

支持 10 个模式的空气孔辅助型偏振保持少模光纤

薛宇勃, 李海粟*, 刘亚静, 揭璐, 张宇, 姜有超, 任国斌, 裴丽

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 提出了一种空气孔辅助型偏振保持少模光纤,在椭圆环芯中心引入一个椭圆形空气孔,并在水平和竖直方向分别引入 4 个不同尺寸的圆形空气孔,以提高模式间的有效折射率差,实现多阶模式间无串扰偏振保持传输。通过数值仿真研究了 4 个圆形空气孔的尺寸和位置、环形纤芯的尺寸和椭圆率以及椭圆形空气孔的尺寸和椭圆率对偏振保持传输性能的影响。经过参数优化设计,所提光纤在 1520~1600 nm 波段内满足所有相邻模式间的有效折射率差 Δn_{eff} 均高于 1.0×10^{-4} ,色散为 17.6~51.3 ps/(nm·km)。所提光纤在大容量空分复用通信技术中具有良好的应用前景。

关键词 光纤光学; 偏振保持; 空气孔辅助; 空分复用; 少模光纤

中图分类号 TN252 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL202249.1706001

1 引言

随着社交媒体、移动通信和云计算的发展,用户对网络容量的需求呈爆炸式增长,这向光纤通信系统提出了巨大挑战^[1]。为了进一步提升全光网络的数据传输及交换能力,光纤的升级扩容势在必行^[2]。目前,波分复用(WDM)^[3]、时分复用(TDM)^[4]等复用技术已被应用于传统单模光纤(SMF)系统的容量扩充,这些扩充技术可使 SMF 具备更高的宽带传输能力^[5]。然而,单根 SMF 已经结合了所有光波自由度(包括幅度、相位、频率和偏振态等),其传输容量已经接近香农定理的传输极限^[6-7]。为了解决容量瓶颈问题,国内外学者对空分复用(SDM)技术进行了深入研究^[8-10],并把 SDM 技术作为扩充光纤通信系统容量的一种有效方法^[11]。

目前,SDM 技术主要通过多芯光纤(MCF)^[12-13]或少模光纤(FMF)^[14]实现。前者将多根纤芯集成于单根光纤中,将各纤芯作为独立的传输信道。通过 MCF 实现 SDM 技术是直接的解决方案^[15],但多纤芯设计会提升制造成本;同时,因为纤芯紧密地集成在包层范围有限的 MCF 中,要确保高纤芯密度、低衰减损耗和低纤芯间串扰,将信号耦合进和耦合出每根纤芯也比较困难。FMF 将光纤中的各正交模式视为独立传输信号的信道,通过 FMF 的特殊结构设计,利用多组混合型矢量模式的两个偏振态^[16-18],可使单根光纤的传输容量增加^[19]。这种“少模+偏振保持”的复用方式为突破通信容量瓶颈提供了一个十分有潜力的解

决方案^[20]。实验研究表明^[21]:当光纤传输距离为 100 m 时,模式间的有效折射率差达到 10^{-4} 量级,即可实现正交偏振模式间的偏振保持稳定传输^[22-24];若传输距离长达 50 km,模式间的有效折射率差需要达到 10^{-3} 量级^[25],才能使模式偏振保持稳定传输。2017 年,Zhao 等^[26]提出了椭圆环芯偏振保持 FMF,其高掺杂纤芯折射率为 1.478,在 75 nm 带宽范围内支持 14 个模式。2018 年,Xiao 等^[27]提出了空气孔辅助型偏振保持 FMF,其高掺杂纤芯折射率 1.478 下可以扩展支持 16 个模式,带宽为 55 nm。2018 年,Jiang 等^[28]提出了环辅助型 FMF,其纤芯折射率为 1.457,在 75 nm 带宽范围内支持 7 个模式。2019 年,Corsi 等^[29]提出了一种支持 10 个模式的椭圆纤芯 FMF,其纤芯折射率为 1.455,带宽为 35 nm。2021 年,Xie 等^[30]提出了支持 10 个模式的轮式环形 FMF,其纤芯折射率为 1.457,带宽为 75 nm。光纤纤芯的掺杂浓度越高,支持的模式数量越多,但这会大幅提高光纤的制作成本。如何在平衡模式数量和光纤制作成本的同时保持较高的传输性能是目前研究的瓶颈问题。

本文提出一种空气孔辅助型偏振保持 FMF,在椭圆环芯的中心处引入一个椭圆形空气孔,并分别在环芯的水平方向和竖直方向引入两个圆形空气孔,纤芯中掺杂二氧化锗(GeO₂)的物质的量分数约为 10.7%。本文研究了 4 个圆形空气孔的尺寸和位置、环形纤芯的尺寸和椭圆率以及椭圆形空气孔的尺寸和椭圆率对模式偏振保持性能的影响,最后讨论了 S+C+L 通信波段(1460~1610 nm)内光纤的传输性能。

收稿日期: 2021-10-18; 修回日期: 2021-11-30; 录用日期: 2021-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801003)、国家自然科学基金(62075007, 62005013)

通信作者: *lihaisu@bjtu.edu.cn

2 光纤结构及参数

图 1 为所设计的空气孔辅助型偏振保持 FMF 的横截面示意图以及相关结构参数,并对包层、椭圆纤芯和空气孔区域进行了标注。在波长 1550 nm 处,包层折射率 $n_{\text{cladding}}=1.444$,纤芯折射率 $n_{\text{core}}=1.460$,空气折射率 $n_{\text{air}}=1$ 。包层直径 $D=125\ \mu\text{m}$,沿 x 、 y 轴方向的空气孔半径分别为 d_1 、 d_2 ;沿 x 、 y 轴方向的圆形空气孔中心与环形纤芯中心的距离分别为 d_x 、 d_y ;椭圆环芯的长轴(即沿 x 轴方向)为 c_x ,短轴(即沿 y 轴方向)为 c_y ,用 c_x/c_y 表示椭圆环芯的椭圆率;引入的椭圆形空气孔的长轴(即沿 x 轴方向)为 a_x ,短轴(即沿 y 轴方向)为 a_y ,用 a_x/a_y 表示椭圆形空气孔的椭圆率;用 a_x/c_x 表示椭圆形空气孔的尺寸。这里需要说明的是,所设计的光纤纤芯折射率可以通过在 SiO_2 中掺杂物质的量分数约为 10.7% 的 GeO_2 得到。所提光纤的制备工艺包括改进的化学气相沉积(MCVD)法、机械钻孔法和压力辅助的光纤拉制工艺。图 2 为所提光纤预制棒的制备工艺示意图。首先切割一个空心圆管,形成两个平坦表面;然后利用改进的 MCVD 工艺在管的内壁上沉积 GeO_2 掺杂层,并通过缩棒工艺实现圆形预制棒横截面(横截面上会形成椭圆形空气孔和椭圆环芯^[31]);最后在预制棒上精确地钻出 4 个侧孔(精确的钻孔技术是实现光纤优良特性的重要因素^[32])。由于空气孔的尺寸是微米

量级,在一定长度的预制棒上钻孔存在一定难度,因此,在光纤钻孔以及气压辅助拉丝过程中需要严格控制空气孔的尺寸。先采用机械钻孔在预制棒上钻出尺寸为毫米量级的空气孔^[33-34],然后采用气压辅助法进行拉丝,在拉丝过程中要严格控制温度、气压、拉丝速度以及光纤的长度。实验研究证明,对于包含孔结构的光纤,当光纤长度控制在 1 m 时,能够保证光纤的制作精度^[32-34]。光纤特性采用基于有限元算法的 COMSOL Multiphysics 软件^[35]进行计算,其中网格尺寸小于波长的 1/5,并且在所设计的光波导外部加入了完美匹配层,以满足仿真计算的精度要求。

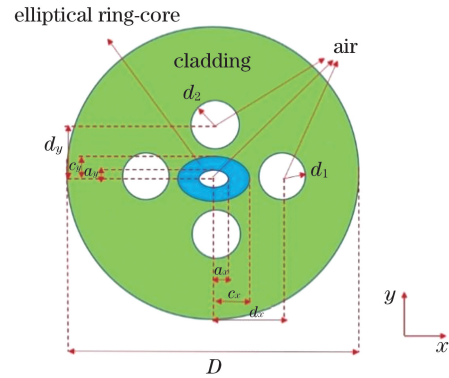


图 1 空气孔辅助型偏振保持 FMF 横截面示意图
Fig. 1 Schematic of cross-section of proposed air hole-assisted polarization-maintaining FMF

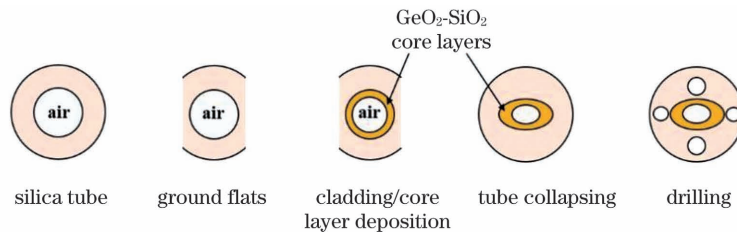


图 2 空气孔辅助型椭圆空心光纤预制棒制造工艺示意图
Fig. 2 Schematic of air hole-assisted elliptical hollow optical fiber preform fabrication process

3 光纤参数设计

3.1 包层中圆形空气孔的尺寸和位置

首先研究包层中圆形空气孔的尺寸和位置对模式偏振保持性能的影响。首先研究沿 x 轴方向圆形空气孔半径 d_1 的影响。保持圆形空气孔的位置不变,即 $d_x=14.5\ \mu\text{m}$, $d_y=13\ \mu\text{m}$,其他光纤参数暂时固定为: $d_2=7.6\ \mu\text{m}$, $c_x=7.2\ \mu\text{m}$, $a_x/a_y=1.4$, $c_x/c_y=1.4$, $a_x/c_x=0.36$,波长为 1550 nm。图 3(a)给出了光纤中模式的有效折射率 n_{eff} 随 x 轴方向圆形空气孔半径 d_1 变化的曲线。为防止圆形空气孔接触纤芯区域,空气孔的半径应小于 $7.3\ \mu\text{m}$ 。由图 3(a)可知,随着 d_1 增大,所有模式的 n_{eff} 都减小,而且 10 个模式对 d_1 的敏感度相差不大。图 3(b)给出了所有相邻模式间的有效折射率差 Δn_{eff} 曲线。为了方便观察,图 3(c)中没有给出 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 的模间

曲线,只给出了模式 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^y 与 LP_{21b}^x 之间的有效折射率差 Δn_{eff} 曲线。由图 3(b)可以看出,模式 LP_{11a}^y 与 LP_{11b}^x 之间的 Δn_{eff} 以及 LP_{21b}^y 与 LP_{21a}^x 之间的 Δn_{eff} 都对 d_1 比较敏感。由图 3(a)可以看出 LP_{11a}^y 与 LP_{11b}^x 、 LP_{21b}^y 与 LP_{21a}^x 的 n_{eff} 差值较大,这主要是由 LP_{11a}^y 与 LP_{11b}^x 以及 LP_{21b}^y 与 LP_{21a}^x 的模场分布不同导致的。由图 3(c)可以看出,当 d_1 增加到 $6.85\ \mu\text{m}$ 时,模式 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 之间的 Δn_{eff} 开始大于 1.0×10^{-4} ,而 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^y 与 LP_{21b}^x 之间的 Δn_{eff} 在仿真参数范围内都始终大于 1.0×10^{-4} 。当 d_1 在 $6.85 \sim 7.2\ \mu\text{m}$ 范围内时,即在图 3(b)和图 3(c)中两条竖直虚线区域内时,光纤支持的 10 个模式间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} ,可以实现模式的偏振保持(后续图 4~10 同理,不再具体描述)。在后续研究中选取 $d_1=7\ \mu\text{m}$ 。

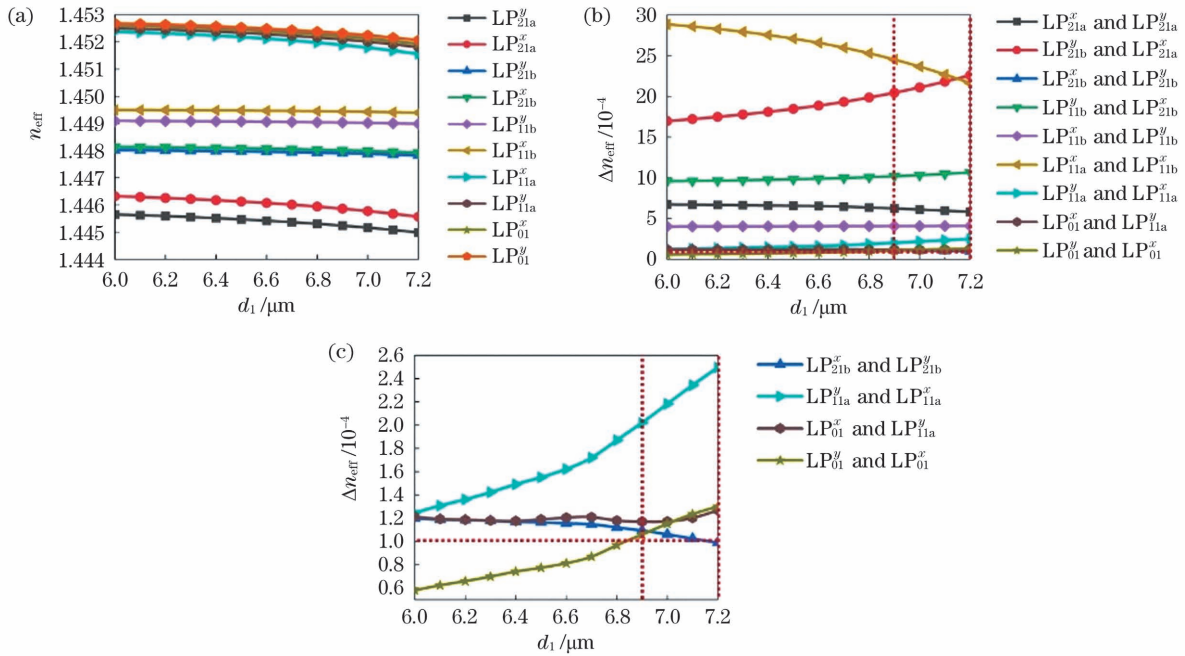


图 3 模式特性随 d_1 的变化。(a)有效折射率 n_{eff} 随 d_1 的变化;(b)有效折射率差 Δn_{eff} 随 d_1 的变化;(c)部分模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 随 d_1 的变化

Fig. 3 Variations of mode characteristics with d_1 . (a) Variation of effective refractive index n_{eff} with d_1 ; (b) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} with d_1 ; (c) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} of partial modes with d_1

接着研究 y 轴方向圆形空气孔半径 d_2 对模式偏振保持性能的影响。令 $d_1 = 7 \mu\text{m}$, $d_x = 14.5 \mu\text{m}$, $d_y = 13 \mu\text{m}$, $c_x = 7.2 \mu\text{m}$, $a_x/a_y = 1.4$, $c_x/c_y = 1.4$, $a_x/c_x = 0.36$ 。图 4(a)给出了光纤中模式的 n_{eff} 随 y

轴方向圆形空气孔半径 d_2 的变化。同理,为了防止空气孔接触纤芯区域,该圆形空气孔的半径应小于 $7.9 \mu\text{m}$ 。由图 4(a)可知,随着 d_2 增加,所有模式的 n_{eff} 都减小。根据 $\text{LP}_{21\text{a}}^y$ 和 $\text{LP}_{21\text{a}}^x$ 的模场分布,模式 $\text{LP}_{21\text{a}}^y$

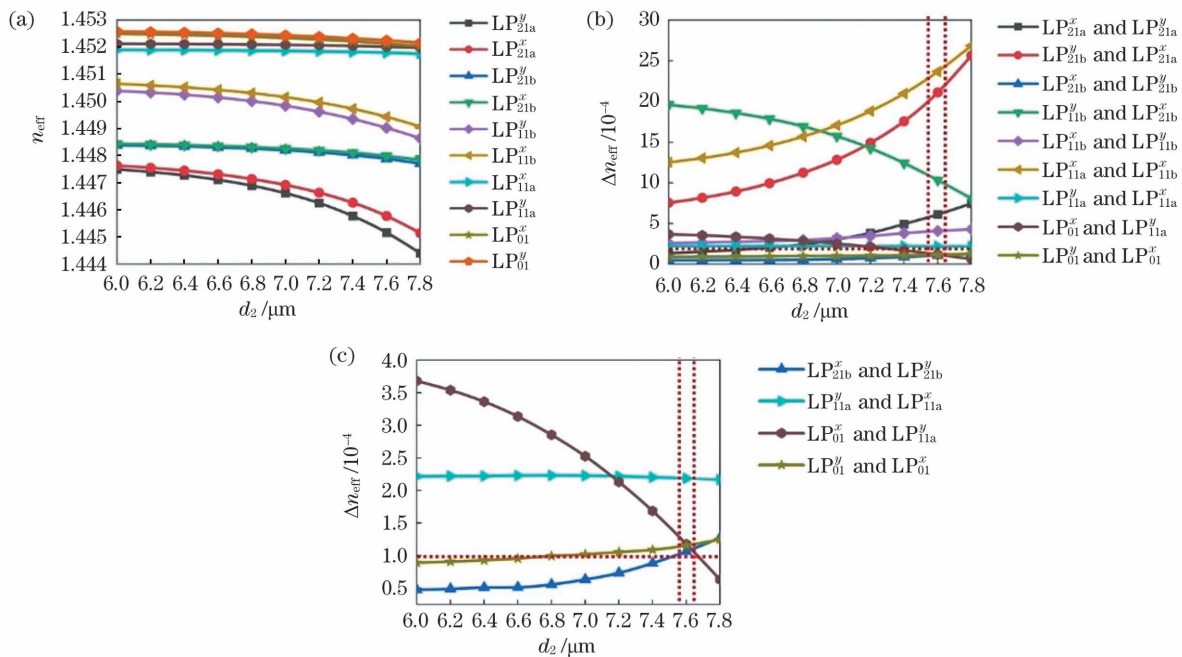


图 4 模式特性随 d_2 的变化。(a)有效折射率 n_{eff} 随 d_2 的变化;(b)有效折射率差 Δn_{eff} 随 d_2 的变化;(c)部分模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 随 d_2 的变化

Fig. 4 Variations of mode characteristics with d_2 . (a) Variation of effective refractive index n_{eff} with d_2 ; (b) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} with d_2 ; (c) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} of partial modes with d_2

和 LP_{21a}^x 的能量主要集中在垂直方向,10 个模式中的高阶模式 LP_{21a}^y 和 LP_{21a}^x 对 d_2 的敏感程度相较于对 d_1 的敏感程度更大。图 4(b)给出了所有相邻模式的 Δn_{eff} 曲线。为了方便观察,图 4(c)没有给出 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 的模间曲线,只给出了 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 之间的 Δn_{eff} 随 d_2 变化的曲线。由图 4(b)可以看出,由于 LP_{11a}^x 与 LP_{11b}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21a}^x 的模场分布不同,模式 LP_{11a}^x 与 LP_{11b}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21a}^x 之间的 Δn_{eff} 对 d_2 较为敏感。由图 4(c)可知,随着 d_2 增加,模式 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 模式之间的 Δn_{eff} 逐渐减小,模式 LP_{01}^y 与 LP_{11a}^x 之间的 Δn_{eff} 逐渐减小, LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 模式之间的 Δn_{eff} 基本保持不变且始终大于 1.0×10^{-4} 。可以在合适的范围内选取 d_2 值,以保证模式之间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 。当 d_2 在 $7.58 \sim 7.65 \mu\text{m}$ 范围内时,光纤支持的 10 个模式间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} ,可以实现模式的偏振保持。在后续研究中选取 $d_2 = 7.6 \mu\text{m}$ 。

本文在研究过程中对 d_1 和 d_2 等参数的取值进行了限制,下面以 d_1 和 d_2 为例说明原因。一方面,在圆形空气孔位置固定的条件下,当 d_1 和 d_2 增加到一定值时,圆形空气孔将与椭圆环形纤芯发生重叠;另一方面,由图 3(c)和图 4(c)可知,随着 d_1 和 d_2 增加,虽然一些模式之间的 Δn_{eff} 会更大,但是图 3(c)中模

式 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 之间的 Δn_{eff} 以及图 4(c)中模式 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 之间的 Δn_{eff} 会减小到低于 1×10^{-4} 。因此,需要对参数的取值进行限制。

然后研究 d_x 对模式偏振特性的影响。令 $d_1 = 7 \mu\text{m}$, $d_2 = 7.6 \mu\text{m}$, $d_y = 13 \mu\text{m}$, $c_x = 7.2 \mu\text{m}$, $a_x/a_y = 1.4$, $c_x/c_y = 1.4$, $a_x/c_x = 0.36$ 。图 5(a)给出了光纤中 10 个模式的 n_{eff} 随 d_x 的变化。随着 d_x 增加, x 轴方向圆形空气孔远离纤芯区域,圆形空气孔对纤芯区域传输模式的功率束缚能力减弱,功率束缚因子(在光纤纤芯中传输的光功率与在光纤中传输的总功率之比,表示为 Γ)减小,模场面积逐渐增大,因此 10 个模式的 n_{eff} 值逐渐增加。图 5(b)给出了所有相邻模式的 Δn_{eff} 曲线。为了方便观察,图 5(c)没有给出 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 的模间曲线,只给出了模式 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 之间的 Δn_{eff} 曲线。由图 5(b)可知,模式 LP_{11a}^x 与 LP_{11b}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21a}^x 之间的 Δn_{eff} 对 d_x 较为敏感。由图 5(c)可知:随着 d_x 增加, LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 模式之间的 Δn_{eff} 始终大于 1.0×10^{-4} ,而 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 之间的 Δn_{eff} 逐渐减小,且只在一定范围内大于 1.0×10^{-4} ;当 d_x 在 $14.35 \sim 14.67 \mu\text{m}$ 范围内时,光纤支持的 10 个模式间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} ,可以实现模式的偏振保持。后续研究中选取 $d_x = 14.5 \mu\text{m}$ 。

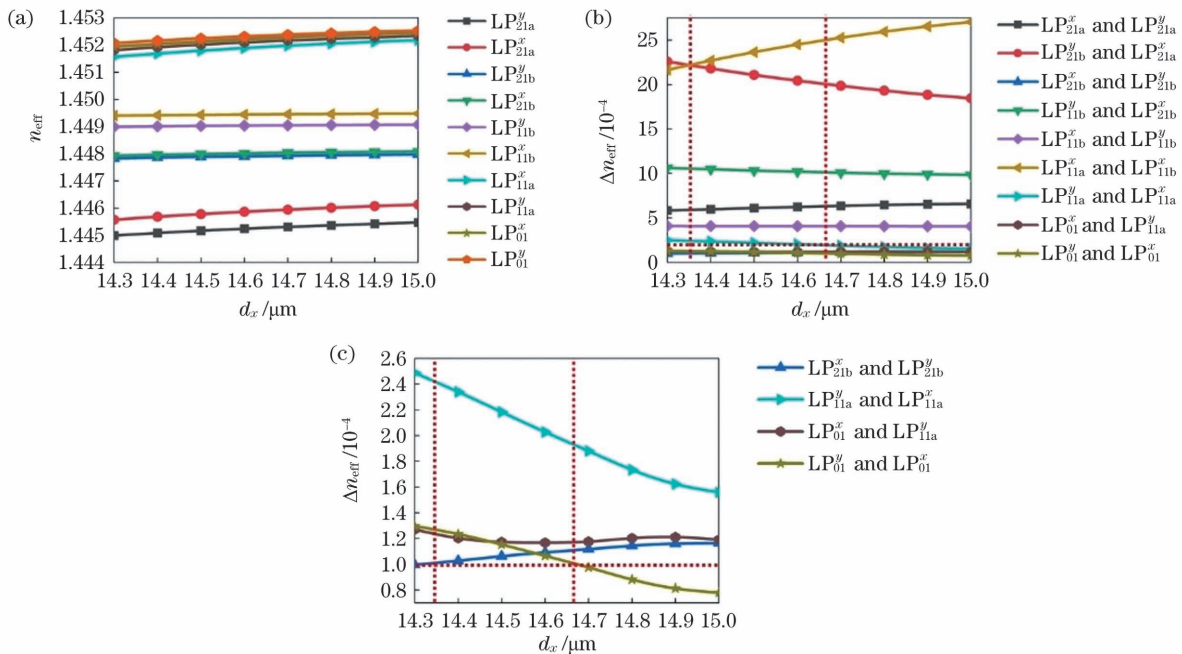


图 5 模式特性随 d_x 的变化。(a)有效折射率 n_{eff} 随 d_x 的变化;(b)有效折射率差 Δn_{eff} 随 d_x 的变化;(c)部分模式之间的 Δn_{eff} 随 d_x 的变化

Fig. 5 Variations of mode characteristics with d_x . (a) Variation of effective refractive index n_{eff} with d_x ; (b) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} with d_x ; (c) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} of partial modes with d_x

最后研究 d_y 对模式偏振特性的影响。令 $d_1 = 7 \mu\text{m}$, $d_2 = 7.6 \mu\text{m}$, $d_x = 14.5 \mu\text{m}$, $c_x = 7.2 \mu\text{m}$, $a_x/a_y = 1.4$, $c_x/c_y = 1.4$, $a_x/c_x = 0.36$ 。图 6(a)给出了光纤中 10 个模式的 n_{eff} 随 d_y 的变化。随着 d_y 增

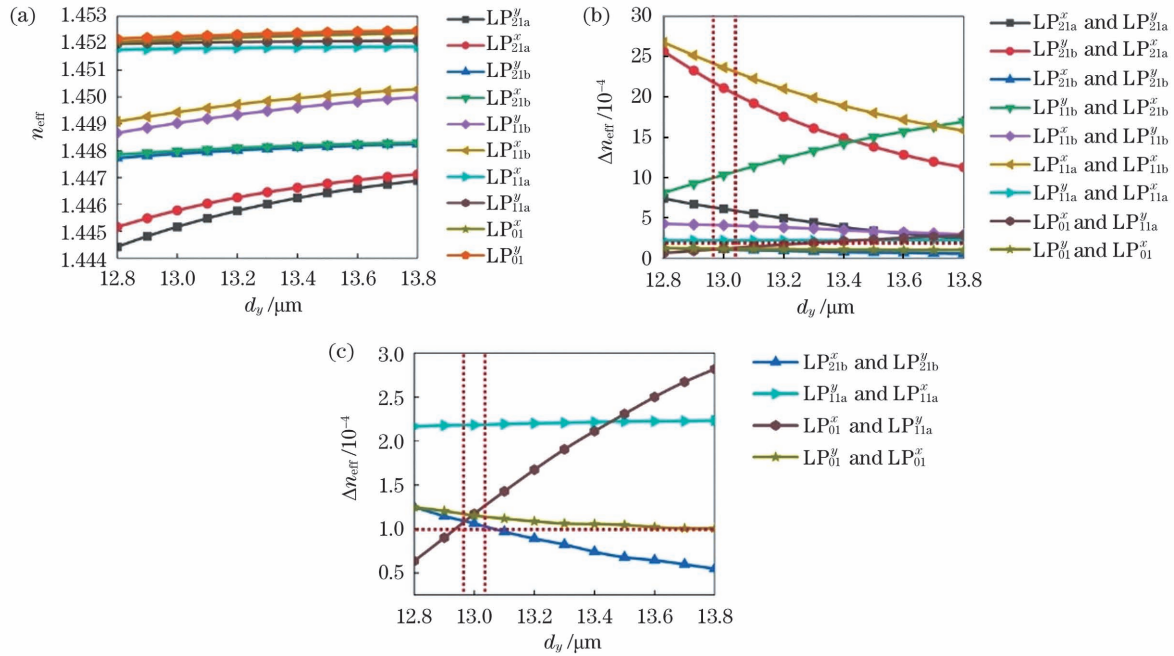


图 6 模式特性随 d_y 的变化。(a)有效折射率 n_{eff} 随 d_y 的变化;(b)有效折射率差 Δn_{eff} 随 d_y 的变化;(c)部分模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 随 d_y 的变化

Fig. 6 Variations of mode characteristics with d_y . (a) Variation of effective refractive index n_{eff} with d_y ; (b) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} with d_y ; (c) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} of partial modes with d_y

加,圆形空气孔对纤芯区域中传输模式的功率束缚能力减弱, Γ 减小,模场面积逐渐增大,因此,10个模式的 n_{eff} 值都逐渐增加。10个模式中的高阶模式 LP_{21a}^y 和 LP_{21a}^x 对 d_y 最敏感,这是因为 LP_{21a}^y 和 LP_{21a}^x 的模场能量主要集中在垂直方向。图 6(b)给出了所有相邻模式的 Δn_{eff} 曲线。为了方便观察,图 6(c)没有给出 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 的模间曲线,只给出了模式 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{01}^y 与 LP_{11a}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^y 与 LP_{21b}^x 之间的 Δn_{eff} 曲线。由图 6(c)可以看出,相比于模式 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x ,模式 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 以及 LP_{21b}^y 与 LP_{21b}^x 之间的 Δn_{eff} 对 d_y 更为敏感。随着 d_y 增加, LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 之间的 Δn_{eff} 较大幅度增加, LP_{21b}^y 与 LP_{21b}^x 模式之间的 Δn_{eff} 较大幅度减小,可以在合适的范围内选取 d_y 值,保证所有相邻模式之间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 。当 d_y 在 $12.96 \sim 13.04 \mu\text{m}$ 范围内取值时,光纤支持的 10 个模式间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} ,可以实现模式的偏振保持。后续研究选取 $d_y = 13 \mu\text{m}$ 。

3.2 椭圆环芯的尺寸和椭圆率

本节研究椭圆环芯的尺寸和椭圆率对模式偏振特性的影响。首先研究椭圆环芯长轴 c_x 的影响。令 $d_1 = 7 \mu\text{m}$, $d_2 = 7.6 \mu\text{m}$, $d_x = 14.5 \mu\text{m}$, $d_y = 13 \mu\text{m}$, $a_x/a_y = 1.4$, $c_x/c_y = 1.4$, $a_x/c_x = 0.36$ 。图 7(a)给出了光纤中 10 个模式的 n_{eff} 随椭圆环芯长轴 c_x 的变化。随着 c_x 增加,椭圆环芯的面积变大,因此各阶模式的 n_{eff} 值均逐渐增大。图 7(b)给出了所有相邻模式

的 Δn_{eff} 曲线。为了方便观察,图 7(c)没有给出 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 的模间曲线,只给出了 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^y 与 LP_{21b}^x 模式之间的 Δn_{eff} 曲线。由图 7(c)可知,相比于模式 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^y 与 LP_{21b}^x ,模式 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 之间的 Δn_{eff} 对 c_x 更为敏感,所以在满足模式 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 之间的 Δn_{eff} 大于 1.0×10^{-4} 的 c_x 值附近选取合适的值,可以保证所有相邻模式之间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 。当 c_x 在 $7.08 \sim 7.27 \mu\text{m}$ 范围内取值时,光纤支持的 10 个模式间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} ,可以实现模式的偏振保持。后续研究选取 $c_x = 7.2 \mu\text{m}$ 。

然后研究椭圆环芯的椭圆率 c_x/c_y 对模式偏振特性的影响。令 $d_1 = 7 \mu\text{m}$, $d_2 = 7.6 \mu\text{m}$, $d_x = 14.5 \mu\text{m}$, $d_y = 13 \mu\text{m}$, $c_x = 7.2 \mu\text{m}$, $a_x/a_y = 1.4$, $a_x/c_x = 0.36$ 。图 8(a)给出了光纤中各模式的 n_{eff} 随椭圆环芯椭圆率 c_x/c_y 变化的曲线。随着 c_x/c_y 增加,椭圆环芯的面积减小,因此各阶模式的 n_{eff} 值均逐渐减小。模式 LP_{21a}^y 在 c_x/c_y 大于 1.57 后截止,模式 LP_{21a}^x 在 c_x/c_y 大于 1.65 后截止,模式 LP_{21b}^y 和 LP_{21b}^x 在 c_x/c_y 大于 1.93 后截止。图 8(b)给出了所有相邻非截止模式的 Δn_{eff} 曲线。为了方便观察,图 8(c)没有给出 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 模间曲线,只给出了模式 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 以及 LP_{21b}^y 与 LP_{21b}^x 之间的 Δn_{eff} 曲线。由图 8(c)可知,模式 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 之间的 Δn_{eff} 对 c_x/c_y 较为敏感, LP_{01}^y 与 LP_{01}^x

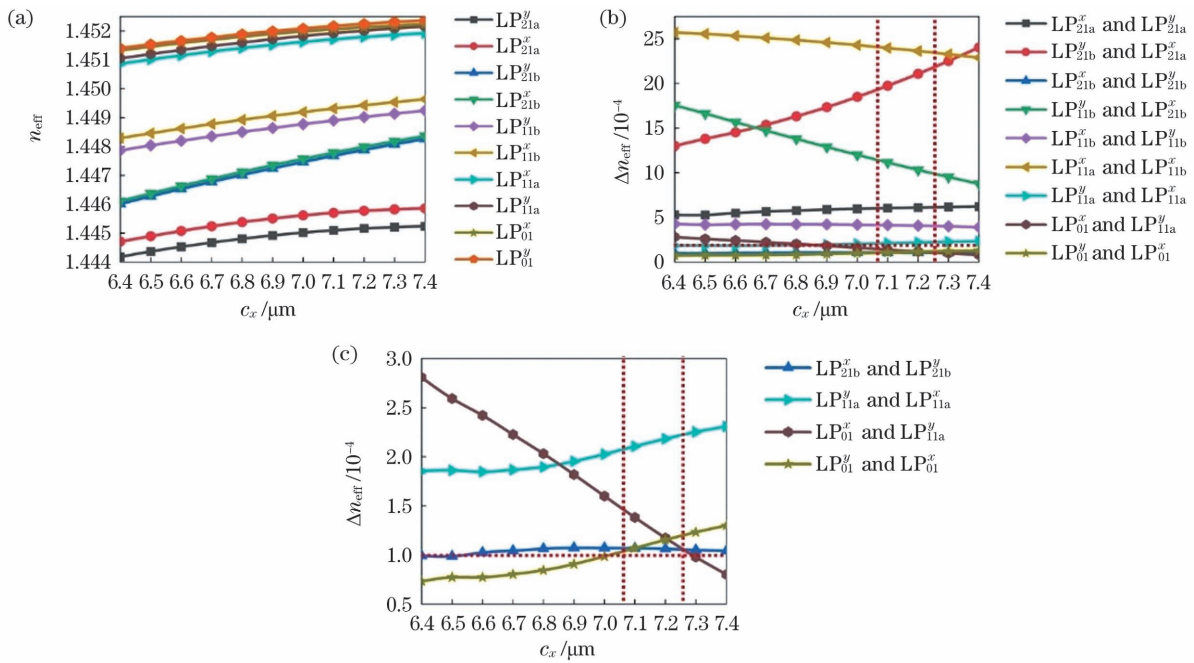


图 7 模式特性随 c_x 的变化。(a)有效折射率 n_{eff} 随 c_x 的变化;(b)有效折射率差 Δn_{eff} 随 c_x 的变化;(c)部分模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 随 c_x 的变化

Fig. 7 Variations of mode characteristics with c_x . (a) Variation of effective refractive index n_{eff} with c_x ; (b) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} with c_x ; (c) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} of partial modes with c_x

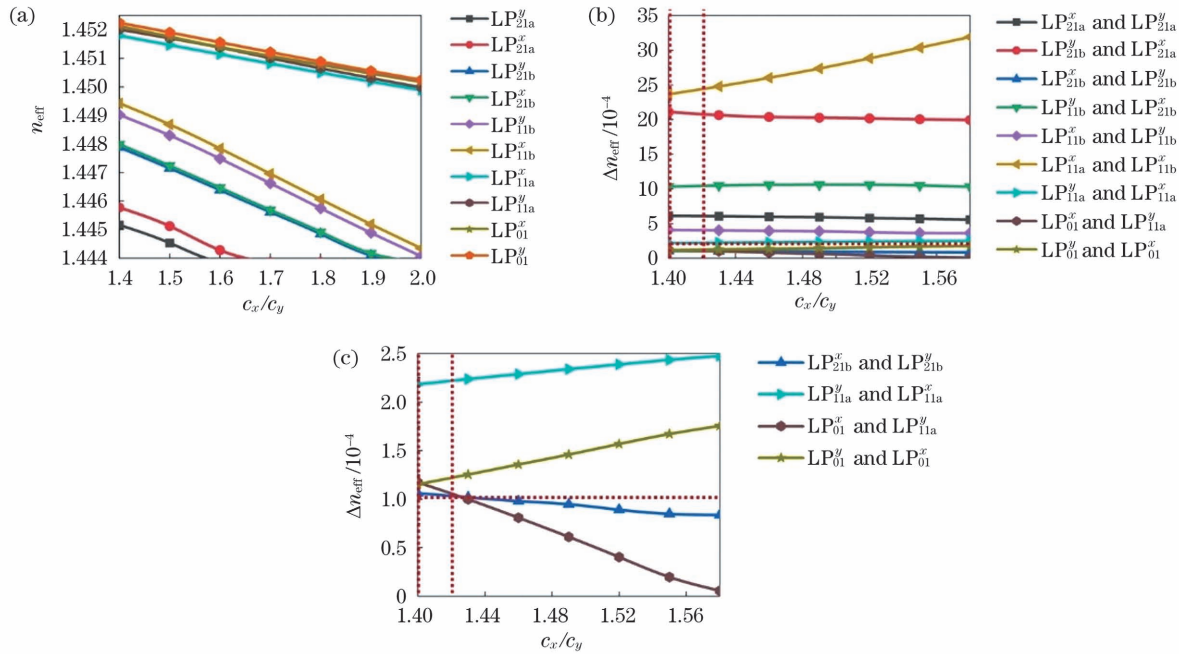


图 8 模式特性随 c_x/c_y 的变化。(a)有效折射率 n_{eff} 随 c_x/c_y 的变化;(b)有效折射率差 Δn_{eff} 随 c_x/c_y 的变化;(c)部分模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 随 c_x/c_y 的变化

Fig. 8 Variations of mode characteristics with c_x/c_y . (a) Variation of effective refractive index n_{eff} with c_x/c_y ; (b) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} with c_x/c_y ; (c) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} of partial modes with c_x/c_y

以及 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 之间的 Δn_{eff} 在仿真参数范围内始终大于 1.0×10^{-4} , 而模式 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 以及 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 之间的 Δn_{eff} 只有在 c_x/c_y 值较小时大于 1.0×10^{-4} 。当 c_x/c_y 在 1.40~1.42 范围内取值时, 光纤支

持的 10 个模式间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} , 可以实现模式的偏振保持。后续研究中选取 $c_x/c_y = 1.4$ 。

3.3 椭圆形空气孔的尺寸和椭圆率

本节研究椭圆形空气孔的尺寸和椭圆率对模式偏

振特性的影响。首先研究椭圆形空气孔尺寸(用 a_x/c_x 表示)的影响。保证椭圆环芯的尺寸不变,即令 $c_x=7.2\ \mu\text{m}$ 。其他参数为 $d_1=7\ \mu\text{m}$, $d_2=7.6\ \mu\text{m}$, $d_x=14.5\ \mu\text{m}$, $d_y=13\ \mu\text{m}$, $c_x/c_y=1.4$, $a_x/a_y=1.4$ 。图 9(a)给出了光纤中各模式的 n_{eff} 随椭圆形空气孔尺寸的变化。随着 a_x/c_x 增加,椭圆形空气孔的尺寸增大,椭圆环芯的尺寸减小,10 个模式的 n_{eff} 都减小。图 9(b)给出了所有相邻模式的 Δn_{eff} 曲线随椭圆形空气孔尺寸的变化。为了方便观察,图 9(c)没有给出 Δn_{eff}

都大于 1.0×10^{-4} 的模间曲线,只给出了模式 LP_{01}^x 与 LP_{01}^y 、 LP_{11a}^x 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 之间的 Δn_{eff} 随椭圆形空气孔尺寸的变化。由图 9(c)可以看出,相比于模式 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y ,模式 LP_{01}^x 与 LP_{01}^y 、 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^x 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 模式之间的 Δn_{eff} 对 a_x/c_x 更为敏感,其中模式 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 受 a_x/c_x 的影响最大。当 a_x/c_x 在 $0.35\sim 0.362$ 范围内时,光纤支持的 10 个模式间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} ,可以实现模式的偏振保持。后续研究中选取 $a_x/c_x=0.36$ 。

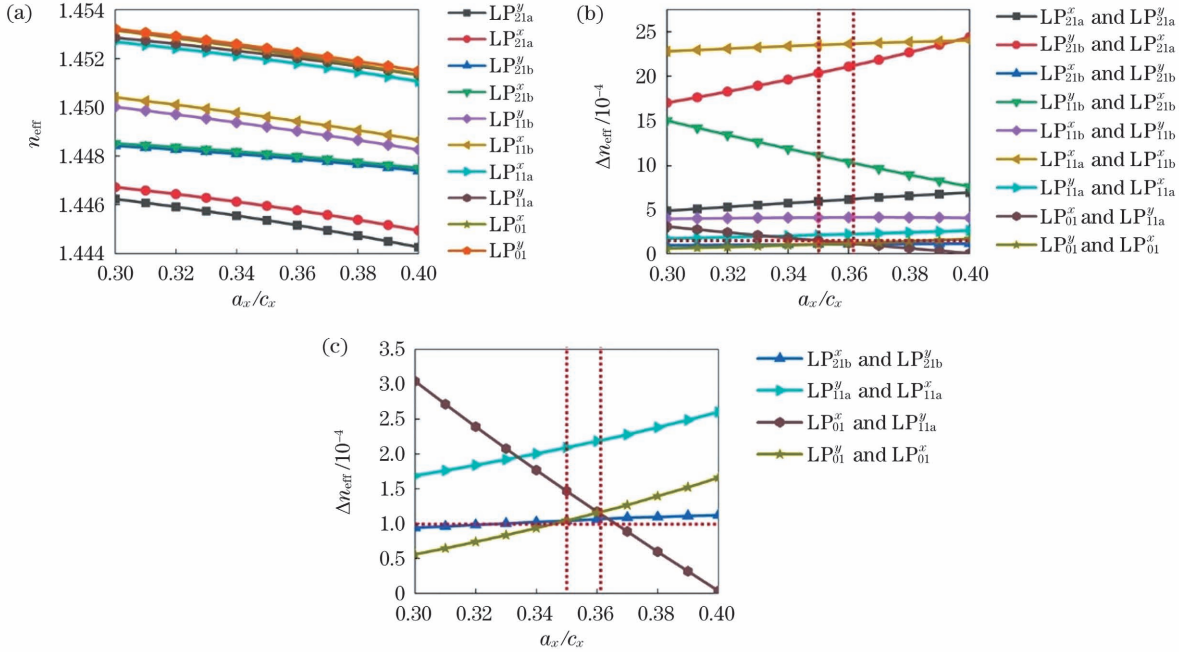


图 9 模式特性随 a_x/c_x 的变化。(a)有效折射率 n_{eff} 随 a_x/c_x 的变化;(b)有效折射率差 Δn_{eff} 随 a_x/c_x 的变化;(c)部分模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 随 a_x/c_x 的变化

Fig. 9 Variations of mode characteristics with a_x/c_x . (a) Variation of effective refractive index n_{eff} with a_x/c_x ; (b) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} with a_x/c_x ; (c) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} of partial modes with a_x/c_x

然后研究椭圆形空气孔的椭圆率(用 a_x/a_y 表示)对模式偏振特性的影响。令 $d_1=7\ \mu\text{m}$, $d_2=7.6\ \mu\text{m}$, $d_x=14.5\ \mu\text{m}$, $d_y=13\ \mu\text{m}$, $c_x=7.2\ \mu\text{m}$, $c_x/c_y=1.4$, $a_x/c_x=0.36$ 。图 10(a)给出了光纤中各模式的 n_{eff} 随椭圆形空气孔椭圆率的变化。随着椭圆率 a_x/a_y 增大,椭圆形空气区域的面积减小,椭圆环芯的面积增大,各阶模式的 n_{eff} 值均逐渐增大,其中模式 LP_{21a}^x 在 a_x/a_y 小于 1.08 时截止,模式 LP_{21a}^y 在 a_x/a_y 小于 1.18 时截止。图 10(b)给出了所有相邻模式之间的 Δn_{eff} 随椭圆率 a_x/a_y 的变化。为了方便观察,图 10(c)没有画出 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 的模间曲线,只给出了模式 LP_{01}^x 与 LP_{01}^y 、 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 之间的 Δn_{eff} 随椭圆率 a_x/a_y 的变化。由图 10(c)可知:相比于模式 LP_{01}^x 与 LP_{01}^y 、 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y ,模式 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 之间的 Δn_{eff} 对 a_x/a_y 更为敏感;模式 LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 以及模式 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 之间的 Δn_{eff} 在仿真参

数范围内基本都大于 1.0×10^{-4} 。在满足模式 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 之间的 Δn_{eff} 大于 1.0×10^{-4} 的 a_x/a_y 值附近取值,可以保证所有相邻模式之间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} 。当 a_x/a_y 在 $1.38\sim 1.42$ 范围内时,光纤支持的 10 个模式间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} ,可以实现模式的偏振保持。后续研究中选取 $a_x/a_y=1.4$ 。

所设计的光纤结构采用的是椭圆环芯(内部包含椭圆形空气孔),长轴沿 x 方向,短轴沿 y 方向。在研究椭圆环芯的椭圆率和椭圆形空气孔的椭圆率对模式传输性能的影响时,都是保持长轴不变,改变短轴的大小,从而改变椭圆率。这种设计结构要求在光纤预制棒拉丝过程中精准控制 y 轴方向的参数(d_2 、 d_y 、 a_y 、 c_y),制作误差须小于 $0.053\ \mu\text{m}$,而对 x 轴方向参数(d_1 、 d_x 、 c_x 、 a_x)有较大容差,制作误差不高于 $0.164\ \mu\text{m}$ 即可。

根据上述研究可以确定实现 10 个模式偏振保持传输的结构参数,即在波长 $1550\ \text{nm}$ 处,纤芯折射率 $n_{\text{core}}=1.460$,包层折射率 $n_{\text{cladding}}=1.444$,包层直径

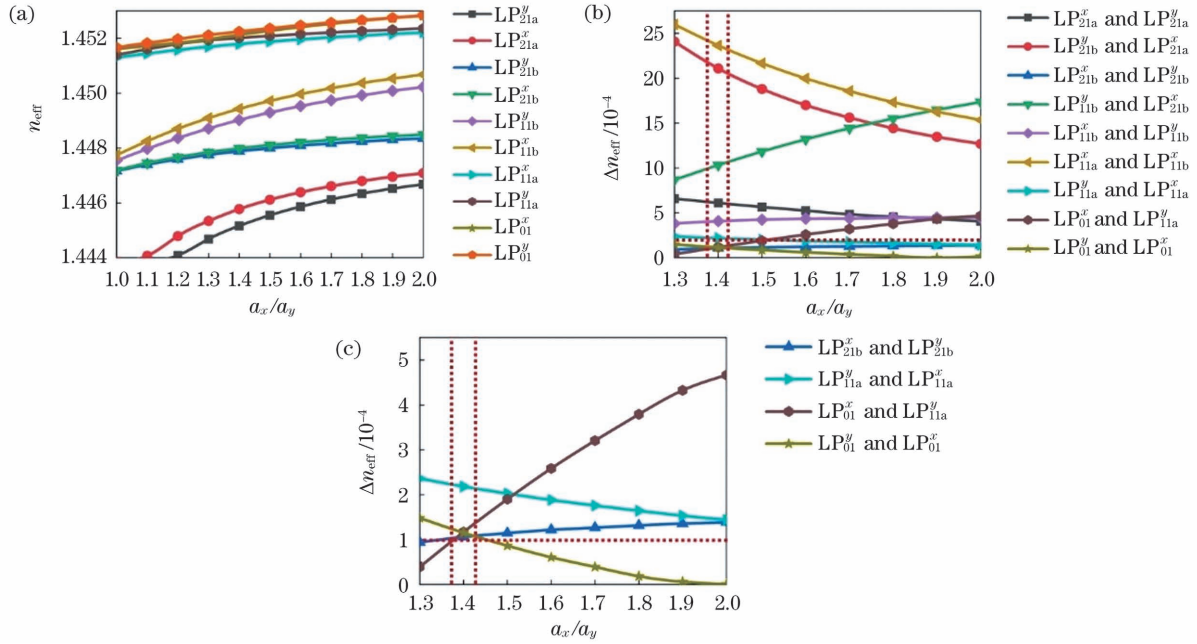


图 10 模式特性随 a_x/a_y 的变化。(a)有效折射率 n_{eff} 随 a_x/a_y 的变化;(b)有效折射率差 Δn_{eff} 随 a_x/a_y 的变化;(c)部分模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 随 a_x/a_y 的变化
 Fig. 10 Variations of mode characteristics with a_x/a_y . (a) Variation of effective refractive index n_{eff} with a_x/a_y ; (b) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} with a_x/a_y ; (c) variation of effective refractive index difference Δn_{eff} of partial modes with a_x/a_y

$D=125 \mu\text{m}$,沿 x 轴方向的圆形空气孔的半径 $d_1 = 7 \mu\text{m}$,沿 y 轴方向的圆形空气孔的半径 $d_2 = 7.6 \mu\text{m}$,沿 x 轴方向的圆形空气孔中心与环形纤芯中心的距离 $d_x = 14.5 \mu\text{m}$,沿 y 轴方向的圆形空气孔中心与环形纤芯中心的距离 $d_y = 13 \mu\text{m}$,椭圆环芯的长轴 $c_x = 7.2 \mu\text{m}$,椭圆环

芯的椭圆率 $c_x/c_y = 1.4$,椭圆形空气孔的尺寸 $a_x/c_x = 0.36$,椭圆形空气孔的椭圆率 $a_x/a_y = 1.4$ 。在上述参数下,所设计的光纤结构支持 10 个模式,并且各模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 都满足大于 1.0×10^{-4} 。图 11 为 10 个模式的归一化电场分布及其电场矢量。

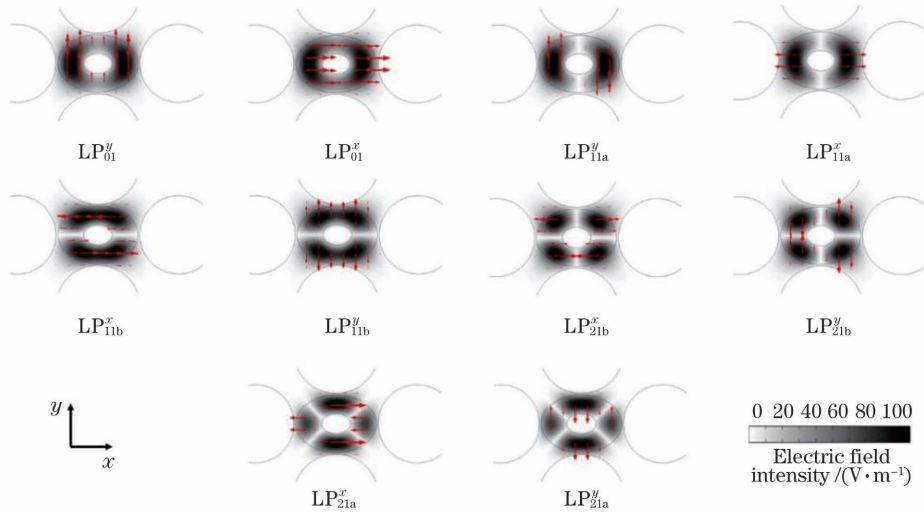


图 11 1550 nm 处空气孔辅助型椭圆环芯光纤中 10 个模式的归一化电场分布及其电场矢量
 Fig. 11 Normalized electrical field distributions with electric vectors (red arrows) of 10 modes in air hole-assisted elliptical-ring-core fiber at 1550 nm

4 S+C+L 通信波段的传输性能

采用优化的光纤结构参数,本节研究 10 个模式的波长依赖性。图 12(a)、(b)分别为 10 个模式的 n_{eff} 和 Δn_{eff} 在 S+C+L 通信波段(1460~1610 nm)的变化曲线,图 12(c)只给出了模式 LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 、 LP_{11a}^x 与 LP_{11a}^y 、

LP_{11a}^y 与 LP_{11a}^x 、 LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 之间的 Δn_{eff} 在 S+C+L 通信波段的变化曲线。由图 12(a)可以看出,当波长大于 1600 nm 时,模式 LP_{21a}^y 临近截止。由图 12(b)、(c)可知,各模式间的 Δn_{eff} 随着波长的增大而增大,当波长小于 1520 nm 时, LP_{21b}^x 与 LP_{21b}^y 模式之间的 Δn_{eff} 低于 1.0×10^{-4} 。这是因为当波长较小时,光纤中模式的数

量会增加(超过 10 个模式),模式间的 Δn_{eff} 减小,从而导致 Δn_{eff} 低于 1.0×10^{-4} 。在 1520~1600 nm 波长范围内(带宽 80 nm),所设计的空气孔辅助型偏振保持

FMF 支持的 10 个模式间的 Δn_{eff} 都大于 1.0×10^{-4} ,可以实现模式的偏振保持。同时,该波长范围内的色散为 17.6~51.3 ps/(nm·km),如图 12(d)所示。

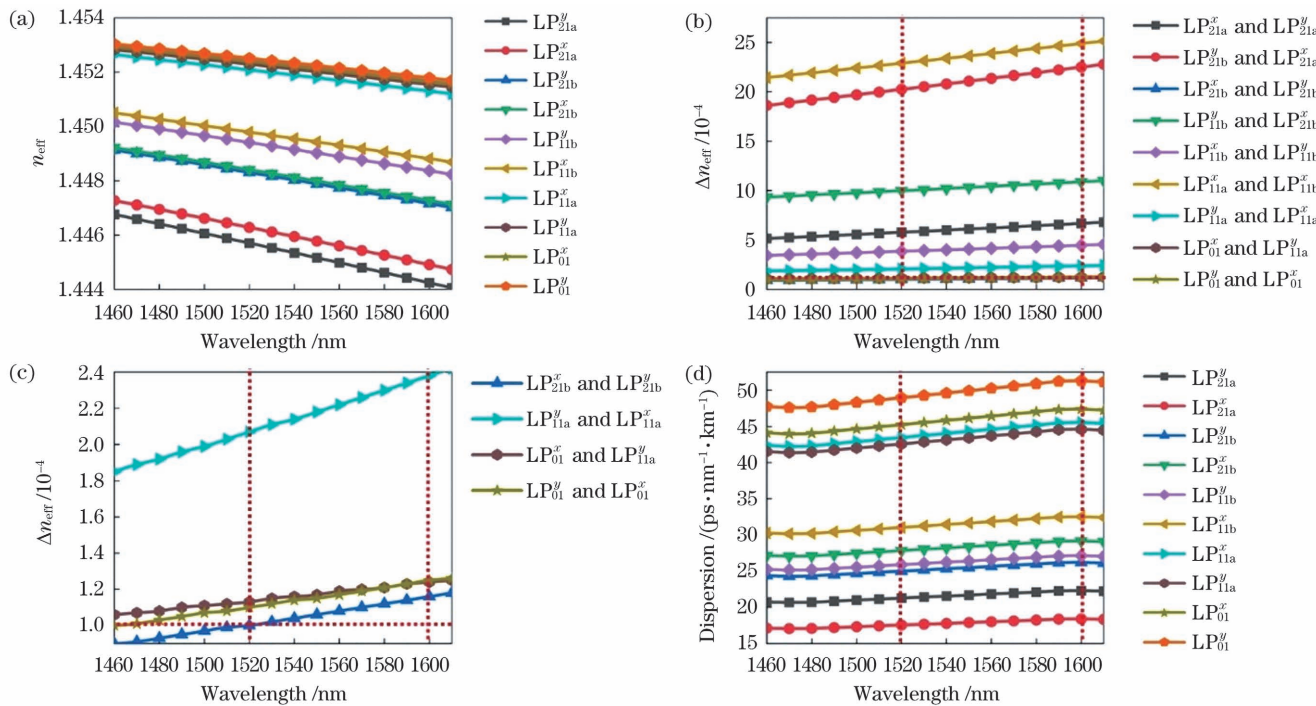


图 12 波长对模式特性的影响。(a)对有效折射率 n_{eff} 的影响;(b)对有效折射率差 Δn_{eff} 的影响;(c)对部分模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 的影响;(d)对色散的影响

Fig. 12 Effects of wavelength on mode characteristics. (a) Effect on effective refractive index n_{eff} ; (b) effect on effective refractive index difference Δn_{eff} ; (c) effect on effective refractive index difference Δn_{eff} of partial modes; (d) effect on dispersion

表 1 对比了所提光纤与其他文献报道的光纤的纤芯折射率(n_{core})、有效折射率差、模式数量、带宽和色散。由表 1 可以看出:所有光纤结构都可以实现模式间的 Δn_{eff} 高于 1.0×10^{-4} ,即实现模式间的偏振保持;文献[28]所提光纤的纤芯折射率为 1.457(略小于 1.460),但本文所提光纤支持的模式数量比其多;文献[29-30]所提光纤的纤芯折射率分别为 1.455 和 1.457,略低于本文所提光纤的纤芯折射率(1.460),而且其支持的模式数量与本文所提光纤相同,但本文所提光纤支持的传输带宽更大。另外,对比表 1 中各文献的数据可以看出,随着光纤支持的模式数量增加,带宽会受到一定限制,同时色散将在一定程度上增加。本文所提光纤的模式数量和带宽相比其他文献报道有一定程度的提升,而色散值与其他文献报道的相差不大,并且比文献[26-27]所提光纤的色散还有一定的改

善。虽然文献[26-27]所提光纤支持的模式数量多于本文所提光纤,但其带宽较小,纤芯折射率较高,纤芯掺杂浓度较高,而高掺杂纤芯会进一步增加制作成本。以纤芯折射率为 1.478 为例,由图 13 和图 12(b)可知部分高阶模式之间(LP_{11a}^x 与 LP_{11b}^x 之间以及 LP_{11b}^y 与 LP_{21b}^x 之间)的有效折射率差 Δn_{eff} 显著增加,而低阶模式之间(LP_{01}^y 与 LP_{01}^x 之间以及 LP_{01}^x 与 LP_{11a}^y 之间)的有效折射率差 Δn_{eff} 的增加仅为 10^{-6} 量级,这说明低阶模式受纤芯折射率变化的影响较小,主要受光纤结构参数的影响。综上,尽管提高纤芯折射率会增加模式间的有效折射率差 Δn_{eff} ,但对于低阶模式来说,有效折射率差 Δn_{eff} 的增加幅度很小,而且增加纤芯折射率将会不可避免地导致纤芯掺杂成本显著增加。为了平衡模式数量和纤芯掺杂成本,本文将纤芯折射率取值为 1.460。

表 1 所提光纤与其他文献报道的光纤的对比

Table 1 Comparison between proposed fiber and fibers reported in other references

| Reference | n_{core} | Δn_{eff} | Quantity of fiber mode | Bandwidth /nm | Dispersion /($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) |
|---------------|-------------------|-------------------------|------------------------|---------------|---|
| This research | 1.460 | $>10^{-4}$ | 10 | 80 | 17.6 to 51.3 |
| [29] | 1.455 | $>10^{-4}$ | 10 | 35 | 18 to 21 |
| [30] | 1.457 | $>10^{-4}$ | 10 | 75 | -32.6 to 35.3 |
| [28] | 1.457 | $>10^{-4}$ | 7 | 75 | 24.5 to 36.3 |
| [26] | 1.478 | $>10^{-4}$ | 14 | 75 | -70 to -10 |
| [27] | 1.478 | $>10^{-4}$ | 16 | 55 | -55 to 22 |

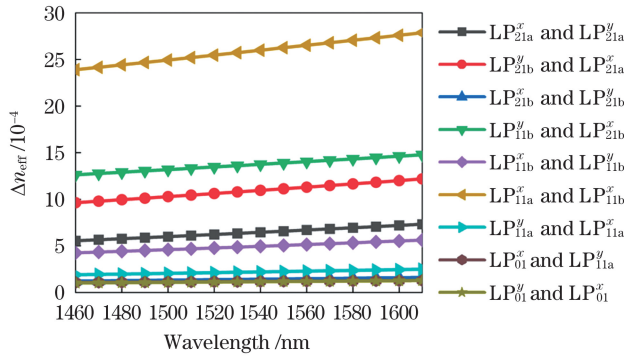


图 13 纤芯折射率 1.478 对应的模式有效折射率差 Δn_{eff} 随波长的变化

Fig. 13 Effective refractive index difference Δn_{eff} varies with wavelength, where the refractive index of core is 1.478

本文提出的光纤能够在保证支持较多模式(10 个模式)的同时较好地控制制作成本。这里需要指出的是,本文所提光纤结构中包含空气孔,这会增加光纤制作的复杂程度,制作成本比较高,而辅助空气孔的引入可以在一定程度上降低包层部分的折射率,在保证纤芯和包层折射率差不变的情况下,降低纤芯折射率,降低纤芯的掺杂成本。本文所提光纤的纤芯折射率为 1.460,纤芯中二氧化锗(GeO_2)的掺杂浓度较低,能以较小的掺杂成本实现 10 个模式无串扰传输。

综上所述,本文方案的优点是通过较低掺杂成本实现 10 个模式的无串扰传输,缺点是光纤结构比较复杂,制作工艺比较复杂。本研究侧重于空气孔辅助型偏振保持 FMF 的结构设计和优化,并提出了可行的制作方法,在具体的制作及测试上将综合考虑本方案的优缺点,并根据本文的理论工作在未来进一步开展实验研究。

5 结 论

本文提出一种空气孔辅助型偏振保持椭圆环芯 FMF。本文通过数值仿真研究了空气孔的尺寸和位置、环形纤芯的尺寸和椭圆率以及椭圆形空气孔的尺寸和椭圆率对模式传输性能的影响。经过参数优化设计得到了如下最优参数: x 轴方向的空气孔半径 $d_1 = 7 \mu\text{m}$, y 轴方向的空气孔半径 $d_2 = 7.6 \mu\text{m}$; x 轴方向圆形空气孔中心到环形纤芯中心的距离 $d_x = 14.5 \mu\text{m}$, y 轴方向圆形空气孔中心到环形纤芯中心的距离 $d_y = 13 \mu\text{m}$; 椭圆环芯的长轴 $c_x = 7.2 \mu\text{m}$, 椭圆环芯的椭圆率 $c_x/c_y = 1.4$; 椭圆形空气孔的尺寸 $a_x/c_x = 0.36$, 椭圆形空气孔的椭圆率 $a_x/a_y = 1.4$ 。所提光纤在 1520~1600 nm 波长范围内(即带宽为 80 nm)支持 10 个模式传输,并且所有相邻模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 都高于 1.0×10^{-4} ,可以实现模式的偏振保持传输。同时,所提光纤在 1520~1600 nm 波长范围内的色散为 17.6~51.3 ps/(nm·km)。本文所提 FMF 在大容量空分复用通信传输中具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Winzer P J. Scaling optical fiber networks: challenges and solutions[J]. Optics and Photonics News, 2015, 26(3): 28-35.
- [2] Schares L, Lee B G, Checconi F, et al. A throughput-optimized optical network for data-intensive computing[J]. IEEE Micro, 2014, 34(5): 52-63.
- [3] Ishio H, Minowa J, Nosu K. Review and status of wavelength-division-multiplexing technology and its application[J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, 2(4): 448-463.
- [4] Kawanishi S. Ultrahigh-speed optical time-division-multiplexed transmission technology based on optical signal processing[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(11): 2064-2079.
- [5] Winzer P J, Neilson D T, Chraplyvy A R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 24190-24239.
- [6] Li G F, Bai N, Zhao N B, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication [J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4): 413-487.
- [7] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 662-701.
- [8] Puttnam B J, Rademacher G, Luis R S. Space-division multiplexing for optical fiber communications[J]. Optica, 2021, 8(9): 1186-1203.
- [9] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106003.
Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003.
- [10] 裴丽, 李祉祺, 王建帅, 等. 空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106001.
Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106001.
- [11] Wang L X, LaRochelle S. Design of eight-mode polarization-maintaining few-mode fiber for multiple-input multiple-output-free spatial division multiplexing[J]. Optics Letters, 2015, 40(24): 5846-5849.
- [12] Chen H, Jin C, Huang B, et al. Integrated cladding-pumped multicore few-mode erbium-doped fibre amplifier for space-division-multiplexed communications [J]. Nature Photonics, 2016, 10(8): 529-533.
- [13] Saitoh K, Matsuo S. Multicore fiber technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 55-66.
- [14] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 521-531.
- [15] Chen S, Wang J. Design of PANDA-type elliptical-core multimode fiber supporting 24 fully lifted eigenmodes[J]. Optics Letters, 2018, 43(15): 3718-3721.
- [16] 薛宇勃, 李海粟, 刘亚静, 等. 偏振保持反谐振空芯光纤[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2326001.
Xue Y B, Li H S, Liu Y J, et al. Polarization-maintaining anti-resonant hollow-core optical fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2326001.
- [17] Agrell E, Karlsson M, Chraplyvy A R, et al. Roadmap of optical communications[J]. Journal of Optics, 2016, 18(6): 063002.
- [18] Tkach R W. Scaling optical communications for the next decade and beyond[J]. Bell Labs Technical Journal, 2010, 14(4): 3-9.
- [19] 李韦萍, 孔森, 余建军. 基于偏振复用光调制器产生 PDM-16QAM 射频信号[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2306002.
Li W P, Kong M, Yu J J. Generation of PDM-16QAM radio frequency signal based on a polarization multiplexing optical modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2306002.
- [20] Wang L X, Nejad R M, Corsi A, et al. Linearly polarized vector modes: enabling MIMO-free mode-division multiplexing [J].

- Optics Express, 2017, 25(10): 11736-11749.
- [21] Ramachandran S, Kristensen P. Optical vortices in fiber [J]. Nanophotonics, 2013, 2(5/6): 455-474.
- [22] Yaman F, Bai N, Zhu B Y, et al. Long distance transmission in few-mode fibers [J]. Optics Express, 2010, 18(12): 13250-13257.
- [23] van Putten L D, Fokoua E N, Mousavi S M A, et al. Exploring the effect of the core boundary curvature in hollow antiresonant fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(2): 263-266.
- [24] Chaudhuri S, van Putten L D, Poletti F, et al. Low loss transmission in negative curvature optical fibers with elliptical capillary tubes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(18): 4228-4231.
- [25] Maruyama R, Kuwaki N, Matsuo S, et al. Experimental investigation of relation between mode-coupling and fiber characteristics in few-mode fibers [C]//Optical Fiber Communication Conference, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015: M2C.1.
- [26] Zhao J J, Tang M, Oh K, et al. Polarization-maintaining few mode fiber composed of a central circular-hole and an elliptical-ring core [J]. Photonics Research, 2017, 5(3): 261-266.
- [27] Xiao H, Li H S, Jian S S. Hole-assisted polarization-maintaining few-mode fiber [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 107: 162-168.
- [28] Jiang S L, Ma L, Zhang Z P, et al. Design and characterization of ring-assisted few-mode fibers for weakly coupled mode-division multiplexing transmission [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23): 5547-5555.
- [29] Corsi A, Chang J H, Rusch L A, et al. Design of highly elliptical core ten-mode fiber for space division multiplexing with 2×2 MIMO [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 7202010.
- [30] Xie Y H, Pei L, Zheng J J, et al. Design of steering wheel-type ring depressed-core 10-mode fiber with fully improved mode spacing [J]. Optics Express, 2021, 29(10): 15067-15077.
- [31] Jung Y, Han S R, Kim S, et al. Versatile control of geometric birefringence in elliptical hollow optical fiber [J]. Optics Letters, 2006, 31(18): 2681-2683.
- [32] Kim B H, Lee S H, Lin A X, et al. Large temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on the birefringent holey fiber filled with metal indium [J]. Optics Express, 2009, 17(3): 1789-1794.
- [33] Moon D S, Kim B H, Lin A X, et al. The temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining side-hole fiber [J]. Optics Express, 2007, 15(13): 7962-7967.
- [34] Kim B H, Moon S, Paek U C, et al. All fiber polarimetric modulation using an electro-optic fiber with internal Pb-Sn electrodes [J]. Optics Express, 2006, 14(23): 11234-11241.
- [35] COMSOL Multiphysics [EB/OL]. [2021-03-06]. <https://cn.comsol.com/>.

Air Hole-Assisted Polarization-Maintaining Few-Mode Fiber Supporting 10 Modes

Xue Yubo, Li Haisu^{*}, Liu Yajing, Jie Lu, Zhang Yu, Jiang Youchao, Ren Guobin, Pei Li
*Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of EMC,
Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

Abstract

Objective With the emerging social media age, mobile communications, and cloud computing, the ever-increasing consumer demand for network capacity has exploded, which has brought enormous challenges to optical fiber communication systems. To enhance data transmission and all-optical network switching capabilities, an upgrade of the optical fiber is imperative. Multiplexing technologies like wavelength-division multiplexing and time-division multiplexing are currently being employed to expand the capacity of traditional single-mode fiber (SMF) based optic-transmission systems. However, the SMF has merged all degrees of freedom of light (including amplitude, phase, frequency, and polarization), achieving the nonlinear Shannon limit's maximal capacity. To solve the capacity barrier, space-division multiplexing (SDM) transmission has been studied in the recent decade. SDM technology has two efficient solutions: multicore fiber (MCF) and few-mode fiber (FMF). The MCF integrates numerous independent cores into a single fiber for parallel transmission and the multicore design increases manufacturing costs. Due to the intermode coupling, it is challenging to attain high core density. For FMF, each mode is a channel for independent signal transmission, which increases the single fiber's transmission capacity. In particular, polarization-maintaining FMF supporting several orthogonally polarized modes with a large separation of effective indices would realize low-crosstalk high-capacity communications. In this study, we report an air hole-assisted polarization-maintaining FMF, where high birefringence is attained using air holes assisted structure. The numerical simulation results revealed that a low-index core fiber can realize 10 polarization-maintaining modes. In the future, the proposed fiber can find applications in large-capacity SDM communication technology.

Methods The numerical model, i. e., the FMF's cross-sectional structure, was established by exploiting COMSOL Multiphysics based on the complete vector finite element approach. The perfectly matched layer, which matched the fiber cladding's wave impedance was placed to the periphery of the fiber to absorb electromagnetic waves at a boundary, simulating an infinite cladding size. In determining the size of the grid unit for a fiber cross-sectional structure's discretization, comprehensive consideration of factors like solution accuracy, calculation time, and hardware conditions

were required. To achieve accurate simulation results, the fiber cross-sectional area was divided into triangular mesh units with the maximum size of the mesh unit of one-fifth of the wavelength. Furthermore, Sellmeier's dispersion formula was included in the numerical model to analyze the proposed fiber's frequency-dependent performance, like, the dispersions over S, C, and L communication bands.

Results and Discussions An air hole-assisted FMF model was proposed (Fig. 1), in which an elliptical air hole was inserted in the center of the elliptical ring core, and four circular air holes of various sizes were placed in the horizontal and vertical directions, respectively. When appropriate values for structure parameters (the size and position of circular air holes, the size and ellipticity of ring-core, and the size and ellipticity of elliptical air hole) are selected at 1550 nm, numerical simulations shows that 10 modes can be transmitted with effective refractive index differences between two adjacent modes up to 10^{-4} , resulting in polarization-maintaining (Fig. 3–Fig. 10). Regarding the transmission performance in the S, C, and L communication bands (Fig. 12), the dispersions for 10 modes range from 17.6 ps/(nm·km) to 51.3 ps/(nm·km), and the effective refractive index differences between 1520 nm and 1600 nm are no less than 10^{-4} (the bandwidth is 80 nm). Furthermore, compared with other fibers reported in relevant literatures (Table 1), the proposed fiber has a larger bandwidth and the same level of dispersion. Further simulations showed that the high refractive index core would inevitably lead to a significant increase in the core doping cost while having less influence on the effective refractive index differences in the low-order modes (Fig. 13). Consequently, to balance the number of modes and the manufacturing cost, a low refractive index core is employed.

Conclusions In this study, an air hole-assisted polarization-maintaining FMF was proposed. The influences of the size (d_1, d_2) and position (d_x, d_y) of circular air holes, the size (c_x) and ellipticity (c_x/c_y) of ring-core, and the size (a_x/c_x) and ellipticity (a_x/a_y) of elliptical air holes on transmission performance were investigated exploiting numerical model. According to the simulation results, when $d_1 = 7 \mu\text{m}$, $d_2 = 7.6 \mu\text{m}$, $d_x = 14.5 \mu\text{m}$, $d_y = 13 \mu\text{m}$, $c_x = 7.2 \mu\text{m}$, $c_x/c_y = 1.4$, $a_x/c_x = 0.36$, $a_x/a_y = 1.4$, the proposed FMF supports 10 mode transmission between 1520 nm and 1600 nm (the bandwidth is 80 nm), and the effective refractive index differences between two adjacent modes are greater than 10^{-4} to attain polarization-maintaining transmission. Meanwhile, the dispersions for 10 modes range from 17.6 ps/(nm·km) to 51.3 ps/(nm·km). The proposed FMF may find applications for large-capacity SDM communication technology in the future.

Key words fiber optics; polarization-maintaining; air hole assistance; space division multiplexing; few-mode fiber