

新型三角芯抗弯曲大模场面积光子晶体光纤*

王鑫 娄淑琴[†] 鹿文亮

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

(2013年3月26日收到; 2013年5月9日收到修改稿)

提出了一种新型三角芯抗弯曲大模场面积光子晶体光纤. 该结构采用单一尺寸的圆形空气孔, 降低了制作难度. 在波长 $1.064 \mu\text{m}$ 处, 在平直状态和弯曲半径为 30 cm 时, 模场面积分别为 $1386 \mu\text{m}^2$ 和 $1153 \mu\text{m}^2$, 弯曲带来的模场面积减少量仅为 16.85% . 当弯曲半径为 30 cm 时, 基模的损耗为 0.087 dB/m , 二阶模的损耗大于 1.5 dB/m , 大的损耗差有效保证了光纤单模运转. 此外, 弯曲半径 30 cm 时, 弯曲方向角扩展至 $\pm 180^\circ$, 光纤弯曲不再受弯曲方向的限制. 所设计的光纤结构具有大模场面积、小的模场面积减少量、低的弯曲损耗以及低的弯曲方向敏感度等优势, 为小型化、集成化高功率激光传输及光纤激光器和放大器的研究奠定了基础.

关键词: 光子晶体光纤, 大模场面积, 抗弯曲, 弯曲方向角

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

DOI: 10.7498/aps.62.184215

1 引言

高功率光纤激光器具有结构紧凑、散热效果好、输出光束质量高等优点, 在军事、医疗、工业等领域有着广泛应用. 近年来, 随着输出光功率的迅速提高, 非线性效应成为限制高功率激光器发展的一大障碍. 由于光纤中非线性效应与光纤模场面积成反比, 因此, 增大光纤模场面积是降低非线性效应最直接有效的途径. 为了提高输出光的光束质量和激光输出的稳定性, 光纤在获得大模场面积的同时还需要保证单模传输. 在实际应用中, 通常采用弯曲或者缠绕的方法将光纤固定在金属热沉上, 不仅使光纤激光器的结构更加紧凑, 有利于激光器的小型化、集成化, 而且便于进行热控管理. 因此, 具有抗弯曲特性、大模场面积的单模光纤在高功率光纤激光器中具有重要的应用价值和研究意义.

传统阶跃光纤很难在保证单模的同时满足抗弯曲、大模场面积的要求. 这是由于传统光纤主要通过增大纤芯直径的方法来获得大的模场面积. 然而, 随着纤芯直径的增大, 光纤中不可避免地出现多种传输模式. 为保证单模传输, 需要尽可能地降

低光纤的数值孔径, 当纤芯直径为 $30 \mu\text{m}$ 时, 数值孔径需降到 $0.027^{[1]}$. 降低数值孔径需要降低包层和纤芯的掺杂折射率差, 而以现有的制造工艺, 数值孔径低于 0.06 的光纤是难以实现的^[2]. 另一方面, 大纤芯直径的单模光纤对弯曲非常敏感. 当纤芯直径为 $30 \mu\text{m}$ 时, 在弯曲半径为 50 cm 的状态下, $1.06 \mu\text{m}$ 处的光纤弯曲损耗高达 $3.3 \text{ dB/m}^{[1]}$, 难以应用于高功率光纤激光器中.

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 打破了传统光纤结构的限制, 为抗弯曲大模场面积单模光纤的研制开辟了新的途径. 1998 年 Knight 等^[3] 首次提出并成功制备出模场面积为 $380 \mu\text{m}^2$ 的大模场光子晶体光纤. 随后, 多种新结构的大模场光子晶体光纤相继出现^[4-8], 但所报道的光纤结构大多具有高的弯曲损耗, 并且由于结构复杂, 制作工艺可行性低, 目前未有研制成功的报道. 为了进一步降低弯曲损耗, 研究者发现具有非对称包层结构的 PCF 能够增大高阶模与基模的弯曲损耗差, 从而实现光纤在弯曲状态下的单模运转. 2010 年, Napierala 等^[9] 首次提出一种双空气孔尺寸的非对称包层 PCF 结构, 光纤模场面积在平直

* 国家自然科学基金 (批准号: 61177082, 61205074) 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

状态和弯曲状态下分别为 $2524 \mu\text{m}^2$ 和 $1065 \mu\text{m}^2$. 由于采用了非对称的包层结构, 光纤在弯曲时必须严格控制弯曲方向. 当弯曲方向角超过 $\pm 3^\circ$ 的范围时, 基模难以被束缚在纤芯而是迅速向包层泄露, 导致弯曲损耗的急剧增加. 在此基础上, 2011 年 Napierala 等^[10] 又研制出一种双空气孔间距低弯曲损耗大模场 PCF, 其模场面积在平直状态和弯曲状态下分别为 $1454 \mu\text{m}^2$ 和 $655 \mu\text{m}^2$. 该种结构的光纤仍然对弯曲方向十分敏感, 弯曲方向角必须控制在 $\pm 7^\circ$ 的范围内. 在实际高功率光纤激光器的应用中, 除了要考虑弯曲方向的问题, 弯曲带来的模场形变会导致模场面积锐减, 这也是一个不可忽视的问题. 2011 年, Chen 和 Zhang^[11] 采用含有两种不同折射率的掺氟棒的微芯结构, 有效地抑制了弯曲带来的模场形变, 将弯曲 30 cm 时相对直光纤的模场面积减少量降到 20.66%, 同时将弯曲方向角扩展到 $\pm 45^\circ$. 近期, 本课题组研制出一种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^[12], 在弯曲半径 30 cm 处, 将可承受弯曲方向角范围扩展至 $\pm 60^\circ$, 但基模和高阶模的弯曲损耗差还需进一步提高.

本文从降低制作难度的角度出发, 采用易于实现的三角格子排布的单一尺寸圆孔及少量掺氟棒设计了一种三角芯结构、具有抗弯曲特性大模场面积的光子晶体光纤. 通过合理的参数设计, 该光纤结构在弯曲状态下具有低的弯曲损耗, 并且能有效抑制弯曲带来的模场面积减少. 在工作波长 $1.064 \mu\text{m}$ 处, 弯曲半径 30 cm 时, 基模的弯曲损耗为 0.087 dB/m , 二阶模弯曲损耗大于 1.5 dB/m , 模场面积为 $1153 \mu\text{m}^2$, 弯曲带来的模场面积减少量仅为 16.85%, 实现单模运转. 此外, 具有旋转对称性的三角芯结构解决了已报道的非对称包层结构对弯曲方向角度敏感的问题, 将弯曲方向角扩展至 $\pm 180^\circ$, 实现了光纤在弯曲半径 30 cm 时任意方向角度的弯曲, 拓展了其在高功率光纤激光器、放大器及高功率传输领域的应用.

2 光纤结构与理论模型

三角芯抗弯曲大模场光子晶体光纤结构如图 1 所示. 结构上我们采用易于制作的、按三角格子规律排布的圆形空气孔, 缺失中心的三个空气孔(虚线处所示)形成三角形芯区, 为了进一步增大模场

面积, 最内圈的空气孔用掺氟棒代替(深灰色区域所示). 图 1 中浅灰色区域代表包层介质 SiO_2 , 其折射率在工作波长 $1.064 \mu\text{m}$ 处为 1.45. 白色小孔代表直径为 d_1 的空气孔, 孔间距为 Λ , 深灰色小孔代表直径为 d_0 的掺氟棒, 其折射率为 n_f .

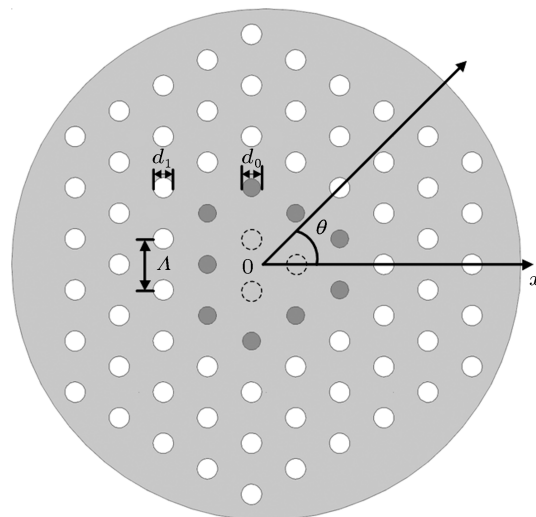


图 1 三角芯抗弯曲大模场光子晶体光纤截面图

有限元方法 (FEM) 由于计算精度高, 可用于几何结构排列复杂的光子晶体光纤特性分析, 是目前分析光子晶体光纤最常用也是最权威的方法^[13,14]. 本文采用全矢量有限元方法结合完美匹配层 (PML) 边界条件^[15], 对所提出的光纤特性进行理论分析.

采用各向异性的 PML, 麦克斯韦波动方程可以表示为

$$\nabla \times ([s]^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 n^2 [s] \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

$$[s] = \begin{pmatrix} s_y/s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_x/s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_x s_y \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{E} 为电场矢量, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是真空中波数, λ 为相应的工作波长, n 为折射率分布, s_x 和 s_y 为 PML 参数.

利用全矢量有限元方法对光纤结构特性进行理论分析, 首先要确定光纤横截面的折射率分布. 由于光纤弯曲之后, 折射率分布会发生改变, 从而影响光纤中的传输模式及模式特性的改变. 因此我们利用弯曲等效折射率分布公式, 将弯曲之后的光纤横截面折射率分布等效为直光纤进行分析. 当光

纤向 x 轴负向弯曲时, 弯曲光纤的折射率分布可以表示为 [16,17]

$$n(x,y) = n_0(x,y) \left(1 + \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{R} \right), \quad (3)$$

其中, $n_0(x,y)$ 为光纤初始折射率分布, R 为弯曲半径, θ 为光纤弯曲方向与 $+x$ 轴方向的夹角, 即弯曲方向角 (图 1 所示).

根据光纤横截面的折射率分布, 可以计算得到光纤的模场分布和各阶模式的传播常数 β . 模场面积作为大模场面积光纤的一项重要特性参数, 可以表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint_s |\mathbf{E}|^2 dx dy \right)^2}{\iint_s |\mathbf{E}|^4 dx dy}. \quad (4)$$

其中, \mathbf{E} 代表电矢量强度, s 代表光纤横截面.

光纤弯曲不仅会影响模场分布, 同时会带来弯曲损耗. 分析光纤的弯曲特性, 各阶模式的限制损耗也是一项关键参数. 光纤中模式的限制损耗 L 可以通过传播常数 β 的虚部求得:

$$L = \frac{20}{\ln 10} \text{Im}(\beta) = \frac{20}{\ln 10} k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (5)$$

其中, $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ 为模式的有效折射率. 实际应用中, 基模限制损耗低于 0.1 dB/m, 同时高阶模限制损耗高于 1 dB/m, 即可认为光纤单模运转.

3 结构参数对弯曲特性的影响

为了进一步优化光纤的特性, 本节对图 1 所示的三角芯大模场面积光子晶体光纤的结构参数对光纤弯曲特性的影响进行了研究. 为了保证光纤能够单模运转, 需要减小芯区与包层的相对折射率差, 即采用较小的孔径比. 综合考虑制作可行性, 我们将孔径比设为 0.4. 在此基础上重点讨论了最内圈掺氟棒的直径与掺氟棒折射率对弯曲特性的影响, 分析过程中仅改变其中一项参数, 其他特性参数保持不变. 初始参数为 $\Lambda = 20 \mu\text{m}$, $d_1 = 8 \mu\text{m}$, $d_0 = 6 \mu\text{m}$, 掺氟棒折射率 n_f 为 1.448.

3.1 掺氟棒直径对光纤弯曲特性的影响

图 2 (a) 和 (b) 分别给出了弯曲半径为 30 cm 时, 掺氟棒直径变化对模式弯曲损耗和基模模场面积的影响. 图 2(a) 中 FM- x 和 FM- y 分别代表基模的 x 偏振态和 y 偏振态, SM-1—SM-4 代表四个二阶模式.

阶模式. 由图 2 可知, 随着掺氟棒直径的增加, 基模的弯曲损耗增大, 而模场面积则对应减小. 这源于光纤弯曲之后, 根据折射率分布公式 (3) 可知, x 轴右侧折射率分布较高, 基模模场分布于折射率较高的区域, 即偏向 x 轴右侧, 而右侧掺氟棒对基模的束缚作用减弱, 导致基模的弯曲损耗增大; 同时由于掺氟棒直径的增大, 芯区的相对面积减小, 导致模场面积的减小.

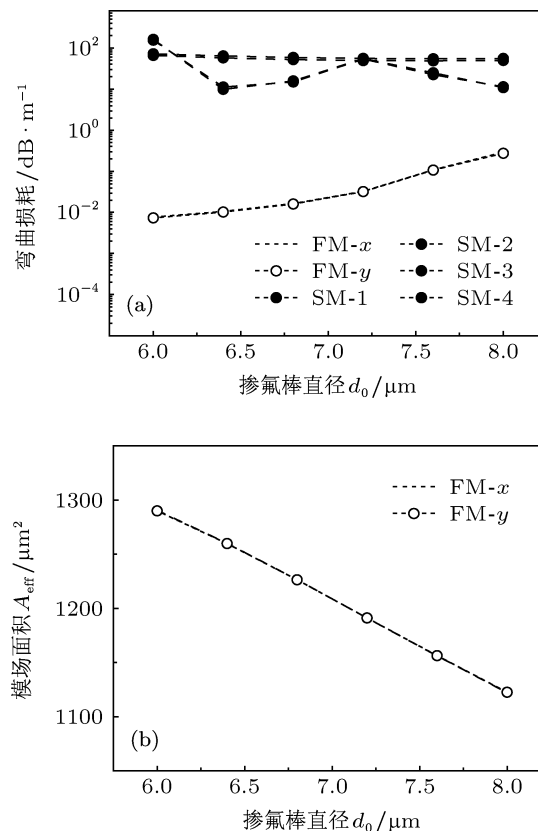


图 2 掺氟棒直径对弯曲特性的影响 (a) 模式弯曲损耗; (b) 基模模场面积

3.2 掺氟棒折射率对光纤弯曲特性的影响

图 3(a) 和 (b) 分别给出了弯曲半径为 30 cm 时, 掺氟棒折射率变化对弯曲损耗和基模模场面积的影响. 图 3(a) 中 FM- x 和 FM- y 分别代表基模的 x 偏振态和 y 偏振态, SM-1—SM-4 代表四个二阶模式. 由图 3 可知, 随着掺氟棒折射率的增大, 基模的弯曲损耗减小, 而模场面积随之增大. 这是由于掺氟棒折射率越大, 越接近于基模的折射率, 模场开始向外扩散, 束缚基模的不再是掺氟棒而是掺氟棒外侧的空气孔, 由于大的折射率差, 空气孔对基模的束缚作用较大, 因此导致弯曲损耗的减小, 同时由于模场的扩散也导致模场面积的增加.

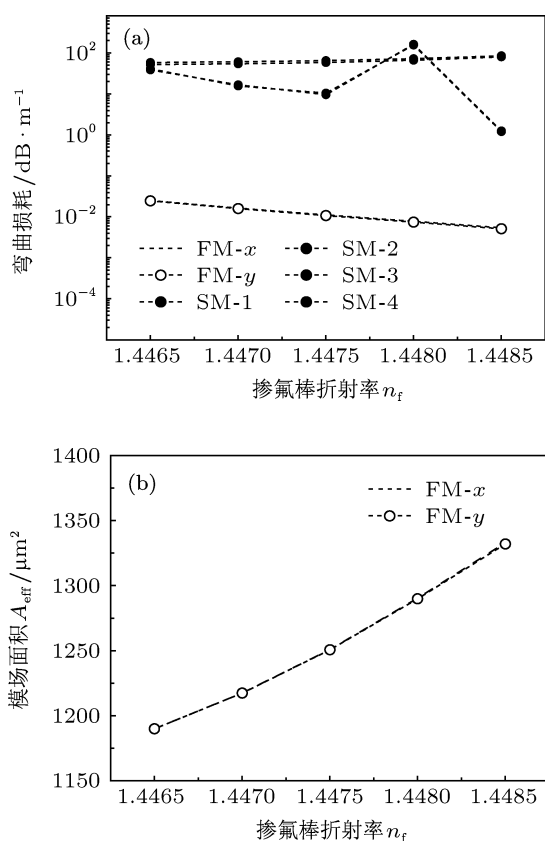


图3 掺氟棒折射率对弯曲特性的影响 (a) 模式弯曲损耗; (b) 基模模场面积

4 最优结构参数及弯曲特性

通过分析掺氟棒直径及折射率变化对弯曲特性的影响, 可以发现, 当掺氟棒直径小于 $7.5 \mu\text{m}$, 掺氟棒折射率低于 1.4485 时, 光纤弯曲之后, 基模的弯曲损耗低于 0.1 dB/m , 二阶模损耗高于 1 dB/m , 光纤可以保持单模运转. 在此基础上对光纤结构参数进行了进一步优化, 设计实现了在弯曲半径为 30 cm 时任意弯曲角度下可以保持单模的大模场低弯曲损耗光子晶体光纤. 最优结构参数为: $\Lambda = 20 \mu\text{m}$, $d_1 = 8 \mu\text{m}$, $d_0 = 7 \mu\text{m}$, 掺氟棒折射率 n_f 为 1.4474. 图 4 给出了光纤在平直状态时不同波长对应基模的限制损耗和模场面积特性. 从图 4 中可知, 工作波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 时, 基模 x 偏振态和 y 偏振态的限制损耗分别为 $1.99 \times 10^{-9} \text{ dB/m}$, $2.01 \times 10^{-9} \text{ dB/m}$, 对应模场面积分别为 1386.76 , $1386.78 \mu\text{m}^2$, 两偏振态之间模场面积差值仅为 0.0014% , 同时双折射仅为 3×10^{-10} , 可以忽略不计, 因此光纤基模两个偏振态属于良好的简并态.

图 5 为不同弯曲半径下基模的弯曲损耗及

模场面积特性. 从图 5 中可知, 随着弯曲半径的减小, 弯曲损耗增加, 模场面积减小. 当弯曲半径 30 cm 时, 基模的弯曲损耗为 0.087 dB/m , 模场面积为 $1154 \mu\text{m}^2$, 相对平直状态下模场面积减小了 16.85% , 低于目前所报道的最小的模场面积减小量 20.66% ^[11]. 当弯曲半径小于 30 cm 时, 基模弯曲损耗超过 0.1 dB/m , 不能满足单模条件. 而模场面积的变化趋势也在弯曲半径 30 cm 时出现一个拐点, 当弯曲半径小于 30 cm 时, 基模难以被束缚在纤芯, 迅速向包层泄露, 导致模场面积的急剧增大; 当弯曲半径大于 30 cm 时, 模场面积随着弯曲半径的增大而增大. 30 cm 作为该光纤结构的临界弯曲半径, 也是本文选择弯曲半径 30 cm 分析其弯曲特性的原因.

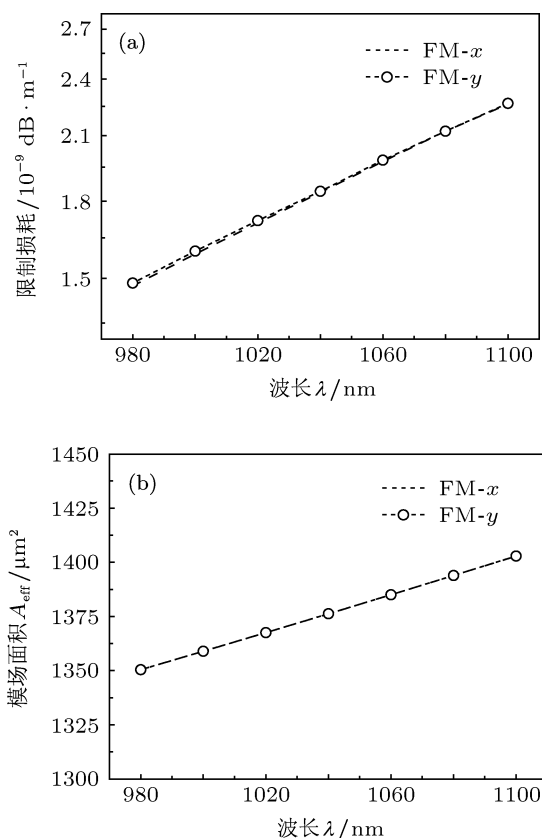


图4 光纤传输特性 (a) 基模限制损耗; (b) 基模模场面积

目前已报道的抗弯曲大模场面积 PCF 弯曲时都受弯曲方向角的限制, 为了与已报道的抗弯曲大模场 PCF 的弯曲特性进行对比, 本文对不同弯曲角度对弯曲特性的影响进行了分析. 图 6 为弯曲半径为 30 cm 时, 不同弯曲角度下基模的弯曲损耗及模场面积特性. 图 6(a) 中 FM-x 和 FM-y 分别代表基模的 x 偏振态和 y 偏振态, SM-1—SM-4

表四个二阶模式. 从图 6 中可以看出, 弯曲角度在 0° — 180° 的范围内, 基模弯曲损耗低于 0.1 dB/m , 二阶模损耗高于 1 dB/m , 光纤符合单模运转条件. 由于光纤结构关于 x 轴对称, 因此可认为光纤在弯曲角 -180° — 180° 范围内都能实现单模运转, 即在弯曲半径 30 cm 时, 光纤不受弯曲方向的限制. 另

一方面, 由于光纤特殊的三角芯结构存在旋转对称性, 弯曲损耗和模场面积随弯曲角度的增大出现周期性的变化. 从图 6 中可以发现, 当弯曲方向角为 60° 时, 基模的损耗最低, 仅为 0.005 dB/m , 同时模场面积达到最大, 为 $1397 \mu\text{m}^2$. 这点可以由图 7 中在不同弯曲方向角时基模模场分布得到验证.

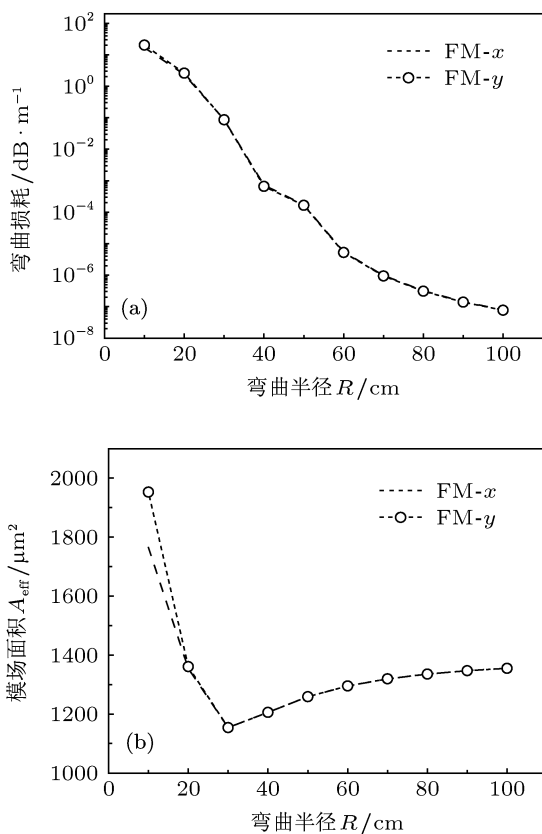


图 5 弯曲半径对弯曲特性的影响 (a) 弯曲损耗; (b) 模场面积

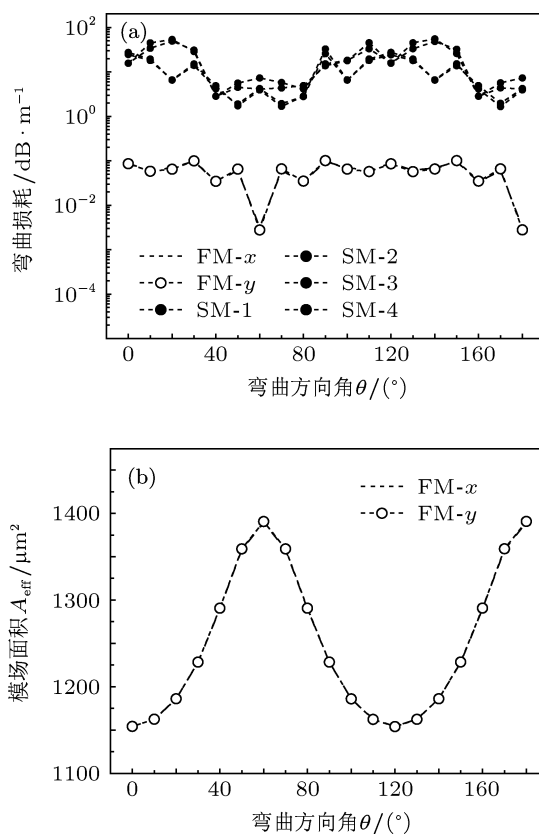


图 6 弯曲半径 30 cm 时光纤弯曲特性与弯曲方向角的关系 (a) 弯曲损耗; (b) 基模模场面积

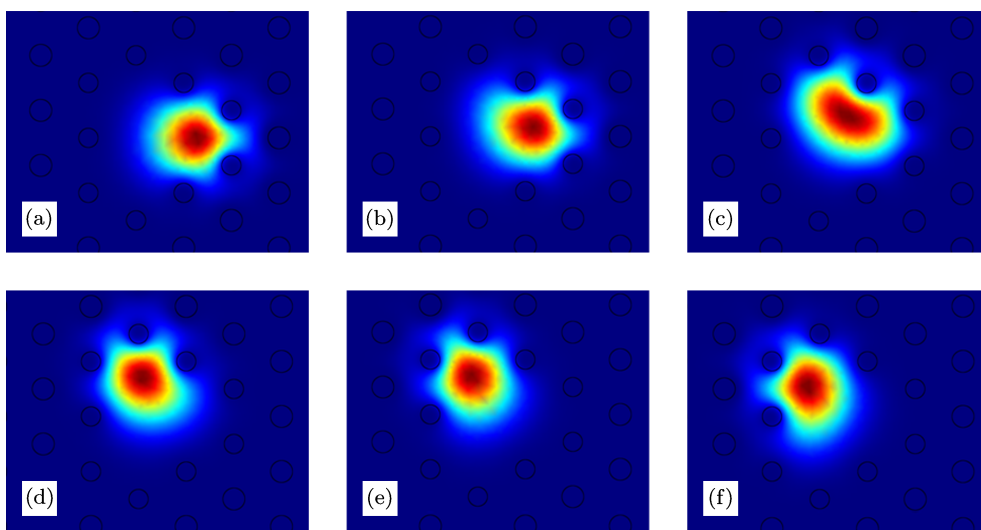


图 7 弯曲半径为 30 cm 时不同弯曲方向角下的模场分布图 (a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° ; (d) 90° ; (e) 120° ; (f) 150°

5 结 论

本文从降低制作难度的角度出发,提出了一种新型三角芯抗弯曲大模场面积光子晶体光纤.该光纤结构采用三角晶格排布的均匀圆形孔,缺失中心三个空气孔形成三角形芯区,并用掺氟棒代替最内圈空气孔进一步增大模场面积.通过分析掺氟棒直径及折射率对光纤弯曲特性的影响,进一步优化所设计的光纤结构.实现在波长 $1.064\ \mu\text{m}$ 处,模场面积在平直状态和弯曲 $30\ \text{cm}$ 时分别达到 $1386\ \mu\text{m}^2$ 和 $1153\ \mu\text{m}^2$ 的大模场光子晶体光纤,弯曲带

来的模场面积减少量仅为 16.85% .所设计的光纤结构不仅有效地抑制了弯曲形变带来的模场面积减少,还具有低的弯曲损耗.弯曲半径 $30\ \text{cm}$ 时,基模的弯曲损耗仅为 $0.087\ \text{dB/m}$,二阶模弯曲损耗大于 $1.5\ \text{dB/m}$,符合单模运转条件.此外,弯曲半径 $30\ \text{cm}$ 时,弯曲方向角可达 $\pm 180^\circ$,解决已报道的不对称包层结构受弯曲方向角限制的问题.所设计的光纤结构由于具有大模场面积、小的模场面积减少量、低的弯曲损耗以及低的弯曲方向敏感度,在高功率光纤激光器、放大器以及高功率传输等领域将具有重要的应用价值和广阔的发展前景.

- [1] Li M J, Chen X, Liu A, Gray S, Wang J, Walton D T, Zenteno L A 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 3010
- [2] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, Liem A, Höfer S, Zellmer H, Nolte S, Limpert J 2005 *J. Phys. B* **38** S681
- [3] Knight J C, Birks T A, Cregan R F, Russell P S, de Sandro P 1998 *Electron. Lett.* **34** 1347
- [4] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiha M 2007 *Opt. Express* **15** 1794
- [5] Abdelaziz I, AbdelMalek F, Ademgil H, Haxha S, Gorman T, Bouchriha H 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 2810
- [6] Abdelaziz I, Ademgil H, AbdelMalek F, Haxha S, Gorman T, Bouchriha H 2010 *Opt. Commun.* **283** 5218
- [7] Chen M Y, Sun B, Zhang Y K, Tong Y Q, Zhou J 2010 *Opt. Commun.* **283** 3153
- [8] Hu D J J, Luan F, Shum P P 2011 *Opt. Commun.* **284** 1811
- [9] Napierała M, Nasilowski T, Bereś-Pawlik E, Berghmans F, Wójcik J, Thienpont H 2010 *Opt. Express* **18** 15408
- [10] Napierała M, Nasilowski T, Bereś-Pawlik E, Mergo P, Berghmans F, Thienpont H 2011 *Opt. Express* **19** 22628
- [11] Chen M Y, Zhang Y K 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 2216
- [12] Lou S Q, Lu W L, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044201 (in Chinese) [娄淑琴, 鹿文亮, 王鑫 2013 物理学报 **62** 044201]
- [13] Rahman B 1995 *Prog. Electromagn. Res.* **10** 187
- [14] Guenneu S, Nicolet A, Zolla F, Lasquelllec S 2003 *Prog. Electromagn. Res.* **41** 271
- [15] Saitoh K, Sato Y, Koshiha M 2003 *Opt. Express* **11** 3188
- [16] Olszewski J, Szpulak M, Martynkien T, Urbańczyk W, Berghmans F, Nasilowski T, Thienpont H 2007 *Opt. Commun.* **269** 261
- [17] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiha M 2005 *Opt. Express* **13** 4770

Novel bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core*

Wang Xin Lou Shu-Qin[†] Lu Wen-Liang

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

(Received 26 March 2013; revised manuscript received 9 May 2013)

Abstract

A novel bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core is proposed in this paper. In this structure, the circle air holes with uniform size are used to reduce the difficulty in fabrication. At a wavelength of 1.064 μm , mode field area of the fundamental mode is 1386 μm^2 in a straight state, and it is 1153 μm^2 at a bending radius of 30 cm. The decrement of mode field area in a bent state is only 16.85% compared with that in a straight state. When a bending radius is 30 cm, bending loss of the fundamental mode is 0.087 dB/m while bending loss of the second order mode is higher than 1.5 dB/m. The bending loss difference between fundamental mode and second order mode is large enough to ensure that the fiber conforms to the single mode operation conditions. Furthermore, when the fiber is bent with a bending radius of 30 cm, the bending orientation angle can be extended to $\pm 180^\circ$, breaking the limit of the bending orientation. The fiber with large mode area, small decrement in mode field area, low bending loss and low sensitivity of bending orientation makes a great contribution to the miniaturization of high power fiber laser and fiber amplifier.

Keywords: photonic crystal fiber, large-mode-area, bend-resistant, bending orientation angle

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

DOI: 10.7498/aps.62.184215

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61177082, 61205074) and Beijing Natural Science Foundation, China (Grant No. 4122063).

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