

抗弯曲大模场面积双模光子晶体光纤的设计

曹原 施伟华 徐冠杰 孙雨昕

南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出了一种抗弯曲大模场面积双模光子晶体光纤。采用全矢量有限元法结合完美匹配层边界条件分析了光纤的传输特性,并讨论了弯曲特性与弯曲半径及弯曲方向角的关系。通过优化结构参数,在工作波长 1550 nm 处,光纤可保持基模 HE_{11} 和二阶模 HE_{21} 双模运转。平直状态和 35 cm 弯曲半径下 HE_{11} 模和 HE_{21} 模的模场面积均大于 $1000 \mu\text{m}^2$,弯曲损耗小于 0.075 dB/m。该光纤可有效抑制弯曲形变导致的模场面积减小,最小弯曲半径可达 10 cm,弯曲方向角范围可以扩展至 $\pm 180^\circ$ 。所设计的双模光纤具有大模场面积、低弯曲损耗、对弯曲方向不敏感等优势,在高功率光通信器件领域具有重要的应用价值。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 双模; 大模场面积; 低弯曲损耗

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.100602

Design of Bend-Resistant Large-Mode-Area Dual-Mode Photonic Crystal Fiber

Cao Yuan Shi Weihua Xu Guanjie Sun Yuxin

College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract A bend-resistant large-mode-area dual-mode photonic crystal fiber is proposed. The transmission properties are analyzed with full vector finite element method combined with perfectly matched layer boundary conditions, and the variation of bending properties with the bending radius and bending orientation angle are discussed. By optimizing the structure parameters, the fiber can only transfer the fundamental mode HE_{11} and second-order mode HE_{21} at a wavelength of 1550 nm. When the fiber is in a straight state or the bending radius is 35 cm, the mode field areas of the modes HE_{11} and HE_{21} are greater than $1000 \mu\text{m}^2$, and the bending loss is lower than 0.075 dB/m. Besides, the fiber can effectively inhibit the decrease of mode field area, which results from the bending deformation. The minimum bending radius can reach 10 cm, and the bending orientation angle can be extended to $\pm 180^\circ$. The designed fiber with large mode area, low bending loss and low sensitivity of bending orientation has important applications in high power optical communication devices.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; dual mode; large mode area; low bending loss

OCIS codes 060.2310; 060.2400; 060.5295

1 引言

随着波分复用(WDM)和偏振复用(PDM)等通信技术的快速发展,光纤通信系统的传输容量正在不断提升^[1-3]。但是,光通信传输所用的单模光纤由于其固有的非线性效应限制,使得系统容量越来越接近香农极限,逐渐无法满足当今日益增长的信息需求。基于少模光纤的模分复用技术(MDM),利用少模光纤中有限的、稳定的正交模式作为独立信道进行信息传送,可以极大地提高系统容量,解决未来单模光纤的带宽危机^[4-6]。非线性效应限制了光纤传输容量的进一步提升,增大模场面积可有效降低光纤的非线性效应,但也会增加光纤中可传输模式的数量并带来弯曲损耗。因此,具有低弯曲损耗、大模场面积特性的少模光纤在

收稿日期: 2015-04-13; 收到修改稿日期: 2015-05-07; 网络出版日期: 2015-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(61275067)、国家大学生创新训练计划(SZDG2014008)

作者简介: 曹原(1994—),男,本科,主要从事光纤通信等方面的研究。E-mail: caoyuan_njupt@126.com

导师简介: 施伟华(1969—),女,副教授,硕士生导师,主要从事光通信等方面的研究。

E-mail: njupt_shiwh@126.com(通信联系人)

MDM系统用于高功率光通信器件中具有重要的应用价值和研究意义。

光子晶体光纤(PCF)通过在包层引入微小空气孔阵列,提高了光纤结构设计自由度,为少模光纤的设计提供了新途径。近年来,多种新结构的少模光纤相继出现。但多因模场面积较小^[7-8]或含有多个(>2)简并的矢量模式^[5,9-10],无法实现严格意义上的稳定少模运转;且传输的非正交模式所引起的耦合问题无法很好地解决。2013年,Zheng等^[11]提出一种多芯大模场面积少模光纤,实现了 HE_{11} 模和 HE_{21} 模双模运转,但其包层不具有圆对称性,光纤在弯曲时需要严格控制弯曲方向,且强耦合型多芯结构增加了光纤的制作难度。2014年,陈艳等^[12]设计了一种具有双模特性的大模场微结构光纤,平直状态下模场面积约为 $700\ \mu\text{m}^2$,但模场面积会随着弯曲锐减,其模场面积有待进一步提高且该结构的光纤仍然对弯曲方向十分敏感。2015年,Chen等^[13]设计的低损耗双模PCF可在抑制基模的同时实现二阶模 HE_{21} 、 TM_{01} 和 TE_{01} 传输,但未对光纤的模场面积进行研究。因此,如何有效地控制少模光纤的模式数量、增大模场面积、降低弯曲损耗并扩大弯曲方向角范围还需进一步探索。

全固态双模PCF具有热稳定性好、包层圆孔不易塌陷等优势,至今仍鲜见报道。本文提出了一种单芯结构的全固态抗弯曲大模场面积双模光子晶体光纤。通过仿真优化该PCF的结构参数,实现了 HE_{11} 模和 HE_{21} 模双模传输,且光纤具有低弯曲损耗和大模场面积特性。在波长 $1550\ \text{nm}$ 处,平直和 $35\ \text{cm}$ 弯曲半径下模场面积大于 $1000\ \mu\text{m}^2$,模场面积形变对弯曲不敏感,可承受弯曲方向角范围可达 $\pm 180^\circ$ 。随着近年来少模光纤用于MDM大容量光纤传输系统中的实验^[5,14-15]逐渐成熟,多种新结构全固态PCF的研制成功^[16-17],该PCF可以应用于用高功率光通信器件的MDM系统中。

2 光纤结构与理论模型

图1为设计的抗弯曲大模场双模PCF的横截面图。为实现大模场面积特性,由光纤中心缺失4个圆形孔形成芯区,纤芯与基底材料均为掺铈石英,折射率为 $n_{\text{high}} = 1.46$,光通信器件中引入掺铈石英作为增益介质,该介质具有高功率输出、高斜率效率等优点。包层包含内、外2个区域;外包层由4组对称分布于纤芯周围的正方格子圆形孔群构成,大、小圆形孔直径分别为 d_2 和 d_1 ,圆形孔间距为 Λ ,次外层4个顶点引入小圆形孔形成4条高阶模泄露通道;内包层在纤芯区域添加9个呈正方格子排列的小圆形孔,圆形孔直径为 d_1 ,间距为 0.8Λ 。为实现合理选模,保证光纤中可实现双模传输,去除 y 轴方向的3个圆形孔,使得内包层为6个呈 y 轴对称排列的圆形孔。引入掺有少量氧化硼的石英棒(折射率为 n_{low})代替包层中所有圆形孔形成全固态PCF,通过合理控制掺杂浓度可有效改变掺杂石英棒的折射率,且掺杂石英棒的引入可有效解决常规PCF的空气孔在拉制时易坍塌变形、光纤耦合的连接损耗较大、散热性差等问题。工作波长为 $1550\ \text{nm}$ 。定义纤芯与包层折射率差为 $\Delta = n_{\text{high}} - n_{\text{low}}$,光纤直径为 $300\ \mu\text{m}$,小孔直径与孔间距的比值为 $f = d_1/\Lambda$ 。

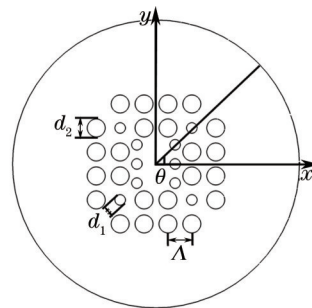


图1 双模PCF截面图

Fig. 1 Cross section of the proposed dual-mode PCF

采用完美匹配层(PML)边界条件的全矢量有限元法,结合专业的有限元仿真软件COMSOL Multiphysics,对所提出的PCF特性进行仿真研究。对于包层层数有限的PCF,光纤中所有模式均会向包层中泄露,产生限制损耗。光纤中模式的限制损耗 L 可以表示为^[18]

$$L = \frac{40\pi}{(\ln 10)\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (1)$$

式中 λ 为工作波长; n_{eff} 为模式的有效折射率。实际应用中,当光纤中有效模式的限制损耗大于 $1\ \text{dB/m}$ 时,

该模式截止^[19]。

光纤折射率分布会随着弯曲半径发生改变,利用弯曲等效折射率模型分析 PCF 的传输特性。Martyinkien 等^[20]研究发现用此模型分析的光纤特性与实验结果相似。当光纤向 x 轴负方向弯曲时,光纤的折射率分布可以表示为

$$n(x,y) = n_0(x,y) \left(1 + \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{R} \right), \quad (2)$$

式中 $n_0(x,y)$ 为光纤初始折射率分布; R 为弯曲半径; θ 为弯曲方向角(如图 1 所示)。

光纤中各模式模场的有效面积可以表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint_S |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint_S |E|^4 dx dy}, \quad (3)$$

式中 E 是电矢量强度; S 是光纤横截面积。

图 2(a)~(d) 为所设计的双模 PCF 中可传输的 4 个模式的模场和二维电矢量分布。通过设计不同的结构参数,破坏光纤的圆对称结构,从而引入高阶模泄露通道,使部分高阶模截止,光纤中只传输 2 个简并的基模 HE_{11} 和 2 个简并的二阶模 HE_{21} ,且模式之间相互正交,实现了严格意义上的双模传输。

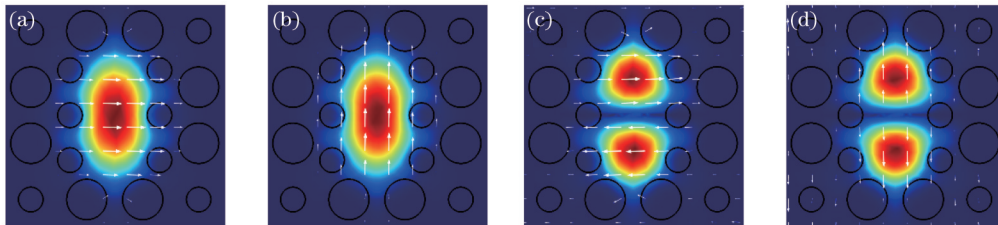


图 2 双模 PCF 中模式的模场和二维电矢量分布。(a),(b) 基模 HE_{11} 的 2 个简并模式; (c),(d) 二阶模 HE_{21} 的 2 个简并模式
Fig.2 Mode fields and two-dimensional electric vector distributions in the dual-mode PCF. (a),(b) Two degenerate modes of fundamental mode HE_{11} ; (c),(d) two degenerate modes of second-order mode HE_{21}

3 结构参数对光纤特性的影响

为了获得性能良好的全固态抗弯曲大模场面积双模 PCF,对图 1 中 PCF 结构参数对光纤限制损耗、模场面积和弯曲损耗的影响进行了研究,并明确了双模运转的条件。

3.1 相对孔径大小的影响

假设纤芯与包层相对折射率差 $\Delta = 0.6\%$ 。初步仿真分析发现,增大孔间距 Λ 可以增加模场面积,但当 Λ 大于 $25.0 \mu\text{m}$ 时,光纤中模式急剧增多导致很难实现双模运转。因此为简化分析并大致实现 PCF 的双模特性,选取初始结构参数为 $\Lambda = 25.0 \mu\text{m}$, d_2 为 $9.0 \sim 9.8 \mu\text{m}$,小孔直径与孔间距的比值 f 分别为 $0.22, 0.23, 0.24$ 。光纤中各模式的简并态随 PCF 结构的变化具有较好的一致性,因此为了便于区分,分别讨论基模 HE_{11} 和二阶模 HE_{21} 各自的一个简并态对应的限制损耗及模场面积和其他高阶模(OHOM)对应的最小限制损耗。图 3(a)~(b) 分别给出了波长 1550 nm 处,光纤在平直状态和 35 cm 弯曲半径下的限制损耗随 d_2 与 f 的变化关系。图 3(c) 给出了光纤在平直状态下基模的模场面积随 d_2 与 f 的变化关系。由图 3 可知,增大 d_2 或 f ,基模 HE_{11} 和二阶模 HE_{21} 的损耗以及基模模场面积均对应减小。这是由于 d_2 或 f 增大导致芯区尺寸减小,纤芯与包层之间的有效折射率差值变大,增强了纤芯对光的束缚能力,造成限制损耗和模场面积减小。当 OHOM 的损耗大于 1 dB/m 时,光纤中只有 HE_{11} 模和 HE_{21} 模可以传输,实现了严格意义上的双模运转。选取保证光纤双模运转的 HE_{11} 模和 HE_{21} 模对应最小损耗的结构参数作为初始最优参数,于是初始最优结构参数为 $\Lambda = 25.0 \mu\text{m}$, $d_2 = 9.4 \mu\text{m}$, $f = 0.22$ 。

3.2 纤芯与包层相对折射率差的影响

在给定初始最优结构参数的基础上讨论纤芯与包层相对折射率差 Δ 为 $0.4\% \sim 0.8\%$ 条件下,光纤传输特性的变化情况。图 4 给出了波长 1550 nm 处,光纤在平直状态和 35 cm 弯曲半径下的限制损耗和模场面积随 Δ 的变化关系。S- HE_{11} , S- HE_{21} , S-OHOM 分别对应平直状态下 HE_{11} 模, HE_{21} 模和 OHOM; B- HE_{11} , B- HE_{21} , B-OHOM 分别对应弯曲状态下 HE_{11} 模, HE_{21} 模和 OHOM。从图 4 可以看出,随着 Δ 增加,各阶模式限

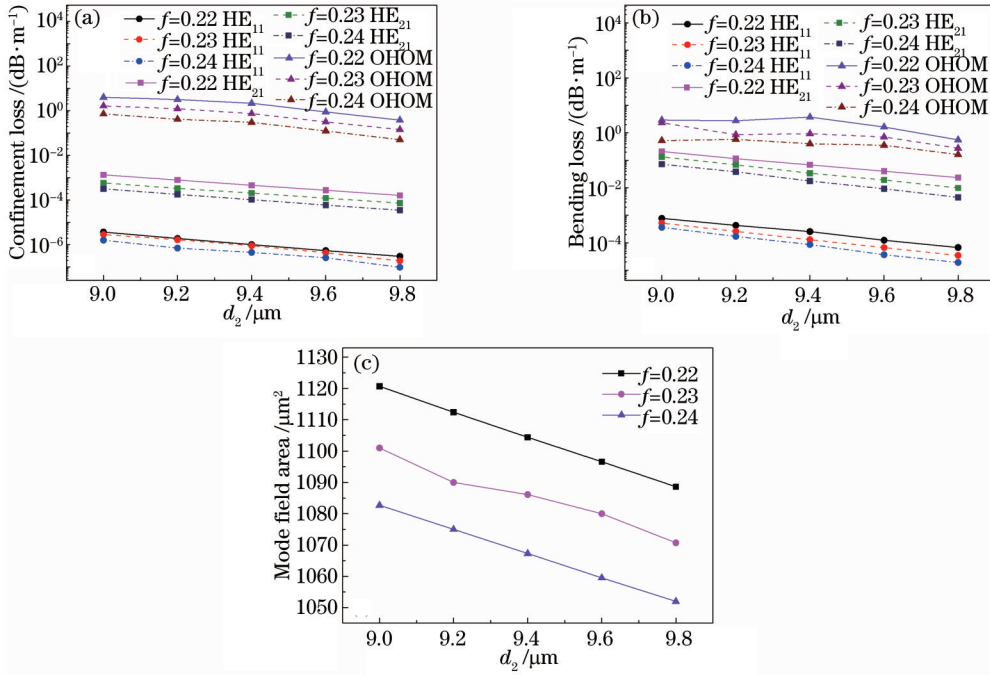


图3 光纤的传输特性随 d_2 与 f 的变化关系。(a) 平直状态各阶模限制损耗;(b) 弯曲状态各阶模弯曲损耗;
(c) 平直状态基模模场面积

Fig.3 Transmission characteristics of the fiber as functions of d_2 and f . (a) Confinement loss of each mode in a straight state; (b) bending loss of each mode in a bending state; (c) mode field area of the fundamental mode in a straight state

制损耗和模场面积对应减小。这是因为 Δ 增加即纤芯与包层相对折射率差变大, 光纤对模式的束缚作用增强, 使光能量能够有效地集中在纤芯中传输。选取保证光纤双模运转的 HE₁₁ 模和 HE₂₁ 模对应最小限制损耗的结构参数作为最终最优参数, 因此最优参数为 $\Lambda = 25.0 \mu\text{m}$, $d_2 = 9.4 \mu\text{m}$, $f = 0.22$, $\Delta = 0.6\%$ 。此时 PCF 在平直状态下 HE₁₁ 模和 HE₂₁ 模的限制损耗为 $1.01 \times 10^{-6} \text{ dB/m}$ 和 $4.59 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$, 模场面积为 $1104 \mu\text{m}^2$ 和 $1116 \mu\text{m}^2$; 弯曲状态下 HE₁₁ 模和 HE₂₁ 模的弯曲损耗为 $2.55 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$ 和 0.068 dB/m , 模场面积为 $1023 \mu\text{m}^2$ 和 $1081 \mu\text{m}^2$ 。平直与弯曲状态下模场面积均大于 $1000 \mu\text{m}^2$, 光纤可实现低弯曲损耗大模场面积双模运转, 传输模式为基模 HE₁₁ 和二阶模 HE₂₁。

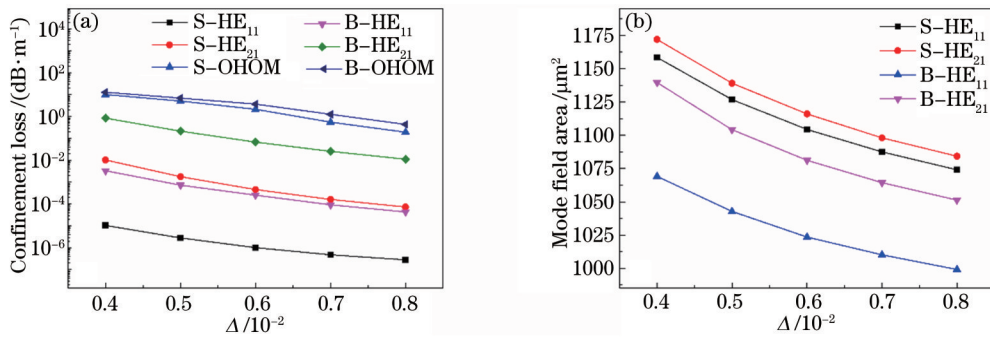


图4 平直与弯曲状态下各阶模式传输特性。(a) 限制损耗;(b) 模场面积

Fig. 4 Transmission characteristics of each mode in straight and bending states. (a) Confinement loss; (b) mode field area

4 弯曲特性

当光纤发生弯曲时, 光纤结构会发生形变导致光纤折射率分布产生变化, 从而影响光纤传输特性并产生弯曲损耗。本文设计的 PCF 具有四重对称性, 其弯曲特性受弯曲半径和弯曲方向角影响。

4.1 弯曲半径

在最优参数的基础上, 图 5 给出了该 PCF 在波长 1550 nm 处基模 HE₁₁ 和二阶模 HE₂₁ 弯曲损耗及模场面积随弯曲半径的变化关系。图 5 中 HE_{11,x} 和 HE_{11,y} 代表基模 HE₁₁ 的 2 个简并态, HE_{21,x} 和 HE_{21,y} 代表二阶模

HE₂₁的两个简并态, OHOM对应其余高阶模式中弯曲损耗最小的模式。由图5(a)可知,随着弯曲半径的增大,基模HE₁₁和二阶模HE₂₁弯曲损耗呈现振荡下降趋势。类似的振荡现象在之前PCF的研究中也有诸多报道^[20-21]。这是由于随着弯曲半径的变化,纤芯与包层模式之间的耦合能够周期性地改变弯曲损耗的大小,造成弯曲损耗随弯曲半径变化呈现一定的振荡趋势。图5(b)表明PCF的模场面积随着弯曲半径的增大而增大,但当弯曲半径大于70 cm时,模场面积变化趋势近似呈一条水平直线,模场面积近似不变,约为1090 μm²(HE₁₁模)和1110 μm²(HE₂₁模)。当弯曲半径低于10 cm时,HE₁₁模和HE₂₁模弯曲损耗均大于1 dB/m,模式截止导致光纤无法实现双模传输;二阶模HE₂₁模场面积也在弯曲半径10 cm处出现一个拐点,这源于弯曲半径小于10 cm时,模式难以集中在纤芯中传输而向包层迅速泄露,造成模场面积增大。当弯曲半径大于10 cm时,光纤中HE₁₁模和HE₂₁模弯曲损耗小于1 dB/m, OHOM弯曲损耗大于1.03 dB/m,光纤可实现低弯曲损耗双模运转。

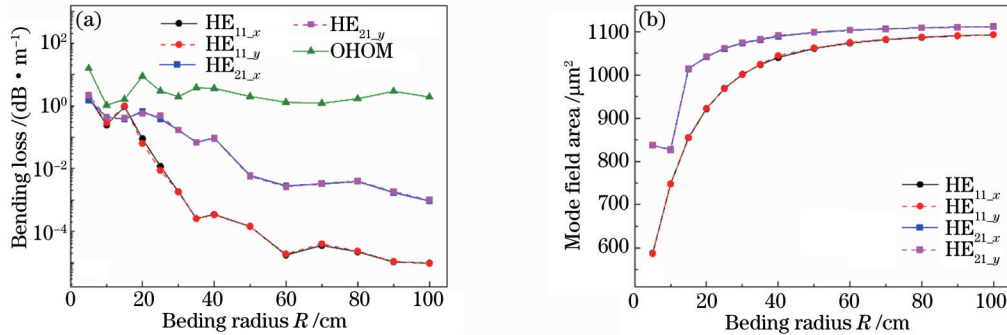


图5 PCF各阶模式弯曲特性与弯曲半径的关系。(a) 弯曲损耗;(b) 模场面积

Fig.5 Bending properties of each mode for the PCF as functions of bending radius. (a) Bending loss; (b) mode field area

4.2 弯曲方向角

图6为波长1550 nm,弯曲半径为35 cm时,基模HE₁₁和二阶模HE₂₁弯曲损耗及模场面积随弯曲方向角的变化关系。从图6中可以看出,在0°~180°弯曲方向角范围内,基模HE₁₁和二阶模HE₂₁弯曲损耗总是小于

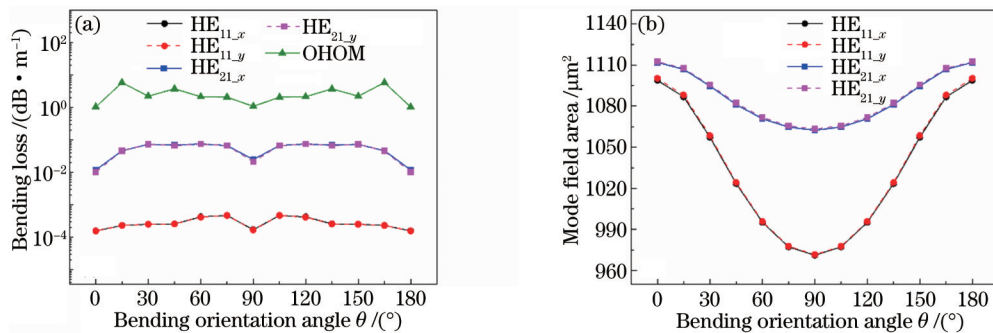


图6 PCF各阶模式弯曲特性与弯曲方向角的关系。(a) 弯曲损耗;(b) 模场面积

Fig.6 Bending properties of each mode for the PCF as functions of bending orientation angle.

(a) Bending loss; (b) mode field area

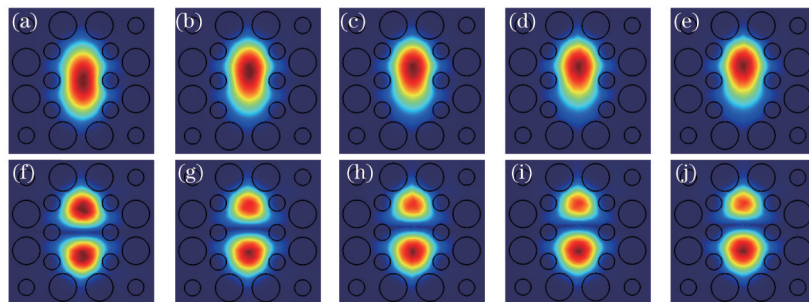


图7 不同弯曲方向角下PCF的模场分布。(a),(f) 0°; (b),(g) 30°; (c),(h) 45°; (d),(i) 60°; (e),(j) 90°

Fig.7 Mode field distributions of the PCF for different bending orientation angles. (a),(f) 0°; (b),(g) 30°; (c),(h) 45°; (d),(i) 60°; (e),(j) 90°

0.075 dB/m, OHOM 损耗大于 1.04 dB/m, 光纤可实现双模运转。图 6 显示该 PCF 弯曲特性随弯曲方向角呈现周期性变化, 这与光纤四重对称结构的旋转对称性有关, 因此可将光纤保持双模运转的弯曲方向角范围扩展至 $\pm 180^\circ$ 。在 0° 弯曲方向角处, 基模 HE_{11} 和二阶模 HE_{21} 弯曲损耗均达到最小, 分别为 1.55×10^{-4} dB/m 和 0.012 dB/m; 此时模场面积可达最大分别为 $1100 \mu\text{m}^2$ 和 $1112 \mu\text{m}^2$ 。图 7 给出了不同弯曲方向角条件下光纤的模场分布。随着弯曲方向角的变化, 光纤模场形变量会发生改变, 从而影响各阶模式弯曲损耗和模场面积。不同弯曲方向角对应的弯曲特性即可由图 7 中模场分布解释, 其中图 7 代表基模 HE_{11} 代表基模 HE_{12} 。

5 结 论

提出了一种抗弯曲大模场面积双模光子晶体光纤, 其结构为正方晶格排布的具有四重对称性的单芯结构。通过合理优化光纤结构参数, 实现了该 PCF 在 1550 nm 波长处, 平直状态和 35 cm 弯曲半径下 HE_{11} 模和 HE_{21} 模的模场面积均大于 $1000 \mu\text{m}^2$, 弯曲损耗小于 0.075 dB/m, 此光纤可实现低弯曲损耗大模场面积双模运转, 传输模式为基模 HE_{11} 和二阶模 HE_{21} 。且该光纤可有效抑制模场面积受弯曲形变的影响, 最小弯曲半径可达 10 cm, 弯曲方向角范围可以扩展至 $\pm 180^\circ$, 解决了已报道的双模 PCF 对弯曲敏感的问题, 在高功率光通信器件领域具有广阔的发展前景。

参 考 文 献

- 1 R J Essiambre, G Kramer, P J Winzer, *et al.*. Capacity limits of optical fiber networks[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(4): 662-701.
- 2 Yang Fang, Tang Ming, Li Borui, *et al.*. Design and optimization of multi-core fibers with low crosstalk and large effective area[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0106005.
杨 芳, 唐 明, 李博睿, 等. 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0106005.
- 3 Cheng Yu, Yang Chen, Luo Jie. Optical fiber technologies for ultrahigh-speed, ultralarge-capacity telecommunication networks[J]. ZTE Technology Journal, 2013, 19(3): 12-16.
成 煜, 杨 晨, 罗 杰. 超高速率超大容量建设用光纤技术[J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(3): 12-16.
- 4 H Kubota, T Morioka. Few-mode optical fiber for mode-division multiplexing[J]. Optical Fiber Technology, 2011, (17): 490-494.
- 5 Yao Shuchang, Fu Songnian, Zhang Minming, *et al.*. Demodulation and multi-input multi-output equalization for mode division multiplexing system using a novel few-mode fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 144215.
姚殊畅, 付松年, 张敏明, 等. 基于少模光纤的模分复用系统多输入多输出均衡与解调[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144215.
- 6 P Sillard, M B Astruc, D Molin. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems[J]. J Lightwave Technol, 2014, 32(16): 2824-2829.
- 7 N Healy, J R Sparks, M N Petrovich, *et al.*. Large mode area silicon microstructured fiber with robust dual mode guidance[J]. Opt Express, 2009, 17(20): 18076-18082.
- 8 T Sakamoto, T Mori, T Yamamoto, *et al.*. Transmission over large-core few-mode photonic crystal fiber using distance-independent modal dispersion compensation technique[J]. Opt Express, 2011, 19(26): B478-B485.
- 9 M Chen, Y Li, Y Zhang, *et al.*. Design of dual-mode optical fibres for the FTTH applications[J]. Journal of Optics, 2011, 13(1): 015402.
- 10 Xie Yiwei, Fu Songnian, Zhang Hailiang, *et al.*. Design and optimization of mode differential group delay for few-mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906010.
谢意维, 付松年, 张海亮, 等. 少模光纤模式差分群时延的设计与优化[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906010.
- 11 S Zheng, G Ren, Z Lin, *et al.*. A novel four-air-hole multicore dual-mode large-mode-area fiber: Proposal and design [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 419-427.
- 12 Chen Yan, Zhou Guiyao, Xia Changming, *et al.*. Analysis of a novel dual-mode large-mode-area micro-structured fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014701.
陈 艳, 周桂耀, 夏长明, 等. 具有双模特性的大模场面积微结构光纤的设计[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014701.
- 13 C Chen, G Zhou, Y Chen, *et al.*. Suppression of the fundamental mode in a dual-mode photonic crystal fiber[J]. Opt Commun, 2015, 336(1): 235-239.
- 14 J Sakaguchi, B J Puttnam, W Klaus, *et al.*. 19-core fiber transmission of $19 \times 100 \times 172$ -Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK

- signals at 305 Tb/s[C]. Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC'12), 2012: PDP5C.1.
- 15 J Xu, C Peucheret, J K Lyngsø, *et al.*. Two-mode multiplexing at 2×10.7 Gbps over a 7-cell hollow-core photonic bandgap fiber[J]. Opt Express, 2012, 20(11): 12449–12456.
- 16 L Wang, H Liu, D He, *et al.*. Phosphate single mode large mode area all-solid photonic crystal fiber with multi-watt output power[J]. Appl Phys Lett, 2014, (104): 131111.
- 17 M Kashiwagi, K Saitoh, K Takenaga, *et al.*. Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high-power all-fiber lasers[J]. Opt Express, 2012, 20(14): 15061–15070.
- 18 Cao Ye, Wang Jiangyun, Tong Zhengrong. High birefringence and low confinement loss photonic crystal fiber with multiple zero dispersion points based on micro-structured core[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905005.
曹 晔, 王江昀, 童峥嵘. 基于微结构纤芯的超低损耗多零色散点的高双折射光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905005.
- 19 W S Wong, X Peng, J M Mclaughlin, *et al.*. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers[J]. Opt Lett, 2005, 30(21): 2855–2857.
- 20 T Martynkien, J Olszewski, M Szpulak, *et al.*. Experimental investigations of bending loss oscillations in large mode area photonic crystal fibers[J]. Opt Express, 2007, 15(21): 13547–13556.
- 21 X Wang, S Lou, W Lu. Bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core[J]. Appl Opt, 2013, 52(18): 4323–4328.

栏目编辑: 王晓球