材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.015

一种双模大模场面积多芯光纤的设计和特性分析

赵丽娟，王贺晴，徐志钮*

（华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003）

摘　要： 提出了一种具有双模大模场面积的多芯光纤，建立了该多芯光纤的电磁场模型并采用有限元方法对其进行求解。基于该模型研究了光纤的模式特性和弯曲特性，系统分析了纤芯间距、纤芯半径和芯包折射率差对光纤模式特性和基模有效模场面积的影响。结果表明：通过引入空气孔并适当减少纤芯间距、纤芯半径和芯包折射率差，该光纤能实现严格的双模传输。保持双模传输时，通过增大纤芯间距，减小纤芯半径和芯包折射率差均有助于增大基模的模场面积。通过调整结构参数，在近似满足双模传输的条件下，光纤的基模模场面积在平直状态下可达到 3 155 μm^2。

关键词： 多芯光纤；双模；大模场面积；弯曲损耗

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0839－06

Design and Characteristic Analysis of a Dual-mode Large-mode-area Multi-core Fiber

ZHAO Lijuan，WANG Heqing，XU Zhiniu

（School of Electrical and Electronic Engineering，North China Electric Power University，Baoding 071003，CHN）

Abstract： A dual-mode large-mode-area multi-core optical fiber is proposed in this paper，and the electromagnetic field model of the proposed fiber is constructed and solved by the finite element method. Both the mode and the bending characteristics of optical fiber are studied based on the model. The influence of the three parameters of core pitch，core radius and refractive index difference between core and cladding on the mode characteristics and effective mode field area of the fiber is analyzed systematically. The proposed multi-core fiber can realize strict dual-mode transmission by using air holes and reducing the core pitch，core radius and refractive index difference between core and cladding. When the optical fiber maintains dual mode transmission，the area of the mode field of the fundamental mode will increase with the increasing core pitch and decreasing fiber cores radius and the refractive index difference between core and cladding. If the dual-mode transmission is approximatively met，the mode field area of the fundamental modes of the straight fiber can reach 3 155 μm^2 by adjusting the structural parameters.

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

0　引言

随着互联网行业的飞速发展和信息需求的日益增长，人们对光通信网络传输容量的要求也在不断提高。常规单芯单模光纤受到非线性效应等的限制，已逐渐接近其 100 Tb/s 的容量极限[1]。基于模式复用的少模光纤[2-4]可用来提升信道传输容量，但模式数量的增加会导致传输损耗增加，各模式之间的耦合也比较复杂，提高少模光纤模式的稳定性是需要解决的关键问题。

多芯光纤设计较为灵活，可通过改变结构来实现模式数量的控制[6-7]，而且强耦合型多芯光纤的模场分布可呈现超模特性[8]，具有超模特性时光纤通

收稿日期：2020－05－06.

基金项目：国家自然科学基金项目(51607066，61377088)；河北省自然科学基金资助项目(E2019502177，E2020502010)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020YJ005，2019MS085).

* **通信作者：**徐志钮　**E-mail：**wzcnjxx@sohu.com

常具有大模场面积。增大光纤的模场面积可降低光纤中的光功率密度，有效减小非线性导致的不利影响[5]，实现大容量高功率传输。因此多芯光纤可实现少模大模场面积特性，为克服传输容量的限制提供解决方案。郑斯文等提出了不同结构的强耦合型多芯光纤结构[9-11]并对其进行了研究。但是目前关于少模、大模场面积、强耦合型多芯光纤的研究仍然较少，需要进一步探索。

本文首先提出了一种八边形结构的多芯光纤，建立了其电磁场模型，并采用有限元法对该模型进行了求解以研究光纤的模式特性。该光纤通过引入空气孔结构，可使高阶模式截止，实现严格的双模传输[9]。之后研究了纤芯间距、纤芯半径和芯包折射率差对光纤模式特性和基模有效模场面积的影响。通过选择适当的参数，可使近似满足双模传输时光纤的基模模场面积在平直状态下达到 3 155 μm^2。最后分析了光纤的弯曲特性。

1 光纤结构及模式特性

1.1 光纤结构

本文所设计不含护套的光纤横截面结构如图 1 所示，包层为纯石英结构，纤芯部分由中间纤芯和三层按八边形排列的纤芯组成，其中部分纤芯替换为空气孔，图中灰色表示空气孔，蓝色表示纤芯。包层半径 $r_{cl}=62.5\ \mu m$，空气孔半径与纤芯半径相等，用 r_{co} 表示，纤芯间距用 Λ 表示，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 $\Delta n=n_{co}-n_{cl}$。

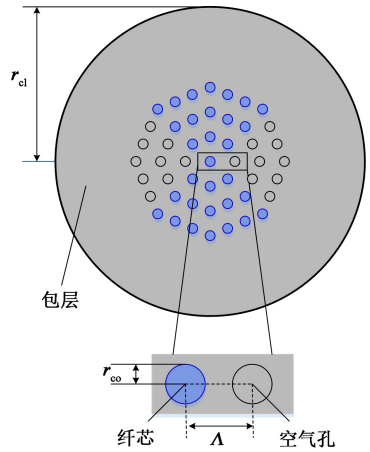
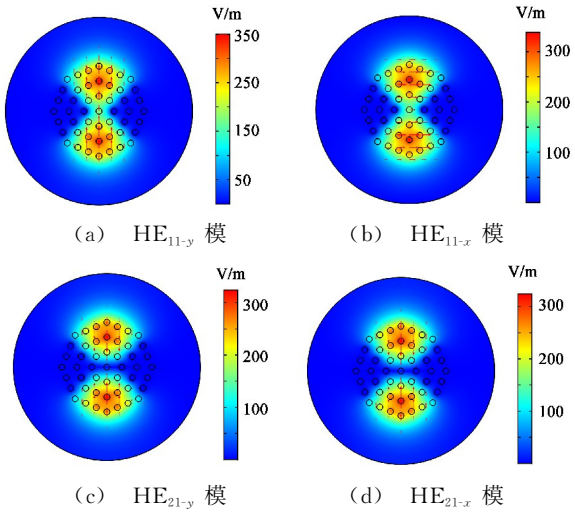


图 1 设计的多芯光纤横截面结构示意图

1.2 光纤模式特性

选用 COMSOL Multiphysics 软件建立上述多芯光纤的二维电磁场模型并使用有限元方法对其进行求解，根据结果分析光纤特性。设置 $\Lambda=10\ \mu m$，$r_{co}=2\ \mu m$，$\Delta n=0.002$，入射波波长 $\lambda=1\ 550\ nm$，计算了所设计的光纤各模式的有效折射率 n_{eff}，其中基模 HE_{11} 模的有效折射率 $n_{eff1}=1.444\ 183$，两个简并模式的有效折射率差 $B=|1.444\ 183\ 57-1.444\ 183\ 206|=3.64\times10^{-7}$，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 $n_{eff2}=1.444\ 169$，两个简并模式的有效折射率差 $B=|1.444\ 169\ 522-1.444\ 169\ 168|=3.54\times10^{-7}$，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 $n_{eff3}=1.443\ 959$。光纤中传输的模式折射率 n_{eff} 需满足 $n_{cl}<n_{eff}<n_{co}$，低于包层折射率的模式不能在光纤中传导，据此可以判断模式截止特性。而 $n_{cl}<n_{eff1}<n_{co}$，$n_{cl}<n_{eff2}<n_{co}$，$n_{eff3}<n_{cl}$，说明 HE_{11} 和 HE_{21} 模能传输，TE_{01} 模和 TM_{01} 模截止，该光纤中可传导 4 个模式（两个简并的 HE_{11} 模和两个简并的 HE_{21} 模），图 2 给出了这 4 个模式的模场分布和二维电矢量分布。



（a） HE_{11-y} 模　（b） HE_{11-x} 模

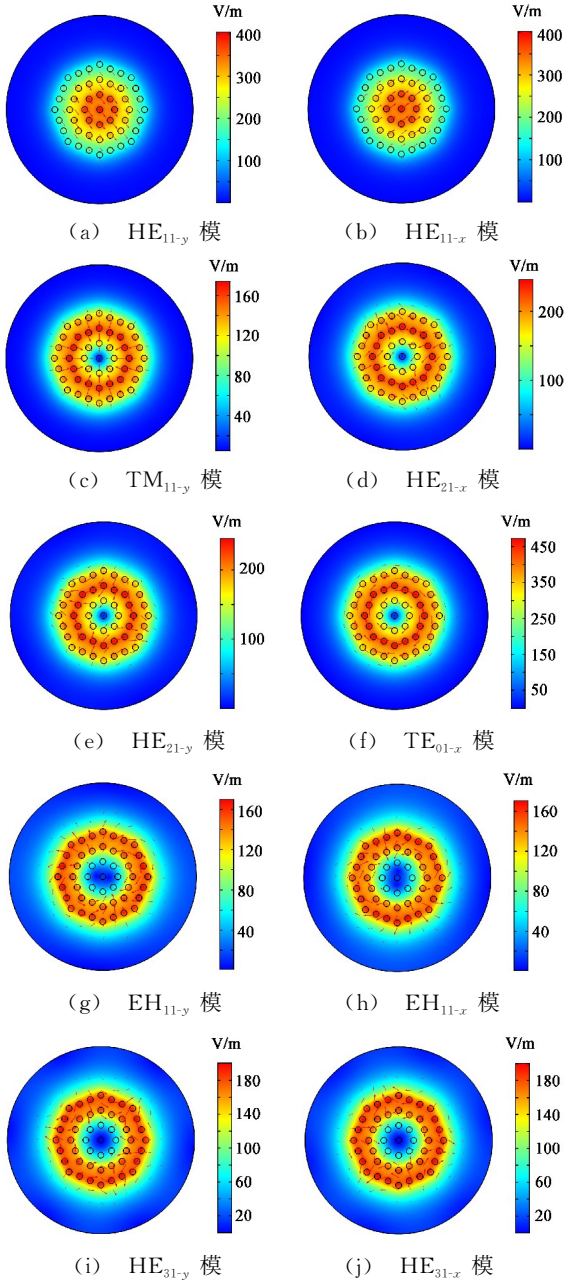
（c） HE_{21-y} 模　（d） HE_{21-x} 模

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

为了进行对比，计算了参数相同的无空气孔结构光纤的各个模式有效折射率，其中基模 HE_{11} 模的有效折射率 $n_{eff1}=1.444\ 318$，4 个二阶模（两个 HE_{21} 模、TE_{01} 模和 TM_{01} 模）的有效折射率 $n_{eff2}=1.444\ 214$，高阶模式（两个 EH_{11} 模，两个 HE_{31} 模）的有效折射率 $n_{eff2}=1.444\ 082$，10 个模式的模场分布和二维电矢量分布在图 3 中给出。

比较图 2 和 3 可知，引入空气孔后高阶模式的数量减少，这是因为两侧及外层的空气孔形成了高

阶模的泄露通道，打破了高阶模的圆对称性，增加了高阶模的泄露损耗，光纤中只能传输 2 个基模 HE_{11} 模和 2 个二阶模 HE_{21} 模，即实现严格的双模传输。



(a) HE_{11-y} 模　(b) HE_{11-x} 模　(c) TM_{11-y} 模　(d) HE_{21-x} 模　(e) HE_{21-y} 模　(f) TE_{01-x} 模　(g) EH_{11-y} 模　(h) EH_{11-x} 模　(i) HE_{31-y} 模　(j) HE_{31-x} 模

图 3　无空气孔时 10 个模式的模场分布和二维电矢量分布

2　结构参数对光纤特性的影响

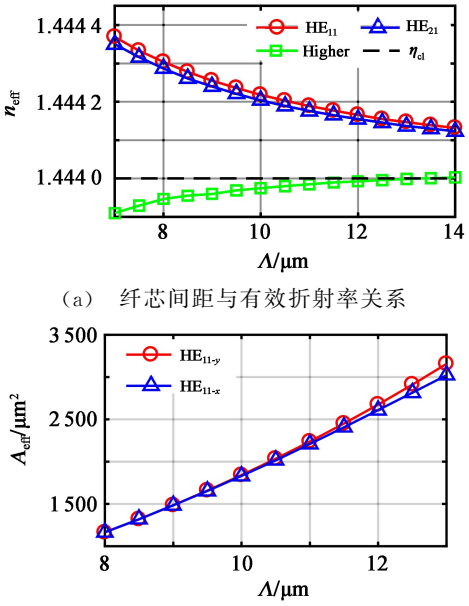
当纤芯结构发生变化时，纤芯之间的耦合作用会对模场面积产生影响，在保持双模特性的同时增大模场面积，本节研究纤芯间距 Λ、纤芯半径 r_{co} 和芯包折射率差 Δn 对各个模式有效折射率和光纤基模有效模场面积的影响。其中，光纤基模有效模场面积 A_{eff} 为

$$A_{eff}=\frac{\left[\iint_S |E(x,y)|^2 \mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\right]^2}{\iint_S |E(x,y)|^4 \mathrm{d}x\,\mathrm{d}y} \tag{1}$$

式中，$E(x,y)$ 为基模电场分布。

2.1　纤芯间距的影响

设置 $r_{co}=2.1\ \mu m$，$\Delta n=0.002$，$\lambda=1\,550$ nm，各个模式有效折射率 n_{eff} 随纤芯间距 Λ 的变化如图 4(a)所示。图中，HE_{11} 模和 HE_{21} 模均只用一条曲线表示，Higher 表示最接近截止的高阶模的有效折射率。可以看出，随着纤芯间距的增大，HE_{11} 模和 HE_{21} 模的有效折射率都逐渐减小，高阶模的折射率则逐渐增加。当 $\Lambda>12\ \mu m$ 时，高阶模式满足传输条件，此时不能严格实现双模传输，但 $\Lambda<14\ \mu m$ 时也能近似实现双模传输。



(a) 纤芯间距与有效折射率关系

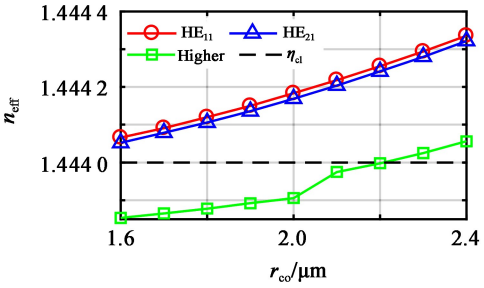
(b) 纤芯间距与模场面积关系

图 4　纤芯间距对有效折射率和模场面积的影响

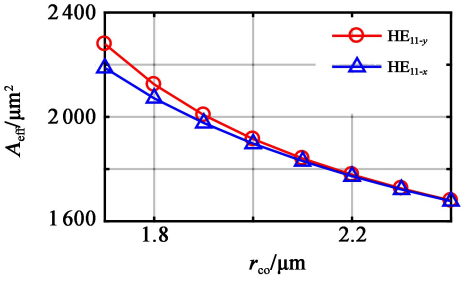
基模的模场面积 A_{eff} 随纤芯间距 Λ 的变化如图 4(b)所示。可以看出，随着纤芯间距的增大，基模的 A_{eff} 逐渐增大。在纤芯间距相同时，HE_{11-y} 模的模场面积略大于 HE_{11-x} 模，且随着 Λ 的增大，两个模式的模场面积差逐渐增大。当 Λ 从 8 μm 增加到 13 μm 时，HE_{11-y} 模的 A_{eff} 从 1 163 μm^2 增加到 3 155 μm^2，HE_{11-x} 模的 A_{eff} 从 1 163 μm^2 增加到 3 021 μm^2。由图 4 可知，当其他参数不变时，适当增大 Λ 值，在保证双模传输的情况下能实现增大模场面积的目的。

2.2 纤芯半径的影响

设置 $\Lambda=10\ \mu m$，$\Delta n=0.002$，$\lambda=1\ 550\ nm$，各个模式有效折射率 n_{eff} 随纤芯半径 r_{co} 的变化如图5(a)所示。可以看出，各个模式的 n_{eff} 随着纤芯半径 r_{co} 的增大而增加。当 $1.6\ \mu m<r_{co}<2.2\ \mu m$ 时，HE_{11} 模和 HE_{21} 模均满足传输条件，当 $r_{co}>2.2\ \mu m$ 后，高阶模式出现，因此选取合适的 r_{co} 值可使高阶模式截止，实现双模传输。



(a) 纤芯半径与有效折射率关系



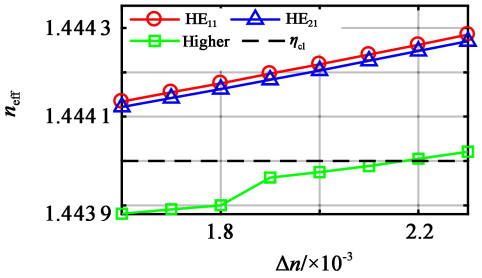
(b) 纤芯半径与模场面积关系

图5 纤芯半径对有效折射率和模场面积的影响

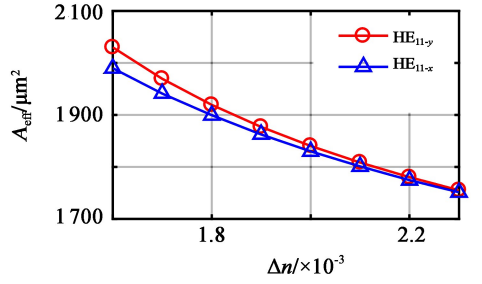
HE_{11} 模的模场面积 A_{eff} 随纤芯半径 r_{co} 的变化如图5(b)所示。由图可知，随着 r_{co} 的增大，HE_{11} 模的 A_{eff} 逐渐减小，r_{co} 相同时，$HE_{11\text{-}y}$ 模的模场面积略大于 $HE_{11\text{-}x}$ 模，随着 r_{co} 的增大，两者之间的差值逐渐减小。$HE_{11\text{-}y}$ 的模场面积最大值约为 $2\ 278\ \mu m^2$，$HE_{11\text{-}x}$ 的模场面积最大值约为 $2\ 187\ \mu m^2$。由图5可知，其他参数不变时，适当减小纤芯半径可减少高阶模数量，在保证严格双模传输的同时能够增大模场面积。

2.3 芯包折射率差的影响

设置 $\Lambda=10\ \mu m$，$r_{co}=2.1\ \mu m$，$\lambda=1\ 550\ nm$，各个模式有效折射率 n_{eff} 随芯包折射率差 Δn 的变化如图6(a)所示。当 $0.001\ 6<\Delta n<0.002\ 2$ 时，HE_{11} 模和 HE_{21} 模满足模式传输条件，高阶模式截止，可实现严格的双模传输。各模式的有效折射率随着 Δn 的增加而增大，这是由于纤芯折射率的增大能使光功率更多地分布在纤芯中。基模模场面积 A_{eff} 随 Δn 的变化如图6(b)所示。可以看出，当 Δn 由 $0.001\ 6$ 增大到 $0.002\ 3$ 时，$HE_{11\text{-}y}$ 模的 A_{eff} 从 $2\ 029\ \mu m^2$ 减小到 $1\ 754\ \mu m^2$，$HE_{11\text{-}x}$ 模的 A_{eff} 从 $1\ 989\ \mu m^2$ 减小到 $1\ 750\ \mu m^2$，前者大于后者。由图6可知，减小芯包折射率差可得到较大的模场面积，但同时会减小各模式的有效折射率，在其他参数不变时，选择合适的 r_{co} 值可实现双模大模场传输。



(a) 芯包折射率差与有效折射率关系



(b) 芯包折射率差与模场面积关系

图6 芯包折射率差对有效折射率和模场面积的影响

3 弯曲特性

光纤在实际应用时容易发生弯曲，导致折射率发生变化，本文利用将弯曲光纤等效为折射率随弯曲半径变化的平直光纤来分析所设计光纤的弯曲特性。设沿纸张横向向右方向为 x 轴正向，沿纸张纵向向上方向为 y 轴正向，当光纤沿 x 轴正向向 y 轴正向弯曲时，其横截面等效折射率[12-13]分布表示为

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

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，$R_{eff}=1.28R$，R 为光纤真实弯曲半径。注意，本节仍使用第1节的二维电磁场模型，但折射率采用以上修正后的结果。

选择2.2节中的参数组合($\Lambda=10\ \mu m$，$r_{co}=2\ \mu m$，$\Delta n=0.002$，$\lambda=1\ 550\ nm$)来对光纤的弯曲特性进行分析，计算得到未弯曲情况下 $HE_{11\text{-}y}$ 模的模场面积为 $1\ 840\ \mu m^2$，$HE_{11\text{-}x}$ 模的模场面积为 $1\ 830\ \mu m^2$。在光纤包层外侧采用完美匹配层，其使

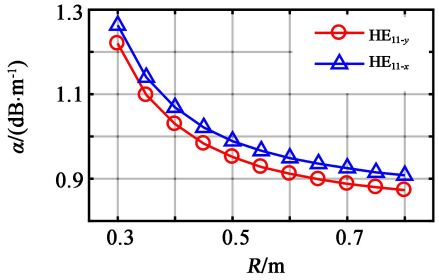
用高折射率材料(折射率为 1.5)时，根据式(3)计算不同弯曲半径下基模的弯曲损耗[14]，如图 7(a)所示，模场面积随弯曲半径的变化如图 7(b)所示。

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

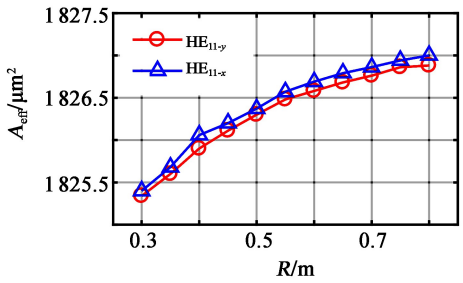
式中，α 为不同弯曲半径下基模的弯曲损耗，$\beta = (2\pi/\lambda)\cdot n_{\mathrm{eff}}$ 为模式传播常数，Im 表示复数的虚部。

由图 7 可知，随着弯曲半径的增大，基模的弯曲损耗逐渐减小，当弯曲半径 $R>0.5$ m 后，基模的弯曲损耗小于 1 dB/m。弯曲半径增大时，基模的模场面积变化较小。与平直光纤相比，在弯曲状态下，$HE_{11\text{-}y}$ 模和 $HE_{11\text{-}x}$ 模间模场面积差变小，两个模式的模场面积略有减小，但仍能达到 1 825 μm^2。

传统光纤传感器多用于实现温度和应变[15-20]、振动[21]、电场[22]、磁场[23]、角速度[24]等参量的传感，而多芯光纤不仅可以实现大容量、高功率的传输，还可以实现弯曲的传感[25]，是对常规光纤传感器的重要补充。



(a)　弯曲半径与基模弯曲损耗关系



(b)　弯曲半径与基模模场面积关系

图 7　光纤的弯曲半径对基模模场面积和弯曲损耗的影响

4　结论

本文提出了一种引入空气孔结构的八边形多芯光纤。采用电磁场建模分析了光纤结构参数及弯曲半径等对模式特性和模场面积的影响。发现增大纤芯间距时，基模和二阶模的模式有效折射率减小，而高阶模式的折射率则逐渐增加，同时基模的模场面积增加，减小纤芯半径和芯包折射率差有助于增大基模的模场面积，但会导致各个模式有效折射率的减小。通过选择适当的参数，该结构光纤可传导 4 个模式(2 个简并的 HE_{11} 模和 2 个简并的 HE_{21} 模)，实现严格的双模传输。在近似保持双模传输的条件下合理调整参数可使基模模场面积达到 3 155 μm^2。弯曲半径增大时，基模弯曲损耗减小，模场面积略有增加。

参考文献：

[1] Desurvire E B. Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades[J]. J. of Lightwave Technol., 2006, 24(12): 4697-4710.

[2] 赵　霞，韦　锦. 一种基于三芯光纤的模式复用器/解复用器的设计[J]. 半导体光电，2018，39(1)：32-36，41.
Zhao Xia, Wei Jin. Design of a mode multi/demultiplexer dased on a three-core optical fiber [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(1): 32-36, 41.

[3] 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.
Pei Li, Wang Jianshuai, Zheng Jingjing, et al. Research on specialty and application of space-division multiplexing fiber[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 42-53.

[4] 肖　健，胡贵军，杜　洋，等. 用于模式复用的少模光纤设计及特性分析[J]. 半导体光电，2013，34(5)：830-832，837.
Xiao Jian, Hu Guijun, Du Yang, et al. Design and characteristic analysis of few-mode fiber used for mode division multiplexing[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(5): 830-832, 837.

[5] 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.
Liu Yehui, Li Jinyan. Mode properties and progress of multi-core fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 53-60.

[6] Saitoh K. Multicore fiber technology[J]. J. of Lightwave Technol., 2016, 34(1): 55-64.

[7] Sasaki Y, Amma Y, Takenaga K, et al. Few-mode multicore fiber with 36 spatial modes (three modes (LP_{01}, LP_{11a}, LP_{11b})×12 Cores)[J]. J. of Lightwave Technol., 2015, 33(5): 964-970.

[8] Xia Cen, Bai Neng, Ozdur I, et al. Supermodes for optical transmission[J]. Opt. Express, 2011, 19(17): 16653-16664.

[9] 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.
Zheng Siwen, Lin Zhen, Ren Guobin, 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.

[10] Zheng S, Ren G, Lin Z, et al. A novel four-air-hole multicore dual-mode large-mode-area fiber: Proposal and design[J]. Optical Fiber Technol., 2013, 19(5): 419-427.

[11] Jin W, Ren G, Jiang Y, et al. Few-mode and large-mode-

area fiber with circularly distributed cores [J]. Opt. Commun., 2017, 387: 79-83.

[12] Baggett J C, Monro T M, Furusawa K. Understanding bending losses in holey optical fibers[J]. Opt. Commun., 2003, 227(4-6): 317-335.

[13] Schermer R T, Cole J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2007, 43(10): 899-909.

[14] White T P, Kuhlmey B T, Mcphedran R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. Ⅰ. Formulation [J]. J. of the Optical Society of America B, 2003, 19(10): 2322-2330.

[15] 王 甫, 江 淮, 易小龙, 等. 光纤光栅温度传感器增敏封装特性研究[J]. 半导体光电, 2020, 41(1): 73-76.
Wang Fu, Jiang Huai, Yi Xiaolong, et al. Sensitivity enhancement and encapsulation of fiber Bragg grating temperature sensors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 73-76.

[16] Xu Z, Zhao L. Accurate and ultra-fast estimation of Brillouin frequency shift for distributed fiber sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111822.

[17] Masoudi A, Newson T P. High spatial resolution distributed optical fiber dynamic strain sensor with enhanced frequency and strain resolution[J]. Opt. Lett., 2017, 42(2):290-293.

[18] 徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于改进二次多项式拟合的布里渊频移快速高精度提取算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 842-848.
Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Fast and highly accurate Brillouin frequency shift extracted algorithm based on modified quadratic polynomial fit[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(3): 842-848.

[19] 徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 202-208.
Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Rapid temperature and strain measurement method for optic - electric composite submarine cable based on slope-assisted method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 202-208.

[20] Zhou Y, Yan L S, He H J, et al. Brillouin optical time domain collider for fast dynamic sensing[J]. Opt. Express, 2020, 28(3):3965-3974.

[21] 张智娟, 郭文翰, 徐志钮, 等. 基于 φ-OTDR 的光纤传感技术原理及其应用现状[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 9-16.
Zhang Zhijuan, Guo Wenhan, Xu Zhiniu, et al. Principle of optical fiber sensing technology based on φ-OTDR and its application status[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(1): 9-16.

[22] 徐福华, 丁凤建, 陈 玲, 等. 高精度纳秒强电磁脉冲集成光学电场传感器性能分析[J]. 半导体光电, 2019, 40(6): 793-795.
Xu Fuhua, Ding Fengjian, Chen Ling, et al. Performance analysis on integrated optical electric field sensor for high-accuracy nanosecond intense electromagnetic pulse measurement [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 793-795.

[23] Wang E, Cheng P, Li J, et al. High-sensitivity temperature and magnetic sensor based on magnetic fluid and liquid ethanol filled micro-structured optical fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 102161.

[24] 梅 甦, 蒋治国, 胡宗福. 谐振式光纤陀螺的误差及噪声分析[J]. 半导体光电, 2020, 41(1): 29-34.
Mei Su, Jiang Zhiguo, Hu Zongfu. Analysis on error and noise of resonant fiber optic gyros[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 29-34.

[25] Yuan L. Recent progress of in-fiber integrated interferometers[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(1): 1-5.

作者简介:

赵丽娟(1981—),女,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感与光纤通信;

徐志钮(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为分布式光纤传感及其在电气设备状态监测和故障诊断中的应用。

(上接第 838 页)

[10] 沈林勇, 肖 海, 钱晋武, 等. 智能内窥镜的形状重建和可视化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014(12): 2725-2730.
Shen Linyong, Xiao Hai, Qian Jinwu, et al. Shape reconstruction and visualization of intelligent endoscope[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2014(12): 2725-2730.

[11] Park Y L, Elayaperumal S, Daniel B, et al. Real-time estimation of 3-D needle shape and deflection for MRI-guided interventions[J]. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2010, 15(6): 906-915.

[12] 章亚男, 范 迪, 沈林勇, 等. FBG 细径形状传感器的应变传递和精度实验[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1481-1491.
Zhang Yanan, Fan Di, Shen Linyong, et al. Strain transmission and accuracy experimenton fiber Bragg grating small-diameter shape sensors[J]. Optics and Precision Engin., 2019, 27(7): 1481-1491.

[13] Abayazid M, Kemp M, Misra S. 3D flexible needle steering in soft-tissue phantoms using fiber Bragg grating sensors [C]// Proc. of 2013 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2013.

作者简介:

张冬伟(1995—),男,河南省洛阳市人,硕士研究生,主要研究方向为先进光学传感与仪器。