

一种新型侧漏型光子晶体光纤的研制及其传输特性研究*

姜淑琴[†] 王鑫 鹿文亮

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

(2012年8月29日收到; 2012年11月8日收到修改稿)

通过引入椭圆掺锗芯和侧向泄露通道, 提出并研制出一种侧漏型光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF). 应用结构重构全矢量有限元数值分析法分析了设计结构和实际研制的侧漏型 PCF 的传输特性. 研制的侧漏型 PCF, 在波长 1550 nm 处基模的平均模场直径为 9.275 μm , 与 G652 标准单模光纤具有很好的适配性, 模式双折射为 0.837×10^{-4} , 群双折射约为 1.508×10^{-4} . 基于研制的侧漏型 PCF 光纤构建了 Sagnac 干涉仪, 对其群双折射进行了测量. 测量结果表明: 当侧漏型 PCF 光纤达到一定长度时, 在 1450—1750 nm 波长范围内, 二阶模在光纤中不能成为有效传输模式, 光纤可以实现单模传输; 另外, 研制的侧漏型 PCF 群双折射实验的测量平均值, 与数值分析结果相符合. 侧向泄露通道的引入, 增强了侧漏型 PCF 光纤对外界参量变化的敏感性, 提高了其在扭转、弯曲、压力等参量的光纤传感和高性能光纤激光器构建等方面的应用潜能.

关键词: 光子晶体光纤, 侧向泄露通道, 双折射, Sagnac 干涉仪

PACS: 42.81.-i, 78.20.Fm, 42.81.Pa, 07.60.Ly

DOI: 10.7498/aps.62.084216

1 引言

自从 1996 年 Knight 等^[1]首次研制出光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 以来, PCF 以其灵活的结构设计及独特的传输特性引起了特种光纤开发人员的广泛关注, 各种新颖特性的 PCF 和 PCF 基器件的开发及其在光通信、光传感及光器件研究领域的应用获得了很大的进展^[2-13], 推动了 PCF 结构创新进一步向更宽的领域发展.

高双折射 PCF 在高性能光纤激光器、光通信和光传感系统中展示出重要的应用价值^[9,14-22], 成为当今特种光纤领域的一个研究热点. 一般三角格子 PCF 具有六重旋转对称性, 在理论上其基模是简并的^[23], 因此要获得高双折射, 须打破其六重旋转对称性^[23]. 通过在纤芯中引入非对称结构、在包层中采用不同尺寸和形状的空气孔、向部分空气孔中填充液体以及采用空气孔新的排布模式等

诸多新结构, 出现了多种新型高双折射 PCF 研究报告^[11-25]. 这些近年来出现的高双折射 PCF, 通常采用小空气孔距 (约为 2 μm) 结构来获得高的双折射, 模场面积小, 与标准单模光纤器件直接连接适配性差, 直接限制了其在光通信和光传感系统等领域的实际应用. 另一方面, 针对各种新器件如偏振稳定的光纤激光器、放大器、新型光传感器件的研制需求, 出现了具有掺杂芯双折射 PCF, 纤芯折射率的提高, 增大了芯包间折射率差, 单模传输特性受到影响. 因此, 如何获得与标准单模光纤适配性好的掺杂芯单模高双折射 PCF, 是一个亟待解决的问题.

本文针对高双折射 PCF 在光通信和光传感系统等领域的实际应用需求, 提出并研制出一种具有侧向泄露通道和椭圆掺锗芯的侧漏型 PCF. 该结构有效地增大了高阶模式的泄漏损耗, 不仅可以实现单模传输, 还大大改善了光纤的双折射特性. 同时, 结构设计采用较大尺寸的结构参数, 有效地提高了

* 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

模场面积, 与标准单模光纤具有良好的适配性. 基于所研制侧漏型 PCF 光纤构建了 Sagnac 干涉仪, 对光纤的群双折射进行了实验测量评估, 其群双折射实验测量平均值与设计结构的数值分析结果符合很好. 由于侧向泄露通道的引入, 增大了该种侧漏型 PCF 对外界参量的敏感性, 使其在扭转、弯曲、压力等参量的光纤传感和高性能光纤器件构建等方面展现出广阔的应用前景.

2 光纤结构与理论基础

面向应用的需求, 本文在光纤结构设计时, 纤芯采用椭圆形的掺锗芯, 如图 1(a) 所示. 椭圆形掺锗芯的引入, 除对传输光形成有效的约束外, 同时

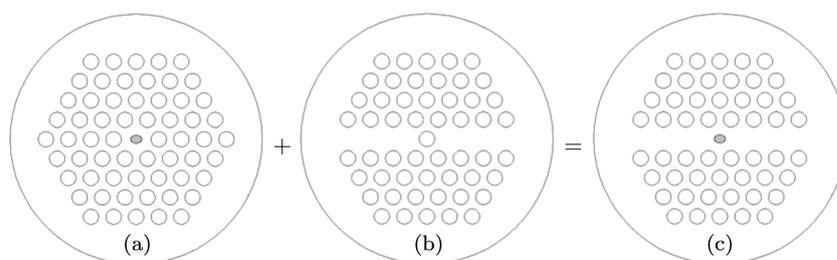


图 1 基于三角格子结构的侧漏型 PCF 设计结构示意图 (a) 纤芯引入椭圆形掺锗芯; (b) 纤芯两侧石英棒代替空气孔形成侧向泄露通道; (c) 侧漏型 PCF 设计结构示意图

为提高与标准单模光纤的适配性, 光纤中空气孔间距值取 $8.06 \mu\text{m}$, 椭圆掺锗芯子直径 $4 \mu\text{m} \times 2.88 \mu\text{m}$, 基底石英的折射率约为 1.444, 掺锗芯与基底材料的折射率差为 0.3%, 空气孔直径为 $5.48 \mu\text{m}$, 光纤直径为 $125 \mu\text{m}$. 应用结构重构全矢量有限元数值分析法, 结合完美匹配层边界条件, 通过求解对应模式的传输常数 β 和模场分布, 对光纤的传输特性进行研究.

模式双折射和群双折射是描述光纤偏振特性的两个重要参数. 模式的双折射程度 B 定义为

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_{x \text{ eff}} - n_{y \text{ eff}}| = \Delta n, \quad (1)$$

其中, β_x 和 β_y 为 x 偏振基模和 y 偏振基模的传输常数, k_0 为真空中的波数, $n_{x \text{ eff}} = \beta_x/k_0$ 和 $n_{y \text{ eff}} = \beta_y/k_0$ 分别为 x 偏振基模和 y 偏振基模的有效折射率.

群双折射 G 定义为

$$G = B - \lambda \frac{dB}{d\lambda}, \quad (2)$$

利用椭圆结构的几何双折射可有助于改善光纤的双折射特性. 纤芯掺锗使纤芯的折射率升高, 影响光纤的单模运转. 为保证光纤单模运转, 在椭圆纤芯长轴方向的两侧空气孔用石英棒代替, 形成如图 1(b) 所示侧向泄露通道. 侧向泄露通道的引入, 一方面可增大高阶模式的泄露损耗, 有助于光纤单模传输特性的实现; 另一方面可改善光纤的双折射特性, 同时增大光纤对外界参量的敏感性, 开拓侧漏型 PCF (side-leakage PCF, SLPCF) 在光纤器件及光纤传感器领域的应用. 新型侧漏型 PCF 的光纤设计结构如图 1(c) 所示. PCF 传统的三角格子结构, 具有六重旋转对称性, 基模简并. 实现高的模式双折射就需要打破这种结构对称性, 降低结构的对称性.

各有效模式对应的等效模场面积 A_{eff} 由下式可得:

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

式中 \mathbf{E} 是电场矢量, S 代表整个光纤横截面.

模场半径 ω_{eff} 本身也是光纤分析中一个非常重要的参量, 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. 在光纤中基模的模场分布为类高斯型的情况下, 模场半径可以由关系式 $A_{\text{eff}} = \pi \omega_{\text{eff}}^2$ 求得. 当光纤直接与标准单模光纤接续时, 由两个接续光纤中的模场面积的失配引入的接续损耗 α_{splice} 可由下式进行估算:

$$\alpha_{\text{splice}} = -10 \log_{10} \left(\frac{2\omega_1 \omega_{\text{eff}}}{\omega_1^2 + \omega_{\text{eff}}^2} \right)^2, \quad (4)$$

式中, ω_1 和 ω_{eff} 分别为标准单模光纤和侧漏型 PCF 中基模的模场半径.

3 研制光纤与数值模拟

利用管棒堆积法, 依照侧漏型 PCF 的设计结

构, 成功研制出了满足设计要求的侧漏型 PCF, 研制出的侧漏型 PCF 样品的截面数字显微图如图 2(a) 所示. 侧漏型 PCF 的纤芯采用椭圆掺锗芯, 其折射率高于背景材料纯石英的折射率, 对传输光具有较强的限制作用, 因此在采集的显微图中, 纤芯中的传输光强明显高于背景材料中的光强. 图 2(a) 中纤芯的白色椭圆区对应椭圆掺锗芯, 黑色的圆形区对应光纤包层中的空气孔. 对于实际研制出的侧漏型 PCF 的特性分析, 使用我们先提出的结构重构全矢量有限元数值分析法进行 [26]. 具体的做法是根据其横截面显微图, 采用数字图像处理技术, 进行识别、提取和结构重建, 进而结合完美匹配层边界条件应用全矢量有限元法可求解对应模式的传输常数 β 和模场分布, 最后获得实际光纤的特性.

实际研制出的侧漏型 PCF 样品的横截面结构重建图如图 2(b) 所示. 对比图 2(a) 和 (b), 可以看出重建结构真实地反映了侧漏型 PCF 样品的实际结构. 根据侧漏型 PCF 的实际折射率分布, 分别设置椭圆掺锗芯子、空气孔区域及包层背景区域的折射率, 利用结构重构全矢量有限元数值分析法即可数值分析设计结构的及研制样品结构的侧漏型 PCF 光纤特性 [27,28].

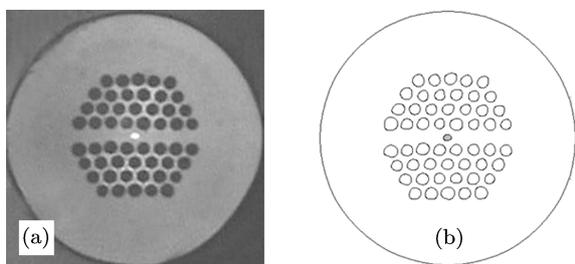


图 2 侧漏型 PCF 横截面图 (a) 研制样品的横截面显微图; (b) 截面结构重构图

图 3 为设计结构及实际结构的侧漏型 PCF 的双折射及模场面积随波长的变化情况. 从图 3 中可以看出, 侧漏型 PCF 的双折射和模场面积随波长逐渐增加. 这是因为当波长增大时, 模场向包层扩展, 由于侧漏通道的存在, 使模式双折射进一步增加, 同时模场面积也随之增大. 而设计结构和实际研制出的侧漏型 PCF, 在双折射及模场面积数值方面具有一定的偏差, 侧漏型 PCF 样品的双折射比设计结构的高, 模场面积比设计结构的小. 造成这一现象主要由两方面原因造成: 一是在光纤拉制的高温条件下, 掺锗芯中锗元素的非均匀扩散, 导致椭圆掺锗芯子偏离完美椭圆; 二是在光纤制作过程中由于抽充气装置控制精度的限制, 使得侧漏型 PCF 样

品包层区中的空气孔产生了一定的形变. 如图 3(c) 所示, 椭圆掺锗芯子两侧空气孔尺寸的增大导致对光纤短轴方向模场的压缩作用增强, 从而使侧漏型 PCF 样品双折射提高, 同时在一定程度上也减小光纤的模场面积. 侧漏型 PCF 样品在 1550 nm 波长处的模式双折射 B_n 为 0.837×10^{-4} , 群双折射 G_n 为 1.5077×10^{-4} , 基模模场面积约为 $69.5 \mu\text{m}^2$, 当与标准单模光纤直接接续时, 由模场失配带来的接续损耗约为 0.03 dB. 从上述分析结果可以看出, 侧漏型 PCF 样品在拉制过程中, 由于空气孔的形变导致

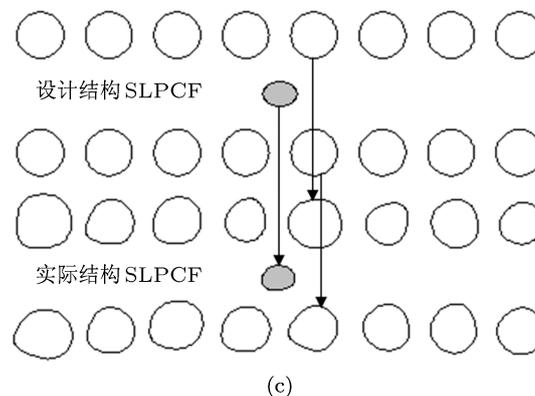
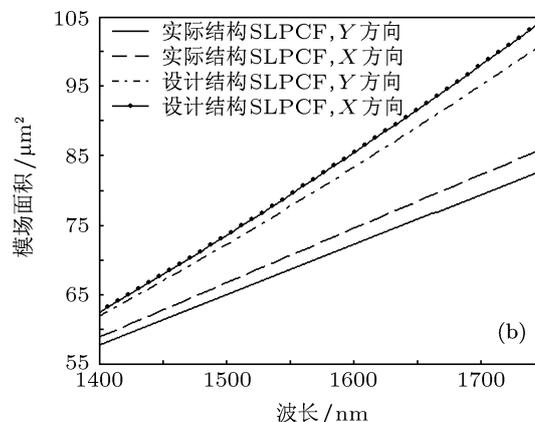
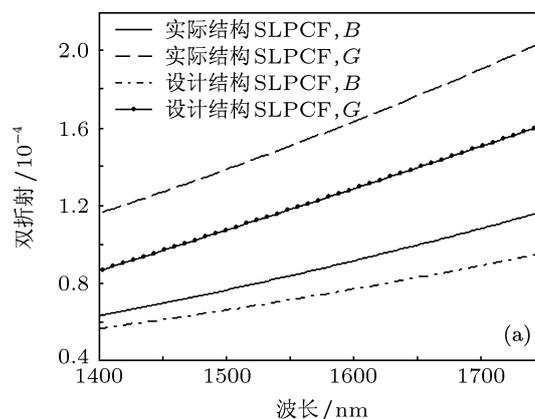


图 3 设计结构及实际结构侧漏型 PCF 的双折射及模场面积 (a) 双折射对比图; (b) 基模场面积对比图; (c) 结构对比图

实际光纤在双折射及模场面积特性与设计结构存在一定的偏差, 但实际光纤的双折射比设计结构的双折射要高, 保持了良好的双折射特性, 实现了设计需求. 虽然实际研制光纤的基模模场面积比设计结构的要小, 但减小的幅度不大, 在 1550 nm 波长处基模模场面积仍然可达 $69.5 \mu\text{m}^2$, 当与标准单模光纤直接接续时, 由模场失配带来的接续损耗低, 实现了与标准单模光纤的良好适配.

4 实验装置与测量结果

光纤的群双折射是侧漏型 PCF 的一个重要参量. 本文构建了基于侧漏型 PCF 的 Sagnac 干涉仪的实验装置, 通过实验对 Sagnac 干涉仪传输谱的波谷波长间隔的测量来实验检测光纤样品的群双折射.

实验装置如图 4 所示, Sagnac 干涉仪是通过将一段侧漏型 PCF 与 3 dB 光耦合器一侧的两个端口进行熔接构成的. Sagnac 干涉仪的输入光由超连续谱光源 (superk compact, Koheras A/S) 提供, 从耦合器的一端输入. Sagnac 干涉仪的输出信号从耦合器的另一端输出, 由光谱分析仪 (optical spectrum analyzer, OSA, Yokogawa AQ6375) 记录显示干涉仪的输出传输谱.

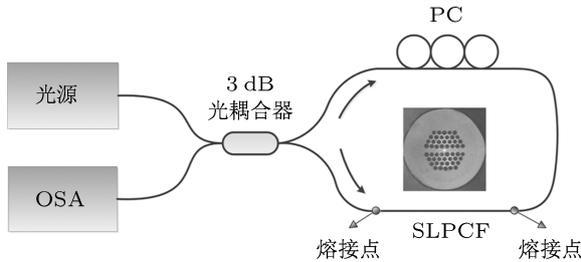


图 4 侧漏型 PCF Sagnac 干涉仪结构示意图

由于侧漏型 PCF 的双折射特性, Sagnac 环中顺时针传输和逆时针传输的两束光相对相位差 $\psi = l\Delta\beta$, 其中 l 为侧漏型 PCF 的长度, $\Delta\beta$ 为侧漏型 PCF 的基模的两个偏振态的传输常数差. Sagnac 环的输出传输谱 T 可以近似表示为一个周期函数^[29]:

$$T = \frac{1 - \cos \psi}{2} = \frac{1 - \cos(\Delta\beta l)}{2}. \quad (5)$$

Sagnac 干涉仪输出传输谱两波谷 (或波峰) 间相位差为 2π , 设两个相邻波谷 (或波峰) 对应波长分别

为 λ_1 和 λ_2 , 且 $\lambda_1 < \lambda_2$, 则有

$$\begin{aligned} & (\Delta\beta(\lambda_1) - \Delta\beta(\lambda_2))l \\ & = (\Delta\beta(\lambda_1) - \Delta\beta(\lambda_1 + \Delta\lambda))l = 2\pi, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\Delta\lambda$ 为两个波谷 (或波峰) 对应的波长差, 即 Sagnac 干涉仪的光谱宽度 S .

将 $\Delta\beta(\lambda_1 + \Delta\lambda)$ 用泰勒级数展开, 忽略高阶项, 并利用 (2) 式可推得 Sagnac 干涉环中侧漏型 PCF 的群双折射为

$$G(\lambda) = \frac{\lambda^2}{l \times \Delta\lambda}, \quad (7)$$

其中 λ 为干涉仪的中心波长.

因此通过监测 Sagnac 干涉仪输出传输谱两波谷间的波长间隔 $\Delta\lambda$, 即可得到干涉环中光纤的群双折射. 图 5 所示为使用长度分别为 10.5, 14.85, 34 和 70.4 cm 的研制侧漏型 PCF 所搭建 Sagnac 干涉仪的输出传输谱. 从图 5 可以看出, 随着所用侧漏型 PCF 光纤长度的增加, Sagnac 干涉仪传输谱两波峰或波谷间的波长间隔 $\Delta\lambda$ 减小.

由于侧漏通道的泄露作用及光纤涂覆层的高吸收作用, 侧漏型 PCF 的二阶模具有比较高的泄露损耗, Sagnac 干涉仪输出传输谱主要是由基模偏振态光干涉形成的, 但二阶模要损耗掉仍需要一定的光纤长度, 在 Sagnac 环长较短时输出传输谱含有二阶模干涉的成分. 如图 5 所示, 当侧漏型 PCF 长度较短如为 10.5 cm 时, 二阶模没有被完全损耗掉, 所以在 Sagnac 干涉仪传输谱中出现了由基模和二阶模耦合形成的局部干涉条纹, 但是强度较弱. 当侧漏型 PCF 长度达到 14.85 cm 以上, 二阶模损耗增大使其不能作为侧漏型 PCF 中的有效传输模式, 由基模和二阶模耦合形成的局部干涉条纹消失, 只存在由基模偏振态干涉形成的 Sagnac 干涉条纹. 这在一定程度上验证了所研制的侧漏型 PCF 单模传输特性.

通过测量光纤 Sagnac 干涉仪输出传输谱相邻波谷之间的波长间隔, 并利用 (7) 式得到所研制侧漏型 PCF 群双折射的实验测量值 G_m , 如表 1 所示.

表 1 侧漏型 PCF 在 1550 nm 处的群双折射

l/cm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	G_m	G_{av}	G_n
10.50	123.0	1.860×10^{-4}	—	—
14.85	107.5	1.505×10^{-4}	1.5083×10^{-4}	1.5077×10^{-4}
32.0	55.0	1.365×10^{-4}	—	—
70.4	26.2	1.303×10^{-4}	—	—

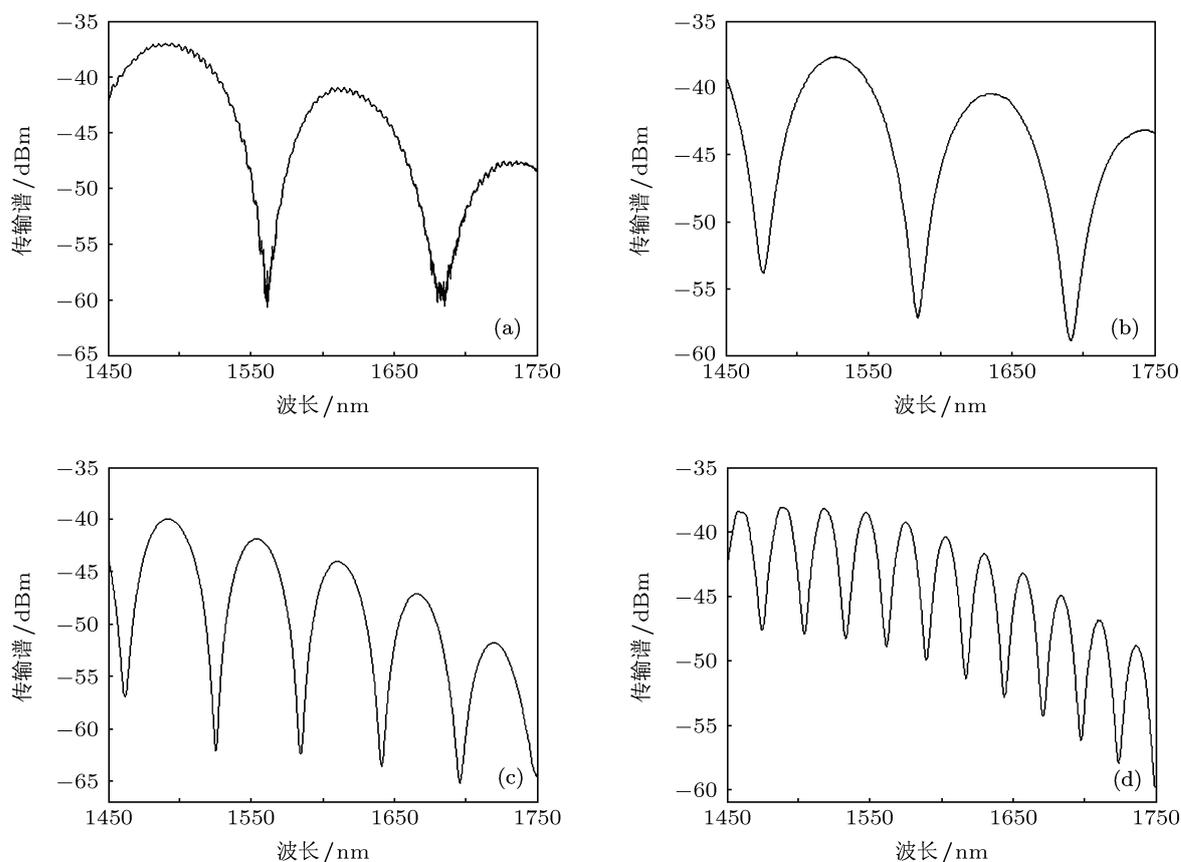


图5 不同侧漏型 PCF 长度的 Sagnac 干涉仪输出传输谱 (a) 10.5 cm; (b) 14.85 cm; (c) 32 cm; (d) 70.4 cm

由于在光纤长度测量和干涉条纹波长间隔测量时会存在一定的测量误差, Sagnac 干涉仪中偏振控制器偏振状态控制精度等的影响, 基于 Sagnac 干涉仪的群双折射实验测量平均值 G_{av} 与基于其横截面结构重构全矢量有限元数值分析法得到的计算值 G_n 之间应存在有一定的差异. 对于本文研制的侧漏型 PCF, 这一差值仅为 6×10^{-8} , 显现出实验测量平均值与结构重构全矢量有限元数值分析法计算值有较好的一致性.

通过上述实验可以看出, 基于侧漏型 PCF 的 Sagnac 干涉仪的输出谱为梳状谱, 易于调谐, 通过调整外界参量, 如对侧漏型 PCF 施加轴向应力、弯曲及扭转等, 将会导致其梳状谱发生偏移, 通过检测其波长的偏移量, 可以测量外界参量的改变, 将在新型光纤传感器的研制方面具有广泛的应用前景. 同时, 侧漏型 PCF 的双折射特性有助于增强偏振烧孔效应, 抑制掺铒光纤激光器的模式竞争, 基于侧漏型 PCF 的 Sagnac 干涉仪作为可调谐的滤波器引入到不同腔结构的激光器中, 将有利于实现掺铒光纤激光器的可调谐多波长输出.

5 结论

通过引入椭圆掺铒芯及侧向泄露通道, 本文研制出一种新型侧漏型 PCF, 不仅实现了单模传输特性, 还展现出优良的双折射特性. 应用结构重构全矢量有限元数值分析法对设计光纤和实际研制光纤的传输特性进行了分析, 在波长 1550 nm 处, 光纤的基模模场面积约为 $69.5 \mu\text{m}^2$, 与普通单模光纤直接接续时, 由模场失配引入的接续损耗约为 0.03 dB. 与已有报道的双折射 PCF 相比, 模场面积得到了大幅度的提高, 与标准普通单模光纤的适配性也得到了明显的提升. 并且建立基于所研制侧漏型 PCF 的 Sagnac 干涉仪实验装置, 对研制光纤特性进行了研究. 实验研究结果表明, 当侧漏型 PCF 达到一定长度时, 在 1450—1750 nm 波长范围内可以实现单模传输, 在波长 1550 nm 处的光纤群双折射约为 1.508×10^{-4} . 测量结果的平均值与应用全矢量有限元法计算值有较好的一致性. 基于侧漏 PCF 的 Sagnac 干涉仪, 除了在新颖光纤传感器方面的应用前景之外, 在可调谐多波长掺铒光纤激光器中也具有很好的应用潜力.

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [2] Demas J, Grogan M D W, Alkeskjold T, Ramachandran S 2012 *Opt. Lett.* **37** 3768
- [3] Nagasaki A, Saitoh K, Koshiha M 2011 *Opt. Express* **19** 3799
- [4] Silva S, Santos J L, Malcata F X, Kobelke J, Schuster K, Frazão O 2011 *Opt. Lett.* **36** 852
- [5] Hossain M A, Namihira Y, Islam M A, Hirako Y 2012 *Opt. Laser Technol.* **44** 1261
- [6] Chen W G, Lou S Q, Wang L W, Jian S S 2011 *Opt. Commun.* **284** 2829
- [7] Lou S Q, Tang Z W, Wang L W 2011 *Appl. Opt.* **50** 2016
- [8] Chen W G, Lou S Q, Wang L W, Jian S S 2010 *Opt. Engin.* **49** 094402
- [9] Russell P St J 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4729
- [10] Ju J, Jin W 2009 *J. Sens.* **2009** 476267
- [11] Zhang D P, Hu M L, Xie C, Chai L, Wang Q Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 044206 (in Chinese) (张大鹏, 胡明列, 谢辰, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 044206)
- [12] Lou S Q, Wang Z, Ren G B, Jian S S 2004 *Chin. Phys.* **13** 1052
- [13] Liu S, Li S G, Yin G B, Wang X Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034217
- [14] Goto R, Jackson S D, Simon F, Kuhlmeier B T, Eggleton B J, Himeno K 2008 *Opt. Express* **16** 18752
- [15] Im J E, Kim B K, Chung Y 2010 *Laser Phys.* **20** 1918
- [16] Kakarantzas G, Ortigosa-Blanch A, Birks T A, Russell P, Farr L, Couny F, Mangan B J 2003 *Opt. Lett.* **28** 158
- [17] Han Y G, Chung Y, Lee S B, Kim C S, Jeong M Y, Kim M K 2009 *Appl. Opt.* **48** 2303
- [18] Geernaert T, Nasilowski T, Chah K, Szpula M, Thienpont H 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 554
- [19] Martynkien T, Gabriela S B, Olszewski J, Thienpont H 2010 *Opt. Express* **18** 15113
- [20] Kim H M, Kim T H, Kim B K, Chung Y J 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 1539
- [21] Statkiewicz-Barabach G, Carvalho J P, Frazao O, Olszewski J, Mergo P, Santos J L, Urbanczyk W 2011 *Appl. Opt.* **50** 3742
- [22] Carvalho J P, Anuszkiewicz A, Statkiewicz-Barabach G, Baptista J M, Frazão O, Mergo P, Santos J L, Urbanczyk W 2012 *Opt. Commun.* **285** 264
- [23] Steel M J, White T P, Sterke C M, McPhedran R C, Botten L C 2001 *Opt. Lett.* **26** 488
- [24] Wang W, Yang B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064601 (in Chinese) [王伟, 杨博 2012 物理学报 **61** 064601]
- [25] Xu Q, Miao R C, Zhang Y N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234210 (in Chinese) [许强, 苗润才, 张亚妮 2012 物理学报 **61** 234210]
- [26] Wang L W, Lou S Q, Chen W G, Li H L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 84209
- [27] Uranus H, Hoekstra H 2004 *Opt. Express* **12** 2795
- [28] White T P, McPhedran R C, de Sterks C M, Botten L C, Steel M J 2001 *Opt. Lett.* **26** 1660
- [29] Dong X, Tam H Y, Shum P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 151113

Design and fabrication of a novel side-leakage photonic crystal fiber and its propagation properties*

Lou Shu-Qin[†] Wang Xin Lu Wen-Liang

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

(Received 29 August 2012; revised manuscript received 8 November 2012)

Abstract

A novel side-leakage photonic crystal fiber (SLPCF) is proposed and fabricated by introducing a central elliptical Ge-doped core and side-leakage channel. The propagation properties of the ideal and actual structure are modeled by using full-vectorial finite element method for the rebuilt structure. This SLPCF exhibits good compatibility with the standard single mode fiber (SMF) due to its modal diameter of $9.275\ \mu\text{m}$ which is very close to that of SMF at a wavelength of 1550 nm. Modal birefringence of 0.837×10^{-4} and the group birefringence of 1.508×10^{-4} are obtained at a wavelength of 1550 nm. Based on the side-leakage PCF, a Sagnac interferometer is constituted for evaluating the properties of the actual SLPCF. Experimental results demonstrate that the second order mode can be efficiently confined and thus single mode operation can be realized in a wavelength range from 1450 nm to 1750 nm when this fiber reaches a certain length. In addition, the average measuring value of group birefringence accords with the numerical result. The proposed SLPCF has a number of potential applications in fiber sensor and fiber components with high performance since the introduction of the side-leakage channel enhances its sensitivity, the environmental parameters such as torsion, curve and strain and so on.

Keywords: photonic crystal fiber, side-leakage channel, birefringence, Sagnac interferometer

PACS: 42.81.-i, 78.20.Fm, 42.81.Pa, 07.60.Ly

DOI: 10.7498/aps.62.084216

* 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