

环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析

靳文星 任国斌 裴丽 姜有超 吴越 湛亚 杨宇光 任文华 简水生

Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores

Jin Wen-Xing Ren Guo-Bin Pei Li Jiang You-Chao Wu Yue Shen Ya Yang Yu-Guang Ren Wen-Hua Jian Shui-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 024210 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.024210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于色散效应的光纤光栅高速高精度解调方法研究

High speed and high precision demodulation method of fiber grating based on dispersion effect

物理学报.2017, 66(1): 014206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014206>

基于偏振延时干涉技术的光子波形产生技术研究

Photonic microwave waveform generation based on polarization delay interference

物理学报.2016, 65(22): 224203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224203>

少模光纤的弯曲损耗研究

Study on bending losses of few-mode optical fibers

物理学报.2016, 65(6): 064208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064208>

基于包层模谐振的三包层石英特种光纤温度传感特性研究

Research on the temperature sensing characteristics of triple cladding quartz specialty fiber based on cladding mode resonance

物理学报.2016, 65(2): 024211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024211>

基于色散补偿光纤的高速光纤光栅解调方法

A demodulation method of high-speed fiber Bragg grating based on dispersion-compensating fiber

物理学报.2015, 64(23): 234207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234207>

环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析*

靳文星[†] 任国斌 裴丽 姜有超 吴越 谌亚
杨宇光 任文华 简水生

(北京交通大学, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2016年7月27日收到; 2016年10月25日收到修改稿)

将多芯光纤与无芯空气孔结构结合, 设计了一种具有大模场面积的十九芯双模光纤结构. 该结构由位于中心的5根常规纤芯及环绕其周围的14根空气纤芯按正六边形排布构成, 能够实现稳定的双模传输, 其基模有效模场面积的最小值约为 $285.10 \mu\text{m}^2$. 系统地分析了影响模式传输特性和模式有效模场面积的结构参数: 纤芯间距、相对折射率差和纤芯大小. 通过对这三个参数的优化, 在双模传输的条件下, 增大基模的有效模场面积. 此外, 具有大模场面积的多芯双模光纤结构具有良好的抗弯曲特性, 基模弯曲损耗小于 $5 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$. 该结构还具有制作简单、设计灵活等优点, 适用于高功率光纤激光器和光纤放大器.

关键词: 多芯光纤, 双模特性, 大模场面积, 弯曲损耗

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.66.024210

1 引言

近年来, 随着互联网产业的飞速发展, 人们对光纤通信网络系统大传输容量的要求越来越高, 通信网络容量的发展一直是研究者们关注的焦点. 目前使用传统普通单模光纤 (single-mode fiber, SMF) 的光通信网已经不能满足飞速增长的容量需求, 亟需一种新的技术来迎接信息时代的通信挑战^[1-3]. 继波分复用 (wavelength-division multiplexing, WDM)^[4]、时分复用 (time-division multiplexing, TDM)^[5]、偏分复用 (polarization-division multiplexing, PDM) 等^[6] 技术之后, 人们把目光投向了空分复用 (spatial-division multiplexing, SDM) 技术^[7]. SDM 作为一种新的传输技术引起了研究者的广泛关注. 该技术采用多个传输通道进行信息的传输, 可使通信容量成倍增加, 有望成为解决当前传输容量瓶颈问题的有效方

法^[8]. SDM 可以采用多芯光纤 (multi-core fiber, MCF)、少模光纤 (few-mode fiber, FMF), 或二者的结合来实现^[9,10]. 目前 SDM 技术与其他技术的结合可在 MCF 和 FMF 中实现超过 1 TB/s 的传输速率^[11,12].

光纤非线性的限制导致传输容量达到了极限, 而增大光纤的模场面积能消除非线性效应带来的不利影响^[13]. MCF 具有纤芯数目、纤芯距离、纤芯大小、纤芯与包层的相对折射率差等多个自由度, 结构设计比较灵活. 目前多芯光纤的研究大都基于低串扰型 MCF, 对强耦合型 MCF 的关注较少. 当 MCF 纤芯之间的距离逐渐减小时, 原本在每个纤芯中独立传输的模式会因为耦合逐渐增强形成超模模式^[14]. 传统的 MCF 竭力避免的耦合作用会在减小光功率密度的同时增大模场面积, 这有助于克服非线性效应. 但是, 大模场面积光纤 (large-mode-area fiber, LMAF) 往往存在弯曲损耗大的问题. Napierala 等^[15] 利用非对称光子

* 国家杰出青年科学基金 (批准号: 61525501) 和国家自然科学基金 (批准号: 61178008, 61275092, 61405008) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: 13111011@bjtu.edu.cn

晶体光纤实现了大的模场面积, 但弯曲损耗仍大于 0.73 dB/m . Masahiro 等^[16] 利用全固化光子带隙光纤设计出大模场面积光纤, 弯曲损耗的最小值为 0.1 dB/m . Chen 等^[17] 通过不同大小的多芯光纤结构实现了大的模场面积, 弯曲损耗仍大于 $2.5 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$. FMF 作为实现模分复用 (mode-division multiplexing, MDM) 的有效手段, 其传输损耗随着模式数量的增加而增大, 因此减少 FMF 中高阶模式的数量也是需要解决的问题^[18]. 如何结合 MCF 和 FMF 来实现模场面积与弯曲损耗之间的平衡是一个具有挑战性的工作. 文献^[19—22] 基于带有空气孔的七芯及十九芯光纤结构, 在严格少模的条件下同时实现了大模场面积与低弯曲损耗, 这对 LMAF 的设计及研究具有启发性意义.

本文将 MCF 与无空气孔的结构相结合, 设计出一种具有较低弯曲损耗的双模大模场面积多芯光纤 (dual-mode large-mode-area multi-core fiber, DMLMAMCF). 五芯结构的两侧引入对称的空气纤芯结构, 二阶模式的数量减为原来的一半, 实现了严格的双模传输. 深入分析了纤芯间距、相对折射率差和纤芯大小对模式特性和模式有效模场面积的影响. 在严格双模传输的条件下, 基模有效模场面积的最小值约为 $285.10 \mu\text{m}^2$, 增大纤芯间距, 有效模场面积也增大. 外圈环绕空气孔结构使光纤基模既保持了大模场特性, 又使其弯曲损耗降低至 $5 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$. 该结构光纤适用于高功率光纤激光器和光纤放大器.

2 光纤结构与模式特性

2.1 光纤结构

光纤的横截面结构如图 1 所示. 与传统的 MCF 不同, DMLMAMCF 由分布在中间的 5 根常规纤芯 (灰色小圆圈) 和均匀排列在外侧的 14 根空气纤芯 (白色小圆圈) 构成, 其余白色区域为包层, 纤芯整体呈正六边形排布. 此设计是在七芯光纤的基础上增加一层正六边形排布的外围空气孔, 类似于掺氟下陷光纤中的下陷层, 有利于减小光纤的弯曲损耗. 此外, 在七芯光纤两侧采用两个对称的空气孔结构, 破坏了模式的圆对称性, 使类似 TE 模和 TM 模的模式通过泄漏通道损耗殆尽, 达到减少高阶模式数量的目的, 从而形成少模结构光纤. 所有纤芯的大小均相等, 相邻纤芯间的距离为 Λ . 设纤芯半径为 a , 纤芯折射率为 n_1 , 包层折射率为 n_2 , 纤

芯和包层的折射率差为 $\Delta n = n_1 - n_2$, 空气纤芯的折射率为 n_{air} , 包层半径为 r_{clad} , 其中 $n_2 = 1.444$, 空气折射率 $n_{\text{air}} = 1.000$, $r_{\text{clad}} = 62.5 \mu\text{m}$. 当 Λ 变化时, 纤芯之间的强耦合作用会对模场面积产生影响. 此外, 通过改变 Δn 和 a 的取值, 就能够在保持少模特性的同时得到大模场面积. DMLMAMCF 结构将多芯光纤和掺氟下陷光纤的优势相结合, 在传统的多芯光纤外环绕一圈空气孔结构来减小光纤的弯曲损耗. 空气孔的尺寸大小和芯区间距的可调节性使光纤结构的设计更加灵活.

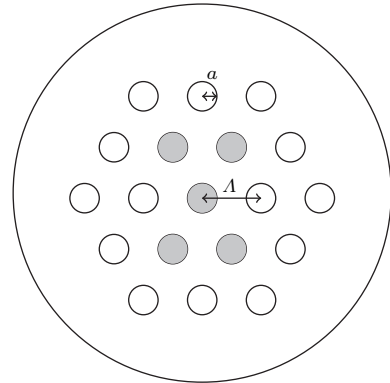


图 1 光纤横截面结构示意图

Fig. 1. Cross section schematic of proposed fiber structure.

2.2 模式特性

一个模式在光纤中传播, 其有效折射率 n_{eff} 必须满足 $n_2 < n_{\text{eff}} < n_1$ 的条件. 若 $n_{\text{eff}} < n_2$, 此模式截止. 假设 $a = 3.2 \mu\text{m}$, $\Lambda = 10.0 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.003$, 工作波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 基于全矢量有限元方法, 使用 COMSOL Multiphysics 软件分析光纤中的模式特性. 经过计算得到光纤中的矢量模式共有 4 个, 2 个简并的基模和 2 个简并的二阶模, 故严格意义上讲, 此条件下共存在 2 个简并的导模. 当中心处七根纤芯无空气孔结构时, 共有 6 个模式, 如图 2 所示, 包括简并的 HE_{11} 模、简并的 HE_{21} 模、 TE_{01} 模和 TM_{01} 模. 引入两侧的空气孔结构后各个模式的模场分布及其二维电矢量分布如图 3 所示, 图 3(a) 和图 3(b) 分别表示 2 个基模 (HE_{11} 模) 的模式特性, 图 3(c) 和图 3(d) 分别表示 2 个二阶模 (HE_{21} 模) 的模式特性, 其中基模的有效折射率 $n_{\text{eff}1} = 1.444506$, 二阶模的有效折射率 $n_{\text{eff}2} = 1.444117$. 该设计通过引入两侧对称的空气孔结构, 使二阶标量模 LP_{11} 模 (2 个 HE_{21} 模, 1 个 TM_{01} 模及 1 个 TE_{01} 模) 的模式数量减少一半, 成为严格的少模光纤.

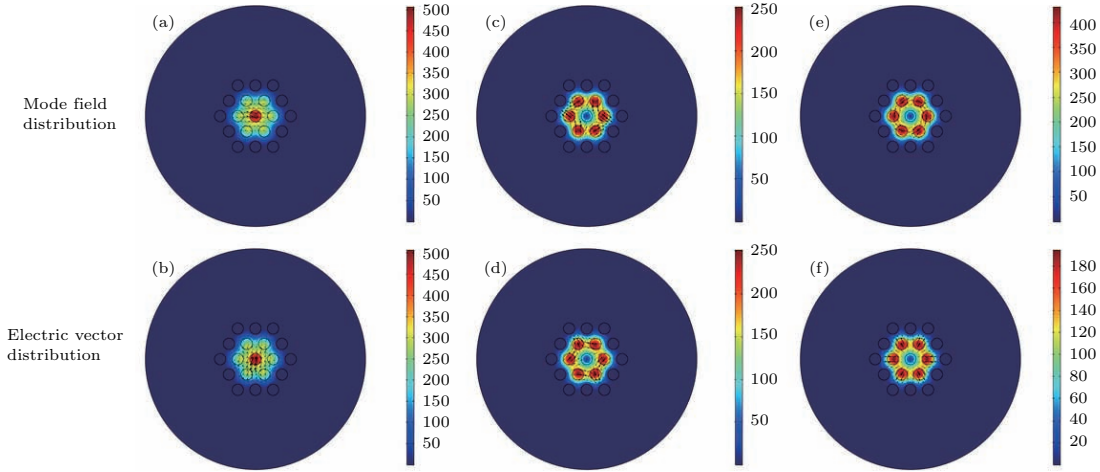


图2 (网刊彩色) 未引入空气孔时各个模式的模场分布和二维电矢量分布 (a),(b) HE₁₁ 模; (c),(d) HE₂₁ 模; (e),(f) TE₀₁ 模和 TM₀₁ 模

Fig. 2. (color online) Mode field and electric vector distributions without air holes on both sides of the center core: (a), (b) HE₁₁ mode; (c), (d) HE₂₁ mode; (e), (f) TE₀₁ mode and TM₀₁ mode.

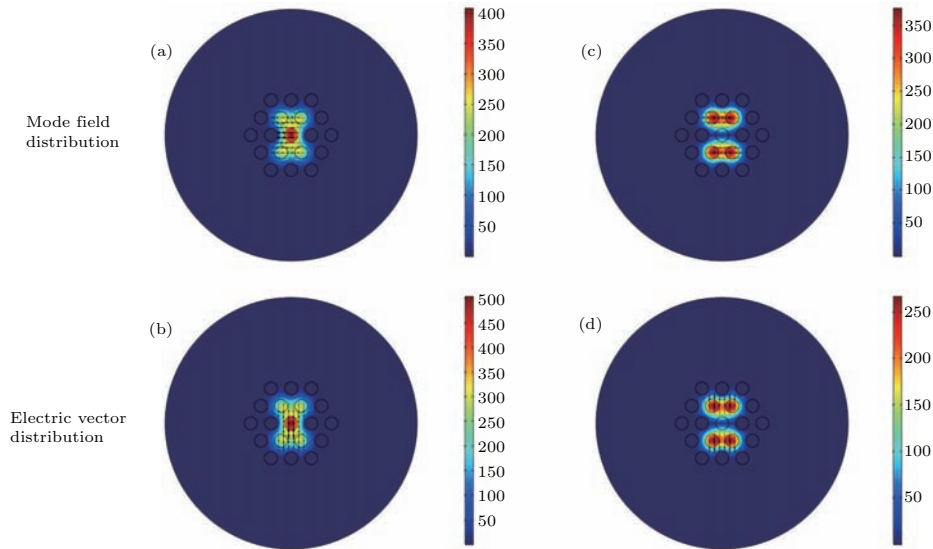


图3 (网刊彩色) 引入空气孔后各个模式的模场分布和二维电矢量分布 (a), (b) HE₁₁ 模; (c), (d) HE₂₁ 模

Fig. 3. (color online) Mode field and electric vector distributions with air holes on both sides of the center core. (a), (b) HE₁₁ mode; (c), (d) HE₂₁ mode.

光纤中基模的有效模场面积 A_{eff} 为^[23]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\int EE^* dA \right)^2}{\int (EE^*)^2 dA}, \quad (1)$$

式中 E 为基模电场的大小, E^* 为其共轭量。

3 结构参数影响

为了在保持少模特性的同时兼顾光纤的大模场面积, 对影响光纤模式传输特性及模式有效模场面积 A_{eff} 的结构参数 Λ , Δn 和 a 进行深入研究, 工

作波长为 1550 nm.

首先研究芯间距 Λ 的变化对光纤模式特性及 A_{eff} 的影响. 光纤中其他参数分别为 $\Delta n = 0.003$, $a = 3.2 \mu\text{m}$. 图 4(a) 所示为各个模式有效折射率 n_{eff} 随着芯间距 Λ 的变化. HE₁₁ 模及 HE₂₁ 模均为双重简并, 图中分别只用一条有效折射率曲线表示. 曲线 Higher 表示最接近截止的高阶模的有效折射率. 从图中可以看出, 随着 Λ 的增大, 各个模式的折射率逐渐增大, 即模式数量随着 Λ 的增大而增加. 当 $7.4 \mu\text{m} < \Lambda < 9.6 \mu\text{m}$ 时, 只存在 HE₁₁ 模. 当 $\Lambda > 9.6 \mu\text{m}$ 时, 增加了满足传输条件的 HE₂₁ 模. 因此, 可以选取合适的 Λ 值来满足少模传输的

条件, 即双模传输. HE₁₁ 模及 HE₂₁ 模的有效模场面积 A_{eff} 随芯间距 Λ 的变化如图 4(b) 所示. 从图中可以看出, 芯间距的大小满足双模传输的条件. 基模 HE₁₁ 和二阶模 HE₂₁ 的 A_{eff} 均随 Λ 的增大呈线性增大, 且 HE₂₁ 的有效模场面积稍大于 HE₁₁. HE₁₁ 模的有效模场面积最小值约为 $255.68 \mu\text{m}^2$, HE₂₁ 模的有效模场面积最小值约为 $270.80 \mu\text{m}^2$. 在其他参数不变的条件下, 增大 Λ 有利于增大各个模式的有效模场面积. 当 Λ 增长至 $11.6 \mu\text{m}$ 时, HE₁₁ 模的 A_{eff} 可达 $378.10 \mu\text{m}^2$, HE₂₁ 模的 A_{eff} 可达 $379.93 \mu\text{m}^2$.

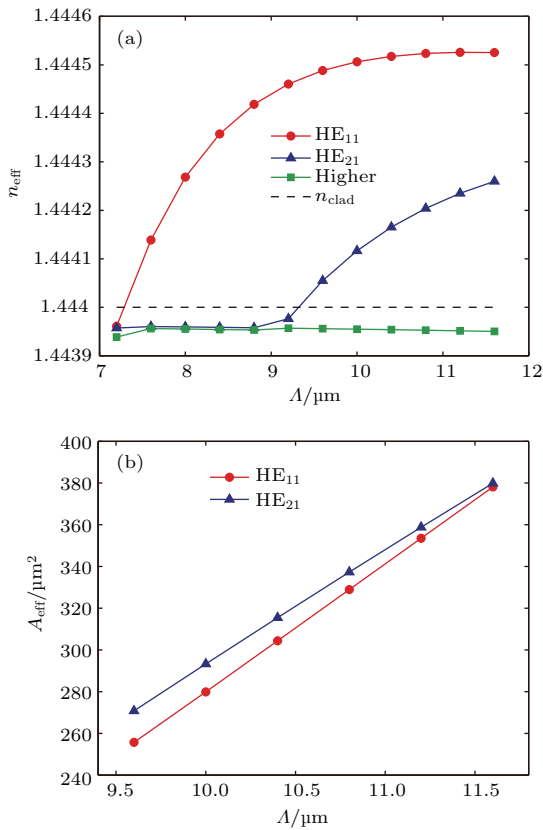


图 4 (a) 各模式有效折射率 n_{eff} 与芯间距 Λ 的关系; (b) 各模式有效模场面积 A_{eff} 与芯间距 Λ 的关系
Fig. 4. (a) Effective refractive index n_{eff} versus Λ ; (b) effective mode area A_{eff} versus Λ .

接下来研究芯包折射率差 Δn 的变化对光纤模式特性的影响. 选取 $\Lambda = 10.0 \mu\text{m}$, $a = 3.2 \mu\text{m}$. 各个模式的有效折射率 n_{eff} 和有效模场面积 A_{eff} 随 Δn 的变化分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示. 由图 5 可以看出, 各个模式的有效折射率均随 Δn 的增大而增大, 当 Δn 为 $0.0028\text{--}0.0036$ 时, 能够实现双模传输. 随着 Δn 的继续增大, 高阶模式出现. 因此选取适当的 Δn 值, 可以实现模式数量的切换.

各模式的有效模场面积 A_{eff} 随着 Δn 的增大呈线性减小, 二阶模式 HE₂₁ 的有效模场面积大于基模 HE₁₁ 的有效模场面积. 基模 HE₁₁ 的 A_{eff} 最大值约为 $282.28 \mu\text{m}^2$, 二阶模 HE₂₁ 的 A_{eff} 最大值约为 $297.10 \mu\text{m}^2$.

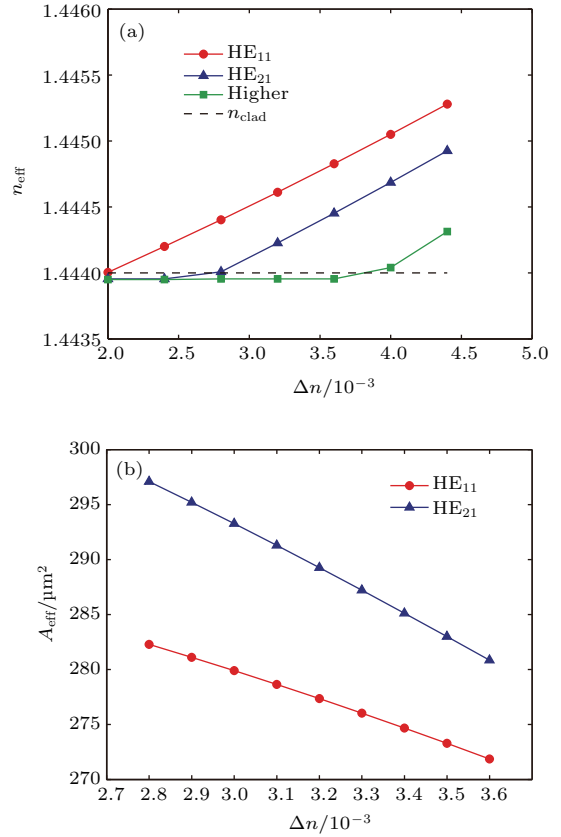


图 5 (a) 各模式有效折射率 n_{eff} 与芯包折射率差 Δn 的关系; (b) 各模式有效模场面积 A_{eff} 与芯包折射率差 Δn 的关系
Fig. 5. (a) Effective refractive index n_{eff} versus Δn ; (b) effective mode area A_{eff} versus Δn .

最后研究纤芯半径 a 的变化对光纤模式有效折射率 n_{eff} 和有效模场面积 A_{eff} 的影响, 选取 $\Lambda = 10.0 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.003$. 各个模式的有效折射率随 a 的变化如图 6(a) 所示. 当 $a > 3.2 \mu\text{m}$ 时, 只存在 HE₁₁ 及 HE₂₁ 两个传输模式. 各个模式的有效模场面积随 a 的变化如图 6(b) 所示. 两个模式的 A_{eff} 均随 a 的增大呈线性减小. 当 a 从 $3.2 \mu\text{m}$ 增大到 $4.4 \mu\text{m}$ 时, 基模 HE₁₁ 的 A_{eff} 从 $288.43 \mu\text{m}^2$ 逐渐减小到 $234.37 \mu\text{m}^2$, 二阶模 HE₂₁ 的 A_{eff} 则从 $300.03 \mu\text{m}^2$ 逐渐减小到 $259.36 \mu\text{m}^2$. 因此, 在其他结构参数不变的条件下, 减小纤芯半径有利于增加各模式的有效模场面积.

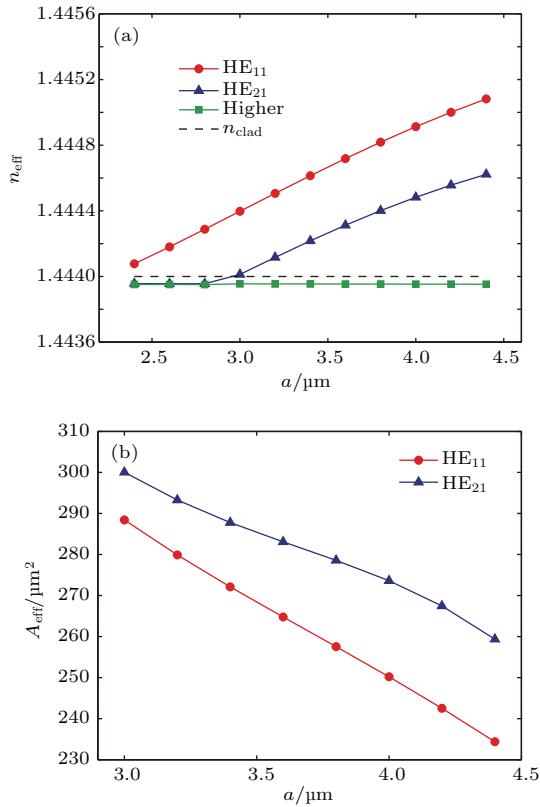


图6 (a) 各模式有效折射率 n_{eff} 与纤芯半径 a 的关系; (b) 各模式有效模场面积 A_{eff} 与纤芯半径 a 的关系
Fig. 6. (a) Effective refractive index n_{eff} versus a ; (b) effective mode area A_{eff} versus a .

4 参数特性分析

从第3节各个结构参数对模式的有效折射率及有效模场面积的影响中,发现芯间距 Λ 、芯包折射率差 Δn 及纤芯半径 a 的增大均有助于各个模式有效折射率 n_{eff} 的增大,因此选取适当的参数范围可以控制模式的数量进而实现少模传输.此外,增大芯间距 Λ 有利于增大有效模场面积 A_{eff} ,但芯包折射率差 Δn 和纤芯半径 a 的增大会减小 A_{eff} .因此,为了在保持双模特性的同时获得尽可能大的模场面积,需要在减小 Δn 和 a 的同时增大 Λ .可以通过SMF的归一化频率 V 与光功率变化的关系来考虑各个参数对 A_{eff} 的影响. SMF的功率限制因子 Γ 表示纤芯功率与总功率的比值. Γ 与 V 的关系如图7所示,随着 V 值减小,纤芯功率限制因子 Γ 的值也减小.这就意味着 V 值较小时,更多的光功率从纤芯分布到包层中,使得各个模式的有效模场面积增加.二阶模 HE₂₁ 的模场受到 V 的约束比基模 HE₁₁ 弱,使得包层中存在更大的光功率.图7中给出了 $V = 0.8, 1.6, 2.4$ 时基模 HE₁₁ 模场的分布情况.从图中可以看出, V 值越小,包层中的光功率

越大.

光纤的归一化频率 V 定义为^[24]

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2)$$

当工作波长 λ 和包层折射率 n_2 一定时, V 值的大小取决于 n_1 和 a . 当纤芯折射率 n_1 或纤芯半径 a 减小时,归一化频率 V 的值会减小,而各个模式的有效模场面积 A_{eff} 增大,这与第3节得到的结论一致.此外,有效模场面积 A_{eff} 与芯间距 Λ 通过不同纤芯之间的耦合作用相关.图7中的插图为基模 HE₁₁ 的 A_{eff} 随 Λ 的变化情况.当 $\Delta n = 0.0028$, $a = 3.2 \mu\text{m}$, Λ 从 $10.0 \mu\text{m}$ 增大到 $14.0 \mu\text{m}$ 时, A_{eff} 从 $285.90 \mu\text{m}^2$ 逐渐增大到 $540.66 \mu\text{m}^2$,整个过程中光纤始终保持着严格双模传输模式.从图7中可以看出, A_{eff} 随着 Λ 的增大呈线性增大.与图4比较发现,在严格双模传输条件下,增大 Λ 可增大 A_{eff} .因此, DMLMAMCF 可以先选取双模传输模式,再调整 Λ 值的大小来得到理想的有效模场面积.

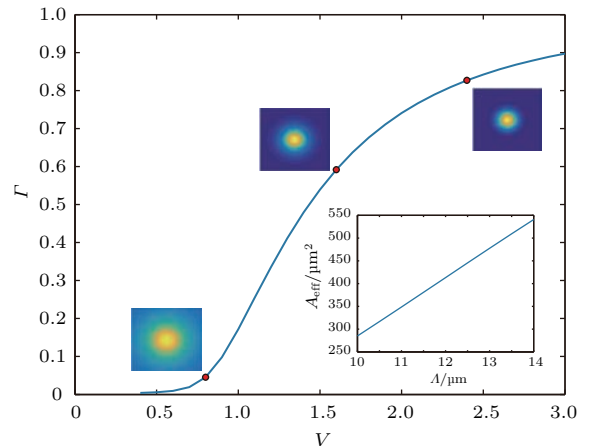


图7 (网刊彩色) 纤芯功率限制因子 Γ 与归一化频率 V 的关系. 插图为基础模有效模场面积 A_{eff} 随纤芯间距 Λ 的变化
Fig. 7. (color online) Fiber core power limiting factor Γ versus normalized frequency V . The insert shows A_{eff} of HE₁₁ versus Λ .

5 弯曲特性分析

实际应用中光纤的弯曲是不可避免的,故弯曲损耗是光纤的一个重要特性.外界环境发生变化引起光纤的几何形变,使得光纤的折射率分布发生改变,影响光纤的传输特性,最常见的是导致模式泄漏.因此,在研究各个模式的有效模场面积受弯曲半径 R 的影响时要考虑模式的泄漏情况.

设沿纸张横向向右方向为 x 轴正向,沿纸张纵向向上为 y 轴正向.当光纤沿着 x 轴正方向向 y

轴正方向弯曲时, 光纤横截面等效折射率分布可表示为

$$n(x, y) = n_0(x, y)\sqrt{1 + 2x/R_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

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

光纤的弯曲损耗 α 与求得的模式有效折射率的虚部有关 [20]:

$$\alpha = -\frac{20\pi}{\ln 10} \text{Im}(\beta) \approx -8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (4)$$

式中 $\beta = (2\pi/\lambda) \cdot n_{\text{eff}}$ 为模式的传播常数.

在严格双模传输的条件下研究光纤的弯曲半径 R 对各个模式的弯曲损耗 α 和有效模场面积 A_{eff} 的影响. 在包层外侧采用完美匹配层, 结构参数纤芯间距 $\Lambda = 10.0 \mu\text{m}$, 芯包折射率差 $\Delta n = 0.0028$, 纤芯半径 $a = 3.2 \mu\text{m}$. 当外层涂覆折射率为 1.50 的高折射率材料时, 各个模式的弯曲损耗 α 和有效模场面积 A_{eff} 随弯曲半径 R 的变化分别如图 8(a) 和图 8(b) 所示.

两侧空气孔的引入导致 x 偏振方向的模式与 y 偏振方向的模式受到弯曲半径的影响会有不同, 因此图 8 中分别画出了 HE_{11-x} , HE_{11-y} , HE_{21-x} , HE_{21-y} 模式下 α 和 A_{eff} 随弯曲半径 R 的变化. 从图 8(a) 可以看出, HE_{21-x} 和 HE_{21-y} 的损耗在特定的弯曲半径下有突变, 其他情况下均较小, 最大损耗约为 0.028 dB/m. 而 HE_{11-x} 和 HE_{11-y} 在特定的弯曲半径下也有突变, 但其最大损耗小于 5×10^{-5} dB/m. 结合图 8(b) 来看, 弯曲损耗的突变是由于模场泄漏引起的, 在突变点模式的有效模场面积也相应地突然增大. 在某些特定的弯曲半径下, 各个模式的模场受到类似于掺氟下陷层谐振耦合作用的影响而产生模式的泄漏 [25]. 环绕空气孔的作用类似于掺氟层, 但是它们之间的空隙并没有完全束缚各个模式的光功率, 使得在某些特定的弯曲半径下模场发生泄漏. 图 8(a) 表明基模 HE_{11} 的弯曲损耗均小于二阶模 HE_{21} , 图 8(b) 则表明不同模式对应着不同的谐振弯曲半径. 由于 x 方向引入了对称空气孔, 两个模式的弯曲损耗和有效模场面积表现出不同特性. 结合图 8(a) 和图 8(b), 发现二阶模 HE_{21} 受到弯曲半径的影响较大. 光场泄漏到包层, 使得有效模场面积增大的同时也会引起弯曲损耗的增大. 为了得到较小的弯曲损耗, 选取的弯曲半径要避开谐振的弯曲半径范围. 不考虑

谐振弯曲半径的影响, 当弯曲半径从 0.06 m 增大到 0.15 m 时, HE_{11-x} 和 HE_{11-y} 的弯曲损耗均小于 5×10^{-5} dB/m, HE_{21-x} 和 HE_{21-y} 的弯曲损耗均小于 0.028 dB/m. 随着弯曲半径的增大, 两个模式的弯曲损耗继续减小. 与此同时, 不考虑突变的结果影响, HE_{11-x} 和 HE_{11-y} 的有效模场面积均约为 $285.10 \mu\text{m}^2$, HE_{21-x} 和 HE_{21-y} 的有效模场面积均约为 $285.60 \mu\text{m}^2$, 各个模式的 A_{eff} 在图 8(b) 上基本重合在一起. 此外, 可以在合适的弯曲半径下继续增加纤芯之间的距离以得到更大的 A_{eff} .

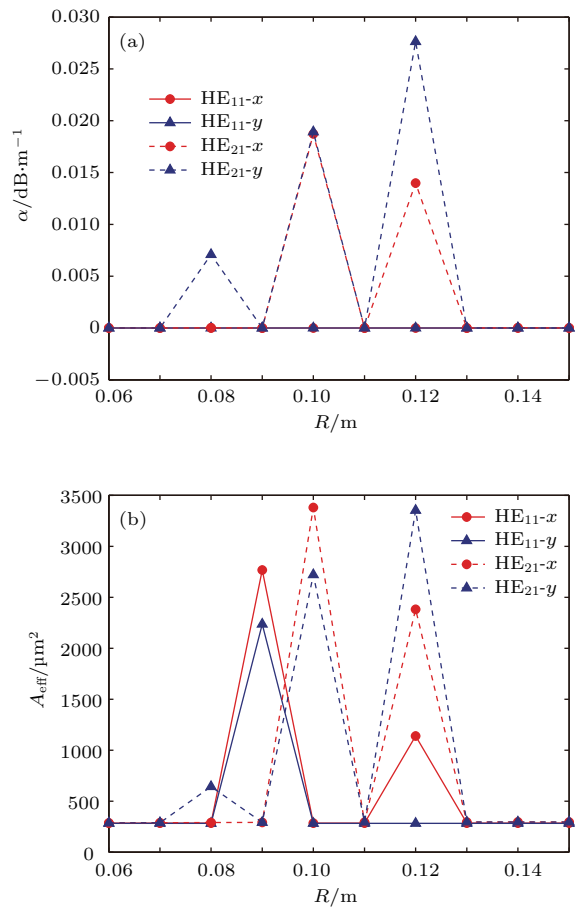


图 8 (网刊彩色) (a) 弯曲损耗 α 随弯曲半径 R 的变化曲线; (b) 有效模场面积 A_{eff} 随弯曲半径 R 的变化曲线
Fig. 8. (color online) (a) Bending losses of HE_{11-x} and HE_{11-y} versus bending radius R ; (b) effective mode areas of HE_{11-x} and HE_{11-y} versus bending radius R .

6 结 论

本文提出了一种具有环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤. 光纤在外围呈正六边形排列的十二芯空气孔基础上, 在中间七芯光纤的两侧又引入对称的空气孔结构, 既能抑制弯曲损耗, 又可使二阶模式的数量由原来的 4 个减少为 2 个, 形成

严格的双模传输. 对影响模式传输特性和各个模式有效模场面积 A_{eff} 的结构参数, 芯间距 Λ 、芯包折射率差 Δn 和纤芯半径 a , 进行了深入研究. Δn 和 a 通过影响归一化频率参数 V 来控制 A_{eff} 的大小, Λ 则是影响各个纤芯之间的耦合来对 A_{eff} 施加影响. 通过选取适当的参数, 在严格双模传输的条件下, 基模的 A_{eff} 最小值约为 $285.10 \mu\text{m}^2$. 在此条件下, 当弯曲半径 R 大于 0.06 m 时, 基模 HE_{11} 的弯曲损耗小于 $5 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$, 二阶模 HE_{21} 的弯曲损耗小于 0.028 dB/m , 并且随着弯曲半径的增大, 两个模式的弯曲损耗继续减小. 除去谐振耦合的影响, 基模和二阶模的有效模场面积 A_{eff} 保持在 $280.00 \mu\text{m}^2$ 以上, 有效模场面积较大. 此外, 继续增加芯间距 Λ 可以增大 A_{eff} . 该结构的光纤可以应用于高功率光纤激光器和放大器.

参考文献

- [1] Essiambre R J, Ryf R, Fontaine N K, Randel S 2013 *IEEE Photonics. J.* **5** 0701307
- [2] Winzer P J 2012 *IEEE Photonics. J.* **4** 647
- [3] Winzer P J 2014 *Nat. Photon.* **8** 345
- [4] Sano A, Masuda H, Kobayashi T, Fujiwara M, Horikoshi K, Yoshida E, Miyamoto Y, Matsui M, Mizoguchi M, Yamazaki H, Sakamaki Y, Ishii H 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 578
- [5] Houtsuma V, Veen D V, Chow H 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 2005
- [6] Li F, Yu J, Cao Z, Chen M, Zhang J, Li X 2016 *Opt. Express* **24** 2648
- [7] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E 2013 *Nat. Photon.* **7** 354
- [8] Li G, Bai N, Zhao N, Xia C 2014 *Adv. Opt. Photon.* **6** 413
- [9] Van Uden R G H, Correa R A, Lopez E A, Huijskens F M, Xia C, Li G, Schülzgen A, Waardt H D, Koonen A M J, Okonkwo C M 2014 *Nat. Photon.* **8** 865
- [10] Saitoh K, Matsuo S 2013 *J. Nanophotonics.* **2** 441
- [11] Sakaguchi J, Puttnam B J, Klaus W, Awaji Y, Wada N, Kanno A, Kawanishi T, Imamura K, Inaba H, Mukasa K, Sugizaki R, Kobayashi T, Watanabe M 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 554
- [12] Sakaguchi J, Klaus W, Mendinueta J M D, Puttnam B J, Luis R S, Awaji Y, Wada N, Hayashi T, Nakanishi T, Watanabe T, Kokubun Y, Takahata T, Kobayashi T 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 93
- [13] Kong F, Saitoh K, McClane D, Hawkins T, Foy P, Gu G, Dong L 2012 *Opt. Express* **20** 26363
- [14] Li S H, Wang J 2015 *Opt. Express* **23** 18736
- [15] Napierala M, Beres P E, Nasilowski T, Mergo P, Berghmans F, Thienpont H 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1409
- [16] Masahiro K, Kunimasa S, Katsuhiko T, Shoji T, Shoichiro M, Munehisa F 2012 *Opt. Express* **20** 15061
- [17] Chen M Y, Li Y R, Zhou J, Zhang Y K 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 476
- [18] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, Bolle C, Sierra A, Mumtaz S, Esmaeelpour M, Burrows E C, Essiambre R J, Winzer P J, Peckham D W, McCurdy A H, Lingle R 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 521
- [19] Zheng S W, Ren G B, Lin Z, Jian W, Jian S S 2013 *Opt. Fiber. Technol.* **19** 419
- [20] Lin Z, Ren G B, Zheng S W, Jian S S 2013 *Opt. Laser. Technol.* **51** 11
- [21] Zheng S W, Lin Z, Ren G B, Jian S S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044224 (in Chinese) [郑斯文, 林桢, 任国斌, 简水生 2013 物理学报 **62** 044224]
- [22] Lin Z, Zheng S W, Ren G B, Jian S S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064214 (in Chinese) [林桢, 郑斯文, 任国斌, 简水生 2013 物理学报 **62** 064214]
- [23] Vogel M M, Abdou A M, Voss A, Graf T 2009 *Opt. Lett.* **34** 2876
- [24] Snyder A W, Love J D 1983 *Optical Waveguide Theory* (London: Chapman and Hall Ltd) p7
- [25] Ren G B, Lin Z, Zheng S W, Jian S S 2013 *Opt. Lett.* **38** 781

Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores*

Jin Wen-Xing[†] Ren Guo-Bin Pei Li Jiang You-Chao Wu Yue Shen Ya
Yang Yu-Guang Ren Wen-Hua Jian Shui-Sheng

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of the Ministry of Education, Beijing
Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 27 July 2016; revised manuscript received 25 October 2016)

Abstract

Multi-core fiber has aroused considerable interest as one of potential candidates for space division multiplexing that provides an additional freedom degree to increase optical fiber capacity to overcome the transmission bottleneck of current single-mode fiber optical networks. Few-mode fiber is also under intense study as a means to achieve space division multiplexing. We propose a novel dual-mode large-mode-area multi-core fiber (DMLMAMCF), which uses multi-core structure to realize few-mode condition when pursuing large mode-area. The proposed fiber consists of 5 conventional silica-based cores in the center region and 14 air hole cores surrounding the center cores. The outer circle with 12 air hole cores, which function similarly to the fluorine doping region in the bend-insensitive fiber, can mitigate the bending loss when keeping large mode area. The symmetrically distributed two cores on both sides of the center core in central region can reduce the half second-order LP_{11} mode consisting of two degenerate HE_{11} modes, TE_{01} mode, two degenerate HE_{21} modes and TM_{01} mode, thus leading to the remaining four vector modes, i.e. two degenerate HE_{11} modes and two degenerate HE_{21} modes. That is the reason why we call it strict dual-mode. We focus on large-mode-area properties and bending characteristics of the dual-mode. The influence of structural parameters that include corepitch Λ , refractive index difference between core and cladding Δn , and fiber core radius a , on mode characteristics and mode area of HE_{11} mode and HE_{21} mode is investigated in detail. The results reveal that it is helpful to increase the effective area of fundamental mode when we increase the value of corepitch, reduce the refractive index and fiber core radius. The effective mode area of HE_{11} is about $285.10 \mu\text{m}^2$ under the strict dual-mode condition. In addition, the relationship between bending loss and bending radius, and the relationship between effective mode area and bending radius of two modes are both investigated. For the HE_{11} mode, the least bending loss is about 5×10^{-5} dB/m while the least effective mode area with bending radius larger than 0.6 m is about $285.10 \mu\text{m}^2$. The HE_{21} mode is more sensitive to bend effect. The least bending loss is about 0.028 dB/m and the effective mode area is larger than $280.00 \mu\text{m}^2$ except for resonant coupling points. Large effective areas of both modes with low bending loss can be realized. Larger effective mode area with larger corepitch, appropriate refractive index difference and fiber core radius can be achieved. This fiber may find its usage in high power fiber lasers and amplifiers.

Keywords: multi-core fiber, dual-mode characteristic, large mode area, bending loss

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.66.024210

* Project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 61525501) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178008, 61275092, 61405008).

[†] Corresponding author. E-mail: 13111011@bjtu.edu.cn