

面向传感应用的弱耦合偏芯少模光纤设计与分析

张金玉¹, 任芳^{1,2*}, 张艺赢¹, 范潇杰¹, 郝锐¹, 牛晶晶¹, 王建萍^{1,2}

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 利用有限元法研究了弱耦合偏芯少模光纤高阶模式的模场特性、隐失场特性及弯曲损耗。分析了光纤参数对相邻模式之间最小有效折射率差的影响, 并对偏芯光纤进行优化, 使其支持 10 个线偏振模式且满足弱耦合条件; 此外, 研究了波长为 1550 nm 条件下, 10 个线偏振模式的功率分布和弯曲损耗。研究表明, 在整个 C 波段, 相邻模式之间最小有效折射率差均大于 10^{-4} ; 且该光纤在高阶模式下表现出更强的隐失场强度、更高的传感灵敏度和更大的弯曲损耗, 同时可以区分特定的弯曲方向。这些研究结果对于提高传感器灵敏度有潜在的应用价值。

关键词 光纤光学; 少模光纤; 偏芯结构; 隐失场; 传感

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2406001

Design and Analysis of Weakly-Coupled Eccentric-Core Few-Mode Fiber for Sensing Application

Zhang Jinyu¹, Ren Fang^{1,2*}, Zhang Yiying¹, Fan Xiaojie¹, Hao Rui¹,
Niu Jingjing¹, Wang Jianping^{1,2}

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 Networks and Ubiquitous Services, Beijing 100083, China

Abstract In this paper, by virtue of a finite element method, we studied the mode field characteristics, evanescent field characteristics, and bending loss of a weakly-coupled eccentric-core few-mode fiber in higher-order modes. Furthermore, we investigated the influence of fiber parameters on the minimum effective refractive index difference between adjacent modes, and optimized the fiber to support 10 linearly polarized modes and satisfy the weak coupling condition. In addition, we analyzed the power distribution and bending loss of the 10 modes at the wavelength of 1550 nm. The research results indicate that the minimum effective refractive index difference between adjacent modes is larger than 10^{-4} over the whole C-band. Besides, the fiber shows higher evanescent field intensity, higher sensing sensitivity and larger bending loss in higher-order modes and can distinguish a specific bending direction. In conclusion, these results have potential application value for improving the sensitivity of sensors.

Key words fiber optics; few-mode fiber; eccentric core structure; evanescent field; sensing

OCIS codes 060.2310; 060.2280; 060.2400

1 引 言

光纤传感器因其灵敏度高、抗电磁干扰、绝缘、耐腐蚀、响应速度快等优点受到广泛关注^[1]。少模光纤(FMF), 与标准单模光纤(SMF)相比具有更低的非线性效应, 与传统多模光纤(MMF)相比具有更

低的模态色散效应^[2], 因此在传感领域得到了迅速发展。目前已经提出了许多用于应变、温度及曲率传感的少模光纤结构, 包括多芯光纤^[3-4]、光纤布拉格光栅(FBG)^[5-7]、D型光纤^[8]、长周期光栅^[9]、偏芯光纤(ECOF)^[10]等。

在这些少模光纤中, 偏芯光纤因为纤芯靠近包

收稿日期: 2020-07-23; 修回日期: 2020-08-27; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-BD-20-11A, FRF-TP-19-016A2)

* E-mail: renfang@ustb.edu.cn

层表面,不需要像 D 型光纤那样的侧抛光技术就可以产生很强的隐失场^[11]。最近几年,偏芯光纤因为其独特的优势而被广泛研究。如:燕山大学张颖等^[12-13]研究了单模偏芯光纤的传播特点、弯曲特性、隐失场特性;北京交通大学马林等^[14]提出了一种基于偏芯熔接结构的光纤振动传感器;Chen 等^[15]研究了光纤布拉格光栅与偏芯光纤相结合的高灵敏度弯曲传感器;Kong 等^[16]提出了一种新的基于偏芯光纤的马赫-曾德尔模态干涉仪(MZI),用于定向弯曲测量。然而,传统的偏芯光纤的高阶模式还未被讨论。

本文主要研究偏芯光纤高阶模式的模场特性和隐失场特性,优化设计光纤参数,使其支持 10 个线偏振(LP)模式且满足弱耦合的传输条件,同时分析

表征模式的隐失场特性的涂覆层功率密度、模式传感灵敏度和弯曲特性。最后的研究结果为提高传感器灵敏度提供了新途径。

2 光纤设计

偏芯光纤的横截面以及对应的折射率分布如图 1(a)和图 1(b)所示。偏芯光纤是纤芯偏离中心且靠近包层表面的特殊结构光纤,影响光纤特性的参数包括纤芯半径 R_1 、纤芯和包层的相对折射率差 Δ ,以及偏芯距离 L ,其中, $\Delta = (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2) / (2n_{\text{core}}^2)$, n_{core} 为纤芯折射率, n_{cladding} 为包层折射率。在模型分析中,设定包层材料为 SiO_2 ,其在波长为 1550 nm 下的折射率(n_{cladding})为 1.444,涂覆层的折射率(n_{coating})为 1,包层半径 R_2 为 $62.5 \mu\text{m}$ 。

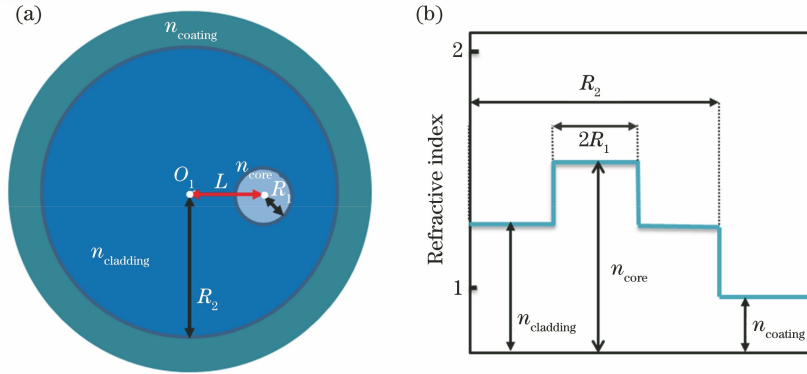


图 1 偏芯光纤结构图。(a)横截面图;(b)横截面折射率分布图

Fig. 1 Schematic diagram of ECOF structure. (a) Schematic of cross section; (b) refractive index profile

一般情况下,模式数量随着纤芯半径和相对折射率差的增大而增加,而当偏芯距离比较小时,模式的有效折射率不随偏芯距离变化而变化。因此,固定 $L = 39 \mu\text{m}$,分析光纤参数 R_1 和 Δ 对相邻模式之间最小有效折射率差($\min \Delta n_{\text{eff}}$)的影响。图 2 为不同纤芯半径和相对折射率差值下的 $\min \Delta n_{\text{eff}}$,其中下方曲线为 LP_{03} 模式的截止线,上方曲线为 LP_{32} 模式的截止线,两曲线之间区域对应的光纤参数支

持 10 个 LP 模式。初步计算 R_1 取 $9.0 \sim 13.0 \mu\text{m}$ 、 Δ 取 $0.70\% \sim 1.00\%$ 范围下的 $\min \Delta n_{\text{eff}}$,如图 2(a)所示,偏芯光纤可以支持 10 个模式且模式之间的有效折射率差大于 10^{-4} 。当光纤支持 10 个 LP 模式时, $\min \Delta n_{\text{eff}}$ 随 R_1 的增加先增大后减小,随 Δ 的增大而增大。当 R_1 取 $9.5 \sim 11.0 \mu\text{m}$, Δ 取 $0.85\% \sim 1.00\%$ 时, $\min \Delta n_{\text{eff}}$ 取值较大。为了尽可能降低模式之间的耦合,对图 2(a)中 $\min \Delta n_{\text{eff}}$ 取值较大的区

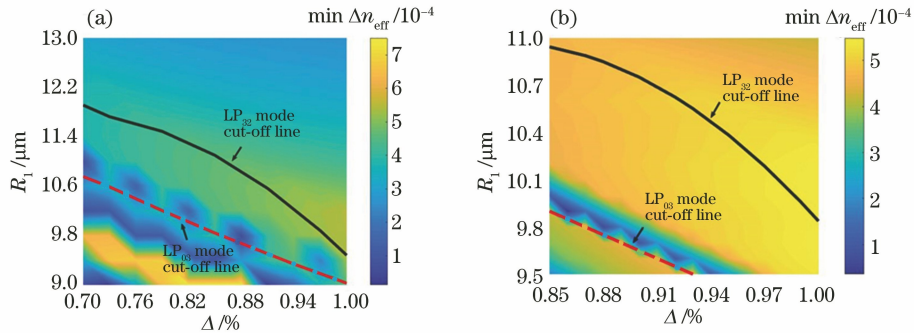


图 2 $\min \Delta n_{\text{eff}}$ 随纤芯半径 R_1 和相对折射率差 Δ 的变化

Fig. 2 Structural parameter $\min \Delta n_{\text{eff}}$ versus the core radius R_1 and relative refractive index difference Δ

域进行细化,如图 2(b)所示。我们发现,当 Δ 越靠近 1.00%,对应的 $\min \Delta n_{\text{eff}}$ 越大。考虑到光纤制造的可行性和模式质量,最后选择 Δ 为 0.94%,而与 $\min \Delta n_{\text{eff}}$ 最大值对应的 R_1 为 $10.2 \mu\text{m}$,此时 $\min \Delta n_{\text{eff}} = 5.162 \times 10^{-4}$ 。

图 3 为偏芯光纤在参数 $\Delta = 0.94\%$, $R_1 = 10.2 \mu\text{m}$ 时的 10 个空间模式模场分布。结果表明,

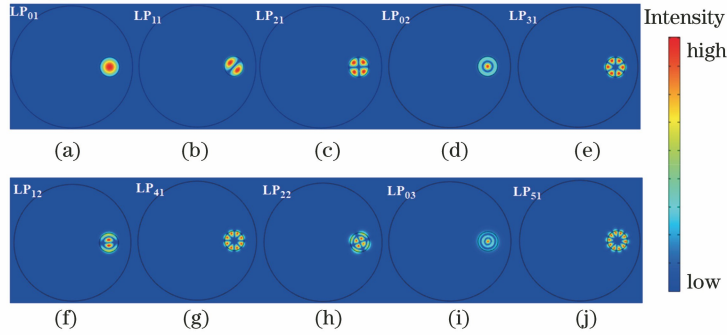


图 3 相对折射率差 $\Delta = 0.94\%$, 纤芯半径 $R_1 = 10.2 \mu\text{m}$ 条件下的 10 个模式的模场分布

Fig. 3 Mode field distribution of ten modes at the core radius $R_1 = 10.2 \mu\text{m}$ and relative refractive index difference $\Delta = 0.94\%$

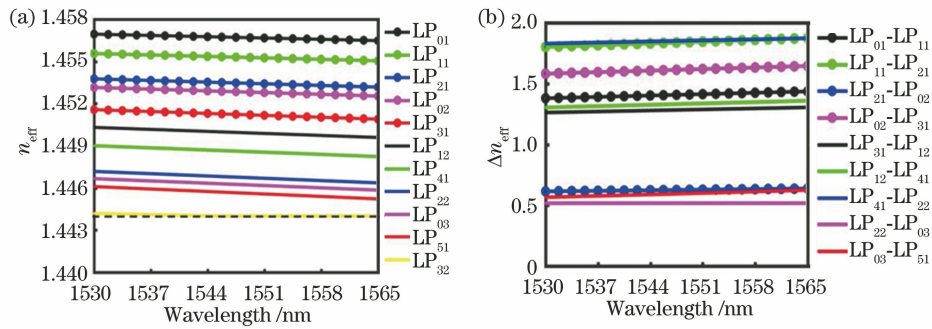


图 4 相对折射率差 $\Delta = 0.94\%$, 纤芯半径 $R_1 = 10.2 \mu\text{m}$ 条件下,有效折射率和波长的关系。

(a) n_{eff} 随波长的变化; (b) Δn_{eff} 随波长的变化

Fig. 4 Relationship between effective refractive index and wavelength at $R_1 = 10.2 \mu\text{m}$ and $\Delta = 0.94\%$.

(a) Variation of n_{eff} with wavelength; (b) variation of Δn_{eff} with wavelength

有效面积 (A_{eff}) 的增加有利于降低非线性效应,同时对弯曲的灵敏度也较高。考虑到适用性,采用广义公式计算该光纤的 A_{eff} ,其定义为^[17]

$$A_{\text{eff}} = \left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2 / \iint |E|^4 dx dy. \quad (1)$$

最后,10 个模式的有效面积的计算结果如下。LP₀₁ 模式为 $197.36 \mu\text{m}^2$, LP₁₁ 模式为 $67.73 \mu\text{m}^2$, LP₂₁ 模式为 $268.91 \mu\text{m}^2$, LP₀₂ 模式为 $158.69 \mu\text{m}^2$, LP₃₁ 模式为 $259.79 \mu\text{m}^2$, LP₁₂ 模式为 $59.03 \mu\text{m}^2$, LP₄₁ 模式为 $222.73 \mu\text{m}^2$, LP₂₂ 模式为 $210.31 \mu\text{m}^2$, LP₀₃ 模式为 $178.67 \mu\text{m}^2$, LP₅₁ 模式为 $237.37 \mu\text{m}^2$ 。

3 隐失场特性

由于偏芯光纤纤芯靠近包层表面,外界物质与

该光纤能够很好地支持高阶模式。另外,研究了该光纤模式随波长的变化。图 4(a)和图 4(b)分别为 n_{eff} 和 Δn_{eff} 随波长为 1530~1565 nm 范围的变化曲线。图 4(a)中黑色圆圈曲线为模式的截止线,在整个 C 波段,该光纤可以支持 10 个模式。如图 4(b)所示,在 1530 nm 处,LP₂₂ 和 LP₀₃ 模式之间的 Δn_{eff} 最小,为 5.1551×10^{-4} ,实现了 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$ 。

纤芯渗透的光(隐失光)会发生相互作用,从而引起光纤中模场和功率的变化,所以定义隐失场传感灵敏度 r 为^[18]

$$r = (n_r/n_e) \times f, \quad (2)$$

其中, n_r 为被检测物质的折射率, n_e 为光纤导模的有效折射率, f 为隐失场的光强占总光强的百分比。

不同的偏芯距离下 10 个模式的有效折射率变化曲线如图 5 所示。结果表明,模式的有效折射率随偏芯距离的增大而减小。当 L 分别小于 47.3, 46.3, 47.3, 49.3, 49.3, 50, 50, 50.3, 50.5 μm 时,对应的 LP₅₁、LP₀₃、LP₂₂、LP₄₁、LP₁₂、LP₃₁、LP₀₂、LP₂₁、LP₁₁、LP₀₁ 模式的有效折射率不再发生变化,这一有效折射率等同于普通光纤模式的有效折射

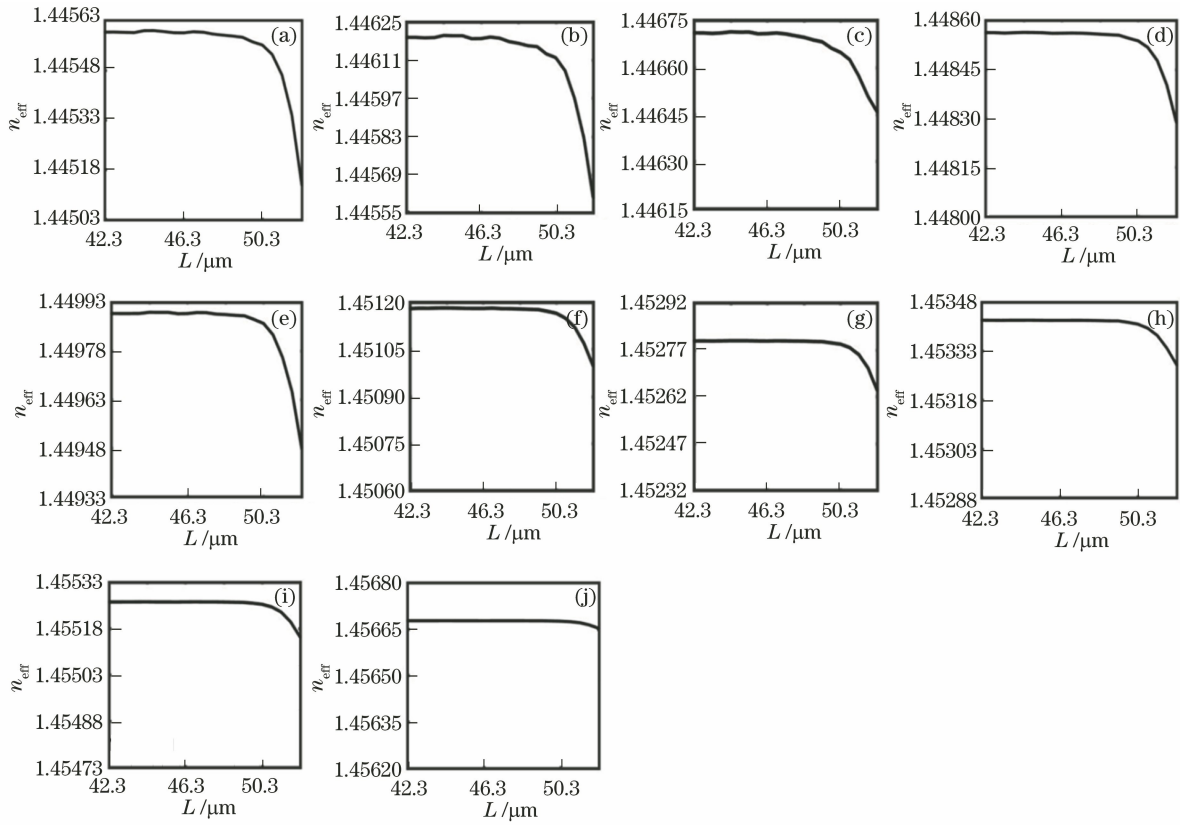


图 5 10 个模式的有效折射率与偏芯距离的关系。(a) LP_{51} ; (b) LP_{03} ; (c) LP_{22} ; (d) LP_{41} ; (e) LP_{12} ; (f) LP_{31} ; (g) LP_{02} ; (h) LP_{21} ; (i) LP_{11} ; (j) LP_{01}

Fig. 5 Relationship between the effective refractive index of ten modes and eccentric distance. (a) LP_{51} ; (b) LP_{03} ; (c) LP_{22} ; (d) LP_{41} ; (e) LP_{12} ; (f) LP_{31} ; (g) LP_{02} ; (h) LP_{21} ; (i) LP_{11} ; (j) LP_{01}

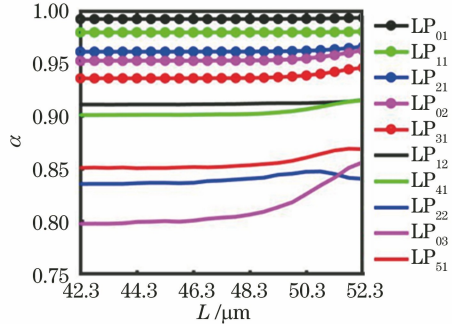
率。可以发现,越高阶的模式对应的偏芯距离越小,这意味着,偏芯距离对高阶模式的有效折射率的影响更为显著。值得注意的是,因为模场的不稳定性, LP_{12} 模式的曲线更加陡峭。

涂覆层的隐失场的归一化光强度为^[19]

$$\eta = P_{\text{coating}}/P_{\text{total}}, \quad (3)$$

其中 P_{coating} 为涂覆层的光功率, P_{total} 为光纤的总功率。而纤芯区域的归一化光强度为

$$\alpha = P_{\text{core}}/P_{\text{total}}, \quad (4)$$



其中 P_{core} 为纤芯区域的光功率。图 6(a)和图 6(b)分别为纤芯区域和涂覆层区域的归一化光强度随偏芯距离的变化曲线。由图 6(a)可以看到,随着 L 的增大,10 个模式的 α 均大于 0.8。这表明,尽管纤芯靠近包层表面,纤芯中少量的光能量泄露,但是传输能量大部分仍然被束缚在纤芯中并沿着纤芯向前传播。当 L 大于 $48.3 \mu\text{m}$ 时,曲线波动增大。图 6(b)的仿真结果表明,当 L 大于 $50.3 \mu\text{m}$ 时,5 个高阶模式的 η 迅速增加,最大值在 LP_{03} 模式上

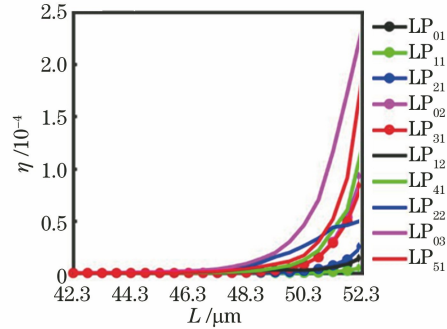


图 6 归一化强度与偏芯距离的关系。(a)纤芯区域;(b)涂覆层区域

Fig. 6 Relationship between normalized intensity and eccentric distance. (a) Core region; (b) coating region

取得,为 2.32×10^{-4} 。即偏芯距离越大,模式的隐失场越强。同时,高阶模式比低阶模式有更强的隐失场。这是由于纤芯不能很好地束缚高阶模式的能量,纤芯中的能量逐渐渗入到包层中,导致能量损失增大,衰减系数减小,从而影响“隐失场特性”。

为了进一步研究隐失场随外界环境的变化情况,仿真了不同偏芯距离下,隐失场归一化光强度 η 随涂覆层折射率的变化曲线,如图 7 所示。当纤芯

靠近包层表面时, η 随涂覆层折射率的增大而增大。在涂覆层折射率为 1.44、 $L=52.3 \mu\text{m}$ 处, η 可以在 LP_{03} 模式处取得最大值,为 0.020383。而当 $L=0 \mu\text{m}$ 时, η 几乎不随涂覆层折射率的改变而变化,且在 LP_{51} 模式处取得最大值 $\eta=1.103 \times 10^{-11}$,隐失场能量非常小。由仿真结果可以看出,随着偏芯距离 L 、模式阶数和涂覆层折射率的增加,隐失场能量增强,这表明隐失场对外界环境更加敏感。

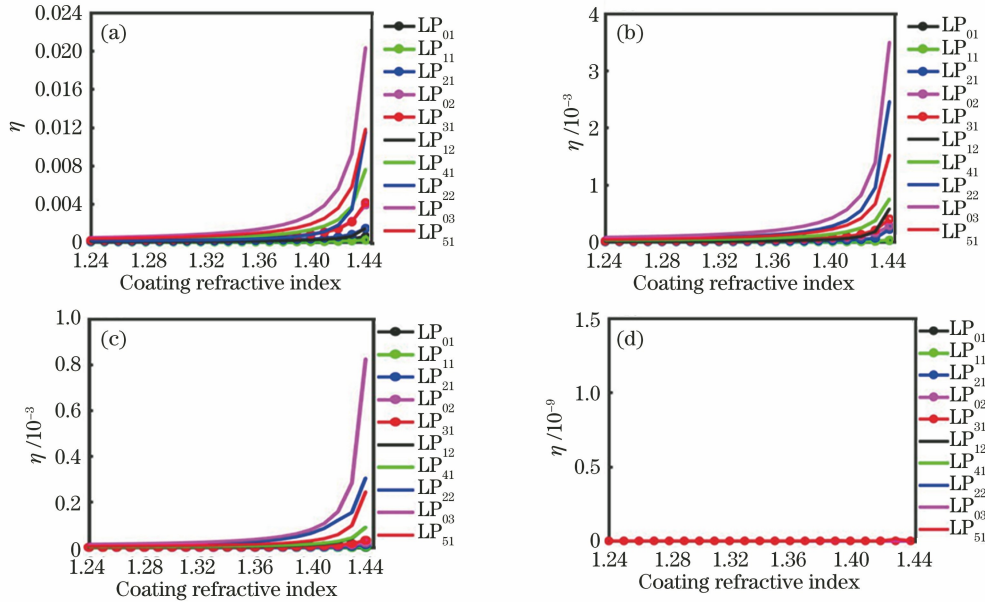


图 7 不同偏芯距离下,涂覆层归一化光强度与涂覆层折射率的关系。

(a) $L=52.3 \mu\text{m}$; (b) $L=50.3 \mu\text{m}$; (c) $L=48.3 \mu\text{m}$; (d) $L=0 \mu\text{m}$

Fig. 7 Relationship between normalized optical intensity and refractive index of coating at different eccentric distances.

(a) $L=52.3 \mu\text{m}$; (b) $L=50.3 \mu\text{m}$; (c) $L=48.3 \mu\text{m}$; (d) $L=0 \mu\text{m}$

仿真结果和(2)式中体现的关系是一致的,即传感灵敏度 r 随着表征模式有效折射率的模式阶数、涂覆层的折射率和影响隐失场功率强度的 L 增加而增加。

4 弯曲特性

在光纤传感和光纤通信中,弯曲损耗对信号传输质量和功率等方面都有较大的影响。偏芯光纤因其不对称,具有很强的方向弯曲敏感特性。弯曲使光纤的折射率发生变化,从而导致模场变化。保角变换允许弯曲光纤等效成一个折射率改变的直光纤^[20]:

$$n(x, y) = n_0(x, y)(1 + x/R), \quad (5)$$

其中, $n_0(x, y)$ 为材料折射率, (x, y) 表示光纤横截面的位置点, R 是弯曲半径。模式的弯曲损耗可以从模式的有效折射率虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 获得^[21]:

$$2\delta = 20 \cdot 2\pi \text{Im}(n_{\text{eff}}) / (\ln 10 \cdot \lambda). \quad (6)$$

图 8(a)和图 8(b)分别为 0° 和 180° 方向上偏芯

距离 $L=50.3 \mu\text{m}$ 时模式的弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线。这里的 0° 弯曲方向与纤芯偏离中心的方向相同。弯曲损耗随弯曲半径的增大而减小。如图 8(a)所示,当弯曲半径 R 分别小于 5.0, 3.0, 2.5, 2.4, 2.0, 1.5, 1.5, 1.5, 1.5, 1.5 mm, 对应的 LP_{51} 、 LP_{03} 、 LP_{22} 、 LP_{41} 、 LP_{12} 、 LP_{31} 、 LP_{02} 、 LP_{21} 、 LP_{11} 、 LP_{01} 模式的弯曲损耗急剧增加。当 $R=1.5 \text{ mm}$ 时, LP_{01} 模式的弯曲损耗为 0.611 dB/m, 而当 $R=5.0 \text{ mm}$ 时, LP_{51} 模式的弯曲损耗仍为 3.2966 dB/m。这表明模式阶数越高,弯曲损耗越大,所需要的临界弯曲半径就越大,即高阶模态的弯曲灵敏度越高。对比图 8(a)和图 8(b)可以看出, 180° 弯曲方向所需的临界弯曲半径较大,损耗较为严重,这与单模偏芯光纤的弯曲特性不同。这可能是因为在 180° 弯曲方向光纤对高阶模式的束缚能力比较弱所致。此外,弯曲半径在 1.0~2.0 mm 处产生震荡的原因是从模式中泄露出去的能量并没有

完全损耗掉^[13]。

由图 8(a)和图 8(b)的计算结果可以看出,高阶

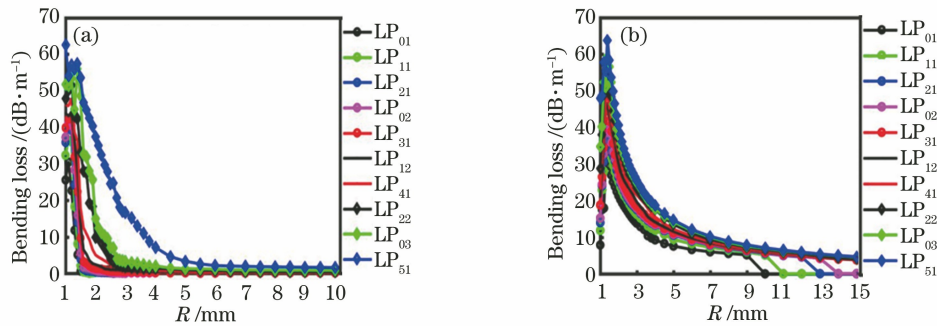


图 8 不同弯曲方向下,弯曲损耗和弯曲半径的关系。(a) 0°方向;(b) 180°方向

Fig. 8 Relationship between bending loss and bending radius at different bending orientations.

(a) Bending direction of 0°; (b) bending direction of 180°

5 结 论

研究了弱耦合偏芯少模光纤 10 个空间模式的模场特性、隐失场特性以及弯曲损耗。通过优化光纤结构参数,在 1530~1565 nm 波长范围内相邻模式的最小有效折射率差为 5.1551×10^{-4} 。结果表明,当涂覆层折射率为 1.44、偏芯距离 $L=52.3 \mu\text{m}$ 时,涂覆层归一化光强度可以达到 2.03%,具有很强的隐失场。即光纤模式阶数越高,涂覆层折射率越大,偏芯距离越大,对环境越敏感。此外,相比较低阶模式,高阶模式对弯曲更敏感,当弯曲方向为 0°、弯曲半径为 5.0 mm 时,LP₅₁ 模式仍然有 3.2966 dB/m 的弯曲损耗。偏芯光纤还可以区分弯曲方向。可以看出,偏芯光纤的高阶模式特性在提高灵敏度方面具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Cięszczyk S, Kisała P. Inverse problem of determining periodic surface profile oscillation defects of steel materials with a fiber Bragg grating sensor [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1412-1420.
- [2] Mao Y, Ashry I, Alias M S, et al. Investigating the performance of a few-mode fiber for distributed acoustic sensing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 1-10.
- [3] Salceda-Delgado G, Van Newkirk A, Antonio-Lopez J E, et al. Compact fiber-optic curvature sensor based on super-mode interference in a seven-core fiber [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1468-1471.
- [4] Xu X N, Chen Y J. Curvature sensing measurement based on seven-core fiber and few-mode fiber splicing structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0306001.

模式具有较高的弯曲灵敏度,同时由于偏芯光纤的非对称结构,0°和 180°的弯曲方向可以区分开来。

许西宁, 陈雍君. 基于七芯光纤和少模光纤拼接结构的曲率传感测量 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0306001.

- [5] Zhang X P, Peng W, Shao L Y, et al. Strain and temperature discrimination by using temperature-independent FPI and FBG[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 272: 134-138.
- [6] Gao X K, Ning T G, Zhang C B, et al. A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing [J]. *Optics Communications*, 2020, 454: 124441.
- [7] Huang T Y, Fu S N, Ke C J, et al. Characterization of fiber Bragg grating inscribed in few-mode silica-germanate fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(19): 1908-1911.
- [8] Ying Y, Si G Y, Luan F J, et al. Recent research progress of optical fiber sensors based on D-shaped structure [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 149-157.
- [9] Guo Y C, Liu Y G, Wang Z, et al. Dual resonance and dual-parameter sensor of few-mode fiber long period grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0906003.
郭艳城, 刘艳格, 王志, 等. 少模光纤长周期光栅双峰谐振及双参量传感 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0906003.
- [10] Xu X F, Zhao Y J, Jiang P Z, et al. Analysis of core eccentricity on the long period grating in eccentric core fiber[C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 5-8, 2019, Huangshan, China. New York: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [11] Liu J, Yuan L. Evanescent field characteristics of eccentric core optical fiber for distributed sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics*

- Image Science and Vision, 2014, 31(3): 475-479.
- [12] Zhang Y, Li X L, Gao Y L, et al. Propagation characteristics analysis of eccentric core optical fiber [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(5): 58-62.
张颖, 李晓林, 高云磊, 等. 偏芯光纤光传输特性分析[J]. 光电工程, 2015, 42(5): 58-62.
- [13] Zhang Y, Zhao J X, Wu J, et al. Bendind characteristics analysis of eccentric core optical fiber [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(3): 0306002.
张颖, 赵俊雪, 吴俊, 等. 偏芯光纤弯曲特性分析[J]. 光子学报, 2017, 46(3): 0306002.
- [14] Ma L, Guo X C, Qi Y H, et al. Investigation on the vibration characteristic of fiber vibration sensor based on a core-offset structure [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1206007.
马林, 郭新春, 齐艳辉, 等. 基于偏芯结构的光纤传感器的振动传感特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1206007.
- [15] Chen X F, Zhang C, Webb D J, et al. Highly sensitive bend sensor based on Bragg grating in eccentric core polymer fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(11): 850-852.
- [16] Kong J, Ouyang X W, Zhou A, et al. Highly sensitive directional bending sensor based on eccentric core fiber Mach-Zehnder modal interferometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(18): 6899-6902.
- [17] Wang X, Lou S Q, Lu W L, et al. Bend resistant large mode area fiber with multi-trench in the core [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(2): 117-124.
- [18] Stewart G, Norris J, Clark D F, et al. Evanescent-wave chemical sensor: a theoretical evaluation [J]. International Journal of Optoelectronics, 1991, 6(3): 227-238.
- [19] Guan C Y, Yuan L B, Tian F J, et al. Characteristics of near-surface-core optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(19): 3004-3008.
- [20] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshihara M. Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses [J]. Optics Express, 2005, 13(12): 4770-4779.
- [21] Han J W, Gao G J, Zhao Y L, et al. Bend performance analysis of few-mode fibers with high modal multiplicity factors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(13): 2526-2534.