

# 基于模间干涉的保偏光子晶体光纤弯曲传感特性研究

刘 丰<sup>1,2</sup> 冯晓龙<sup>1</sup> 郭 璇<sup>1,2</sup> 徐 香<sup>1</sup>

<sup>1</sup>燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

<sup>2</sup>河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 提出了一种基于模间干涉原理的双空气孔保偏光子晶体光纤弯曲传感方法。采用有限差分光束传播法对保偏光子晶体光纤弯曲传输特性进行了仿真研究,给出了在弯曲调制时两个低阶偏振模干涉产生的双边瓣归一化光强与弯曲半径的关系,讨论了波长变化对弯曲传感灵敏度的影响,并对所设计的弯曲传感器进行了实验研究。研究表明:基于模间干涉技术的双空气孔光子晶体保偏光纤弯曲传感器在10~30 mm的弯曲半径范围内具有良好的线性度和检测精度。

**关键词** 光纤光学; 模间干涉; 保偏光子晶体光纤; 弯曲传感; 干涉输出边瓣

**中图分类号** 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0905005

## Research on the Bending Sensing Characteristics of PM-PCF Based on Intermodal Interference

Liu Feng<sup>1,2</sup> Feng Xiaolong<sup>1</sup> Guo Xuan<sup>1,2</sup> Xu Xiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Information Science & Engineering College, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

<sup>2</sup>Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** A novel bending sensing scheme based on intermodal interference of dual-hole polarization maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF) is presented. The finite difference beam propagation method is used to analyze the bending characteristics of dual-hole PM-PCF. The relationship between normalized interference output intensity of two low order polarization modes and bending radius is calculated thoroughly when the dual-hole PM-PCF is modulated by bending. Further, the wavelength influence of bending sensing characteristics is discussed theoretically. And an experiment system is set up to verify the feasibility of bending sensing based on intermodal interference in dual-hole PM-PCF. The experimental results show that the bending sensor designed in this paper has excellent linearity and accuracy when the bending radius ranges from 10 mm to 30 mm.

**Key words** fiber optics; intermodal interference; polarization maintaining photonics crystal fiber; bending sensing; interference output sidelobes

**OCIS codes** 060.2370; 120.1880; 300.6190

## 1 引 言

弯曲测量技术在航空航天、地球物理、机械和建筑结构健康检测等领域都具有重要意义。大型建筑和机械构件的状态和应力参数与弯曲具有直接的关系,对弯曲进行测量是获得构件力学条件的一种间接手段。近年来,光纤传感器因其具有抗电磁干扰能力强、精度高、可在线监测等优点,在弯曲测量领域得到了广泛关注。在已有的光纤弯曲传感实现方案中,利用光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅实现弯曲测量的方法最为广泛<sup>[1-4]</sup>,此外,双芯或多芯光纤弯曲传感器<sup>[5-7]</sup>、光纤LP<sub>21</sub>模场分布检测型弯曲传感器<sup>[8]</sup>也均有报道。近年来,也有人利用标准单模光纤(SMF)模损耗原理进行弯曲传感并应用于波长测量、温度测量以及边缘滤

收稿日期: 2015-01-19; 收到修改稿日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(60907033)、河北省自然科学基金(F2013203252)、河北省科学技术研究与发展计划(13273305)

作者简介: 刘 丰(1976—),男,教授,主要从事光纤传感及光电检测技术方面的研究。E-mail: kennan@ysu.edu.cn

波器等<sup>[9-12]</sup>。然而,在上述光纤弯曲传感测量方案中,光栅型、多芯光纤型以及模式损耗型传感器的解调需要用到光谱设备,从而导致整个传感系统的成本很高,也不容易实现小型化和仪器化,而且模式损耗型由于损耗因素较多致使原理复杂,难以精确测量大范围弯曲变化。而采用光纤中高阶模场分布监测弯曲的方法存在光路结构复杂、LP<sub>21</sub>模式的激发和稳定控制手段复杂等问题,难以保证传感系统的长期稳定性和可靠性。

模间干涉技术是利用保偏光纤中2个低阶偏振模间的干涉原理,通过探测模间干涉2个输出边瓣的光强实现传感及相关应用。模间干涉技术将传统干涉仪的传感光与参考光集成在1根保偏光纤中,具有结构简单、成本低廉、抗干扰能力强等诸多优点,近年在国内外受到广泛关注,并被广泛应用于设计应力、高电压、温度等物理量传感器中<sup>[13-16]</sup>。

鉴于模间干涉技术的上述优点,本文提出了一种利用保偏光子晶体光纤(PM-PCF)中LP<sub>01</sub>和LP<sub>11</sub>2个低阶模间干涉实现弯曲传感测量的方法。利用有限差分光束传播法分析了一种双空气孔PM-PCF中2个低阶线性偏振模干涉输出光强与弯曲半径的数学关系,研究了不同波长对弯曲传感灵敏度的影响。对基于PM-PCF模间干涉原理的光纤弯曲传感器进行了实验研究,结果表明该弯曲传感器具有很好的灵敏度和线性度,能够实现毫米级的弯曲测量。

## 2 双空气孔 PM-PCF 低阶模传输特性分析

### 2.1 双空气孔 PM-PCF 光纤的物理结构参数

在实际应用中,椭圆芯型、熊猫型、领结型等常规保偏光纤均能够实现稳定的模间干涉输出。而光子晶体光纤具有结构灵活、通过改变光纤结构即可定制双模工作波长和模传输特性等优点,近年来在光纤传感领域得到了广泛的关注和应用<sup>[17-19]</sup>。

以图1所示的一种双空气孔结构PM-PCF为研究目标,对光纤的LP<sub>01</sub>和LP<sub>11</sub>模式分布及干涉特性进行了理论分析,在此基础上讨论了模间干涉输出光强分布与光纤弯曲半径之间的变化规律。图1(a)为实际光纤在电子显微镜(SEM)下的端面结构图,图1(b)为PM-PCF的理想结构图(后续讨论均以该图中标示的坐标方向开展)。该光纤主要结构参数为:小孔直径 $d_1=2.2\ \mu\text{m}$ ,大孔直径 $d_2=4.5\ \mu\text{m}$ ,两孔之间的中心距 $\Lambda=4.4\ \mu\text{m}$ ,光纤介质材料为无掺杂石英。

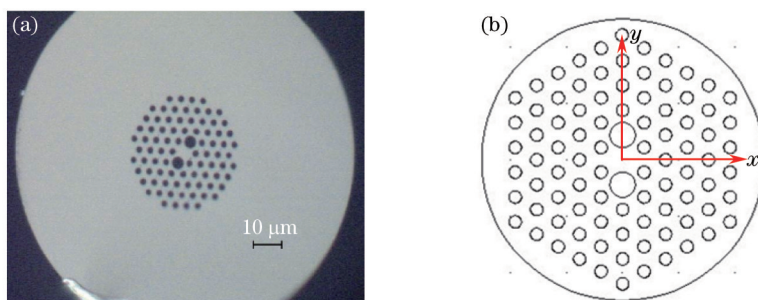


图1 双空气孔PM-PCF的端面结构。(a)电子显微镜端面图;(b)理想端面图

Fig.1 Section structure of the dual-hole PM-PCF. (a) SEM picture; (b) ideal structure

### 2.2 双空气孔 PM-PCF 光纤的低阶模传输特性

在光子晶体光纤中,导模的有效折射率满足:

$$n_{\text{FSM}} < n_{\text{eff}} = \frac{\beta_{\text{eff}}}{k_0} < n_{\text{core}}, \quad (1)$$

式中 $n_{\text{FSM}}$ 为基空间填充模的有效折射率, $\beta_{\text{eff}}$ 为模式的有效传播常数, $k_0$ 为自由空间波数, $n_{\text{core}}$ 为纤芯折射率。当模式的有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 低于基空间填充模的有效折射率 $n_{\text{FSM}}$ 时,模式不能在PCF中传输,由此可以确定该模式的截止波长。为了从仿真图上更直观地看出不同模式在双空气孔PCF中的传输特性,在这里引入相对有效折射率 $N_{\text{eff}}$ 的概念,表示为

$$N_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}/n_{\text{FSM}}. \quad (2)$$

若 $N_{\text{eff}} > 1$ ,模式的有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 大于基空间填充模的有效折射率 $n_{\text{FSM}}$ ,此时对应的模式可以在光纤中

有效传输。图2是经过数值计算后得到  $x$  和  $y$  两个偏振方向上  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模的  $N_{\text{eff}}$  与波长的关系曲线图。从图中可以看出,  $LP_{11}$  模的两个正交偏振模的截止波长分别约为  $0.66 \mu\text{m}$  和  $0.79 \mu\text{m}$ , 即: 若用  $x$  偏振方向的 2 个低阶线性偏振模实现模间干涉, 最大双模工作波长为  $0.79 \mu\text{m}$ , 而用  $y$  偏振方向实现模间干涉时, 最大的双模工作波长为  $0.66 \mu\text{m}$ 。

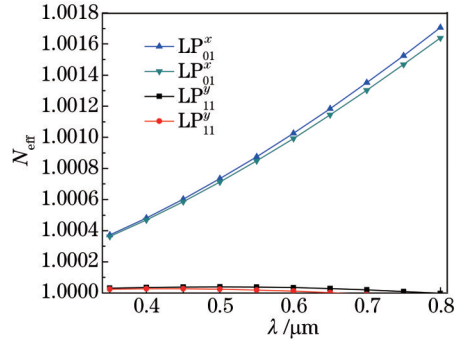


图2 双空气孔 PM-PCF 中  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模相对有效折射率与波长的关系

Fig.2 Relationship between  $N_{\text{eff}}$  and the wavelengths of  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  modes in the dual-hole PM-PCF

图3给出了仿真得到的双空气孔 PM-PCF 在  $y$  偏振方向上  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模在光纤中的模场分布图。在图3中,  $n_{\text{eff},01}$  和  $n_{\text{eff},11}$  分别是  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模的有效折射率。

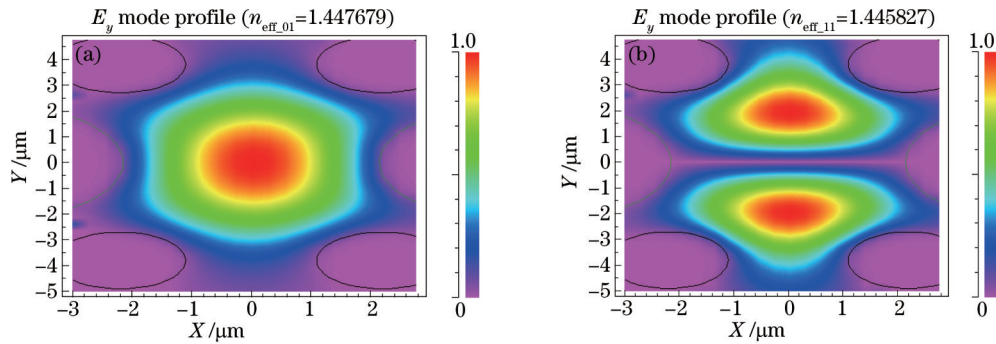


图3 双空气孔 PM-PCF 中 (a)  $LP_{01}^y$  模和 (b)  $LP_{11}^y$  模的模场分布

Fig.3 (a)  $LP_{01}^y$  and (b)  $LP_{11}^y$  mode distributions of the dual-hole PM-PCF

### 3 双空气孔 PM-PCF 低阶模干涉与弯曲半径关系分析

#### 3.1 PM-PCF 模传输特性与光纤弯曲半径的关系

当光纤弯曲时, 不同模式的有效折射率将受到影响。为了从理论上明确弯曲对 2 个偏振模式传输特性的影响, 分别对  $x$  和  $y$  方向上的  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模折射率与光纤弯曲半径之间的关系进行了分析计算(计算过程中设光源波长为  $650 \text{ nm}$ ), 仿真结果如图4所示。

从图4中可以看出: 光纤弯曲半径对  $x$  和  $y$  方向上的 2 个低阶模有效折射率都有明显影响, 且随着弯曲

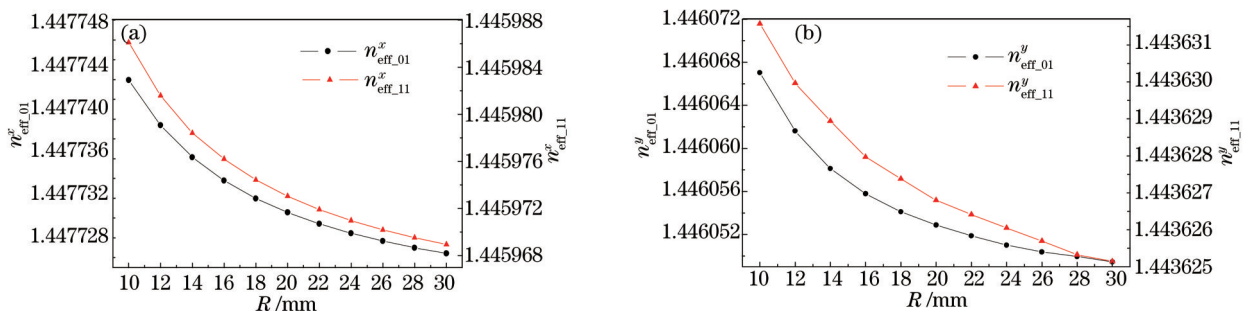


图4 (a)  $X$  方向和 (b)  $Y$  方向上  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模有效折射率与弯曲半径的关系曲线图

Fig.4 Relationship between the effective index and bending radii of  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  modes for (a)  $X$  and (b)  $Y$  directions

半径的增加,模有效折射率都呈现减小的趋势。在 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模干涉应用中,模有效折射率差是引起干涉输出光强分布变化的根本原因,为此,在图 5 中给出了  $x$  和  $y$  偏振方向上 2 个低阶模式有效折射率差与光纤弯曲半径的关系曲线。

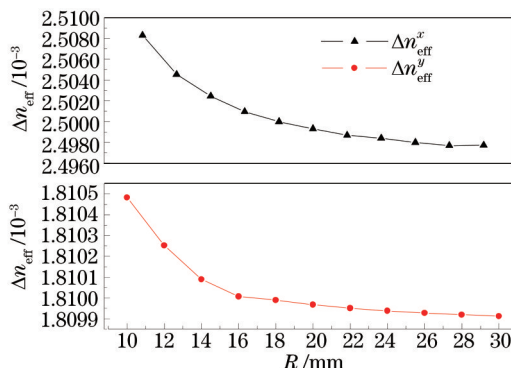


图 5 有效折射率差与弯曲半径的关系曲线

Fig.5 Relationship between difference of effective indexes and bending radius

为了更直观地反映光纤弯曲半径对模间干涉输出光强分布的影响,以  $x$  偏振方向为例,定性地对模间干涉输出光强与光纤弯曲半径的关系进行了仿真分析,并给出三维分布图。根据模间干涉理论,双空气孔 PM-PCF 光纤中, LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模间的干涉光强可以表示为

$$I = |E(x,y)|^2 = E_{01}^x(x,y)^2 + E_{11}^x(x,y)^2 + 2E_{01}^x(x,y)E_{11}^x(x,y)\cos(\Delta\varphi), \quad (3)$$

式中  $E_{01}^x(x,y)$  和  $E_{11}^x(x,y)$  分别为 2 个模式的电场强度,  $\Delta\varphi$  是 2 个模式在光纤中传输后的相位差,可以写为

$$\Delta\varphi = \Delta\beta \cdot L = \frac{2\pi}{\lambda} [n_{\text{eff},01}^x - n_{\text{eff},11}^x] \cdot L, \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为光源波长,  $L$  为光纤长度。当光源波长和光纤长度一定时,模间干涉输出光强的分布形式由模间有效折射率差决定。图 6 是数值仿真后得到的不同弯曲半径条件下双空气孔 PM-PCF 模间干涉输出光强的分布情况。

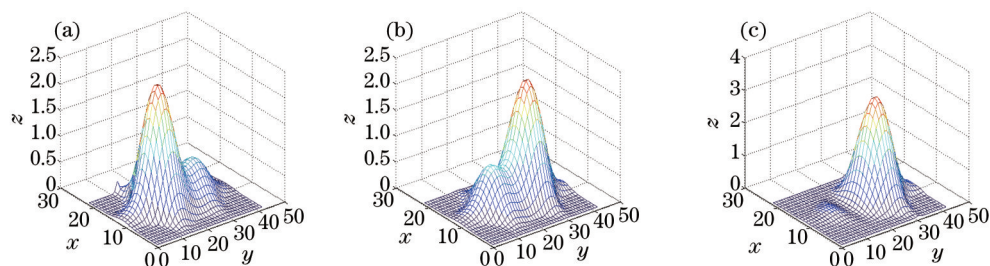


图 6 不同弯曲半径时模间干涉输出光强分布仿真 (a)  $R=10$  mm; (b)  $R=20$  mm; (c)  $R=30$  mm

Fig.6 Simulation results of intermodal interference output intensity distribution with different bending radii.

(a)  $R=10$  mm; (b)  $R=20$  mm; (c)  $R=30$  mm

从图 6 中可以看出:随着光纤弯曲半径的变化, LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模间干涉输出光强呈现双边瓣能量交替分布的形式,从而通过探测 1 个(或 2 个)干涉输出边瓣的光强,即能实现对弯曲半径的测量。

### 3.2 模间干涉弯曲响应与光源波长的关系

在后续的模间干涉解调方案中,采取了对 2 个干涉输出边瓣进行光强探测后再进行差除以和的处理方式,这能够有效剔除光源功率波动对解调精度的影响。据此,定义归一化干涉输出光强为

$$\delta I = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}, \quad (5)$$

式中  $I_1$  和  $I_2$  分别是 2 个干涉输出边瓣的光强。另,定义模间干涉弯曲响应灵敏度为  $\frac{\partial(\delta I)}{\partial R}$ 。按照上述定义,

分析计算了光源波长分别为 640 nm 和 660 nm 时归一化干涉输出光强  $\delta I$  和弯曲响应灵敏度  $\frac{\partial(\delta I)}{\partial R}$  与弯曲半



径  $R$  之间的关系曲线,如图7所示。

从图7中可以看出:在不同的双模工作波长条件下,模间干涉对弯曲的响应特性有明显差别;在保证双模工作的前提下,波长越长,归一化干涉输出光强随弯曲半径变化越显著;另外,随着弯曲半径的增加,模间干涉对弯曲响应的灵敏度逐渐降低。

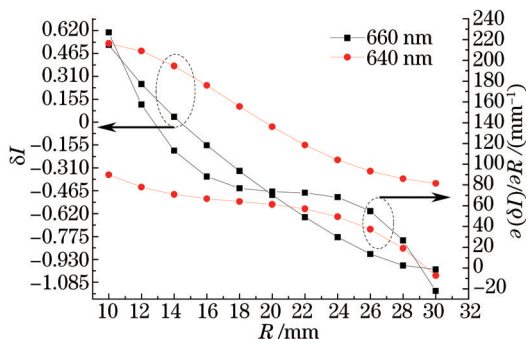


图7 归一化干涉输出光强和弯曲响应灵敏度与光纤弯曲半径的关系

Fig.7 Normalized interference output intensity and bending response sensitivity with different bending radii

#### 4 实验研究

在上述理论分析基础上,设计了如图8所示的实验系统对模间干涉式双空气孔PM-PCF弯曲传感方案进行研究。

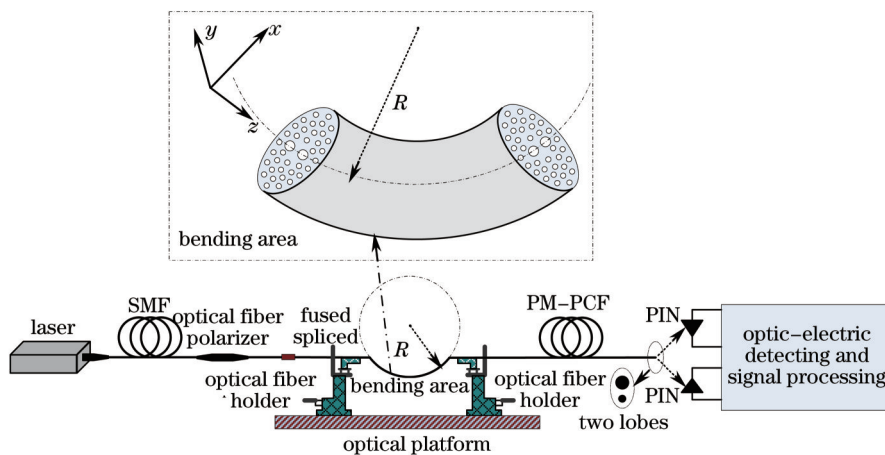


图8 基于模间干涉的光纤弯曲传感实验系统

Fig.8 Experiment system of optic fiber bending sensing based on intermodal interference

在弯曲传感实验中,PM-PCF的弯曲方向如图8中的传感区域放大图所示。实验用光源为NanoBase公司的Xperay-TL-STD可调谐光源,波长可调范围为633~670 nm,实验过程中选择的光源波长为660 nm。实验系统基本工作原理简述如下:激光器发出的光进入光纤偏振器后变成线偏振光,之后沿着PM-PCF的  $x$  方向进入到弯曲传感区域,弯曲传感区会改变2个低阶偏振模的有效折射率,从而在PM-PCF的输出端形成强度分布随弯曲半径变化的2个干涉输出边瓣。用2个光电探测器对模间干涉输出边瓣进行光强探测,再经放大滤波和如(5)式的“差除以和”运算后得到实验系统的输出电压  $U_0 = k \cdot \delta I$ ,  $k$  为可调的比例系数,当  $k$  值确定时,可以计算理论输出电压  $U_{or}$ 。

在实验建立过程中,用视频显微镜确定PM-PCF的快慢轴方向并实现与光纤偏振器的对轴熔接,同时在光纤上标记快慢轴方向并将光纤固定。在调整光纤弯曲半径时,为了尽可能保证光纤弯曲曲率的一致性,先将光纤固定在弹性塑料基片上(固定时保证弯曲方向沿着如图8所示的  $x$  方向),再用如图9所示的方法将弹性塑料基片固定在可水平精密移动的光学支架上,最后通过调整2个光纤支架的距离来调整光纤的弯曲半径。

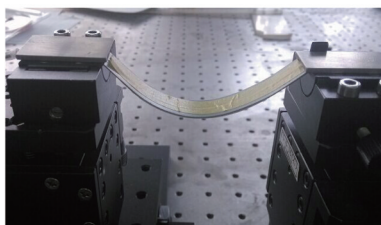


图9 光纤弯曲半径调整装置

Fig.9 Equipment of PCF bending radius adjustment

用图8所示的实验系统进行了3次重复性实验,每次实验开始时将光纤弯曲半径调整到10 mm作为初始状态,然后逐渐增加光纤弯曲半径,记录各个实验点的系统输出数据,实验结果如图10所示。图10中也给出了用3次实验结果的平均值  $U_{OA}$  与理论值  $U_{OT}$  按(6)式计算得到的均值误差百分比曲线。

$$e_a = \frac{U_{OA} - U_{OT}}{U_{OT}} \times 100\% . \quad (6)$$

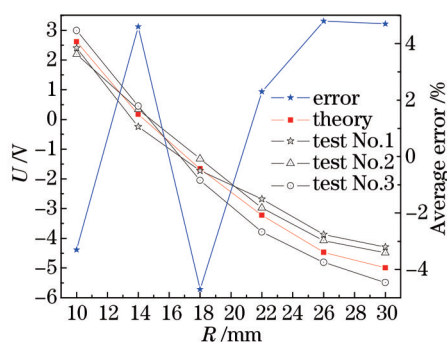


图10 光纤弯曲半径与系统输出电压关系曲线

Fig.10 Relationship between experiment output voltage and PM-PCF bending radius

从误差分析曲线可以看出均值误差最大约为5%,分析这一误差的可能产生原因主要是:1) 模间干涉输出光强分布与光源波长有直接关系,而实验系统的光源波长稳定性精度偏低;2) 采用在光纤输出远场放置光电探测器来检测模间干涉输出光强的方式非常容易受到震动和环境光变化的影响。所以,在实际的传感系统中,保证光源波长的稳定度以及设计集成化的模间干涉边瓣光强提取器件是提高模间干涉传感器检测精度的重要手段。

需要说明的是:在图10中,当输出电压为0时,对应着2个干涉输出边瓣的强度相等的位置,此时模间相位差为  $90^\circ$ (或  $270^\circ$ ),该位置并不是完全由弯曲半径决定,与PM-PCF的长度及受到的应力有直接关系,可以根据实际传感器设计需求调整光纤长度或者为光纤的一部分施加拉伸应力来调整输出电压为0时对应的弯曲半径。

## 4 结 论

提出了一种基于双空气孔PM-PCF模间干涉的光纤弯曲传感方法,从理论上分析了光纤模间干涉输出光强与弯曲半径之间的关系,从实验上对所提出的光纤弯曲传感器进行了验证。研究表明:利用模间干涉技术,能够将光纤弯曲变化变成输出光强的变化,通过探测模间干涉输出光强即可实现对弯曲半径的测量;当弯曲半径介于10~30 mm范围内时,双空气孔结构PM-PCF中  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模间干涉输出光强分布与弯曲半径之间具有良好的线性关系;这种方法结构简单,不需要昂贵的光谱解调设备,可以通过探测模间干涉的输出光强实现对光纤弯曲半径的测量,为设计低成本、仪器化的光纤弯曲传感器提供了新颖的理论和实验参考。

## 参 考 文 献

- 1 Young-Geun Han, Xinyong Dong, J H Lee, *et al.*. Simultaneous measurement of bending and temperature based on a single

- sampled chirped fiber Bragg grating embedded on a flexible cantilever beam[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(19): 2839–2841.
- 2 Ying Yang, Zhengtian Gu. Temperature and bending simultaneous sensing properties of cascaded long and short-period gratings [J]. *Appl Opt*, 2014, 53(2): 165–173.
- 3 Abdul Rauf, Jianlin Zhao, Biqiang Jiang. High-sensitivity bend angle measurements using optical fiber gratings[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(21): 5072–5078.
- 4 M Bravo, J Saenz, M Bravo-Navas, *et al.*. Concrete beam bending test monitorization using a high strain fiber optic sensor[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(8): 1085–1089.
- 5 J R Guzman-Sepulveda, D A May-Arrijoa. In-fiber directional coupler for high-sensitivity curvature measurement[J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 11858–11861.
- 6 H Qu, G F Yan, M Skorobogatiy. Interferometric fiber-optic bending/nano-displacement sensor using plastic dual-core fiber[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(16): 4835–4838.
- 7 Zhao Shigang, Wang Xue, Yuan Libo. Four-core fiber based bending sensor[J]. *Acat Optica Sinica*, 2006, 26(7): 1001–1006.  
赵士刚, 王 雪, 苑立波. 四芯光纤弯曲传感器[J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 1001–1006.
- 8 Yuqiang Fan, George Wu, Wanting Wei, *et al.*. Fiber-optic bend sensor using  $LP_{21}$  mode operation[J]. *Opt Express*, 2012, 20(24): 26127–26134.
- 9 Q Wang, G Farrell, T Freir. Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers[J]. *Opt Express*, 2005, 13(12): 4476–4484.
- 10 P F Wang, G Farrell, Q Wang, *et al.*. An optimized macrobending-fiber-based edge filter[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(15): 1136–1138.
- 11 Q Wang, G Farrell, T Freir, *et al.*. Low-cost wavelength measurement based on a macrobending single-mode fiber[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(12): 1785–1787.
- 12 P F Wang, G Rajan, Y Semenove, *et al.*. Temperature dependence of a macrobending edge filter based on a high-bend loss fiber[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(21): 2470–2472.
- 13 Bohnert K, Gabus P, Kostovic J, *et al.*. Optical fiber sensors for the electric power industry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(3): 511–526.
- 14 Ivan Martincek, Dusan Pudis, Daniel Kacik, *et al.*. Investigation of intermodal interference of  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  modes in the liquid-core optical fiber for temperature measurements[J]. *Optik*, 2011, 122: 707–710.
- 15 Liu Feng, Bi Weihong, Guo Xuan. Optical voltage transducer based on modular interference in highly elliptical-core polarization-maintaining fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 219–223.  
刘 丰, 毕卫红, 郭 璇. 基于椭圆芯保偏光纤模间干涉的光学电压互感器[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 219–223.
- 16 Feng Liu, Delan Cao, Xuan Guo, *et al.*. Intermodal interference of  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  modes in panda fibers[J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(6): 060602.
- 17 Lu Xin, Bi Weihong, Ma Shuo, *et al.*. Optical voltage transducer based on two-hole photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1105003.  
芦 鑫, 毕卫红, 麻 硕, 等. 双孔光子晶体光纤光学电压传感方案研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1105003.
- 18 Hou Jianping, Ning Tao, Gai Shuanglong, *et al.*. Sensitivity analysis of refractive index measurement based on intermodal interference in photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 4732–4737.  
侯建平, 宁 韬, 盖双龙, 等. 基于光子晶体光纤模间干涉的折射率测量灵敏度分析[J]. *物理学报*, 2010, 59(7): 4732–4737.
- 19 Shuangxia Wang, Yange Liu, Zhi Wang, *et al.*. Intermodal interferometer based on a fluid-filled two-mode photonic crystal fiber for sensing applications[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(14): 3166–3171.

栏目编辑: 王晓琰