

新型抗弯曲大模场面积光子晶体光纤*

姜淑琴[†] 鹿文亮 王鑫

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

(2012年7月16日收到; 2012年8月14日收到修改稿)

研制出一种新型抗弯曲大模场面积石英光子晶体光纤. 利用光子晶体光纤结构设计的灵活性, 通过规划缺陷的位置及空气孔的尺寸, 实现了大模场面积单模及低弯曲损耗特性. 应用建立的实际光子晶体光纤特性分析模型, 研究了研制光纤的模式特性和弯曲特性, 在波长 1064 nm 处, 平直状态下光纤的模场面积可以达到 2812 μm^2 , 基模限制损耗为 0.00024 dB/m, 高阶模限制损耗高于 1.248 dB/m. 基模和高阶模之间的高传输损耗差, 保证了在获得大模场面积的同时实现单模传输. 弯曲半径和弯曲方向角所带来弯曲损耗变化的研究结果显示, 即使在弯曲半径小到 5 cm 时, 弯曲损耗也在 10^{-3} dB/m 量级以下, 而且在弯曲半径为 30 cm 时光纤可承受的弯曲方向角范围扩展至 -60° — 60° . 研制的光纤具有良好的低弯曲损耗特性, 可有效解决非对称结构所带来的光纤弯曲特性对弯曲方向角敏感的问题. 该光纤在高功率光纤激光器、放大器及高功率传输等技术领域具有重要的应用价值.

关键词: 光子晶体光纤, 大模场面积, 低弯曲损耗, 弯曲方向角

PACS: 42.81.Qb, 42.81.Bm, 42.81.Dp

DOI: 10.7498/aps.62.044201

1 引言

单纤输出已达千瓦的光纤激光器具有增益介质长、结构紧凑、散热好和输出光束质量高等优点, 在国防、工业和医疗等领域获得了广泛的应用. 随着输出功率的进一步提升, 非线性效应已成为近十年来高功率光纤激光器发展的一大障碍^[1]. 大模场面积可以有效减弱光纤中的非线性效应, 增加光纤激光器的功率容限.

传统阶跃型光纤结构主要通过增加光纤的纤芯直径来增大模场面积; 但随着纤芯直径的增加, 光纤中传输模式增多. 多传输模式不仅影响激光输出光束质量, 模式竞争也会影响激光输出的稳定性. 为提高输出光束的质量, 在增大纤芯直径的同时, 需降低纤芯的数值孔径, 即降低纤芯折射率, 使光纤尽可能地保持单模传输. 但当数值孔径低于 0.06 时, 现有制作工艺很难实现^[2], 尤其是当纤芯直径达到 30 μm 时, 光纤对弯曲极为敏感, 应用价值不高^[3].

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 灵活

的结构设计自由度打破了传统光纤的结构局限, 为大模场面积单模光纤研制开辟了一条新途径. 自 1998 年 Knight 等^[4] 首次研制出大模场面积 PCF 以来, 相继出现了多种新结构大模场面积 PCF, 但多数对弯曲敏感^[5-9]. 为减小弯曲损耗, 陆续出现了一些通过优化 PCF 结构降低弯曲损耗的大模场面积 PCF 新结构报道, 但多因结构复杂, 如含有多种尺寸空气孔、八角形结构等, 工艺上难以实现^[10-13]. 2010 年, Napierala 等^[14] 提出一种含有两种尺寸空气孔的非对称结构大模场面积 PCF, 模场面积为 2500 μm^2 . 从降低制作难度出发, 2011 年他们又提出并研制出采用同一种尺寸空气孔的双空气孔间距结构的低弯曲损耗大模场面积 PCF^[15], 这是至今惟一的非对称结构低弯曲损耗大模场面积 PCF 的研制报道. 但其弯曲损耗对光纤的弯曲方向角敏感, 实际应用时须将弯曲方向角控制在 $\pm 7^\circ$ 范围内. 在此基础上, Wang 等^[16] 以两种掺氟石英棒构成芯区提出一种类似结构, 基模模场面积可达 2000 μm^2 , 弯曲损耗对弯曲方向角敏感问题得到明显改善, 弯曲半径为 30 cm 时, 弯曲方向角范围达

* 国家自然科学基金 (批准号: 60977033, 61177082) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4122063) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

-45° — 45° , 但因掺氟石英棒尺寸及掺氟浓度难以精确控制, 目前尚未见研制成功的报道.

为减小制作难度, 降低弯曲损耗及对弯曲方向角的敏感度, 本文通过规划缺陷位置及空气孔尺寸, 提出并研制出一种只含有两种尺寸空气孔的非对称结构低弯曲损耗大模场面积 PCF. 在波长 1064 nm 处, 基模模场面积高达 $2812\text{ }\mu\text{m}^2$, 可承受弯曲方向角范围扩展至 -60° — 60° . 新型抗弯曲大模场面积 PCF 的研制成功, 解决了目前大模场面积光纤的弯曲损耗对光纤弯曲方向角敏感的问题, 为其在高功率光纤激光器、放大器及高功率激光传输等方面的应用展现了广阔的前景.

2 光纤结构与分析模型

抗弯曲大模场面积 PCF 设计结构的横截面示意图见图 1(a). 在传统三角格子排布 PCF 的基础上, 为实现大模场面积特性, 以七个石英棒代替中心的七个空气孔形成光纤芯区; 为降低基模弯曲损耗, 增加高阶模泄漏损耗, 在光纤包层区域的左侧由石英棒代替部分 (虚线孔处) 空气孔, 减小此侧空气孔的占空比, 形成高阶模泄漏通道; 同时, 在纤芯区左侧上下两个对称位置设置两个小尺寸空气孔, 以增大对基模的约束. 抗弯曲大模场面积 PCF 设计结构直径为 $400\text{ }\mu\text{m}$, 大空气孔直径 d 约为 $27\text{ }\mu\text{m}$, 两个小空气孔直径 d_s 约为 $19.2\text{ }\mu\text{m}$, 空气孔间距 Λ 为 $36\text{ }\mu\text{m}$. 图 1(b) 为本文采用管束堆积法制作出的抗弯曲损耗大模场面积 PCF 的横截面显微图.

PCF 灵活的结构设计自由度不仅带来了传统结构光纤难以实现的各种新颖特性, 也增加了光纤的制作难度. 研制 PCF 需将外径约为 20 mm 的 PCF 预制棒拉制成外径只有 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的 PCF 光纤,

毛细管棒直径缩比达 50 倍. 在实际拉制过程中, 拉丝炉中不同位置炉温存在差异, 而导致不同位置的空气孔呈现出差异形变. 对比图 1(a) 和 (b) 可以明显看出, 尽管采取了优化后的拉制工艺参数, 研制出的光纤的横截面中不同位置的空气孔都存在不同程度的偏离圆孔形状. 对于大模场面积 PCF, 空气孔的形变将导致光纤的实际传输特性, 如传输模式、模场面积、弯曲损耗、偏离设计特性.

研制光纤的实际传输特性的测量目前主要有两种: 一是直接测量法, 即采用专用的实验设备对光纤进行直接测量; 二是间接测量法, 例如可实际测量光纤的结构参数, 然后通过数值分析来获得光纤的传输特性. 对于光子晶体光纤, 除了制作难度比传统光纤高外, 对其性能的准确测量也是该领域面临的一大难题. 现有的光纤特性测试设备多是针对普通光纤特性测试的, 不仅价格昂贵, 而且直接应用于光子晶体光纤特性测量存在着一些难以解决的问题, 尤其是大模场面积光子晶体光纤的模场、模式及弯曲特性测量, 存在着与传统跳线接续或开放空间入射光耦合等方式方法所引入的不确定性影响问题, 直接测量不仅难度大, 尚需一系列昂贵设备的支持. 本文主要采用间接测量法研究研制实际光纤的传输特性^[17], 其主要思想是通过采集研制的实际光纤的横截面的数字显微图, 借助于数字图像处理技术对实际光纤的横截面进行几何重构, 得到实际光纤的横向折射率的分布后, 应用全矢量有限元方法获得实际光纤的传输特性. 重构后的光纤截面结构如图 1(c) 所示, 与实际结构图 1(b) 对比可以看出, 重构的光纤截面结构与实际光纤的截面结构一致. 由重构出的研制光纤的横截面几何结构, 即可获得其横截面折射率分布 $n_0(x, y)$.

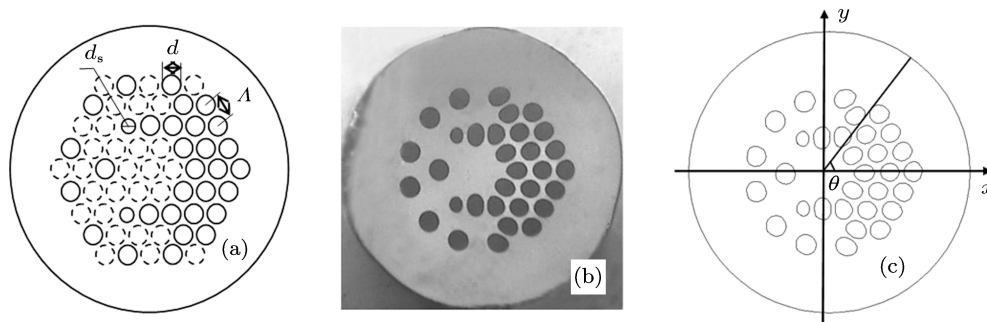


图 1 抗弯曲大模场面积 PCF 横截面图 (a) 设计结构; (b) 研制光纤横截面显微图; (c) 研制光纤横截面重构图

光纤弯曲变形,也会引起传输模式、模场泄漏等传输特性的变化.对于弯曲光纤的特性分析,可以按对其横截面的折射率分布进行弯曲修正后的直光纤情形进行特性分析.当光纤向 x 轴负方向弯曲时,其横截面的折射率分布可以用(1)式表示^[18,19]:

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

其中, R 为光纤弯曲半径, θ 为光纤弯曲方向与 $+x$ 轴的夹角,即光纤弯曲方向角.

根据获得的光纤横截面折射率分布,应用全矢量有限元法,结合完美匹配边界条件^[20-22],即可对所研制光纤的传输模式、模场面积及其弯曲损耗进行分析.在获得对应情形光纤中的有效模式传输常数 β 和模场分布的基础上,根据下式可获得光纤中各有效模式对应的等效模场面积 A_{eff} :

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

式中, E 是电场矢量, S 代表整个光纤横截面.光纤

中各有效模式的限制损耗 L 则可通过其传输常数的虚部进行计算

$$L = \frac{20}{\ln 10} \text{Im}(\beta) = \frac{20}{\ln 10} k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) (\text{dB/m}), \quad (3)$$

其中, k_0 为真空中自由波数, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ 为模式的有效折射率.

掺 Yb 光纤激光器是高功率光纤激光器中应用最广的一类激光器,因此,本文重点研究所研制抗弯曲大模场面积 PCF 在 1064 nm 波长附近的模式特性和弯曲特性.

3 模式特性

图 2 为所研制 PCF 光纤在波长 1064 nm 处的基模和二阶模的模场矢量分布图.正如设计预期,研制的实际光纤可以有效地将基模束缚在纤芯中传输,而空气孔占空比较小的左侧,对高阶模形成了高泄露通道,二阶模即可通过该泄露通道向包层泄露.

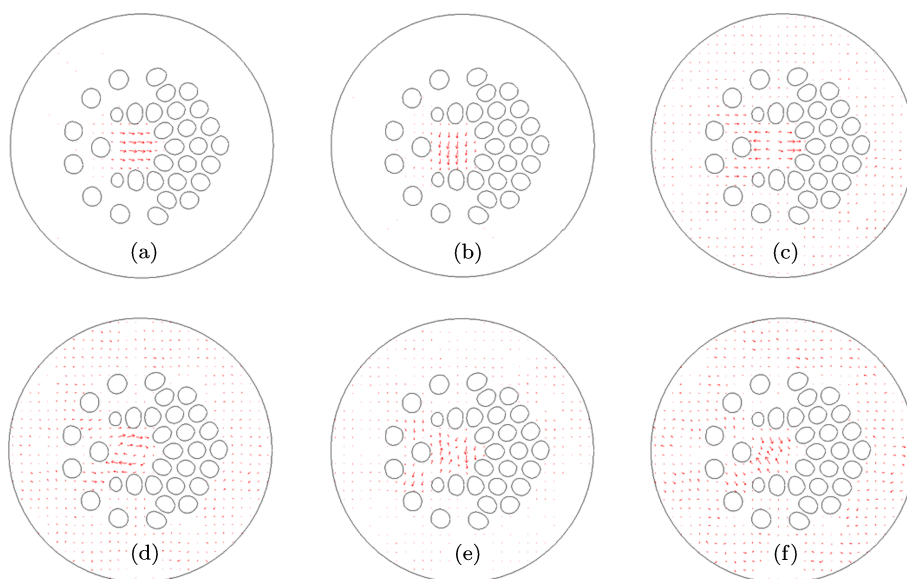


图 2 所研制光纤中在波长 1064 nm 处基模和二阶模模场矢量分布图 (a), (b) 基模; (c)—(f) 二阶模

图 3(a) 所示为所研制光纤在 975—1100 nm 波长范围内有效传输模式的实际限制损耗, FM- x , FM- y 分别代表基模的两个偏振态, SM-1—SM-4 为二阶模的四个简并态.从图 3(a) 中可以看出,在 975—1100 nm 波长范围内基模损耗小于 0.00025 dB/m,从波长 1020 nm 开始,二阶模损

耗大于 1 dB/m,二阶模与基模的损耗相差 4 个量级.如此大的损耗差,有效地保证了在 1020—1100 nm 波长范围内光纤中只有基模传输,即实现了单模传输.图 3(b) 所示为光纤中基模两个偏振态的模场面积随波长的变化情况,在 975—1100 nm 波长范围内,基模模场面积基本保持不变,波幅仅为 0.035%,

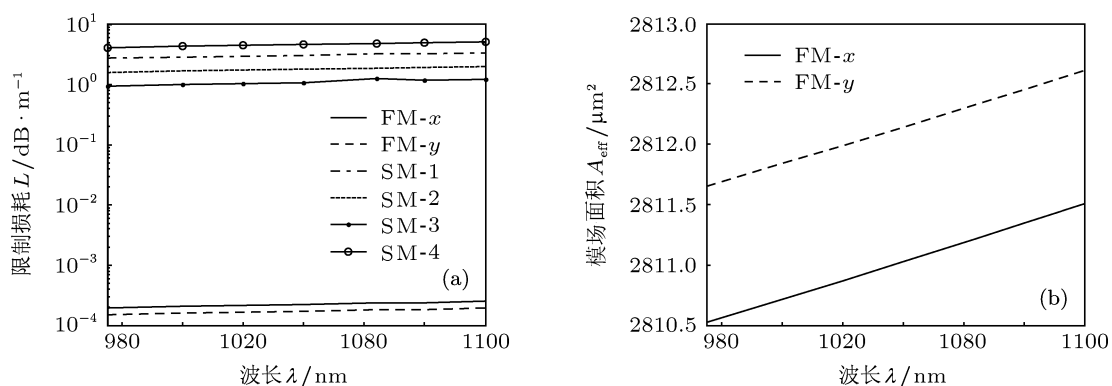


图3 所研制光纤中基模和二阶模的传输特性 (a) 基模和二阶模的限制损耗; (b) 基模模场面积

因此所研制光纤的模场面积具有良好的光谱平坦性. 在波长 1064 nm 处, 平直状态下基模限制损耗为 0.00024 dB/m, 高阶模限制损耗高于 1.248 dB/m, 二阶模与基模的损耗相差 4 个量级, 即实现了单模运转, 而且基模模场 x 和 y 偏振态的模场面积分别为 2811.216, 2812.325 μm^2 , 差值小于 0.04%, 且基模的模式双折射小于 10^{-6} , 基模的两个偏振态简并. 因此可以认为, 所研制光纤具有非偏振相关的大模场面积单模传输特性.

4 弯曲特性

光纤弯曲引起光纤形变, 弯曲半径和弯曲方向角对光纤传输特性, 尤其是对光纤弯曲损耗的影响, 决定了光纤的弯曲特性.

4.1 弯曲半径的影响

当研制的实际光纤向 x 轴负方向弯曲, 横截面折射率分布发生的变化情况由 (1) 式决定. 在 x 轴

负方向, 光纤背景 (石英) 折射率因弯曲将降低, 在 x 轴正方向, 背景折射率升高. 图 4 给出了基模弯曲损耗及模场面积随弯曲半径变化的对应关系. 从图中可以看出, 基模两偏振态随弯曲半径的变化具有较好的一致性, 因此所研制光纤在弯曲情况下仍保持非偏振相关的大模场面积基模传输特性.

如图 4(a) 所示, 随着弯曲半径的减小, 弯曲损耗先略有降低, 然后逐渐增加, 弯曲半径在 20—45 cm 之间时弯曲损耗较低. 弯曲半径减小至 20 cm 后再进一步减小, 弯曲损耗急剧增加, 但即便弯曲半径小到 5 cm, 弯曲损耗始终维持在 10^{-3} dB/m 量级以下. 研究表明, 所研制光纤具有良好的抗弯曲特性.

另外, 如图 4(b) 所示, 随着弯曲半径的减小, 基模模场面积逐渐减小. 在平直状态下, 基模模场面积约为 2812 μm^2 , 当弯曲半径为 20 cm 时, 模场面积约为 1000 μm^2 . 实际应用时一般可保持光纤弯曲半径大于 20 cm, 因此所研制光纤的模场面积总可以保持在 1000 μm^2 以上的大模场面积运转, 对应弯曲损耗小于 10^{-6} dB/m.

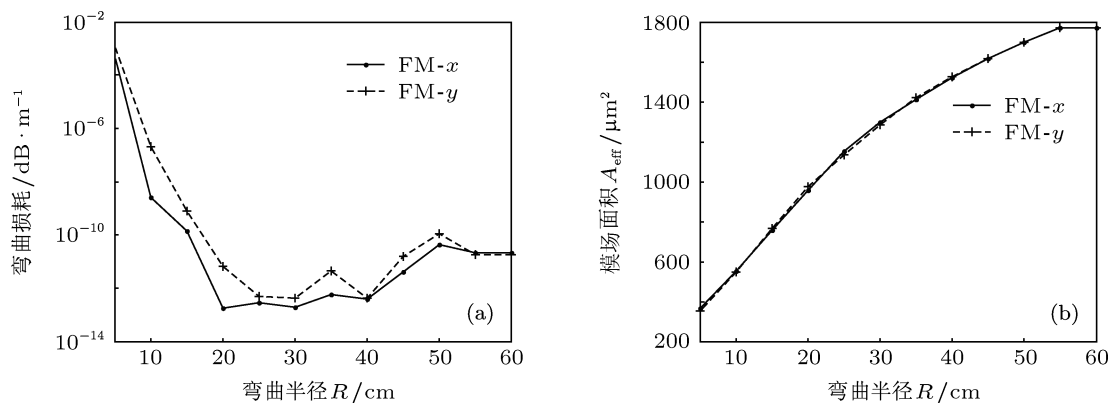


图4 所研制光纤的基模传输特性随弯曲半径的变化关系 (a) 弯曲损耗; (b) 模场面积

4.2 弯曲角度的影响

非对称结构大模场面积 PCF 弯曲损耗一般对弯曲方向角比较敏感, 目前惟一研制出的非对称结构抗弯曲大模场面积 PCF 在实际应用时须将弯曲方向角控制在 $\pm 7^\circ$ 范围内 [15]. 为了便于与现有报道的非对称结构低弯曲损耗大模场面积 PCF 比较 [15,16], 这里重点讨论光纤弯曲半径为 30 cm 时研制光纤的弯曲特性受弯曲方向角的影响.

图 5 为弯曲半径 30 cm 时所研制光纤基模弯曲损耗和模场面积随弯曲方向角的变化关系. 光纤结构关于 x 轴呈二重对称性, 因此光纤弯曲损耗及模场面积随弯曲方向角的变化呈对称分布. 弯曲方向角在 $\pm 60^\circ$ 范围以内, 模场面积约为 $1369 \mu\text{m}^2$ 变

化缓慢, 弯曲损耗小于 0.0069 dB/m ; 弯曲方向角超过 $\pm 60^\circ$ 后, 基模场面积及弯曲损耗急剧变化, 模场沿上侧或下侧空气孔间的泄漏通道向包层辐射形成泄漏模式, 造成弯曲损耗的迅速增大和模场面积的突变.

图 6 为弯曲半径 30 cm 时不同弯曲方向角度下光纤中基模的模场分布图. 由于光纤是关于 x 轴二重对称, 因此只需给出弯曲角度为正值时几个典型情形的模场分布. 可见, 弯曲方向角度为 0° — 60° 时, 基模场可束缚在纤芯中传输; 当弯曲方向角度达到 80° 时, 基模模场明显向包层区域泄漏, 将形成较大的弯曲损耗. 当光纤弯曲半径为 30 cm 时, 所研制光纤可以承受的弯曲方向角为 $[-60^\circ, 60^\circ]$.

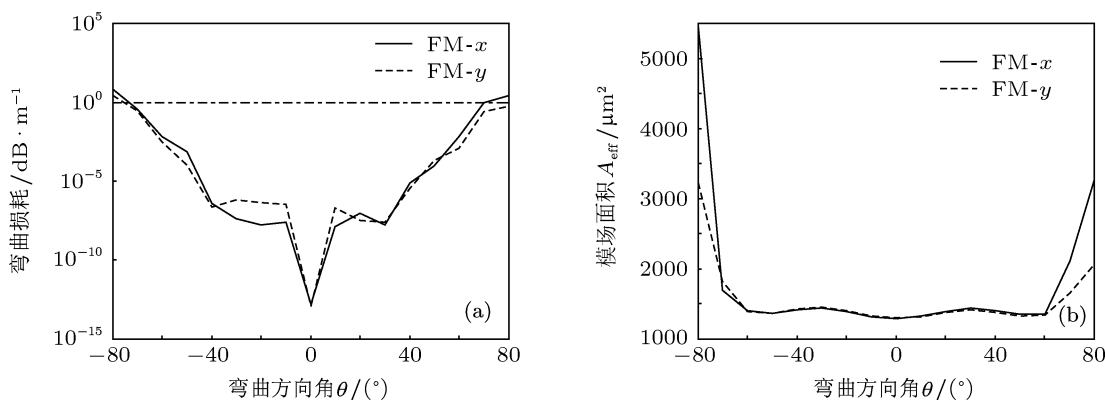


图 5 弯曲半径 30 cm 时所研制光纤传输特性与弯曲方向角的关系 (a) 基模弯曲损耗; (b) 基模模场面积

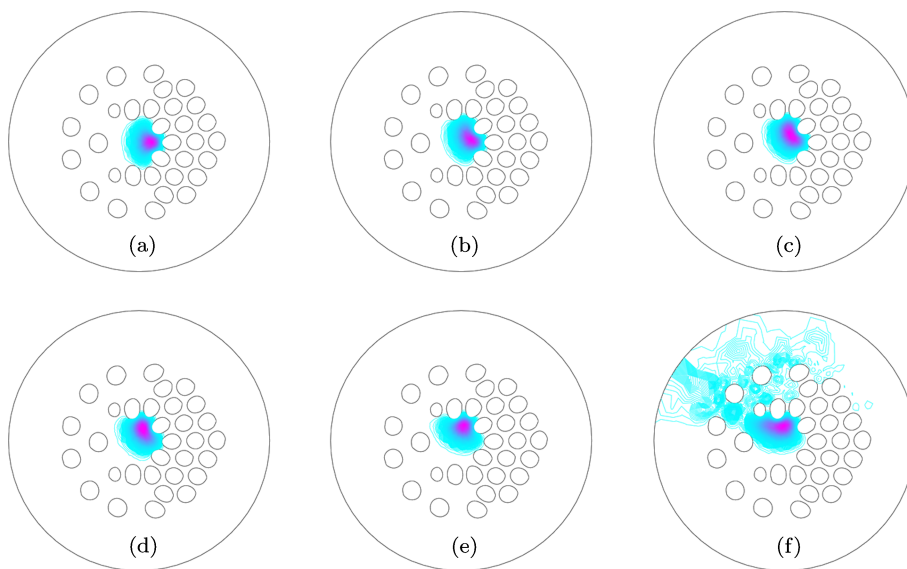


图 6 弯曲半径为 20 cm 时不同弯曲方向角度下的基模模场分布图 (a) 0° ; (b) 20° ; (c) 30° ; (d) 40° ; (e) 60° ; (f) 80°

5 结论

本文采用非对称结构, 通过优化缺陷和空气孔的位置和大小, 提出并研制出一种新型抗弯曲的大模场面积 PCF. 该光纤可以有效地同时实现基模大模场面积和低弯曲损耗, 平直状态下在波长 1064 nm 处的模场面积可以达到 $2812 \mu\text{m}^2$, 在 1020—1100 nm 波长范围内实现了单模传输. 在波长 1064 nm 处, 只要光纤保持弯曲半径大于 20 cm, 模场面积可以保持在 $1000 \mu\text{m}^2$ 以上, 弯曲损耗小于 10^{-6} dB/m. 与现有报道的非对称结构的低

弯曲损耗大模场面积 PCF 相比, 当光纤弯曲半径为 30 cm 时, 可以承受的弯曲方向角的变化范围可扩展至 -60° — 60° . 这种低弯曲损耗大模场面积 PCF 不仅实现了大模场面积特性及低弯曲损耗特性, 也大大扩展了光纤可以承受的弯曲方向角的变化范围. 如果进一步采用掺镱或掺铥等增益介质做纤芯, 通过元素共掺技术如共掺氟, 控制掺杂纤芯的折射率, 使其折射率与石英背景折射率接近, 有望研制出各种大模场面积低弯曲损耗的增益光纤, 可为各种新型高功率光纤激光器提供较好的研制基础.

- [1] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, Shverdin M Y, Stappaerts E A, Sridharan A K, Pax P H, Heebner J E, Siders C W, Barty C P J 2008 *Opt. Express* **16** 13240
- [2] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, Liem A, Höfer S, Zellmer H, Nolte S, Limpert J 2005 *J. Phys. B* **38** S681
- [3] Li M J, Chen X, Liu A, Wang G S, Walton D T, Zenteno L A 2009 *J. Lightw. Technol.* **27** 3010
- [4] Knight J C, Birks T A, Cregan R F, Russell P S, de Sandre J P 1998 *Electron. Lett.* **34** 1347
- [5] Limpert J, Schmidt O, Rothhardt J, Röser F, Schreiber T, Tünnermann A, Ermeneux S, Yvernault P, Salin F 2006 *Opt. Express* **14** 2715
- [6] Schmidt O, Rothhardt J, Eidam T, Röser F, Limpert J, Tünnermann A, Hansen K P, Jakobsen C, Broeng J 2008 *Opt. Express* **16** 3918
- [7] Vogel M M, Abdou-Ahmed M, Voss A, Graf T 2009 *Opt. Lett.* **34** 2876
- [8] Dong L, Wu T W, McKay H A, Fu L, Li J, Winful H 2009 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **15** 47
- [9] Wu T W, Dong L, Winful H 2008 *Opt. Express* **16** 4278
- [10] Ward B G 2008 *Opt. Express* **16** 8532
- [11] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiba M 2007 *Opt. Express* **15** 1794
- [12] Guo Y Y, Hou L T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4041 (in Chinese) [郭艳艳, 侯蓝田 2010 物理学报 **59** 4041]
- [13] Napierała M, Nasiłowski T, Bereś-Pawlik E, Berghmans F, Wójcik J, Thienpont H 2010 *Opt. Express* **18** 15408.
- [14] Napierała M, Nasiłowski T, Bereś-Pawlik E, Mergo P, Berghmans F, Thienpont H 2011 *Opt. Express* **19** 22628
- [15] Chen M Y, Zhang Y K 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 2216
- [16] Wang L W, Lou S Q, Chen W G, Li H L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 4209
- [17] Olszewski J, Szpulak M, Martynkien T, Urban W, Berghmans F, Nasiłowski T, Thienpont H 2007 *Opt. Commun.* **269** 261
- [18] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 4770
- [19] Guo S, Wu F, Albin S 2004 *Opt. Express* **12** 3341
- [20] Boag A, Boag A, Mittra R 1994 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **7** 395
- [21] Uranus H, Hoekstra H 2004 *Opt. Express* **12** 2795
- [22] White T P, McPhedran R C, de Sterks C M, Botten L C, Steel M J. 2001 *Opt. Lett.* **26** 1660

A novel bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber*

Lou Shu-Qin[†] Lu Wen-Liang Wang Xin

(School of Electronic and Information Engineer, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 16 July 2012; revised manuscript received 14 August 2012)

Abstract

A novel bend-resistant large-mode-area silica photonic crystal fiber (PCF) is proposed and fabricated. With the advantage of flexible design on the PCF configuration, the properties of large-mode-area, single mode propagation and low bend loss can be simultaneously achieved by intentionally designing the position of defect and the size of air holes. Modal properties and bending loss of the actual PCF can be evaluated with previous model for assessing the properties of the actual fiber. Numerical results demonstrate that this fiber has an extremely large mode area of $2812 \mu\text{m}^2$, low confine loss of 0.00024 dB/m of the fundamental mode and high confine loss of over 1.248 dB/m of higher order mode at a wavelength of 1064 nm when the optical fibre is kept straight. The large difference in propagation loss levels between fundamental mode and higher order modes ensures the efficient single-mode propagation in the fiber core. Furthermore, the effects of bend radius and bend direction angle on bend loss are investigated when the fiber is bent. Even if bend radius is as small as 5 cm , bend loss of this fiber is still below 10^{-3} dB/m . It is found that the proposed fiber has the negligible bending loss at a bending radius of 30 cm with the bending angle ranging from -60° to 60° . These results illustrate that the fabricated fiber possesses the better bend resistant properties and can overcome the sensitivity to bend direction angle caused by the asymmetric structure. The fabricated fiber will play an important role in developing high power fiber laser, fiber amplifier and high power delivery application.

Keywords: photonic crystal fiber, large-mode-area, low bend loss, bend direction angle

PACS: 42.81.Qb, 42.81.Bm, 42.81.Dp

DOI: 10.7498/aps.62.044201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977033, 61177082) and the Beijing Natural Science Foundation, China (Grant No. 4122063).

[†] Corresponding author. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn