

一种与标准单模光纤高适配的低弯曲损耗光子晶体光纤*

盛新志¹⁾ 娄淑琴^{2)†} 尹国路²⁾ 鹿文亮²⁾ 王鑫²⁾

1) (北京交通大学理学院, 北京 100044)

2) (北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

(2012年8月28日收到; 2013年1月22日收到修改稿)

设计并研制出一种与普通单模光纤高适配的低弯曲损耗光子晶体光纤. 结构采用光纤预制棒制作工艺上易于实现的掺锗芯六孔结构. 应用间接测量方法, 对其模式、弯曲及色散特性进行了系统的评估. 在波长 1550 nm 处研制光纤的模场面积为 $79.26 \mu\text{m}^2$, 色散为 $21.7 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, 模场面积和色散特性与标准单模光纤具有高的适配性. 在光纤弯曲半径为 5 mm 时, 在波长 1550 nm 处的弯曲损耗为 0.0365 dB/圈, 小于 G.657B 的弯曲损耗 0.5 dB/圈. 研究成果为光纤到户用低弯曲损耗光纤的实用化奠定了良好的基础.

关键词: 光子晶体光纤, 低弯曲损耗, 光纤到户, 高适配性

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

DOI: 10.7498/aps.62.104217

1 引言

在光纤到户的建设中, 为适应室内或设备内部复杂的布线需求, 需要对一部分传输光纤进行小弯曲半径布线, 如采用标准单模光纤布线将带来高的弯曲损耗. 随着光纤到户应用的迅速发展, 光纤的弯曲损耗已成为光纤应用中的一个不可回避的问题. 进一步优化光纤结构, 研究出能适应通信波段使用的弯曲不敏感并与标准单模光纤具有高适配性的光纤, 已成为特种光纤领域的研究热点之一^[1-9].

自 1996 年 Knight 等^[10] 首次研制出的第一根光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 以来, PCF 以其独特的特性和宽广灵活的结构设计自由度, 打破了传统光纤的结构局限, 为研制低弯曲损耗光纤提供了新途径. 2005 年, Himeno 等^[1] 提出了一种由一个掺锗芯、三个小尺寸空气孔及三个大尺寸空气孔构成的掺锗芯低弯曲损耗 PCF, 当光纤弯曲半径为 5 mm 时, 在波长 1550 nm 处的弯

曲损耗为 0.012 dB/圈, 模场直径为 $7.8 \mu\text{m}$, 色散为 $28.2 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. 同年, Saitoh 等^[3] 提出了另一种具有不同尺寸空气孔结构的低弯曲损耗 PCF, 当光纤弯曲半径为 5 mm 时, 在波长 1550 nm 处弯曲损耗为 0.011 dB/圈, 模场直径约为 $9.3 \mu\text{m}$, 色散为 $21.8 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. 由于采用了非均匀空气孔结构, 这两种低弯曲损耗 PCF 制作难度相对较高, 其模场直径和色散特性与普通单模光纤存在较大差异, 在实际应用中需考虑插入损耗及色散管理等问题.

2008 年, 康宁公司的 Li 等^[5] 提出了一种具有环形掺氟层结构的新型低弯曲损耗光纤. 它具有与标准单模光纤相匹配的掺锗芯, 通过在包层区域形成一定宽度的环形掺氟区域, 使包层区域折射率形成一定的凹陷, 提高了纤芯和包层的折射率差, 减小了光纤弯曲损耗. 在波长 1550 nm 处, 当光纤弯曲半径为 5 mm 时, 其弯曲损耗小于 0.1 dB/圈, 模场直径为 $9.7 \mu\text{m}$, 色散为 $17.6 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, 模场直径和色散特性与标准单模光纤具有良好的匹配性. 但这种光纤的制作需要精确地控制光纤掺氟区域的掺氟量及掺氟区域的厚度, 难度较高. 基于相

* 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

似的结构设计原理, Nakajima 等 [6] 在 2010 年提出了一种改进结构的低弯曲损耗 PCF. 通过在掺锗纤芯周围均匀排列十个相同尺寸的空气孔, 形成一个环形低折射率区, 有效改善了光纤的低弯曲损耗特性. 但是, 这种空气孔排列方式加大了光纤的制作难度. 近年来, 国内在 PCF 理论和实验研究方面均取得了较大的进展, 但在 PCF 制作技术方面与国外还存在一定的差距, 低弯曲损耗 PCF 的研制报道相对较少.

本文设计并研制出一种与标准单模光纤高适配的低弯曲损耗 PCF, 其结构采用光纤预制棒制作工艺上易于实现的掺锗芯六孔结构, 与标准单模光纤具有相似模场面积及色散特性, 具有较好的实用化前景.

2 光纤设计与弯曲分析理论

从工艺实现的可行性及与标准单模光纤的适配性出发, 在传统三角格子结构石英 PCF 的基础上, 中心空气孔由低掺锗芯棒代替形成纤芯, 包层区仅采用一圈相同尺寸的空气孔以降低光纤预制棒制作难度, 同时使高阶模通过空气孔间空隙区向包层区域辐射或泄漏, 增加高阶模限制损耗以实现单模传输. 图 1(a) 为研制的低弯曲损耗 PCF 光纤的横截面显微图. 掺锗纤芯直径为 $5.317 \mu\text{m}$, 芯子掺杂浓度为 0.3%, 空气孔直径为 $9.6 \mu\text{m}$, 空气孔间距为 $13.5 \mu\text{m}$, 光纤直径为 $125 \mu\text{m}$.

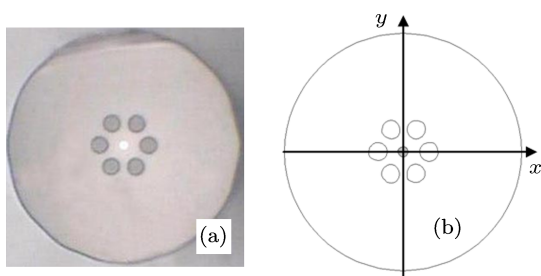


图 1 低弯曲损耗 PCF 的实际光纤截面图 (a) 和光纤截面重建图 (b)

假设研制的低弯曲损耗 PCF 沿 x 轴的负方向弯曲, 如图 2(a) 所示, 其横截面的折射率分布可以表示为 [11,12]

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

其中, $n_0(x,y)$ 为光纤初始折射率分布, R 为光纤弯曲半径.

从图 2(b) 所示折射率分布可知, 弯曲光纤的有

效折射率沿 x 轴正方向逐渐增大. 由 (1) 式可知, 弯曲半径越小, 折射率变化越快. 因此, 弯曲会导致传输模式场通过空气孔之间的泄漏通道向外泄漏, 模场截面分布发生畸变.

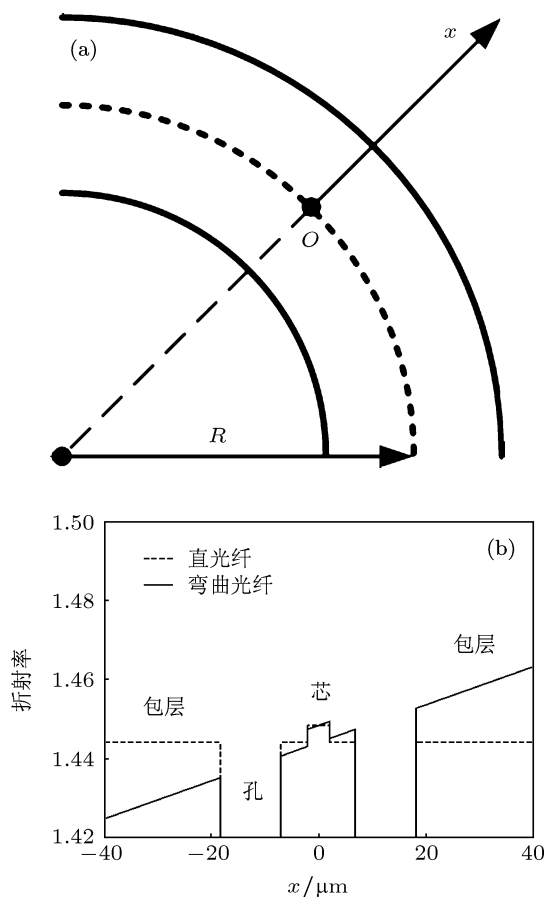


图 2 弯曲光纤的示意图 (a) 及折射率分布 (b)

研制光纤的实际传输特性的测量目前主要有两种手段: 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, 如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较大, 重复性不高等问题. 虽然目前国外公司已有商售的光子晶体光纤熔接设备, 但其价格高. 因此, 本文主要采用间接测量法研究实际光纤的传输特性 [13], 该方法也是在国际上普遍被采用的实际光子晶体光纤特性的测试技术 [14].

本文采用间接测量法研究实际光纤的传输特性^[13,14],通过采集研制的实际低弯曲损耗 PCF 光纤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结构重构,进而得到光纤横截面折射率的实际分布 $n_0(x,y)$,最后结合完美匹配边界条件^[15-17],应用全矢量有限元方法获得光纤的实际传输特性.

图 1(b) 所示为本文研制的低弯曲损耗 PCF 重构后的光纤截面结构,与实际结构显微图 1(a) 相比,可以看出两者截面结构一致.由重构出的实际横截面几何结构,即可获得其横截面初始折射率分布 $n_0(x,y)$.针对该光纤横截面折射率分布,应用全矢量有限元法,即可对所研制光纤及其弯曲情形进行传输特性分析,获得对应情形下光纤的有效模式传输常数 β 和模场分布,进而分析光纤的相应传输特性.

光纤色散 D 主要由波导色散 D_w 和材料色散 D_m 两部分构成.本文研制低弯曲损耗 PCF 中采用的是纯石英材料,不同结构参量 PCF 的材料色散 D_m 相同,可以 Sellmeyer 公式计算.波导色散 D_w 可由上述全矢量有限元法分析得到有效折射率 n_{eff} 的实部,由 (2) 式得到:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (2)$$

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

光纤模式的限制损耗 L 可通过其传输常数的

虚部计算得到^[18]:

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

各有效模式对应的等效模场面积 A_{eff} 由下式计算:

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

式中, \mathbf{E} 是电场矢量, S 是光纤横截面面积.

模场半径 ω_{eff} 是一个非常重要的传输参量,对研究光纤间的耦合、接续、弯曲损耗及非线性效应等有非常重要的意义.在基模场分布类高斯型的情况下,模场半径可由其与等效模场面积的关系式 $A_{\text{eff}} = \pi\omega_{\text{eff}}^2$ 求得.

与普通单模光纤接续时,两接续光纤模场面积失配引入的接续损耗, α_{splice} 可由下式估算:

$$\alpha_{\text{splice}} = -10 \log_{10} \left(\frac{2\omega_1 \omega_{\text{eff}}}{\omega_1^2 + \omega_{\text{eff}}^2} \right)^2, \quad (5)$$

式中, ω_1 和 ω_{eff} 分别为普通单模光纤和所研制低弯曲损耗 PCF 中基模的模场半径.

3 光纤传输特性

3.1 模式特性

图 3 所示为本文研制的低弯曲损耗 PCF 在光波长 1550 nm 处基模和二阶模的模场矢量分布图.

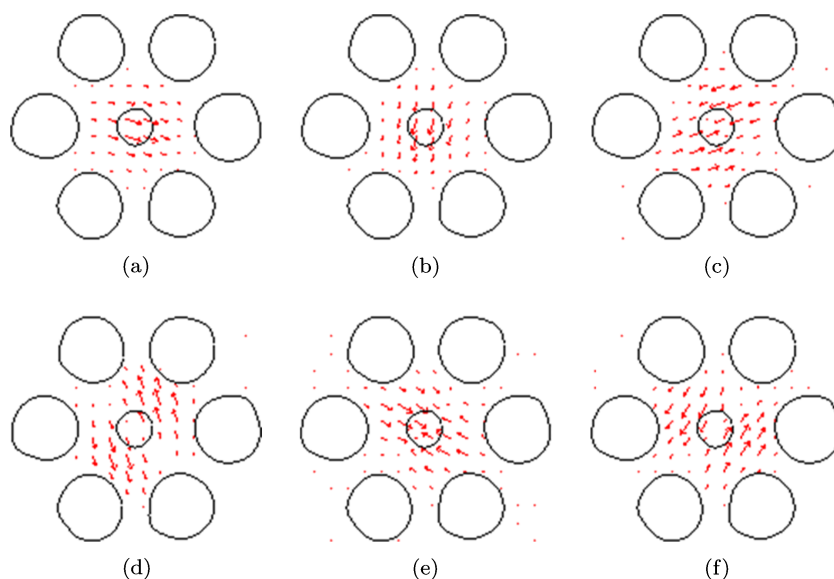


图 3 光纤模场矢量分布图 (a), (b) 基模; (c)—(f) 二阶模

图 4 所示为所研制低弯曲损耗 PCF 光纤基模和二阶模的折射率及限制损耗在 1250—1700 nm 波长范围内随波长变化情况, 其中 FM-*x*, FM-*y* 为基模的两个偏振态, SM-1—SM-4 为二阶模的四个简并态. 从图 4(a) 中可以看出, 在此波长范围内, 基模两个偏振态的有效折射率非常接近, 光纤双折射约为 2.4×10^{-6} , 因此可以认为光纤基模的两个偏振态属于良好的简并态. 在此波长范围内, 光纤二阶模损耗大于 1.374 dB/m, 基模损耗小于 0.001 dB/m. 在实际应用中, 只要保证基模限制损耗小于 0.1 dB/m, 二阶模损耗大于 1 dB/m, 就可以认为满足单模运转条件^[19]. 因此, 所研制的低弯曲损耗 PCF 光纤满足基模运转条件.

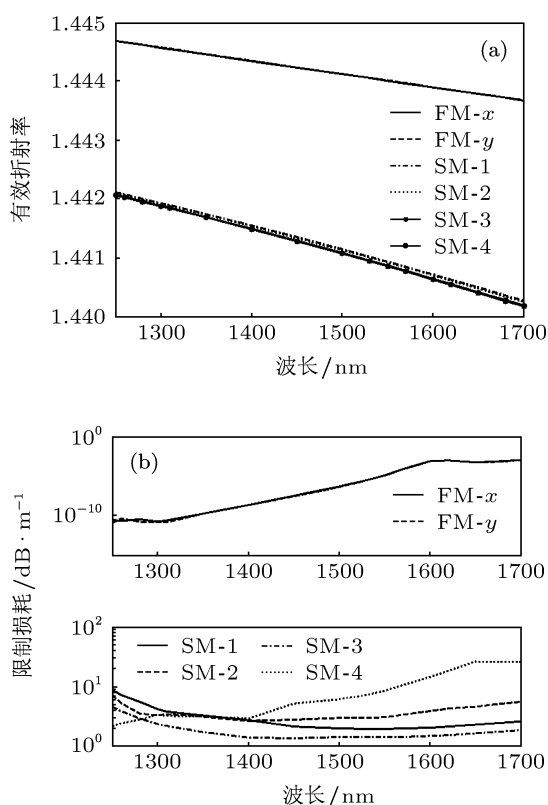


图 4 (a) 光纤模式折射率; (b) 模式限制损耗特性

3.2 模场面积和色散特性

因与标准单模光纤适配的需要, 要求所研制的低弯曲损耗 PCF 与标准单模光纤具有相似或相近的模场面积及色散特性.

图 5 所示为所研制的六孔型低弯曲损耗 PCF 的模场面积及色散特性. 可见这种低弯曲损耗光纤在波长 1550 nm 处的光纤模场面积约为 $79.26 \mu\text{m}^2$, 与标准单模光纤的模场面积基本一致; 当它与标

准单模光纤接续时, 由模场失配所带来的接续损耗约为 0.01 dB. 另外, 光纤在 1550 nm 处的色散为 $21.7 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, 零色散点也在 1310 nm 附近, 与标准单模光纤的色散特性相似. 因此, 这种低弯曲损耗 PCF 与标准单模光纤具有相似模场面积及色散特性, 与标准单模光纤具有良好的适配性.

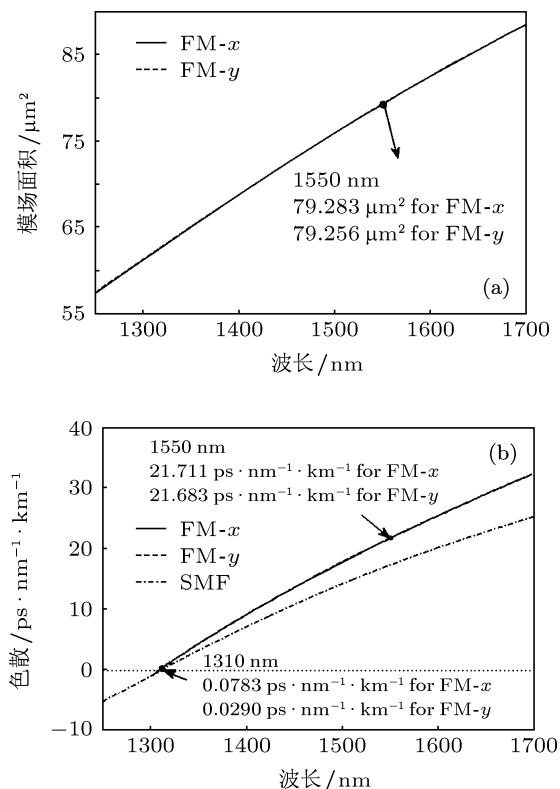


图 5 光纤基模的模场面积 (a) 及色散特性 (b)

3.3 弯曲特性

在光纤到户建设中, 当光纤应用于室内环境和设备内部时, 由于存储空间小, 光纤布线的弯曲半径小, 对光纤的抗弯曲性能有更高的要求.

图 6 为所研制的低弯曲损耗 PCF 的基模弯曲损耗及模场面积随弯曲半径的变化关系. 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, 因此在下面分析光纤模场随弯曲变化时, 只分析基模 *x* 偏振态的变化.

从图 6(a) 可以看出, 基模的弯曲损耗随弯曲半径的变化呈现一定的振荡变化趋势, 但总的变化趋势是随着弯曲半径的增加而减小. 类似的振荡现象在先前关于普通单模光纤和光子晶体光纤的研究中也有报道^[11,20-22]. 产生振动变化现象的主要原因是因为在平直 PCF 中光纤基模的有效折射率大于包层模的有效折射率, 当光纤弯曲半径较小时

包层模有效折射率迅速增大, 由于设计的低弯曲损耗光子晶体光纤包层区域的空气孔层数仅有一层, 芯区与包层区域之间存在光纤模场交叠区域, 纤芯基模和包层模会产生相互耦合. 当光纤在一定弯曲半径状态下时, 如果光纤基模和包层模式相位相同, 则这两种模式会发生同相耦合, 使光纤基模能量增大, 弯曲损耗减小; 当这两种模式的相位差为 π 时, 使光纤基模模场在光纤弯曲的散焦面上形成散射, 从而造成光纤基模的能量衰减, 使弯曲损耗增大. 这种模式耦合过程在光纤中会周期性重复出现, 从而形成弯曲损耗随弯曲半径变化呈现一定的振荡现象. 在波长 1550 nm 处, 当光纤的弯曲半径为 5 mm 时, 光纤模场面积为 $85 \mu\text{m}^2$, 弯曲损耗为 0.0365 dB/圈, 小于 G.657B 的弯曲损耗 0.5 dB/圈.

从图 6(b) 可以看出, 随着弯曲半径的减小, 基模的模场面积将增大, 弯曲半径越小, 模场面积增大越显著. 这种变化现象可以从图 7 的不同弯曲半径下的模场分布图得到合理的解释. 图 7 为光纤弯曲半径 2, 5, 7 mm 时, 在 1550 nm 波长处的光纤基模 x 偏振态的模场分布图. 从图 7 可以看出, 随着光纤弯曲半径的减小, 光纤形变量增大, 使光纤基模模场逐渐偏离纤芯, 且光纤基模场畸变加剧, 由于模场逐渐向光纤包层区域扩散, 从而导致光纤模

场面积的增大.

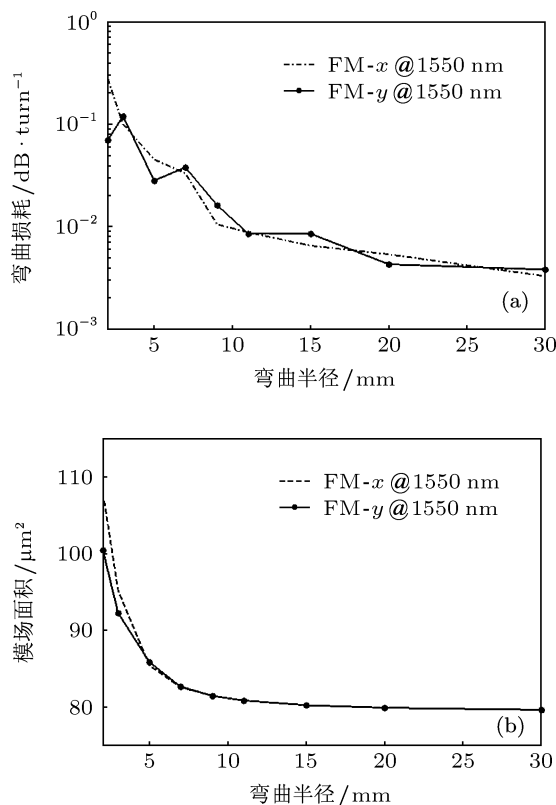


图 6 研制光纤的弯曲特性 (a) 弯曲损耗; (b) 模场面积与弯曲半径的关系

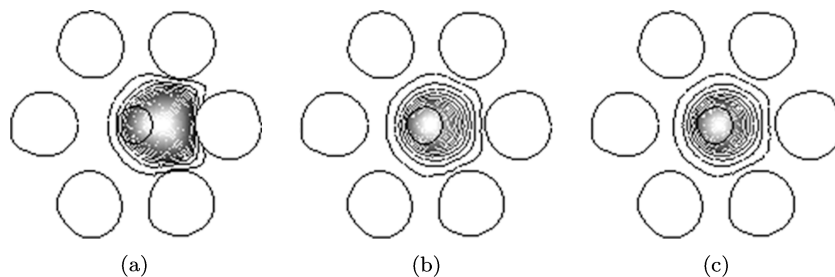


图 7 弯曲半径为 (a) 2 mm, (b) 5 mm, (c) 7 mm 时 1550 nm 处的基模模场分布图

4 结论

从减小制作难度、降低弯曲损耗以及提高与普通单模光纤的兼容性出发, 采用工艺上易于实现的掺锗芯六孔结构, 研制出一种与普通单模光纤具有高适配性的低弯曲损耗 PCF. 在 1250—1700 nm 波长范围内, 二阶模损耗大于 1.374 dB/m, 基模损耗小于 0.001 dB/m, 在此波长范围内实现了

单模传输. 当光纤弯曲半径为 5 mm 时, 1550 nm 处的弯曲损耗为 0.0365 dB/圈, 小于 G.657B 光纤对应弯曲半径的弯曲损耗. 这种低弯曲损耗光纤在 1550 nm 处的模场面积约为 $79.26 \mu\text{m}^2$, 色散为 $21.7 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, 具有与普通单模光纤相似的模场面积及色散特性. 研究成果为推进低弯曲损耗光纤的实用化及光纤到户的应用奠定了良好的基础.

- [1] Himeno K, Matsuo S, Guan N, Wada A 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 3494
- [2] Watekar P R, Ju S, Han W 2008 *Opt. Express* **16** 1180
- [3] Saitoh K, Tsuchida Y, Koshiba M 2005 *Opt. Lett.* **30** 1779
- [4] Nakajima K, Hogari K, Zhou J, Tajima K, Sankawa I 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1737
- [5] Li M J, Tandon P, Bookbinder D C, Bickham S R, McDermott M A, Desorcie R B, Nolan D A, Johnson J J, Lewis K A, Englebert J J 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 376
- [6] Nakajima K, Shimizu T, Matsui T, Fukai C, Kurashima T 2010 *Opt. Fiber Technol.* **16** 392
- [7] Matsui T, Nakajima K, Fukai C 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 5410
- [8] Zhang Y N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084213 (in Chinese) [张亚妮 2012 物理学报 **61** 084213]
- [9] Zhang L C, Hou L T, Zhou G Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054217 (in Chinese) [张立超, 侯蓝田, 周桂耀 2011 物理学报 **60** 054217]
- [10] Knight J C, Birks T A, Cregan R F, Russell S P, deSandre J P 1998 *Electron. Lett.* **34** 1347
- [11] Olszewski J, Szpulak M, Martynkien T, Urbańczyk W, Berghmans F, Tomasz N, Thienpont H 2007 *Opt. Commun.* **269** 261
- [12] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 4770
- [13] Wang L W, Lou S Q, Chen W G, Li H L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 84209
- [14] Napierała M, Nasilowski T, Beres-Pawlik E, Mergo P, Berghmans F, Thienpont H 2011 *Opt. Express* **19** 22628
- [15] Guo S, Wu F, Albin S 2004 *Opt. Express* **12** 3341
- [16] Boag A, Boag A, Mitra R 1994 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **7** 395
- [17] Uranus H, Hoekstra H 2004 *Opt. Express* **12** 2795
- [18] White T P, McPhedran R C, de Sterks C M, Botten L C, Steel M J 2001 *Opt. Lett.* **26** 1660
- [19] Matsui T, Nakajima K, Fukai C 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 5410
- [20] Olszewski J, Szpulak M, Urbańczyk W 2005 *Opt. Express* **13** 6015
- [21] Martynkien T, Olszewski J, Szpulak M, Golojuch G, Urbanczyk W, Nasilowski T, Berghmans F, Thienpont H 2007 *Opt. Express* **15** 13547
- [22] Alun J H, Peter F C 1986 *J. Lightwave Technol.* **4** 34

A high-compatibility low-bending-loss photonic crystal fiber with standard single mode fiber*

Sheng Xin-Zhi¹⁾ Lou Shu-Qin^{2)†} Yin Guo-Lu²⁾ Lu Wen-Liang²⁾ Wang Xin²⁾

1) (School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

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

(Received 28 August 2012; revised manuscript received 22 January 2013)

Abstract

A high-compatibility low-bending-loss photonic crystal fiber (PCF) with standard single mode fiber (SMF) is designed and manufactured successfully. From the point of the view of fiber fabrication and application, a feasible structure with a germanium-doped core surrounded by one layer of six air holes running along fiber axis is adopted in fiber design. The properties of the fabricated PCF such as modal property, bending characteristic and dispersion are systemically evaluated with indirect measurement method. Analysis results demonstrate that this fiber has a mode field area of $79.26 \mu\text{m}^2$ and dispersion of $21.7 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, which exhibits high compatibility with SMF. The bending loss is 0.0365 dB/turn at a wavelength of 1550 nm for a bending radius of 5 mm , which is less than the bending loss of 0.5 dB/turn of G.657B. This fiber offers an efficient way to develop the low-bending-loss fibers for the application of fiber-to-the-home.

Keywords: photonic crystal fiber, low-bending-loss, fiber-to-the-home, high compatibility

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

DOI: 10.7498/aps.62.104217

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

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