



面向模分复用的偏振保持领结型 椭圆芯少模光纤的设计*

慈英娟¹, 任 芳^{1,2}, 张金玉¹, 牛晶晶¹, 雷 晓¹, 张燕飞¹, 王晓晖¹

(1. 北京科技大学 计算机与通信工程学院, 北京 100083; 2. 北京市融合网络与泛在业务工程技术研究中心, 北京 100083)

摘 要: 提出了一种弱耦合领结型椭圆芯应力保偏少模光纤 (PM-FMF), 通过使用高折射率纤芯, 所提出的光纤可在 1505~1585 nm 波段下, 支持 32 个独立的本征模式。椭圆纤芯和领结型应力区的引入, 有效地分离了相邻的本征模式。采用有限元法对领结型椭圆芯应力 PM-FMF 的纤芯及领结型应力区的结构参数进行优化。评估了光纤参数对模式数量、模式间的最小有效折射率差、模态双折射、应力双折射以及弯曲损耗的影响。此外还分析了该光纤的带宽性能, 包括模式间的有效折射率、有效折射率差、差分模式时延 (DMD)。经数据分析, 在 1505~1585 nm 波段下, 该光纤支持的 32 个本征模式是完全分离的, 相邻模式之间的最小有效折射率差大于 1.295×10^{-4} 。所提出的弱耦合保偏少模光纤能够提高传输容量, 在本征模式复用传输中具有潜在的应用前景。

关键词: 少模光纤; 保偏光纤; 弱耦合; 模分复用; 双折射

中图分类号: TN252

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220105

Design of polarization-maintaining bow-tie elliptical-core few-mode fiber for mode-division-multiplexing

Ci Yingjuan¹, Ren Fang^{1,2}, Zhang Jinyu¹, Niu Jingjing¹, Lei Xiao¹, Zhang Yanfei¹, Wang Xiaohui¹

(1. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing Engineering and Technology Research Center for Convergence Network and Ubiquitous Service, Beijing 100083, China)

Abstract: We propose a weakly coupled polarization-maintaining few-mode fiber (PM-FMF) design with elliptical-core and bow-tie stress-applying areas. Using a high refractive index core, the proposed fiber can support 32 independent eigenmodes in the 1505–1585 nm band. The combination of the elliptical-core and bow-tie stress-applying area effectively separates the adjacent eigenmodes. The structural parameters of the elliptical-core and the bow-tie stress-applying area of the PM-FMF are optimized using the finite element method. The effects of fiber parameters on the number of modes, the minimum effective refractive index difference ($\Delta n_{\text{eff, min}}$) between modes, the mode birefringence B_m , the stress birefringence B_s , and the bending loss are evaluated. The bandwidth performance of the fiber is also analyzed, including the effective refractive index n_{eff} , Δn_{eff} and differential mode delay (DMD) between adjacent modes. The results indicate that 32 eigenmodes supported by the fiber are completely separated with $\Delta n_{\text{eff, min}}$ between adjacent modes larger than 1.295×10^{-4} in the 1505–1585 nm band. The fiber proposed can improve the transmission capacity and has potential applications in eigenmode multiplexing transmission.

Key words: few-mode fiber, polarization-maintaining fiber, weakly coupled, mode division-multiplexing, birefringence

目前, 由于移动网络和云服务需求的增加, 对通信系统的传输容量的要求也不断提高^[1-2]。单模光纤 (SMF) 通信系统的传输容量接近香农极限^[3], 不能满足日益增长的容量需求。为了提高通信系统容量, 少模光纤 (FMF) 和多芯光纤 (MCF) 的空分复用技术得到广泛的关注^[4-5]。虽然通过扩大包层直径或降低芯间距可以增加 MCF 的传输

* 收稿日期: 2022-04-12; 修订日期: 2022-06-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (FRF-BD-20-11A)

联系方式: 慈英娟, ciyingjuan@163.com

通信作者: 任 芳, renfang@ustb.edu.cn

容量,但是较大的包层会降低光纤的可靠性,较低的芯间距会带来强烈的串扰^[6-7],FMF无需考虑芯间串扰问题。同时,相较于多芯光纤,少模光纤可以与单模光纤更好地兼容,少模光纤应用到单模光纤系统中的拼接损耗较低^[8]。另外,FMF在传输容量、有效模场面积(即更低的非线性)方面,优于SMF^[9-10]。但是,在基于少模光纤的模分复用(MDM)系统中,存在相邻模式间的串扰,影响通信质量^[10]。对于通信的模间串扰问题,多输入多输出(MIMO)是一种普遍的解决方法,但其复杂性随模式数量的增加非线性增长,并且存在成本昂贵的问题^[10-11],这在短距离通信中是不可取的。此外,可通过增加相邻模式间的有效折射率差来改善甚至消除模式间的串扰问题,当有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$ 时,模间串扰得到有效的抑制^[12]。此外,由于包含两个正交本征模式的线偏振模式可以被分成两个独立的信道,因此本征模式可以成为无MIMO数字信号处理MDM传输的模式集,使系统容量加倍^[13]。基于此,Nicolas^[12]提出了椭圆芯少模光纤,分离了矢量模式,研究结果显示,偏振保持少模光纤在无MIMO的模分复用通信系统中可以成倍增加容量。

目前,已经有很多弱耦合PM-FMF被提出,比如,杨同心等^[14]提出了一种由三层气孔组成的新型孔辅助椭圆芯偏振少模光纤,其支持18个独立的本征模式,相邻模式间的最小有效折射率差为 1.21×10^{-4} ;腾飞等^[15]提出了一种利用神经网络实现熊猫型环芯保偏少模光纤,可支持10个本征模式,最小有效折射率差为 1.296×10^{-4} ;杜志勇等^[16]提出了一种分段环芯熊猫型保偏少模光纤,其可支持10个本征模式,相邻模式间的最小有效折射率差为 3.5×10^{-4} 。以上保偏少模光纤支持的模式数量少,折射率差小,扩展数十个模式是比较困难的。

本文提出了一种可支持32个本征模式的弱耦合领结型椭圆芯PM-FMF,其相邻模式之间最小有效折射率差在1550 nm下为 1.612×10^{-4} 。分离了相邻的矢量模式,提高了矢量模式的利用率,增加了通信系统的容量;此外椭圆芯和领结型应力区的结合,进一步扩大了相邻模式间的有效折射率差。我们分析了光纤参数对模式数量、最小有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff, min}}$ 、模态双折射 B_m 、应力双折射 B_s 以及弯曲损耗的影响,以及在1505~1585 nm波段下的32个模式的 n_{eff} 、 Δn_{eff} 以及DMD,并且计算了在1550 nm波长下的模式有效模场面积、差分模式时延和弯曲损耗。结果表明,所提出的光纤有较小的差分模式时延(在-11.045 ns/km到15.396 ns/km范围内),工作波长可以贯穿1505~1585 nm,在无MIMO数字信号处理MDM中具有提高传输容量的能力。

1 光纤设计

光纤的截面示意图以及折射率分布如图1所示,由椭圆型纤芯和领结型应力区组成,领结型应力区对称的放置在纤芯两侧。椭圆纤芯的长半轴和短半轴分别为 a 和 b 。椭圆度表示为 $\rho = a/b$ 。领结型应力区的内半径为 r ,宽度为 h ,扇形角为 θ 。

光纤包层的材料为纯二氧化硅,半径为62.5 μm ,根据Sellmeier方程^[17],在1550 nm处包层折射率 $n_{\text{clad}} = 1.444$,包层热膨胀系数 $\alpha_{\text{clad}} = 5.4 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 。光纤的应力区是由二氧化硅中掺杂摩尔分数为30%的氧化硼制成,根据混合Sellmeier方程^[18],在1550 nm处的应力折射率 $n_{\text{B}_2\text{O}_3} = 1.438$,应力区热膨胀系数 $\alpha_{\text{B}_2\text{O}_3} = 3.378 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。实验分析表明,光纤支持的模式数量与纤芯的尺寸以及纤芯折射率密切联系,纤芯的材料是在二氧化硅中掺杂二氧化锗,纤芯和包层的相对折射率差定义为 $\Delta = (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2) / 2n_{\text{core}}^2$,热膨胀系数为^[19]

$$\alpha_{\text{core}} = (1 - m)\alpha_{\text{SiO}_2} + m\alpha_{\text{GeO}_2} \quad (1)$$

式中: m 表示掺杂 GeO_2 的物质的量浓度。为了获得有效的折射率和本征模式的模场分布,可以采用全矢量有限元法进行数值分析。用于光纤建模的其他弹性材料参数来自于文献[19]。

1.1 纤芯参数优化

采用全矢量有限元法在波长为1550 nm下对光纤进行优化,我们首先优化纤芯的参数,图2显示了在 $\Delta = 0.0178$, $r = 10 \mu\text{m}$, $h = 9 \mu\text{m}$, $\theta = 84^\circ$ 的情况下,长半轴 a 和短半轴 b 对光纤所支持的 $\Delta n_{\text{eff, min}}$ 和模式数量的影响。仿真结果表明,当 $a = 7.4 \mu\text{m}$, $b = 5.4 \mu\text{m}$ 时,该光纤支持26个本征模式, $\Delta n_{\text{eff, min}} = 3.19 \times 10^{-4}$; $a = 8.8 \mu\text{m}$, $b = 6 \mu\text{m}$ 时,该光纤支持33个本征模式,但是 $\Delta n_{\text{eff, min}}$ 仅为 0.66×10^{-4} ; $a = 8.2 \mu\text{m}$, $b = 5.8 \mu\text{m}$ 时,该光纤支持32个本征模式, $\Delta n_{\text{eff, min}}$ 为 1.54×10^{-4} 。增加椭圆纤芯的椭圆度可以增加光纤支持的模式数量,但是随着椭圆度的增大,光纤的制作难度也随之增大,并且可能导致高阶模截止^[20]。综合考虑光纤性能和实际制造,选择 $a = 8.2 \mu\text{m}$, $b = 5.8 \mu\text{m}$ 作为纤芯的参数。此时光纤支

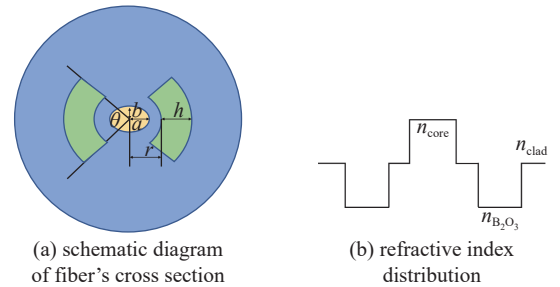


Fig. 1 Schematic diagram of fiber structure

图1 光纤的结构

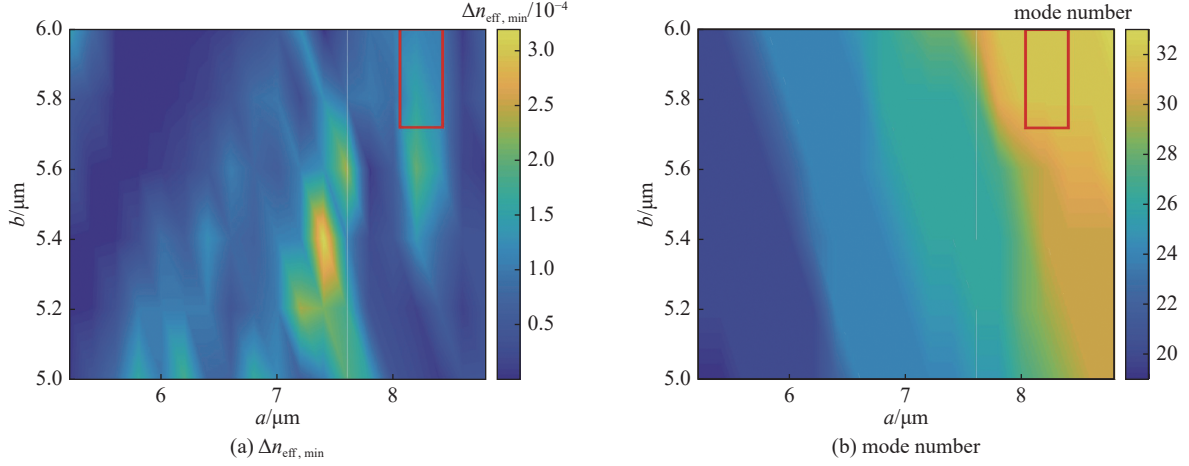


Fig. 2 Variations of the optical performance as a function of core size

图 2 纤芯尺寸对光纤性能的影响

持 32 个模式数量, $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 为 1.54×10^{-4} 。如图 2(a) 和 (b) 的红色矩形区域所示, 在 $8.1 \mu\text{m} \leq a \leq 8.4 \mu\text{m}$ 和 $5.6 \mu\text{m} \leq b \leq 6 \mu\text{m}$ 区域内均支持 32 个模式数量并且 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}} > 10^{-4}$ 。

为了优化光纤包层和纤芯间的相对折射率差, 固定椭圆纤芯 $a=8.2 \mu\text{m}$, $b=5.8 \mu\text{m}$, 应力区 $r=10 \mu\text{m}$, $h=9 \mu\text{m}$, $\theta=84^\circ$, 分析纤芯折射率对 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 和模式数量的影响, 如图 3 所示。结果显示, 随着 Δ 的增大, 光纤所支持的本征模式数量逐渐增多。当光纤支持 32 个本征模式时, 随着 Δ 的增加, $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 先增加再减小。 $\Delta=0.0162$ 时, $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 达到 2.223×10^{-4} , 但是所支持的本征模式仅为 27; $\Delta=0.0174$, 所支持的本征模式为 32 个, 但此时的 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 仅有 1.06×10^{-4} ; 当 $\Delta=0.0183$ 时, 所支持的本征模式为 32 个, $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 达到了 1.599×10^{-4} 。选取 $\Delta=0.0183$ 时为最优的方案, 此时支持 32 个模式数量, $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}=1.599 \times 10^{-4}$ 。此时, 纤芯的折射率可以通过在 SiO_2 中掺杂物质的量分数为 18.3% 的 GeO_2 得到, 对应的纤芯材料的热膨胀系数 $\alpha_{\text{core}}=1.7139 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 。

1.2 应力区参数优化

当光纤具有不对称的结构和应力作用区时, 需要分析其模态双折射 (B_m)。模态双折射包括几何双折射 (B_g) 和应力双折射 (B_s)。几何双折射是由电介质材料的几何形状造成的材料折射率的各向异性引起的; 应力双折射是由光弹效应引起的, 光纤材料各部分之间的热膨胀系数存在差异, 热胀冷缩过程中在材料内部产生热应力, 应力的存在使光纤产生应力双折射。 B_m 定义为^[19]

$$B_m = N_x - N_y = B_g + B_s = N_{x0} - N_{y0} + (C_1 - C_2)(\sigma_x - \sigma_y) \quad (2)$$

式中: N_x 和 N_y 是光纤受到应力时沿 x 和 y 方向的折射率, N_{x0} 和 N_{y0} 是材料中应力为零时沿 x 和 y 方向的折射率, σ_x 和 σ_y 分别是沿材料 x 和 y 方向的法向应力, C_1 和 C_2 是应力光学系数。其中 $B_s = (C_1 - C_2)(\sigma_x - \sigma_y)$ 应力区的设计同样会影响 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$, 并且在很大程度上影响光纤的应力双折射, 但是不会对光纤所支持的模式数量产生显著影响。为了优化应力区的结构尺寸, 我们分析了 r 、 h 和 θ 对 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 、 B_m 、 B_s 和弯曲半径 $R=76 \text{mm}$ 时沿 x 方向弯曲和沿 y 方向弯曲的弯曲损耗的影响。

在优化应力区结构参数 r 、 h 和 θ 时, 固定 $a=8.2 \mu\text{m}$, $b=5.8 \mu\text{m}$, $\Delta=0.0182$ 。如图 4 所示, 随着 r 、 h 和 θ 的增大, $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 几乎是先增大再减小。图 4 和图 5 的结果显示, 双折射 B_m 随 r 的增大逐渐减小, 随 h 的增大逐渐增大, 随 θ 的增大先增大在降低。 B_m 的变化与 B_s 的变化一致。沿 x 方向弯曲和沿 y 方向弯曲的弯曲损耗, 随着 r 的减小、 h 的增大以及 θ 的增大而增大。综合考虑 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 以光纤制造难度, 同时考虑较低的弯曲损耗, 选取 $r=10 \mu\text{m}$, $h=8.9 \mu\text{m}$, $\theta=84^\circ$ 。此时 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}=1.612 \times 10^{-4}$, 模态双折射 $B_m=4.74 \times 10^{-4} \text{N/m}^2$ 。

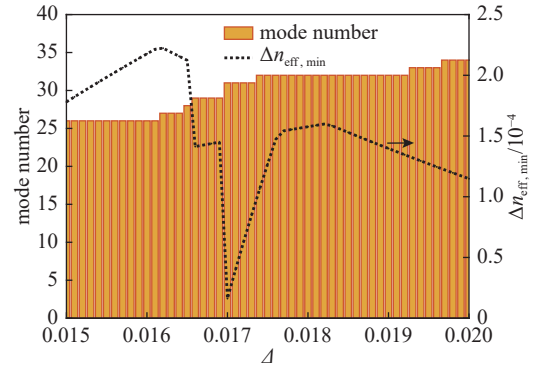

 Fig. 3 Variation of number of supported modes and $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ as a function of Δ

 图 3 光纤支持的模式数量和 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 随 Δ 的变化

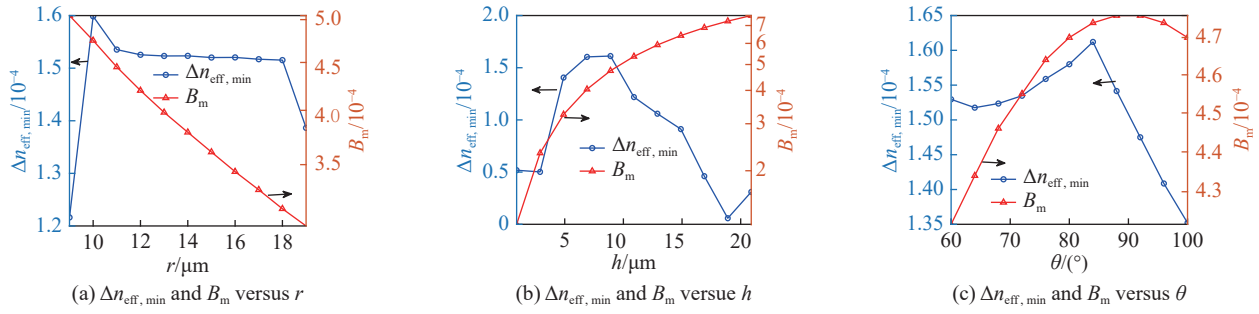


Fig. 4 Variation of the optical performance with stress-applying area parameters

图 4 光纤性能随应力区参数的变化

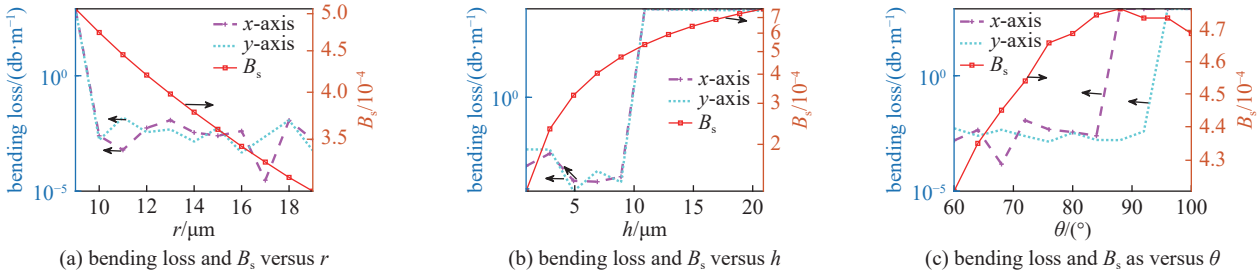


Fig. 5 Variation of the optical performance with stress-applying area parameters

图 5 应力区参数对光纤性能的影响

2 光纤性能分析

通过对光纤结构参数的优化,确定了领结型椭圆芯 PM-FMF 的椭圆纤芯的长半轴 $a=8.2\ \mu\text{m}$,短半轴 $b=5.8\ \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_{\text{core}}=1.4710$;领结型应力区的内半径 $r=10\ \mu\text{m}$,应力区厚度 $h=8.9\ \mu\text{m}$,应力区扇形角度 $\theta=84^\circ$ 。为了区分传统圆形芯少模光纤中的标量模式,用厄米-高斯模 (Hermite-Gaussian mode, HG_{mn} ; $m, n=0, 1, 2, \dots$) 来描述椭圆芯少模光纤支持的本征模式^[20]。

2.1 模式特征和双折射

图 6 显示了光纤在 1550 nm 处的 32 个本征模式的电场分布,电矢量方向由白色箭头表示,模式名称的上标的 x 和 y 表示电场的水平和垂直极化方向。表 1 计算了在 1550 nm 下的 32 个本征模式的特征,包括 n_{eff} 、 $\Delta n_{\text{eff},\text{min}}$ 、

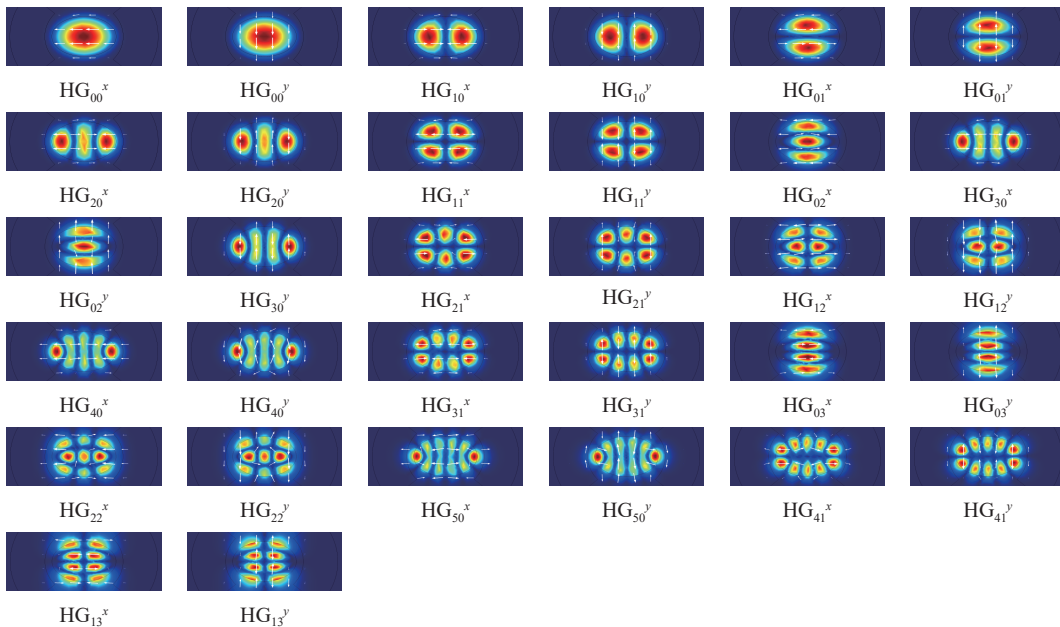


Fig. 6 Mode field distributions with electric vectors (white arrows) of the proposed bow-tie elliptical-core PM-FMF

图 6 所设计的椭圆纤芯领结型 PM-FMF 的 32 个本征模式的电场分布和电场矢量图 (白色箭头)

A_{eff} 和 DMD。32 个本征模式的 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 出现在 HG_{02}^y 和 HG_{30}^y 之间, $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}=1.612 \times 10^{-4}$ 。说明设计的领结型椭圆芯 PM-FMF 的相邻模式之间的 Δn_{eff} 都大于 1.612×10^{-4} , 32 个本征模式是完全独立的。

表 1 领结型椭圆芯 PM-FMF 中 32 个本征模式在 1550 nm 波长处的 n_{eff} 、 Δn_{eff} 、 A_{eff} 、DMD
Table 1 n_{eff} , Δn_{eff} , A_{eff} and DMD of the 32 eigenmodes for bow-tie elliptical-core PM-FMF at 1550 nm

mode	n_{eff}	$\Delta n_{\text{eff}}/10^{-4}$	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	$\delta_{\text{DMD}}/(\text{ns}/\text{km})$
HG_{00}^x	1.4683	4.803	90.96	1.727
HG_{00}^y	1.4678	18.878	90.88	-7.946
HG_{10}^x	1.4659	4.799	87.01	1.776
HG_{10}^y	1.4654	10.450	86.78	-4.804
HG_{01}^x	1.4644	4.932	80.48	1.627
HG_{01}^y	1.4639	14.081	80.72	-7.396
HG_{20}^x	1.4625	4.640	84.71	1.847
HG_{20}^y	1.4620	9.198	84.08	-4.247
HG_{11}^x	1.4611	5.033	87.21	1.684
HG_{11}^y	1.4606	23.286	87.53	-6.646
HG_{02}^x	1.4583	2.174	73.55	-3.479
HG_{30}^x	1.4580	2.888	85.34	5.077
HG_{02}^y	1.4578	1.612	74.48	-3.209
HG_{30}^y	1.4576	6.842	84.59	-3.450
HG_{21}^x	1.4569	4.931	89.15	1.768
HG_{21}^y	1.4564	25.223	89.04	-5.824
HG_{12}^x	1.4539	5.137	85.89	1.672
HG_{12}^y	1.4534	6.797	87.06	-8.065
HG_{40}^x	1.4527	4.354	88.85	2.089
HG_{40}^y	1.4523	4.015	88.74	-2.916
HG_{31}^x	1.4519	4.709	92.05	1.999
HG_{31}^y	1.4514	10.421	90.67	3.810
HG_{03}^x	1.4503	5.037	75.36	1.989
HG_{03}^y	1.4498	11.703	78.29	-9.013
HG_{22}^x	1.4487	4.956	93.59	1.924
HG_{22}^y	1.4482	15.794	94.47	-11.048
HG_{50}^x	1.4466	4.101	94.89	2.184
HG_{50}^y	1.4462	1.624	108.82	-2.394
HG_{41}^x	1.4460	4.353	110.14	1.893
HG_{41}^y	1.4456	2.601	94.49	15.396
HG_{13}^x	1.4453	4.811	105.19	3.261
HG_{13}^y	1.4448	-	110.30	-

图 7 显示了所设计的领结型椭圆芯 PM-FMF 的横截面上的几何和应力引起的双折射 (N_x-N_y)、法向应力 σ_x 和法向应力 σ_y 的分布情况。从图 7(a) 来看, 该领结型椭圆芯 PM-FMF 的最大模态双折射值 B_m 为 $9.78 \times 10^{-4} \text{ N/m}^2$, 椭圆纤芯中心的 B_m 为 $4.7366 \times 10^{-4} \text{ N/m}^2$, 从图 7(b) 和 (c) 得到, 椭圆纤芯中心的 σ_x 和 σ_y 分别为 $1.24 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 和 $-1.385 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, 应力双折射 $B_s = (C_1 - C_2)(\sigma_x - \sigma_y) = 3.7787 \times 10^{-4} \text{ N/m}^2$, 几何双折射 B_g 可以通过公式(2)计算出来, 为 $0.9579 \times 10^{-4} \text{ N/m}^2$ 。由于 B_s 远大于 B_g , 对于该保偏光纤而言, 应力双折射 B_s 对光纤模式双折射 B_m 起主要作用。

2.2 弯曲损耗

由于光纤是不对称的, 所以在不同的弯曲方向上, 弯曲损耗是不同的。如图 8 所示, 分别计算沿 x 和 y 方向弯曲, 不同弯曲半径 R 下的弯曲损耗。可以看出, 随着光纤弯曲半径 R 的减小, 高阶模式从纤芯漏入包层。在沿 x 或

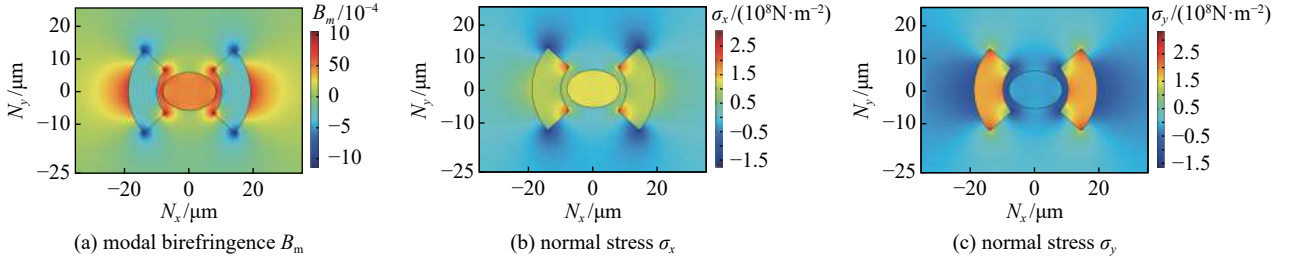


Fig. 7 Birefringence properties of optical fibers
图 7 光纤的双折射特性

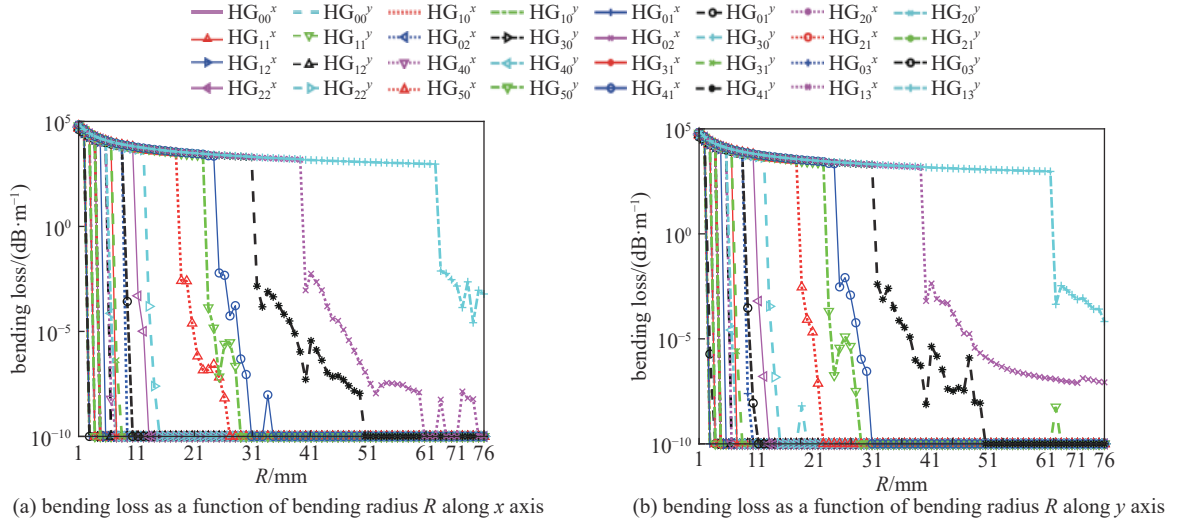


Fig. 8 Bending loss characteristics of optical fibers
图 8 光纤的弯曲损耗特性

y 方向弯曲的弯曲半径为 14 mm、28 mm 和 46 mm 时, 本征模式为 26、29 和 31 个。沿 x 方向弯曲的弯曲半径 $R > 74$ mm 时, 可以支持 32 个本征模式, 此时高阶模式的最小弯曲损耗为 2.605×10^{-5} dB/m。沿 y 方向弯曲的弯曲半径 $R > 76$ mm 时, 可以支持 32 个本征模式, 此时高阶模式的最小弯曲损耗为 6.682×10^{-5} dB/m。

2.3 带宽性能

图 9(a) 和 (b) 分别描述了 n_{eff} 和 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 随着波长的变化。发现所设计的光纤在 1505 nm 到 1585 nm 的波长范围内支持 32 个本征模式, 相邻的模式间 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ 出现在 1505 nm 时, 为 1.295×10^{-4} 。这表明, 所设计的光纤可以在 1505~1585 nm 波段工作。

在一定程度上, 短距离传输中光纤模式耦合与模间色散相互抑制, DMD 的大小可以定性地评价光纤的弱耦合性能。DMD 对于衡量短距离传输系统的计算复杂性和功耗非常重要。DMD 被定义为群时延 τ_B 减去 τ_A 的值, 即^[21]。

$$\delta_{\text{DMD}} = \tau_B - \tau_A = \frac{n_{g-B} - n_{g-A}}{c} = \frac{n_{\text{eff-B}} - n_{\text{eff-A}}}{c} - \frac{\lambda}{c} \left(\frac{\partial n_{\text{eff-B}}}{\partial \lambda} - \frac{\partial n_{\text{eff-A}}}{\partial \lambda} \right) \quad (3)$$

式中: n_{g-A} 和 n_{g-B} 是模式 A 和模式 B 的群折射率, $n_{\text{eff-B}}$ 和 $n_{\text{eff-A}}$ 是两个模式的有效折射率, c 是真空中光速, λ 指自由空间的波长。

表 1 为所设计的光纤在 1550 nm 的所有相邻特征模式之间的 DMD。此外, 我们分析了相邻模式的 DMD 对波长的依赖性。如图 10 所示, 所有的模式都表现出相对较小的 DMD(在 -11.045 ns/km 到 15.396 ns/km 范围内), 在短距离光通信链路中产生的功率损失可以忽略不计。在实际的通信系统中, 应该考虑所有模式之间的 DMD。为了简化所有模式之间 DMD 的分析, 以模式 HG_{00}^x 作为参考, 计算其他模式相对于 HG_{00}^x 的 DMD。计算得到最大 DMD 为 49.27 ns/km, 根据参考文献 [22], 在短距离传输系统中, 传输距离最远可达 3 km。因此, 这种光纤可以被认为是一种有前途的无 MIMO MDM 系统的候选光纤。

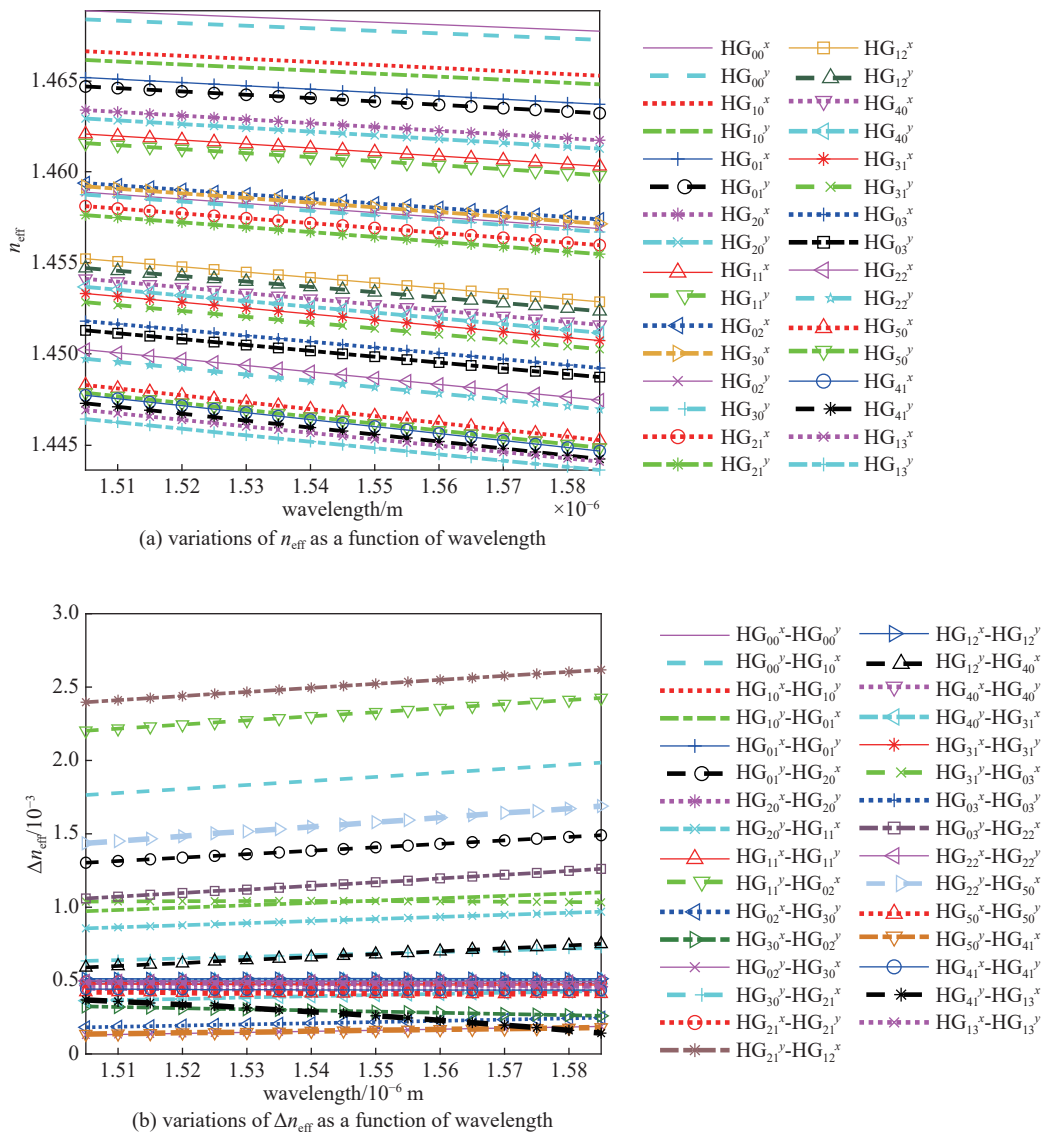


Fig. 9 Variations of the optical performance as a function of wavelength

图 9 光纤性能对波长的依赖性

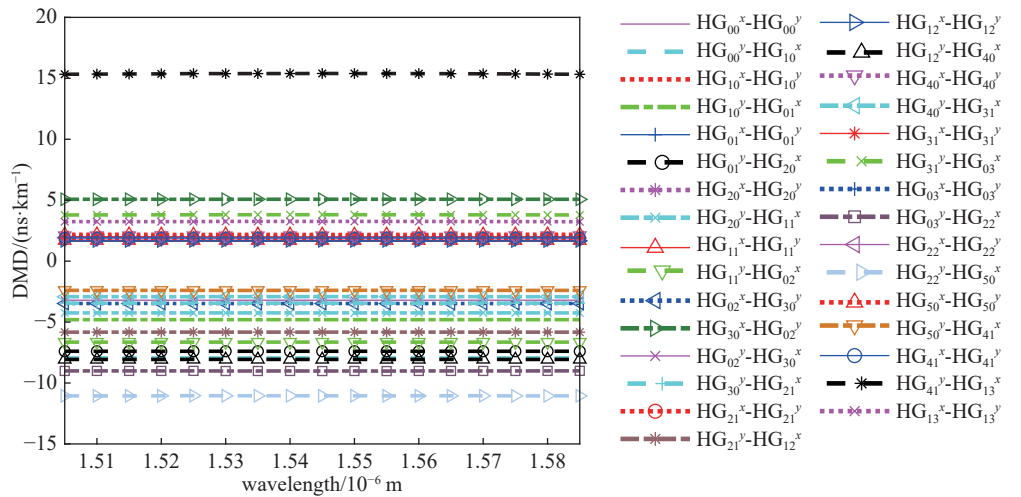


图 10 DMD 随波长的变化

3 结 论

本文提出并设计了一种弱耦合领结型椭圆芯 PM-FMF, 该光纤可支持 32 个独立的偏振保持本征模式。通过优化结构参数, 相邻模式之间的 Δn_{eff} 在 1550 nm 时大于 1.612×10^{-4} , 在 1505~1585 nm 波段下 Δn_{eff} 大于 1.295×10^{-4} , 很好地抑制了模式串扰。所提出的领结型椭圆芯 PM-FMF 的最大模态双折射值 B_m 为 9.78×10^{-4} N/m², 椭圆芯中心的模态双折射 B_m 约为 4.7366×10^{-4} N/m²。该光纤具有较小的差分模式时延 (在 -11.045 ns/km 到 15.396 ns/km 范围内), 以及较低的弯曲损耗 ($< 10^{-4}$ dB/m)。研究结果表明, 与现有的少模光纤相比, 所提出的弱耦合领结型椭圆芯保偏少模光纤能够有效地平衡模式数量与模式双折射, 提高模式的利用率, 从而成倍地增加模式数量, 提高传输容量, 在无 MIMO 短距离 DMD 光纤通信系统中具有潜在的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] Hossain S B, Rahman T, Stojanović N, et al. Transmission beyond 200 Gbit/s with IM/DD system for campus and intra-datacenter network applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(5): 263-266.
- [2] Behera B, Mohanty M N. Design of bend-limited large-mode area dispersion shifted few-mode fiber for fast communication[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Applied Machine Learning (ICAML). 2019.
- [3] 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.
- [4] Mizuno T, Miyamoto Y. High-capacity dense space division multiplexing transmission[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 35: 108-117.
- [5] Bigot-Astruc M, Boivin D, Sillard P. Design and fabrication of weakly-coupled few-modes fibers[C]//Proceedings of 2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. 2012.
- [6] Yang Yi, Mo Qi, Fu Songnian, et al. Panda type elliptical core few-mode fiber[J]. *APL Photonics*, 2019, 4: 022901.
- [7] Xiao Han, Li Haisu, Wu Beilei, et al. Elliptical hollow-core optical fibers for polarization-maintaining few-mode guidance[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 7-11.
- [8] Sun Yi, Lingle R, McCurdy A, et al. Few-mode fibers for mode-division multiplexing[C]//Proceedings of 2013 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. 2013: 80-81.
- [9] Zhao Jijia, Tang Ming, 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.
- [10] Zhang Jiwei, Wang Guorui, Zhang Han, et al. A weakly-coupled few-mode optical fiber with a graded concave high-index-ring[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13: 7200710.
- [11] LaRochelle S, Corsi A, Chang J H, et al. Polarization maintaining few mode fibers for space division multiplexing[C]//Proceedings of 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). 2018.
- [12] Riesen N, Love J D, Arkwright J W. Few-mode elliptical-core fiber data transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(5): 344-346.
- [13] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, et al. Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26117-26127.
- [14] Yang Tongxin, Zhang Hu, Xi Lixia, et al. Design of 18-mode hole-assisted elliptical-core polarization-maintaining few-mode fiber[J]. *Optics Communications*, 2022, 507: 127647.
- [15] Teng Fei, Jin Zhen, Chen Shuo, et al. Neural network for the inverse design of polarization-maintaining few-mode panda-type ring-core fiber[C]//Proceedings of 2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC). 2020: 1-3.
- [16] Du Zhiyong, Wang Chuncan, Li Peixin, et al. Fully degeneracy-lifted PANDA few-mode fiber based on the segmented ring-core[J]. *Optik*, 2022, 255: 168710.
- [17] Jundt D H. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_o , in congruent lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(20): 1553-1555.
- [18] Wemple S H, Pinnow D A, Rich T C, et al. Binary SiO₂-B₂O₃ glass system: refractive index behavior and energy gap considerations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(12): 5432-5437.
- [19] Guan Rongfeng, Zhu Fulong, Gan Zhiyin, et al. Stress birefringence analysis of polarization maintaining optical fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2005, 11(3): 240-254.
- [20] Milione G, Ip E, Ji P, et al. MIMO-less space division multiplexing with elliptical core optical fibers[C]//Proceedings of 2017 Optical Fiber Communication Conference. 2017.
- [21] Kasahara M, Saitoh K, Sakamoto T, et al. Design of three-spatial-mode ring-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1337-1343.
- [22] Hu Tao, Li Juhao, Ge Dawei, et al. Weakly-coupled 4-mode step-index FMF and demonstration of IM/DD MDM transmission[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8356-8363.