

DOI:10.16136/j.joel.2022.03.0428

八边形空气孔环绕-双模大模场面积多芯光纤

赵丽娟^{1,2,3}, 姜焕秋¹, 王贺晴¹, 徐志钊^{1*}

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003; 3. 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:为实现多芯光纤的严格双模传输和大模场面积,将多芯光纤引入空气孔并排列成八边形结构,利用COMSOL软件建立该光纤的电磁场模型,再采用有限元方法系统地分析相对孔径大小、纤芯与包层折射率差和纤芯之间的间距等3个结构参数对光纤模式特性及有效模场面积的影响,最后讨论了不同弯曲半径下光纤的弯曲损耗。根据分析结果并结合归一化频率常数找到合适的结构参数,此时光纤的基模模场面积在平直状态下可达到 $1730\ \mu\text{m}^2$,当弯曲半径大于 $0.45\ \text{m}$ 时,弯曲损耗小于 $10^{-3}\ \text{dB/m}$,基模模场面积仍可达到 $1685\ \mu\text{m}^2$ 。该光纤保持少模传输并实现了大模场面积和低弯曲损耗,在大容量、高功率光纤传输系统中具有广阔的应用前景。

关键词:多芯光纤; 双模; 大模场面积; 弯曲损耗

中图分类号: TN253 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2022)03-0312-09

Dual-mode large mode area multi-core fiber with octagonal distribution of air holes

ZHAO Lijuan^{1,2,3}, JIANG Huanqiu¹, WANG Heqing¹, XU Zhiniu^{1*}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: In order to realize the strict dual-mode transmission and large mode field area of the multi-core optical fiber, the multi-core fiber is introduced into the air hole and designed into an octagonal structure. First, the electromagnetic field model of the fiber is established by using COMSOL software, and then the finite element method is used to systematically analyze the influence of the three structural parameters of the relative aperture size, the core-clad refractive index difference and the core spacing on the fiber mode characteristics and the effective mode field area. The bending loss of the optical fiber is discussed under different bending radii in the end. According to the analysis results and combined with the normalized frequency constant to find suitable structural parameters, the fundamental mode field area of the fiber can reach $1730\ \mu\text{m}^2$ in the flat state. When the bending radius is greater than $0.45\ \text{m}$, the bending loss is less than $10^{-3}\ \text{dB/m}$, the area of the fundamental mode field can still reach $1685\ \mu\text{m}^2$ at this time. This optical fiber maintains few-mode transmission and achieves a large mode field area and low bending loss, so it has broad application prospects in large-capacity and high-power optical fiber transmission systems.

Key words: multi-core fiber; dual-mode; large mode field area; bending loss

* E-mail: wzcnjxx@163.com

收稿日期: 2021-06-19 修订日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(62171185, 61775057)、河北省自然科学基金(E2020502010, E2019502177)、河北省省级科技计划(SZX2020034)和中央高校基本科研业务费专项资金(2021MS072)资助项目

1 引言

随着光通信系统日益向超高速大容量发展,作为传输介质的光纤受到损耗和非线性效应等的影响,传输特性受到巨大挑战,将给下一代光通信系统带来极大的影响^[1]。增大光纤的模场面积可降低光纤中光功率密度,有效地减小非线性导致的不利影响^[2],但随着模场面积的增大光纤中模式数量也相应增加,使得传输损耗增加。因此在扩大光纤传输容量的同时减少模式数目和降低损耗是实现大功率传输急需解决的问题。

研究人员提出通过各种新型光纤来解决上述问题。陈艳等^[3]提出一种可支持 LP_{01} 模和 HE_{31} 模传输的微结构光纤,该光纤包层由四组空气孔群组成,基模有效模场面积为 $700 \mu\text{m}^2$,且光纤弯曲时模场面积会减小。CHENG 等^[4]提出一种双模光子晶体光纤,该光纤抑制基模 HE_{11} 模,支持 TM_{01} 模、 HE_{21} 模和 TE_{01} 模传输,但没有研究光纤的模场面积。岳震等^[5]提出一种方形结构的带隙光纤,该光纤纤芯由中心缺少高折射率介质柱组成,可支持 LP_{01} 模和 LP_{11} 模传输,2 种模式的泄露损耗均低于 10^{-4} dB/m,在平直状态下基模模场面积约为 $1320 \mu\text{m}^2$,模场面积有待提高。与以上结构类似,多芯光纤的设计也比较灵活,可通过调整光纤结构参数实现少模传输^[6],SASAKI 等^[7]提出了 12 芯异质光纤结构,该光纤串扰和差分模式延迟较低,支持 LP_{01} 模和 LP_{11} 模传输。而且多芯光纤具有超模特性^[8],超模通常具有大模场面积,有利于实现大容量传输。郑斯文等^[9,10]提出多种带有空气孔的强耦合型 19 芯光纤结构,光纤中均支持 HE_{11} 模和 HE_{21} 模传输,优化后在弯曲半径大于 0.5 m 时,基模有效模场面积约为 $1403 \mu\text{m}^2$,弯曲损耗小于 10^{-3} dB/m,但通过结构优化进一步增大模场面积的同时也存在弯曲损耗增大的问题。很多已有研究为大模场面积少模光纤的设计和分分析提供了参考^[11,12],但如何保持少模传输并实现模场面积和弯曲损耗的平衡仍需要进一步探索。

本文提出了一种八边形空气孔环绕结构的多芯光纤,空气孔的引入使 TE_{01} 模和 TM_{01} 模截止,实现双模传输的同时增大了模场面积。文中从光纤的模式特性分析出发,探讨了光纤结构的参数变化对模式数和有效模场面积的影响,找到了最佳光纤结构。在此基础上,进一步讨论了光纤在一定弯曲半径内的有效模场面积和弯曲损耗。与其他光纤相比,该光纤在减小非线性效应(增大有效模场面积)和降低损耗方面有所突破,具有良好的传输特性,因此具有更广阔的应用前景^[13]。

2 光纤结构及模式特性

2.1 光纤结构

二维光纤横截面结构示意图如图 1 所示(不含护套),纤芯呈八边形环绕方式排列,除了中间纤芯一共有 3 层,第 2 层纤芯的外侧 2 个芯替换为空气孔,最外层全部用空气孔进行环绕,其余为纯石英结构的包层。包层半径和空气孔半径分别用 r_{cl} 和 r_{co} 表示,且 $r_{cl}=62.5 \mu\text{m}$ 。纤芯间距用 Δ 表示,则相对孔径大小为 $f=2r_{co}/\Delta$,包层折射率 $n_{cl}=1.444$,纤芯折射率用 n_{co} 表示,纤芯与包层折射率差为 $\Delta n=n_{co}-n_{cl}$ 。该光纤通过优化结构参数可以实现严格的双模大模场面积及低弯曲损耗工作。

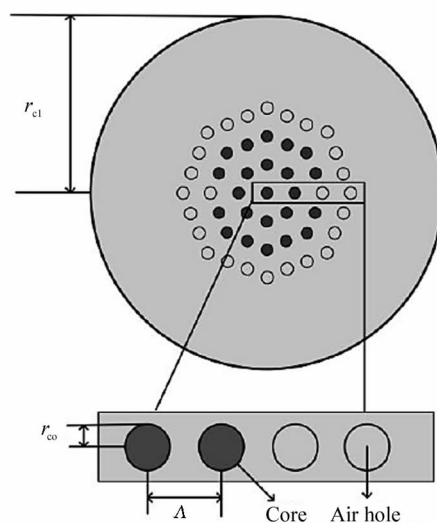


图1 光纤横截面结构示意图

Fig. 1 Cross section schematic of fiber structure

2.2 光纤模式特性

在 COMSOL Multiphysics 软件中设置 $\Delta=10 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\Delta n=0.0025$, $\lambda=1550 \text{ nm}$ 进而建立该光纤的电磁场模型,使用有限元方法计算光纤各模式的有效折射率 n_{eff} ,包括有空气孔结构和无空气孔结构这 2 种状态。其中有空气孔结构光纤的基模 HE_{11} 模的有效折射率 $n_{eff1}=1.444303$,2 个简并模式的有效折射率差 $B=|n_{eff1_y}-n_{eff1_x}|=|1.444303743-1.444303703|=4\times 10^{-8}$,双折射数值很小,可以忽略不计。二阶模 HE_{21} 模的有效折射率 $n_{eff2}=1.444092$,2 个简并模式的有效折射率差 $B=|n_{eff2_y}-n_{eff2_x}|=|1.444092644-1.444091699|=9.45\times 10^{-7}$,双折射数值也很小,可以忽略。二阶模 TE_{01} 模和 TM_{01} 模的有效折射率 $n_{eff3}=1.443966$ 。根据光纤中模式传输的条件(满足 $n_{cl}<n_{eff}<n_{co}$), $n_{eff3}<n_{cl}$ 说明 TE_{01} 模和 TM_{01} 模被截止,此时光纤中

可传导简并的 HE_{11} 模和简并的 HE_{21} 模共 4 个模式, 图 2 给出了引入空气孔后 4 个模式的模场分布和二维电矢量分布。而无空气孔结构光纤基模 HE_{11} 模的有效折射率 $n_{\text{eff}1} = 1.444\ 316$, 4 个二阶模(2 个 HE_{21} 模, TE_{01} 模和 TM_{01} 模)的有效折射率 $n_{\text{eff}2} = 1.444\ 175$, $n_{\text{eff}2} > n_{\text{cl}}$ 说明此时 6 个模式均可在光纤中

传导, 无空气孔时 6 个模式的模场分布和二维电矢量分布如图 3 所示。

比较图 2 和图 3 发现, 空气孔的存在打开了高阶模的泄露通道, 高阶模的泄露损耗增加使得光纤实现严格的双模传输(简并的 HE_{11} 模和简并的 HE_{21} 模)。为了研究光纤的波长依赖特性, 保持 $\Delta =$

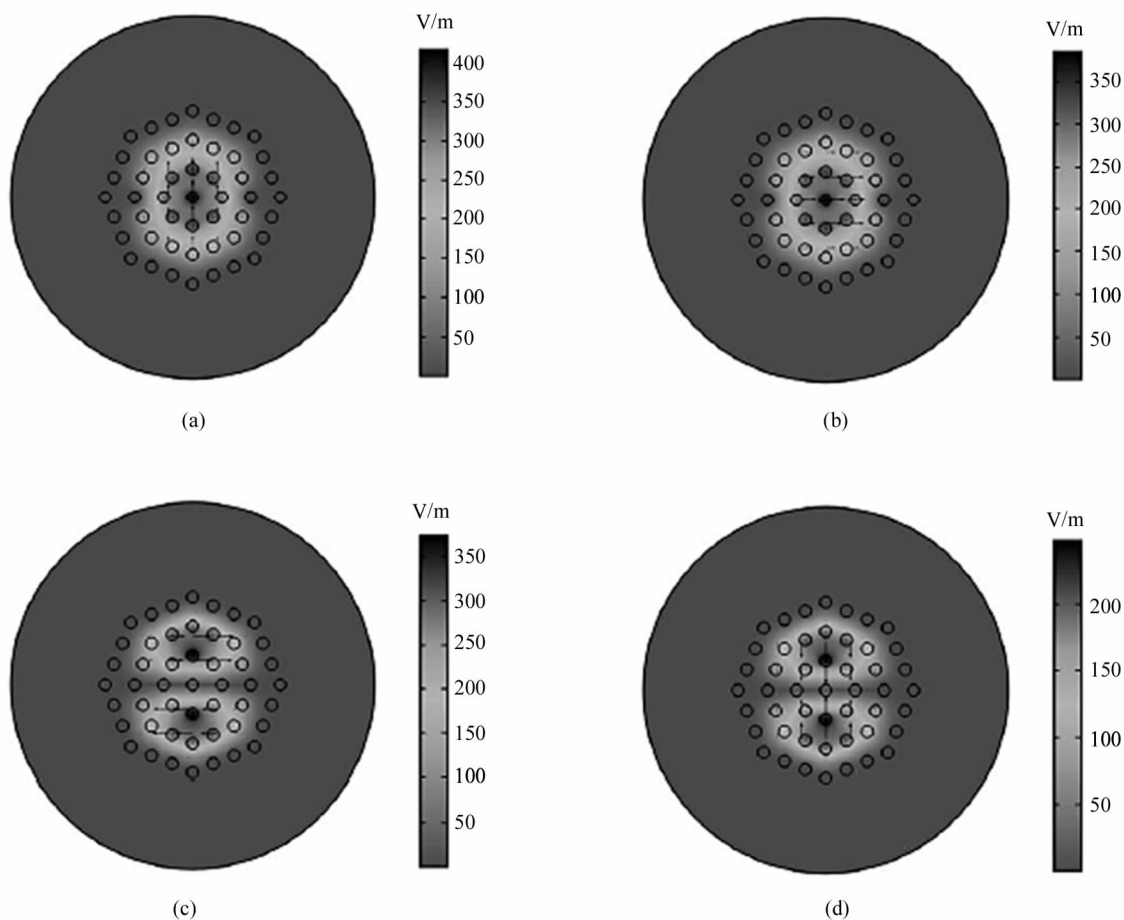
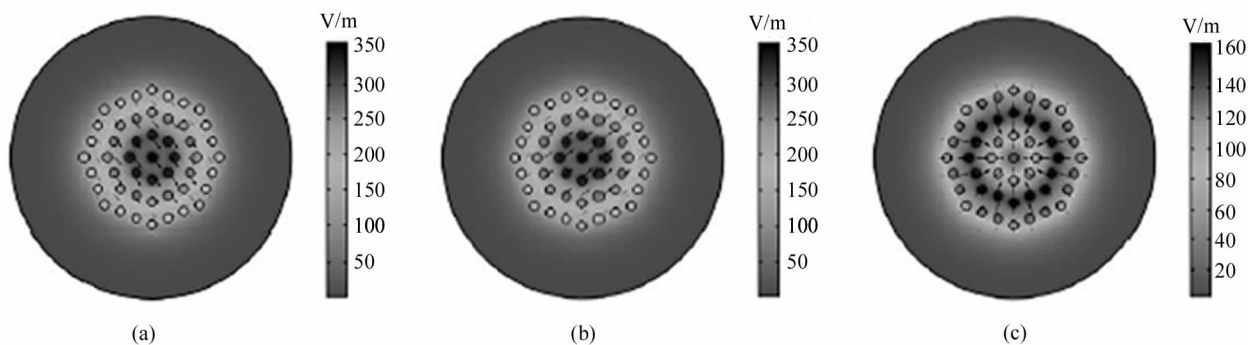


图 2 引入空气孔后 4 个模式的模场分布和二维电矢量分布:

(a) HE_{11-y} ; (b) HE_{11-x} ; (c) HE_{21-x} ; (d) HE_{21-y}

Fig. 2 Mode field distribution and two-dimensional electric field vector distribution of 4 modes with air holes:

(a) HE_{11-y} ; (b) HE_{11-x} ; (c) HE_{21-x} ; (d) HE_{21-y}



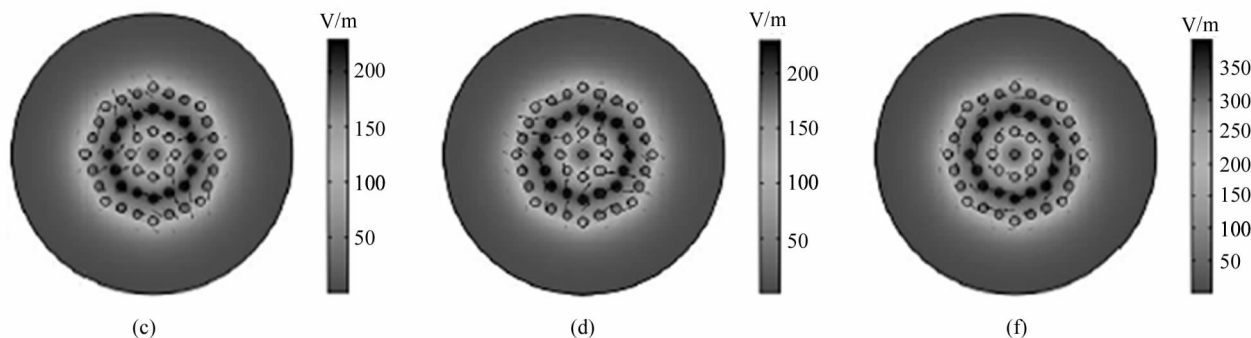


图3 无空气孔时6个模式的模场分布和二维电矢量分布:

(a) HE_{11-y} ; (b) HE_{11-x} ; (c) TM_{01} ; (d) HE_{21-y} ; (e) HE_{21-x} ; (f) TE_{01}

Fig. 3 Mode field distribution and two-dimensional electric field vector distribution of 6 modes without air holes:

(a) HE_{11-y} ; (b) HE_{11-x} ; (c) TM_{01} ; (d) HE_{21-y} ; (e) HE_{21-x} ; (f) TE_{01}

$10 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\Delta n=0.0025$, 计算了在 C+L 波段各模式的有效折射率 n_{eff} , 有效折射率随波长的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 随着波长的增加, 各模式 n_{eff} 都逐渐减小, 但仍能保持严格双模传输。

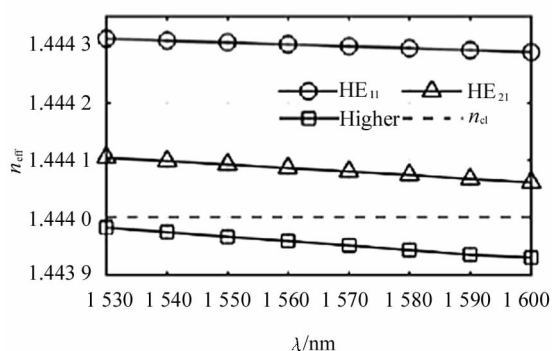
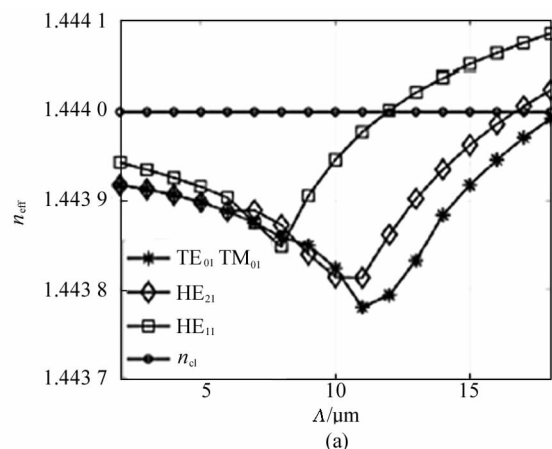
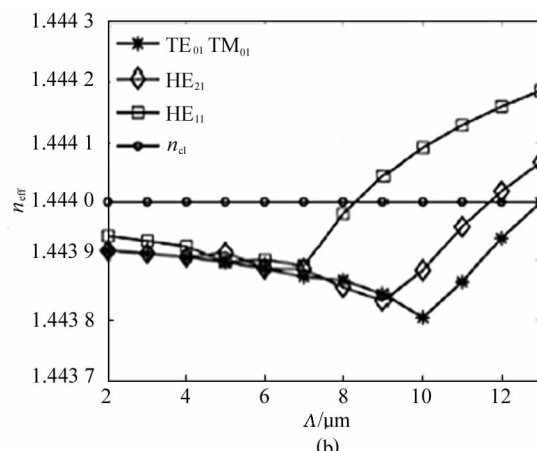


图4 有效折射率随波长的变化曲线

Fig. 4 Relationship between effective refractive index and wavelength



(a)



(b)

3 结构参数对光纤特性的影响

保持双模传输特性分析光纤结构参数与模场面积的关系时, 要考虑的结构参数包括 3 个: 光纤纤芯间距 Δ 、相对孔径大小 f ($f=2r_{\text{co}}/\Delta$) 及芯包折射率差 Δn , 当纤芯结构发生变化时, 纤芯之间的耦合作用会对模场面积产生影响。其中, 模场面积 A_{eff} 的计算方法与文献[9]相同。

3.1 相对孔径大小的影响

设置 $\Delta n=0.0025$, $\lambda=1550 \text{ nm}$, 针对不同的 f 值 ($f=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$) 得到随纤芯间距 Δ 对有效折射率 n_{eff} 的影响如图 5 所示。由 2.2 节可知, HE_{11} 模和 HE_{21} 模的双折射可以忽略不计, 故图中, HE_{11} 模和 HE_{21} 模均只用一条曲线表示。当 f 值一定的时候, 若要实现双模传输, 对于 Δ 值有一定的限制, 在 Δ 值的合理范围内, HE_{11} 模和 HE_{21} 模的有效折射率逐渐增大。在能够实现双模传输的前提

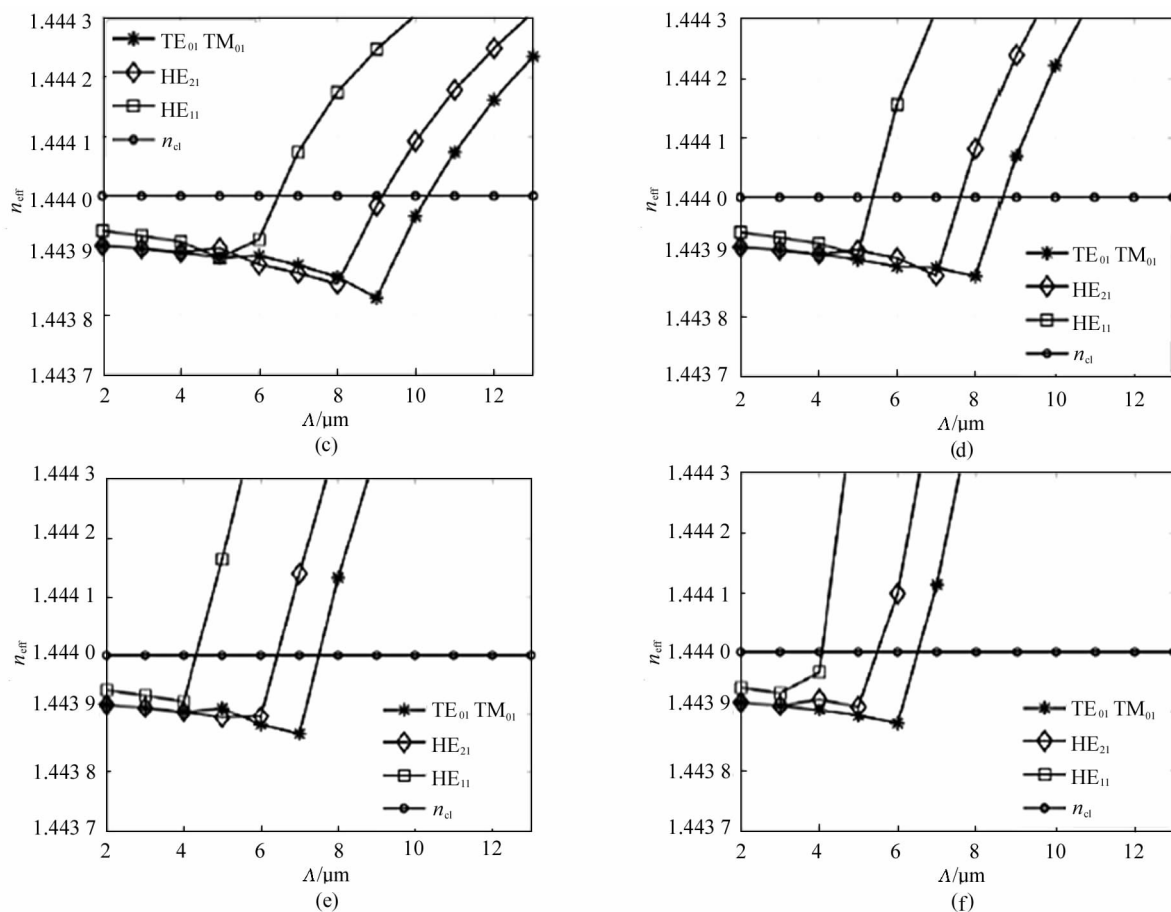


图5 纤芯距离 Δ 对有效折射率 n_{eff} 的影响:(a)一(f)分别为表示相对孔径大小

$f=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 时有效折射率 n_{eff} 随纤芯距离 Δ 的变化情况

Fig. 5 The impact on the effective refractive index of fiber core: (a)一(f) represent the change of effective refractive index with the distance of fiber core when the relative aperture size $f=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$

下, f 值越大所需要的纤芯间距就越小, 相应的纤芯半径也会减小, 但 Δ 值的变化范围保持在 $1.2 \mu\text{m}$ 左右, 近乎是一个恒定数值。

为了更清楚地了解不同大小的相对孔径对双模传输的影响, 将不同 f 值(相对孔径大小)对应的最佳 Δ (纤芯距离)值的关系整理如表1所示。

表1 不同相对孔径大小 f 对应的最佳纤芯间距 Δ 值

Tab. 1 The optimal core spacing values corresponding to different relative aperture sizes

f	$f=0.2$	$f=0.3$	$f=0.4$	$f=0.5$	$f=0.6$	$f=0.7$
The range of $\Delta/\mu\text{m}$	$17.2 \leq \Delta \leq 18.4$	$11.8 \leq \Delta \leq 13$	$9.0 \leq \Delta \leq 10.2$	$7.8 \leq \Delta \leq 8.8$	$6.2 \leq \Delta \leq 7.3$	$5.2 \leq \Delta \leq 6.3$

3.2 纤芯间距的影响

设置 $\Delta n=0.0025$, $\lambda=1550 \text{ nm}$, 利用 COMSOL 软件在不同 f 值下对 Δ 进行有效范围内的扫描, 研究不同相对孔径大小 f 下基模模场面积 A_{eff} 随纤芯间距 Δ 的变化曲线, 如图6所示。在双模传输的条件下, 不同的 f 值对应基模的模场面积 A_{eff} 随着纤芯间距 Δ 增大而增大, 且 f 的值越小对应的基模的模场面积越大。这是因为 f 变小导致纤芯尺寸变小,

进而导致纤芯的等效折射率变小, 光功率更多地分布包层内, 所以模场面积会增大, 而在 f 一定的情况下, Δ 值增加导致等效尺寸增大, 进而 A_{eff} 增大。结合光纤包层半径 $r_{\text{cl}}=62.5 \mu\text{m}$ 及包层不可以过薄的实际情况, 纤芯间距 Δ 值不易过大($f \geq 0.3$)。

为了更明显地观察有效折射率随纤芯距的变化情况, 精确取值 $r_{\text{co}}=2 \mu\text{m}$, $\Delta n=0.0025$, $\lambda=1550 \text{ nm}$, 各个模式有效折射率 n_{eff} 随纤芯间距 Δ 的影响如

图 7(a)所示。简并的一阶模 HE_{11} 模和简并的二阶模 HE_{21} 模均用一条曲线表示, Higher 表示最接近截止的 TE_{01} 模和 TM_{01} 模的有效折射率。随着纤芯间距 Δ 的增大, HE_{11} 模的有效折射率逐渐减小, HE_{21} 模的有效折射率基本保持不变, TE_{01} 模和 TM_{01} 模的折射率则逐渐增加。当 $\Delta > 11.5 \mu\text{m}$ 时, 高阶模式满足传输条件, 此时不能严格地实现双模传输。

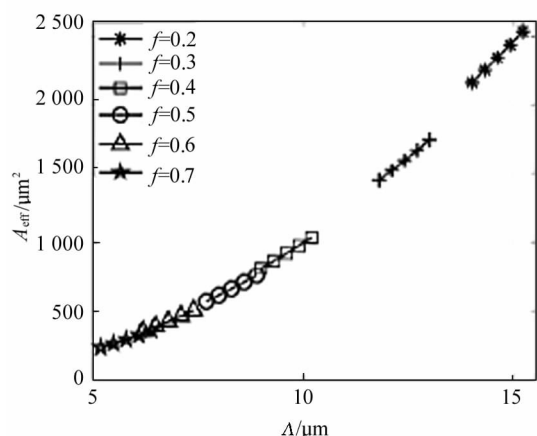


图 6 不同相对孔径大小 f 下基模模场面积 A_{eff} 随纤芯间距 Δ 的变化曲线

Fig. 6 The variation curve of effective area of fundamental mode with core spacing under different relative aperture sizes

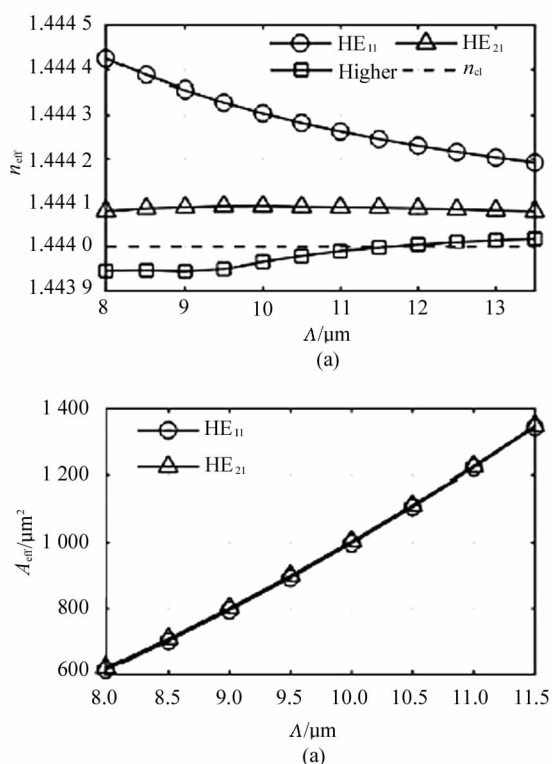


图 7 纤芯距的影响: (a) 有效折射率; (b) 模场面积
Fig. 7 Influence of fiber core distance:
(a) Effective refractive index; (b) Mode area

HE_{11} 模和 HE_{21} 模的模场面积 A_{eff} 随纤芯间距 Δ 的变化如图 7(b)所示。纤芯间距不变时, HE_{21} 模的模场面积略大于 HE_{11} 模; 随着纤芯间距 Δ 的增大, HE_{11} 模和 HE_{21} 模的 A_{eff} 都逐渐增大。当 Δ 值从 $8 \mu\text{m}$ 增加到 $11.5 \mu\text{m}$ 时, HE_{11} 模的 A_{eff} 从 $613 \mu\text{m}^2$ 增加到 $1343 \mu\text{m}^2$, HE_{21} 模的 A_{eff} 从 $620 \mu\text{m}^2$ 增加到 $1347 \mu\text{m}^2$ 。由图 7 可知, 当其他参数不变时, 适当地增大 Δ 值能够实现双模大模场面积传输。

3.3 芯包折射率差的影响

设置 $\Delta = 10 \mu\text{m}$, $f = 0.4$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 各个模式有效折射率 n_{eff} 及各个模式的模场面积 A_{eff} 随芯包折射率差 Δn 的影响如图 8 所示。光功率随着芯包折射率差 Δn 的增大更多地分布在纤芯中, 导致各模式的有效折射率随着 Δn 的增大而增加。由图 8(a)可以得到单模传输的条件为: $0.0019 < \Delta n < 0.0021$, 严格双模传输的条件为: $0.0021 < \Delta n < 0.0026$ 。由图 8(b)可以得到, HE_{21} 模的 A_{eff} 始终大于 HE_{11} 模, 且 Δn 在双模传输范围内时, 即 Δn 由 0.0021 增大到 0.0026 时, HE_{11} 模的有效模场面积 A_{eff} 减小约为 $2.7 \mu\text{m}^2$, HE_{21} 模的有效模场面积 A_{eff} 减小约为 $4.1 \mu\text{m}^2$ 。由图 8 可知, 增大芯包折射率差对模场面积的影响较小, 其他参数不变时, 为实现更好的双模传输特性可适当增大芯包折射率差。

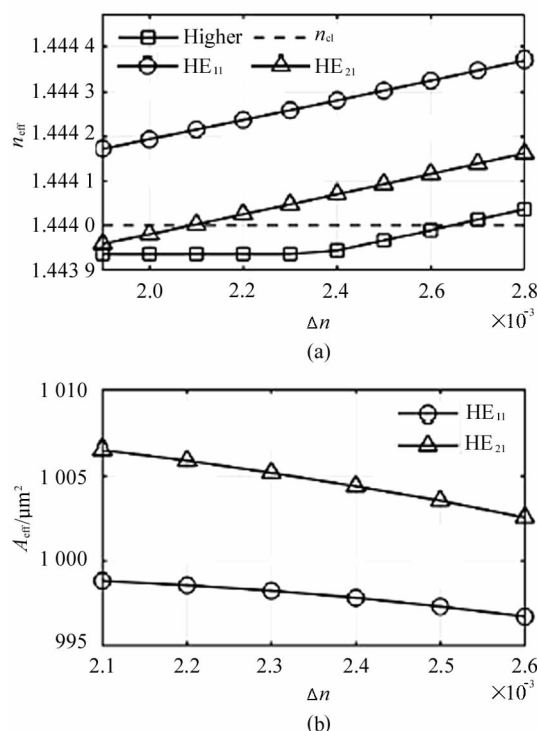


图 8 芯包折射率差的影响: (a) 有效折射率; (b) 模场面积
Fig. 8 Influence of refractive index difference between core and cladding: (a) Effective refractive index; (b) Mode area

4 弯曲特性

由于光纤的折射率会随着弯曲程度的改变而改变,分析光纤的弯曲特性可更好地将多芯光纤与实际应用相结合。本文将弯曲光纤等效为折射率随弯曲半径变化的平直光纤,进而分析所设计光纤的弯曲特性,设横向向右方向为 x 轴正向,沿纵向向上方向为 y 轴正向,当光纤沿 x 轴正向向 y 轴正向弯曲时,光纤横截面等效折射率^[14,15]分布可表示为:

$$n(x, y) = n_0(x, y) \sqrt{1 + 2x/R_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中, $n_0(x, y)$ 为光纤初始折射率, $n(x, y)$ 为光纤弯曲后的等效折射率, R_{eff} 为引入校正因子后的弯曲半径, $R_{\text{eff}} = 1.28R$, R 为光纤弯曲半径。

根据第3节的分析可知,纤芯间距增大,减小相对孔径大小和芯包折射率差有助于增大各模式的模场面积,且 Δn 对有效模场面积的影响较大, Δn 对有效模场面积的影响相对较小。为了计算最大的有效模场面积,设置结构参数 $f = 0.2, 0.3, 0.4$, 在双模传输条件下,每个值又分别对应 $\Delta n = 0.0015, 0.0020, 0.0025, 0.0030$ 进行仿真计算,在去掉一些不合理参数设置后,最后得到特定值的相对孔径大小 f 和芯包折射率差 Δn 下模场面积随纤芯间距变化规律,如图9所示。图9中,当 $\Delta = 17.5 \mu\text{m}$, $f = 0.2$, $\Delta n = 0.0025$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时可以得到最大有效模场面积 $A_{\text{eff}} = 3819 \mu\text{m}^2$ 。

在实际设计光纤时除了要考虑有效模场面积最大,还要考虑无量纲归一化频率 V , V 较小则光功率更多地分布在包层内, V 太大则会无法抑制高阶模,其表达式为:

$$V = \frac{2\pi r_{\text{co}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2}, \quad (2)$$

所以需要仔细调整结构参数,避免 Δn 和 r_{co} 的取值过小,从而导致更多的光功率扩展到光纤包层。最终得到当 $V = 0.68$, 即在双模传输状态下 $\Delta = 13 \mu\text{m}$, $f = 0.34$, $\Delta n = 0.002$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时取得理想有效模场面积,在未弯曲情况下基模模场面积为 $1730 \mu\text{m}^2$, 大于文献[9—11]中给出的基模模场面积,故用这组参数对光纤的弯曲特性进行分析。在光纤包层外侧采用完美匹配层,其使用高折射率材料(折射率为 1.5)时,根据式(3)计算弯曲特性,如图10所示。不同弯曲半径下基模弯曲损耗^[16]随弯曲半径的变化曲线如图10(a)所示,模场面积随弯曲半径的变化曲线如图10(b)所示。折射率表示为:

$$\alpha = -\frac{20\pi}{\ln 10} \text{Im}(\beta) \approx -8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (3)$$

式中, $\beta = (2\pi/\lambda) \cdot n_{\text{eff}}$ 为模式传播常数。

由图10可知,随着弯曲半径的增大,基模的弯曲损耗逐渐减小,模场面积则逐渐增大。当弯曲半径 $R = 0.2 \text{ m}$ 时,基模2个偏振态的弯曲损耗分别为 $3.12 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$ 和 $2.93 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$, 模场面积分别为 $1552 \mu\text{m}^2$ 和 $1554 \mu\text{m}^2$ 。随着弯曲半径的增加,基模的弯曲损耗减小,当弯曲半径 $R = 0.45 \text{ m}$ 时弯曲损耗小于 10^{-3} dB/m , 此时模场面积增加到 $1685 \mu\text{m}^2$ 。表2中总结了本文提出的光纤与现有文献中的双模大模场面积多芯光纤弯曲特性比较。与已提出的结构相比,本文设计的多芯光纤弯曲半径接近最大值,弯曲损耗已达到 10^{-3} 数量级的较低水平,且有效模场面积实现了最大值,在(相似甚至更小的弯曲半径时)不增加弯曲损耗的情况下实现了模场面积的增大,改进了光纤性能。

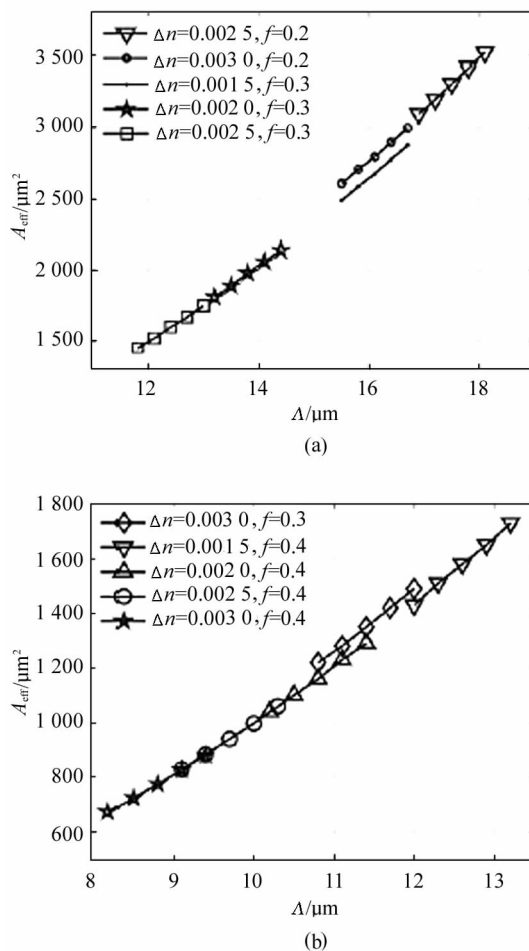


图9 特定值的相对孔径大小 f 和芯包折射率差 Δn 下模场面积随纤芯间距变化规律

Fig. 9 The mode field area changes with the core spacing at a specific value of the relative aperture size and the core-wrap refractive index difference

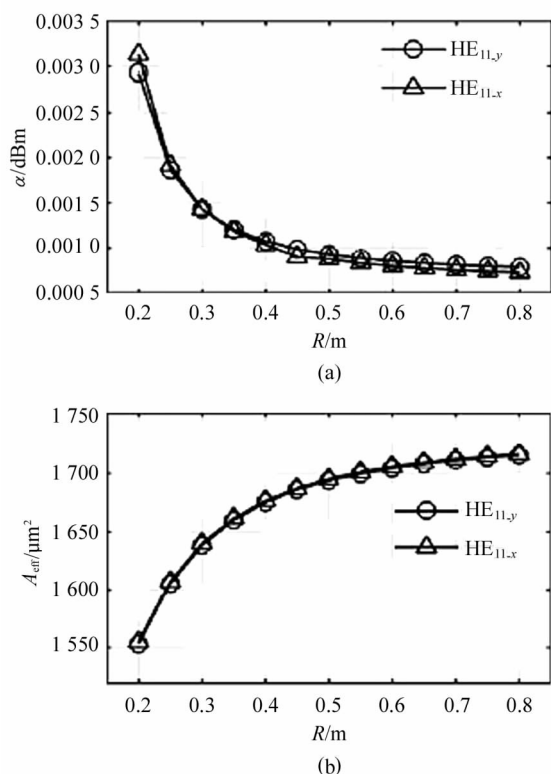


图 10 弯曲特性:(a) 基模弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线;(b) 基模模场面积随弯曲半径的变化曲线

Fig. 10 Bending characteristics: (a) Relationship between fundamental mode bending loss and bending radius; (b) Relationship between fundamental mode field area and bending radius

表 2 本文提出的光纤与现有文献中双模大模场面积多芯光纤弯曲特性比较

Tab. 2 Comparison of the bending characteristics of the optical fiber proposed in this paper and the dual-mode large-mode area multi-core fiber in published papers

Literature	Bending radius/m	Bending loss of fundamental mode /dB · m ⁻¹	Area of fundamental mode field/ μm^2
Ref. [9]	>0.38	<0.1	≈1 047
Ref. [10]	>0.34	<1.0	≈1 331
Ref. [11]	>0.5	<10 ⁻³	≈1 403.5
Ref. [12]	>0.47	<10 ⁻⁴	≈1 557.91
In this article	>0.45	<10 ⁻³	1 685—1 730(≈1700)

5 结 论

设计的八边形空气孔环绕结构光纤可以通过调整结构参数实现对单模传输和双模传输的控制。在严格双模传输的条件下,纤芯间距增大时各模式的模场面积增加,减小相对孔径大小和芯包折射率差也有助于增大各模式的模场面积,但会导致有效折

射率的减小。结合归一化频率与光功率的变化关系,最后选择 $\Delta=13\mu m$, $f=0.34$, $\Delta n=0.002$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 为合适的参数,在此基础上讨论了基模弯曲特性。在双模传输平直状态下基模模场面积可达到 $1730\mu m^2$,而在双模传输弯曲状态下,弯曲半径增大时,基模弯曲损耗减小,同时模场面积增大,在一定的弯曲半径(大于 0.45 m)下可同时实现较小的弯曲损耗(小于 10^{-3} dB/m)和大模场面积($1685\mu m^2$)。该多芯光纤具有双模大模场面积特性,可实现光网络的大容量传输,也可用于放大器和激光器光器件的制作。

参考文献:

[1] PEI L, WANG J S, ZHENG J J, et al. Research on specialty and application of space-division multiplexing fiber[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 42-53.
裴丽, 王建帅, 郑晶晶, 等. 空分复用光纤的特性及其应用研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 42-53.

[2] LIU Y H, LI J Y. Mode properties and progress of multi-core fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 53-60.
刘业辉, 李进延. 多芯光纤激光器选模特性及其研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 53-60.

[3] CHEN Y, ZHOU G Y, XIA C M, et al. Analysis of a novel dual-mode large-mode-area micro-structured fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 242-247.
陈艳, 周桂耀, 夏长明, 等. 具有双模特性的大模场面积微结构光纤的设计[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 242-247.

[4] CHENG C, ZHOU G Y, YAN C, et al. Suppression of the fundamental mode in a dual-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Communications, 2015, 336: 235-239.

[5] YUE Z, ZHENG H B, CHEN M Y, et al. Study on low bending loss and large mode area bandgap fiber based on more coupling[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2017, 28(8): 843-848.
岳震, 郑虹波, 陈明阳, 等. 基于模式耦合的低弯曲损耗大模场带隙光纤研究[J]. 光电子 · 激光, 2017, 28(8): 843-848.

[6] SAITOH K, MATSUO S. Multicore fiber technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 55-66.

[7] SASAKI Y, AMMA Y, TAKENAGA K, et al. Few-mode multicore fiber with 36 spatial modes (three modes (LP01, LP11a, LP11b). 12 cores)[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(5): 964-970.

[8] XIA C, BAI N, OZDUR I, et al. Supermodes for optical transmission.[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16653-

- 16664.
- [9] ZHENG S, REN G, ZHEN L, et al. A novel four-air-hole multicore dual-mode large-mode-area fiber: Proposal and design[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 419-427.
- [10] ZHENG S W, LIN Z, REN G B, et al. Design and analysis of novel multi-core dual-mode large-mode-area optical fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 299-306.
郑斯文, 林桢, 任国斌, 等. 一种新型多芯-双模-大模场面积光纤的设计和分析[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 299-306.
- [11] JIN W X, REN G B, JIANG Y C, et al. Few-mode and large-mode-area fiber with circularly distributed cores [J]. Optics Communications, 2017, 387: 79-83.
- [12] YANG M, LIAN Y, WANG J, et al. Dual-mode large mode area multi-core fiber with air hole structure[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 1-10.
- [13] LV H Z, YU M X, ZHONG W B, et al. Research and design of large-mode area low loss photonic crystal fiber[J]. Laser Technology, 2021, 45(2): 196-201.
- 吕欢祝, 余明芯, 钟文博, 等. 大模场低损耗光子晶体光纤的研究与设计[J]. 激光技术, 2021, 45(2): 196-201.
- [14] BAGGETT J C, MONRO T M, FURUSAWA K, et al. Understanding bending losses in holey optical fibers[J]. Optics Communications, 2003, 227(4-6): 317-335.
- [15] SCHERMER R T, COLE J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(10): 899-909.
- [16] WHITE T P, KUHLMLEY B T, MCPHEDRAN R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2003, 19(10): 2322-2330.

作者简介:

徐志钮 (1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事分布式光纤传感及其在电力系统中的应用方面的研究。