when $d=0.85 \mu\text{m}$, $d_1=0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda_1=2 \mu\text{m}$

选取 $\Lambda=2.4 \mu\text{m}$ 不变, 改变小孔间隔 Λ_1 , 从 $1.4 \mu\text{m}$ 以 $0.1 \mu\text{m}$ 的步长值增加到 $2.2 \mu\text{m}$ 时, 其对 PCFs 性能的影响如图 6. 图 6(a) 是有效折射率 n_{eff} 随波长的变化曲线, 显然, 在 n_{eff} 随着波长增大而逐渐减小的总趋势下, 随着 Λ_1 的增加, 有效折射率 n_{eff} 呈现增大趋势. 其约束损耗随波长的变化关系如图 6(b), 可以看出, 随着 Λ_1 的增大约束损耗逐渐减小, 且波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处的约束损耗大于 $1.31 \mu\text{m}$ 处的约束损耗. 这是由于随着 Λ_1 的增大, 纤芯中材料所占比例增加, 模场被更好地束缚在纤芯. 图 6(c) 给出了色散随波长的变化曲线, 显然, 当 Λ_1 在 $1.4 \mu\text{m}$ 到 $2.2 \mu\text{m}$ 范围内时, 随着 Λ_1 的逐渐增加, 色散值逐渐增加致使色散曲线上移, 且色散曲线对波长的依赖性逐渐减小而趋于平坦, 值得注意的是在 Λ_1 等于 $1.6 \mu\text{m}$ 时 PCFs 呈现两个零色散点. 因此, 可以通过适当调整中心 6 个小空气孔大小和间隔来实现所需的色散特性.

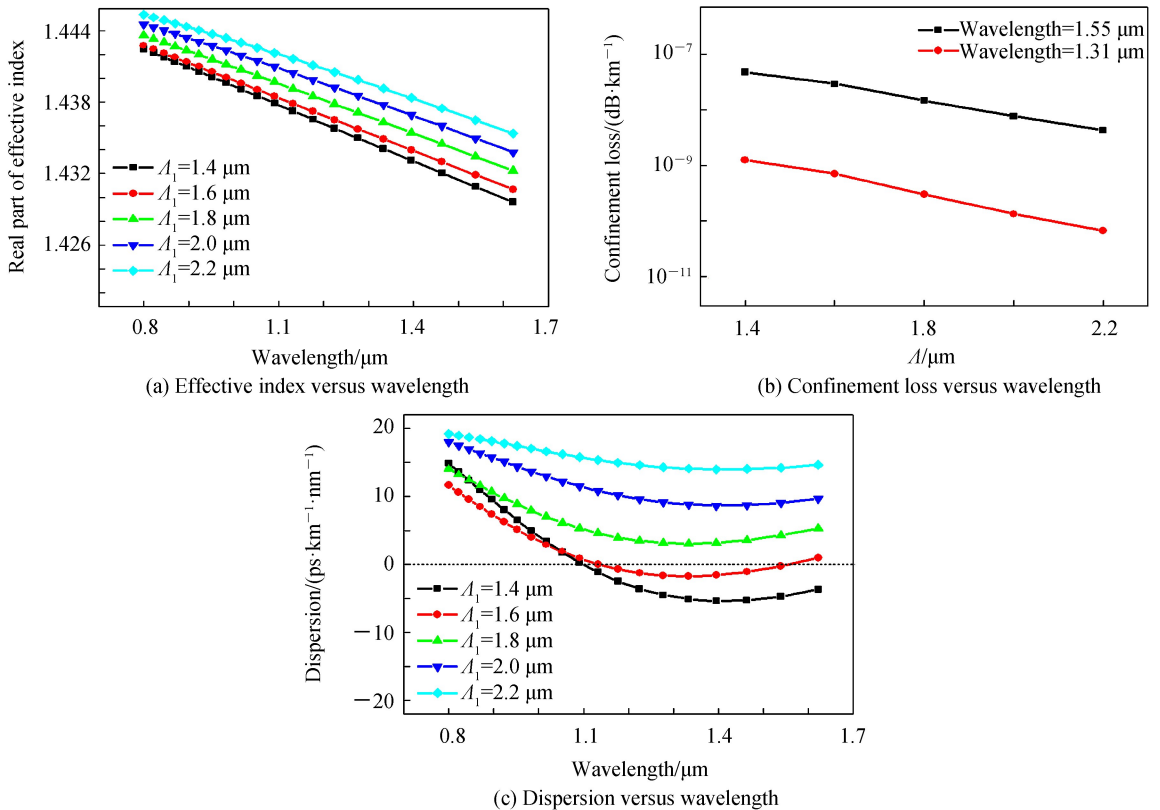


图6 选取 $d=0.85 \mu\text{m}$, $d_1=0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda=2.4 \mu\text{m}$, 改变小孔间隔 Λ_1 对光纤性能的影响

Fig.6 The effect of hole spacing Λ_1 on property of the proposed PCFs when $d=0.85 \mu\text{m}$, $d_1=0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda=2.4 \mu\text{m}$

2.4 最优化 PCFs 结构参数讨论

综合以上分析, 采用 FDTD 结合 PMLs 吸收边界条件对纤芯内层含有 6 个小空气孔的六角点阵圆空气孔 PCFs 参数进行优化设计, 发现纤芯内层 6 个小空气孔对色散和非线性优化起主导作用, 而约束损耗则很

大程度上受限于光纤包层孔直径和孔间隔. 基于损耗、色散和非线性之间的折衷考虑, 选取 PCFs 结构参数为中心小孔间隔 $\Lambda_1 = 1.6 \mu\text{m}$, 小孔半径 $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$, 包层大孔间隔 $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$, 大孔半径 $d = 0.85 \mu\text{m}$ 时, 其约束损耗和色散随波长的变化关系如图 7(a). 可以发现, 在波长扫描范围内其约束损耗小于 $10^{-7} \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, 波长 $1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.31 \mu\text{m}$ 处的约束损耗分别为 $2.93 \times 10^{-8} \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $7.33 \times 10^{-10} \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, 且波长从 $1.05 \mu\text{m}$ 到 $1.65 \mu\text{m}$ 色散值约为 $0 \pm 1.7 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, 呈现双零色散点和较长波长范围的色散平坦特性. 图 7(b) 给出了设计光纤的非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 和有效模场面积 $A_{\text{eff}}(\lambda)$ 随波长的变化关系. 图中明显呈现了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, 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 $1.55 \mu\text{m}$ 附近模场面积为 $24.91 \mu\text{m}^2$, 对应的模场直径为 $5.63 \mu\text{m}$, 在通信光纤的参数设计范围^[31,32], 且相应的非线性系数仅为 $4.88 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 呈现相对较低的非线性特性. 为了更好地阐述 6 个小空气孔对光纤模式特性的影响, 在保持其他光纤结构参数不变的情况下, 仿真了光纤中心无 6 个小空气孔 ($d_1 = 0 \mu\text{m}$) 时的光纤特性. 值得注意的是, 两种情况的限制损耗总体趋势相差不大, 但 $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$ 的色散比 $d_1 = 0 \mu\text{m}$ 低很多, 并出现双零色散点(图 7(a)). 图 7(b) 则表明 $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$ 时可以获得相对更低的非线性系数. 进一步研究表明, 纤芯中小空气孔的引入, 对其模式截止和模场质量也有一定的影响. 模拟结果显示, 内层小空气孔的引入并不影响基模的传输特性, 仅使得高阶模截止波长向长波长移动, 且随着内层小空气孔径的减小, 高阶模截止波长亦移向长波段, 这一结论与相关文献^[33] 阐述一致. 图 8 对比了纤芯存在小孔和无小孔时对基模模场的约束特性, 显然, 小孔的引入使得基模模场被很好地约束在纤芯中传输(图 8(a)). PCFs 最内层 6 个小空气孔的引入对光纤模式特性的影响非常显著, 特别是色散和模场质量. 因此在控制 PCFs 时, 保证内层 6 个小空气孔形状、大小、排列的均匀性是非常重要的.

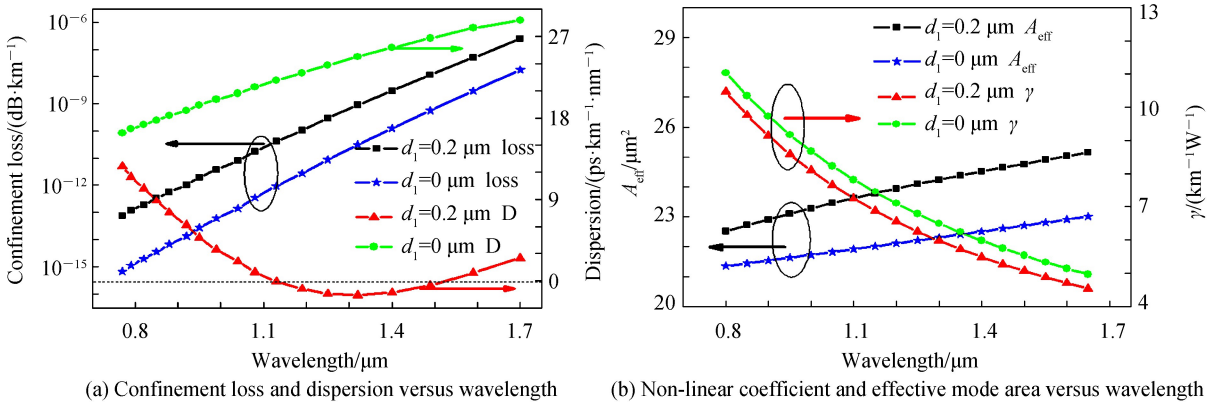


图 7 选取 $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 1.6 \mu\text{m}$, $d = 0.85 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$ ($d_1 = 0 \mu\text{m}$) 时, 光纤性能随波长的变化关系

Fig.7 The characteristic of the proposed PCFs versus wavelength when $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 1.6 \mu\text{m}$, $d = 0.85 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$ ($d_1 = 0 \mu\text{m}$)

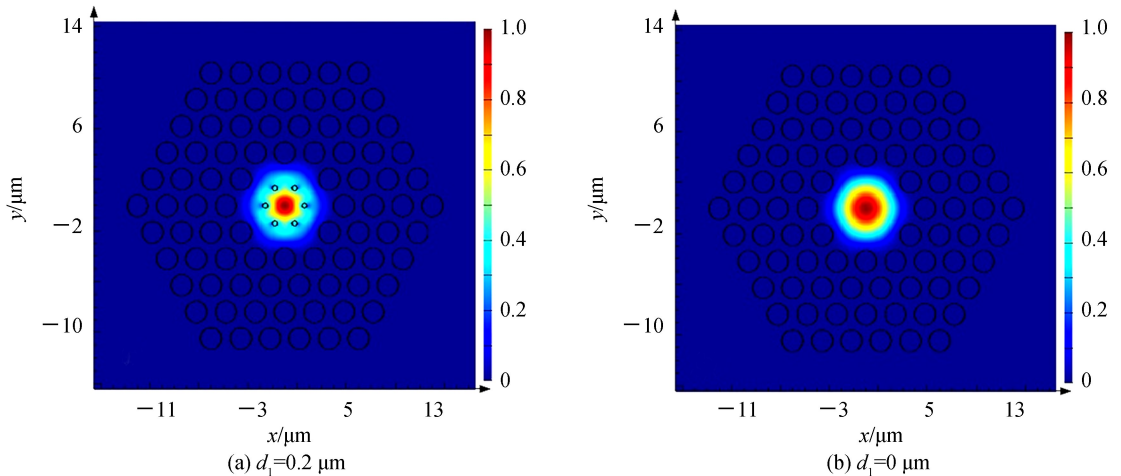


图 8 选取 $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 1.6 \mu\text{m}$, $d = 0.85 \mu\text{m}$ 时, PCFs 基模模场分布对比

Fig.8 When $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 1.6 \mu\text{m}$, $d = 0.85 \mu\text{m}$, the comparison of the fundamental mode distribution for the proposed PCFs

3 结论

以二氧化硅(SiO_2)为基材,设计了一种6环圆空气孔六角点阵PCFs,通过减小纤芯内层6个小空气孔以增加模场面积来降低非线性系数.采用FDTD结合PMLs吸收边界条件,使用Lumerical公司的MODE Solutions软件对该PCFs基模模场有效折射率、约束损耗、色散、有效模场面积和非线性系数等特性与光纤结构参数之间的关系进行了数值分析.研究发现,PCFs的约束损耗很大程度上受限于包层结构设计,而内层6个小空气孔则对色散和非线性的优化起主导作用.当光纤结构参数被优化为中心小孔间隔 $\Delta_1 = 1.6 \mu\text{m}$,小孔半径 $d_1 = 0.2 \mu\text{m}$,包层大孔间隔 $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$,大孔半径 $d = 0.85 \mu\text{m}$ 时,设计的光纤可实现整个波长扫描范围内约束损耗小于 $10^{-7} \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$,波长 $1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.31 \mu\text{m}$ 处约束损耗分别为 $2.93 \times 10^{-8} \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $7.33 \times 10^{-10} \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$,且波长从 $1.05 \mu\text{m}$ 到 $1.65 \mu\text{m}$ 色散值大约为 $0 \pm 1.7 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$,呈现两个零色散点和较长波长范围的色散平坦特性.进一步研究发现,该光纤纤芯内层小空气孔的引入并不影响基模传输特性,而使得其在低损耗通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处非线性系数降为 $4.88 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$,呈现较低的非线性特性.该光纤呈现的超低损耗低非线性平坦色散能力,可用于长距离大容量高速光通信系统中.研究结果可为特定用途的PCFs设计提供一定的理论依据和参考价值.

参考文献

- [1] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(19): 1547-1549.
- [2] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358-362.
- [3] YU Chong-xiu, YUAN Jin-hui, SHEN Xiang-wei. Recent progress of study on photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 332-336.
余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 332-336.
- [4] HE Zhong-jiao. Rectangular-hole photonic crystal fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 583-586.
何忠蛟. 矩形孔光子晶体光纤[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 583-586.
- [5] ZHANG Ya-ni, REN Li-yong, WANG Li-li, *et al.* Progress in the study of high birefringence polarization maintained photonic crystal fibers[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(5): 577-582.
张亚妮, 任立勇, 王丽莉, 等. 高双折射光子晶体保偏光纤研究进展[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(5): 577-582.
- [6] YI Chang-shen, ZHANG Pei-qing, DAI Shi-xun, *et al.* Research progress of large mode area photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(10): 1-11.
易昌申, 张培晴, 戴世勋, 等. 大模场光子晶体光纤研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(10): 1-11.
- [7] LI X Y, LIU P, XU Z L, *et al.* Design of a pentagonal photonic crystal fiber with high birefringence and large flattened negative dispersion[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(24): 7350.
- [8] CHEN D, CHEN H. A novel low-loss terahertz waveguide: polymer tube[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(4): 3762-3767.
- [9] ZHANG Xue-dian, NIE Fu-kun, LU Xing-lian, *et al.* The characteristic analysis of microstructure photonic crystal fibers based on regular quadrilateral lattice[J]. *Optical Instruments*, 2017, **39**(4): 18-24.
张学典, 聂富坤, 逮兴莲, 等. 基于正四边形晶格的微结构光子晶体光纤的特性分析[J]. *光学仪器*, 2017, **39**(4): 18-24.
- [10] SAITOH K, FLOROUS N, KOSHIBA M. Ultra-flattened chromatic dispersion controllability using a defected-core photonic crystal fiber with low confinement losses[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(21): 8365-8371.
- [11] SAITOH K, KOSHIBA M. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(8): 843.
- [12] RAZZAK S M A, RASHID M A, NAMIHIRA Y, *et al.* Group velocity dispersion management of microstructure optical fibers[J]. *International Journal of Physics and Mathematical Sciences*, 2010, **4**(8): 536.
- [13] KRISHNA G D, PRASANNAN G, SUDHEER S K, *et al.* Design of ultra-low loss highly nonlinear dispersion flattened octagonal photonic crystal fibers[J]. *Optics & Photonics Journal*, 2015, **5**(12): 335-343.
- [14] MORSHED M, HASSAN M I, UDDIN M S, *et al.* Microstructure core photonic crystal fiber for gas sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(29): 8637-8643.
- [15] FERRANDO A, SILVESTRE E, ANDRÉS P. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2001, **9**(13): 687-697.
- [16] REEVES W H, KNIGHT J C, RUSSELL P S J. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(14): 609-613.
- [17] RAZZAK S M A, NAMIHIRA Y. Tailoring dispersion and confinement losses of photonic crystal fibers using hybrid cladding[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(13): 1909-1914.

- [18] ZHANG Ya-ni. Design and optimization of low-loss low-nonlinear high negative-dispersion photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(8): 261-267.
张亚妮. 低损耗低非线性高负色散光子晶体光纤的优化设计[J]. *物理学报*, 2012, **61**(8): 261-267.
- [19] YANG T Y, WANG E, JIANG H M, *et al.* High birefringence photonic crystal fiber with high nonlinearity and low confinement loss[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 8329-37.
- [20] AHMED K, MORSHED M. Design and numerical analysis of microstructured-core octagonal photonic crystal fiber for sensing applications[J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2016, **7**(C): 1-6.
- [21] UDDIN S, SINGH D K. A solid silica core based non-linear hybrid PCF with low confinement loss[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(22): 10399-10411.
- [22] DE M, GANGWAR R K, SINGH V K. Designing of highly birefringence, dispersion shifted decagonal photonic crystal fiber with low confinement loss[J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 2017, **26**:15-23.
- [23] XU Q, MIAO R C, ZHANG Y N. High birefringence low-dispersion of nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(15): 2269-2272.
- [24] ZHU Y J, CHEN Y C, HURAY P, *et al.* Application of a 2D-CFDTD algorithm to the analysis of photonic crystal fibers (PCFs)[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2002, **35**(1), 215-219.
- [25] XU Qiang. Applications study and numerical simulation of new configurations in photonic crystal fibers[D]. Xi'an : Shaanxi Normal University, 2014.
许强. 新型光子晶体光纤的数值模拟及应用研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2014.
- [26] KUMAR A, SAINI T S, NAIK K D, *et al.* Large-mode-area single-polarization single-mode photonic crystal fiber: design and analysis[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(19): 4995-5000.
- [27] ADEMGILA H, HAXHAB S. Bending insensitive large mode area photonic crystal fiber[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2011, **122**(21): 1950-1956.
- [28] WU Li-min, SONG Peng, WANG Jing, *et al.* A squeezed lattice high negative dispersion and high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(b05): 183-187.
武丽敏, 宋朋, 王静, 等. 一种高双折射高负平坦色散压缩型光子晶体光纤[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(b05): 183-187.
- [29] OLYAEE S, TAGHIPOUR F. Doped-core octagonal photonic crystal fiber with ultra-flattened nearly zero dispersion and low confinement loss in a wide wavelength range[J]. *Fiber & Integrated Optics*, 2012, **31**(3): 178-185.
- [30] UDDIN S, SINGH D K. A solid silica core based non-linear hybrid PCF with low confinement loss[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(22): 10399-10411.
- [31] ZHANG Wei, ZHANG Lei, CHEN Shi, *et al.* Low loss splicing experiment of high nonlinearity photonic crystal fiber and single mode fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(10):1389-1392.
张巍, 张磊, 陈实, 等. 高非线性光子晶体光纤与单模光纤低损耗熔接实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1389-1392.
- [32] LIN Hong-huan, XU Dang-peng, ZHAO Lei, *et al.* All fiber high-conversion-efficiency supercontinuum source based on photonic crystal fiber with low nonlinear coefficient[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(1):31-34.
林宏奂, 许党朋, 赵磊, 等. 基于低非线性系数光子晶体光纤的全光纤高效超连续谱光源[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(1):31-34.
- [33] FANG Hong, LOU Shu-qin, REN Guo-bin, *et al.* Mode cutoff in photonic crystal fiber with non-uniform holes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(4):493-498.
方宏, 娄淑琴, 任国斌, 等. 非均匀孔径光子晶体光纤的模式截止[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):493-498.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 11647008, 11504416), the International Science & Technology Cooperation and Exchanges Project of Shaanxi (No. 2018KW-016), the Key Sciences and Technology Project of Baoji City (No. 2015CXNL-1-3) and the Key research project of Shaanxi University of Science & Technology (No. 2018WLXY-01-01)

引用格式: XUE Lu, ZHANG Ya-ni, ZHU Yu-yu, *et al.* Optimization Design of Ultra-low Loss Low Nonlinear Flatten Dispersion Photonic Crystal Fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11):1106005

薛璐, 张亚妮, 朱雨雨, 等. 超低损耗低非线性平坦色散光子晶体光纤优化设计[J]. *光子学报*, 2018, **47**(11):1106005