

基于选择填充光子晶体光纤的二维弯曲矢量 传感器设计

陈慧芳^{1,2} 严惠民¹ 单国峰³

¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

²中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

³航天通信控股集团股份有限公司, 浙江 杭州 310009

摘要 利用模式耦合理论和有限元求解方法,研究了基于选择填充光子晶体光纤(PCF)的耦合器对弯曲的响应。引入等效折射率(RI),将弯曲波导简化为直波导,仿真确定耦合波长并分析器件弯曲传感性能。研究表明,耦合波长的移动与弯曲曲率呈线性关系,并指示弯曲方向;耦合波长由填充液体折射率和空气孔直径决定;弯曲灵敏度取决于填充孔与纤芯距离。利用此规律,设计了基于选择填充PCF的二维弯曲矢量传感器。在PCF截面上选择相互正交的2个空气孔,分别填充不同折射率液体,2条液体波导各自与纤芯形成耦合器,监测2个耦合波长变化即可求解器件的弯曲曲率及在二维空间中的弯曲方向。该传感器具有良好的设计柔性及制备可控性,具有良好的应用前景。

关键词 光纤传感器; 二维弯曲矢量; 光子晶体光纤; 耦合器

中图分类号 TN252 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0105003

Design of Two-Dimensional Bending Vector Sensor Based on Selective Infiltration of Photonic Crystal Fiber

Chen Huifang^{1,2} Yan Huimin¹ Shan Guofeng³

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

²College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

³Aerospace Communications Holdings CO, LTD, Hangzhou, Zhejiang 310009, China

Abstract With mode coupling theory and finite element solving method, a photonic crystal fiber (PCF) coupler basing on selective infiltration and its response to bending are investigated. The bended coupler is treated as a straight waveguide by introducing an equivalent refractive index (RI). The coupling wavelength is simulated and the bend sensing characters are analyzed. The coupling wavelength shift has linear response to bending curvature with directional indication; the coupling wavelength is decided by the RI of infiltrated liquid and the diameter of air-holes; while the bending sensitivity is affected by the distance between the infiltrated hole and the fiber core. With these characters, a two-dimensional bending vector sensor is designed based on selectively infiltrated PCF. Two orthogonal air-holes on the cross-section of the PCF are selected to be filled with different RI liquids. The two liquid waveguides couple with fiber core separately. The shift of two coupling wavelengths indicates the bending curvature in two orthogonal directions. The bending curvature and two-dimensional direction can be solved simultaneously by inspecting the shift of two coupling wavelengths. The flexible design and controllable fabrication of the sensor has been demonstrated and a promising sensing application could be seen.

Key words fiber sensors; two-dimensional bending vector; photonic crystal fiber; coupler

OCIS codes 060.2370; 060.5295; 060.1810

收稿日期: 2015-07-27; 收到修改稿日期: 2015-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(61377094,61405184)、国家863计划(2014AA022302)

作者简介: 陈慧芳(1978—),女,博士研究生,主要从事光纤传感技术研究。E-mail: adie_chen@cjlu.edu.cn

导师简介: 严惠民(1961—),男,博士,教授,主要从事光学检测技术研究。E-mail: yhm@zju.edu.cn (通信联系人)

1 引言

光纤弯曲传感器以高灵敏度、抗电磁干扰、耐腐蚀及低成本等优势,在地质灾害预防、建筑结构安全监测、智能机械臂操控等领域有着良好的应用前景。目前的光纤弯曲传感器主要采用光纤 Bragg 光栅(FBG)、长周期光纤光栅(LPFG)、光纤干涉仪和光纤波导耦合器等结构类型。FBG 是发展最为成熟的光纤传感器件,如结合 D 形光纤^[1]可提高弯曲传感的灵敏度,应用三芯光纤^[2]可使器件在曲率测量的同时兼具指示弯曲方向的功能;而倾斜光纤光栅(TFBG)可使弯曲传感性能进一步提高^[3-4]。LPFG 的模式耦合由于有包层模参与^[5]而对弯曲变化更敏感^[6],其透射的工作方式可使 2 种 LPFG 串联实现曲率和弯曲方向同时检测^[7]。光纤干涉型传感器具有制作容易、价格低廉的优势,在弯曲传感方面也获得了广泛研究,如偏芯结构^[8]、单模-多模-单模结构^[9]、双拉锥结构^[10]等均实现了小动态范围的弯曲测量。随着特种结构光纤的涌现,基于光纤波导耦合的传感器件也得到了深入研究,如利用双芯光纤^[11-12]的传感器,实现了较高灵敏度的弯曲测量。

光子晶体光纤(PCF)技术的成熟与商用化为光纤传感技术注入了新活力^[13-14]。PCF 依靠包层中周期排列的空气孔形成全内反射效应或光子带隙效应将光约束在纤芯中传播。PCF 中的空气孔可作为功能材料的微通道,材料与光相互作用直接改变了光纤的导光性能,通过光信号解调,获得介质与光相互作用的信息。光纤微加工技术使 PCF 空气孔的选择填充成为现实^[15-17],本课题组利用飞秒激光微加工技术对 PCF 中的特定空气孔填充了折射率(RI)标准液,形成定向耦合器件,并初步测试了其弯曲响应^[18]。实验结果表明,该器件具有一维方向指示性,并在较大曲率范围内保持线性,在传感领域有巨大的应用潜力。

本文将针对基于选择填充的 PCF 耦合器进行仿真研究,深入分析 PCF 的结构参数、填充液体的折射率等因素对器件弯曲传感性能的影响,设计能够同时测量曲率和指示二维方向的弯曲矢量传感器,以期为该类型器件的制备提供可靠的理论依据。

2 耦合器弯曲传感原理

本文以全内反射型 PCF 为对象分析讨论其弯曲传感特性,这种光纤一般以纯石英为材料,光纤包层中的空气孔为规则正六边形排列,光被限制在折射率较高的纤芯区域传播。当包层中某个孔被功能液体填充后,形成圆柱形液体波导,PCF 的纤芯与该液芯相互平行,当 2 条波导相距较近时,波导折射率分布发生畸变,引起 2 条波导中的导模相互耦合,使其成为定向耦合器,2 条波导间进行能量的周期性交换^[19]。纤芯模功率到液芯模功率实现最大转换时,输出光谱信号表现为耦合波长的损耗峰。耦合波长与 PCF 的结构、材料、填充液体的物理性质以及环境温度等多参数相关,监测耦合损耗峰的波长变化,即可实现该器件的传感应用。根据光波导耦合的微扰理论,只有传播常数 β 相等或近似相等的模式之间才能发生有效耦合($\beta_1 - \beta_2 \approx 0$, β_1, β_2 分别为 2 条介质波导的传播常数),而传播常数是传导模有效折射率的函数,因此求解纤芯和液芯传导模式有效折射率是分析波导间耦合、研究器件性能的有效方法。

2.1 纤芯与液芯的模式耦合

基于已有经验^[15,18],以 NKT 公司 LMA-10 单模 PCF 为初始结构,选择第 2 圈的 1 个空气孔进行高折射率液体的填充,形成耦合器截面如图 1 所示。在 Comsol 多物理场仿真软件中按以下参数建立器件模型:石英材料折射率 $n_{\text{Si}}=1.444$,空气孔间距 $\Lambda=6.46 \mu\text{m}$,空气孔直径 $d=3.06 \mu\text{m}$,PCF 中填充液体折射率 $n_{\text{refl}}=1.4925$ 。在波长范围 1300~1900 nm 内,忽略石英与填充液体的材料色散,分别求解得到纤芯和液芯中传导模式的有效折射率,如图 2 所示。为定量描述耦合波长,结果图中仅绘出基模 LP_{01} 中 x 方向偏振模式和液芯中 LP_{11} 模中的 HE_{21x} 模式。由于填充液体的折射率远高于石英材料的折射率,使液芯中基模(rod LP_{01x})的有效折射率远高于纤芯基模(core LP_{01x})的有效折射率,因此这 2 种模式无法满足波导耦合的相位匹配条件,即耦合不能发生。相反,纤芯基模与液芯高阶模具有较为接近的有效折射率,在波长 1617 nm 附近发生避免相交效应,2 个模式发生耦合,如图 2 中插图所示。纤芯中的能量完全转换到液芯中所需的距离 L_c 则由耦合发生时奇、偶模式的有效折射率决定^[19]:

$$L_c = \frac{\pi}{|\beta_1 - \beta_2|} = \frac{\lambda}{2|n_c - n_o|}, \quad (1)$$

式中 L_c 即耦合长度, n_c 和 n_o 分别为奇模式和偶模式的有效折射率。在初始条件下可计算获得 2 个波导耦合长度 $L_c=2.31$ cm。图 3 描述了纤芯中基模、液芯中高阶模以及耦合模的能量分布。

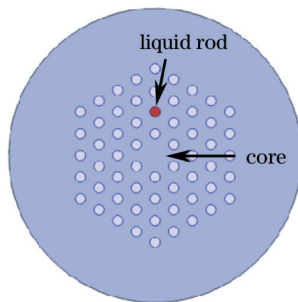


图 1 选择填充 PCF 器件截面图

Fig.1 Cross view of selective infiltrated PCF device

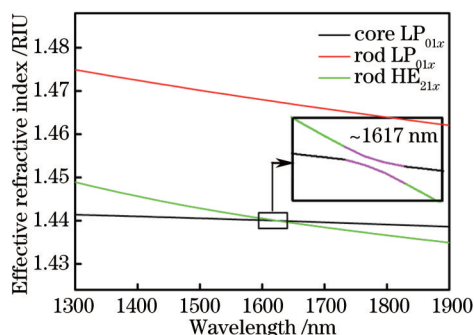


图 2 纤芯和液芯中传导模式的有效折射率(插图: 避免相交效应)

Fig.2 Effective refractive indices of transmission modes in the core and the liquid rod (inset: avoid crossing effect)

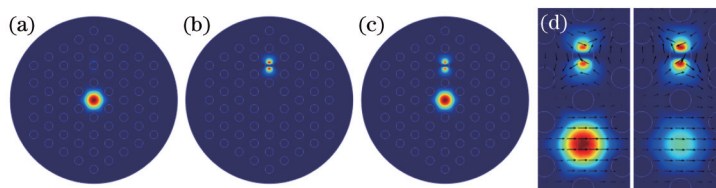


图 3 PCF 器件中模场分布。(a) 纤芯中 LP_{01x} 模; (b) 液芯中 HE_{21x} 模; (c) 耦合模; (d) 奇模式与偶模式(箭头描述电场矢量)

Fig.3 Mode profiles in PCF device. (a) LP_{01x} mode in core; (b) HE_{21x} mode in liquid rod; (c) coupling mode;

(d) odd mode and even mode (the arrow lines indicate electrical field vector)

2.2 弯曲传感原理

按图 4 所示对弯曲方向进行定义, 其中 C 为耦合器受外力产生弯曲的曲率。当耦合器弯曲时, 纤芯外侧受到拉伸变形使光路长度增加, 而内侧受到挤压使光路长度减小, 该变化同时发生在石英材料和液芯区域, 使液芯中传导模有效折射率改变, 进而使耦合波长发生移动, 监测耦合波长的移动, 即可实现 PCF 耦合器的弯曲传感应用。

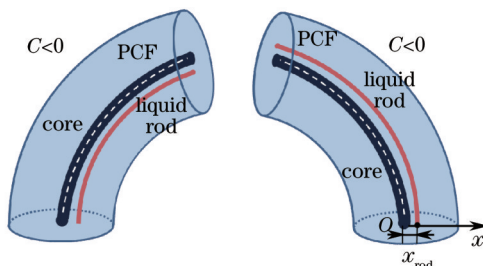


图 4 弯曲方向的定义

Fig.4 Definition of bending directions

仿真研究中引入等效折射率^[19-20], 将弯曲的 PCF 近似为具有横向渐变折射率的直波导, 则耦合器上某点

的折射率变为

$$n'_{si} = n_{si}(1 + xC), n'_{rod} = n_{rod}(1 + x_{rod}C), \quad (2)$$

其中 n'_{si} 和 n'_{rod} 分别为石英材料和液芯的等效折射率, x 为该点在弯曲平面内到纤芯的距离, x_{rod} 为液芯到纤芯的距离。

3 耦合器传感性能分析

3.1 耦合器对弯曲的响应

为研究器件对弯曲的响应,在曲率范围 $C=-20\sim 20\text{ m}^{-1}$ 内,以 5 m^{-1} 为间隔,将(2)式确定的等效折射率代入仿真模型,对纤芯基模与液芯高阶模的耦合情况进行了模拟,得到色散曲线如图5所示。在计算范围内,纤芯基模有效折射率不随器件的弯曲发生变化;而液芯中的传导模由于受到周围石英材料及填充液体折射率变化的影响,色散曲线随曲率发生等间隔平移,使其与纤芯基模的耦合波长发生线性变化,灵敏度为 1.15 nm/m^{-1} ,如图5中插图所示。更为重要的是:该器件不仅能够检测曲率,还可由耦合波长的移动方向指示出弯曲的方向,当弯曲曲率为正时,耦合波长发生红移;当弯曲曲率为负时,耦合波长发生蓝移。另外,若 PCF 器件的弯曲方向与当前定义方向垂直,弯曲不会引起液芯及周围石英材料折射率的变化,因此不会有耦合波长的移动。

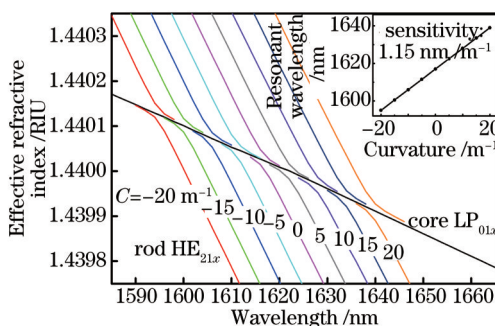


图5 耦合器对弯曲的响应(插图:耦合波长变化)

Fig.5 Coupler response to bending curvature (inset: shift of coupling wavelength)

3.2 耦合器的工作波长

耦合器的工作波长由纤芯基模与液芯高阶模色散曲线的避免相交效应确定。液芯高阶模有效折射率的影响因素主要有2个:填充液体材料折射率和液芯直径。由于液芯模场不仅覆盖液芯区域,还有部分能量渗透至液芯周围的石英区域,因此,提高填充液体折射率或增大高折射率液芯的直径均能提高液芯高阶模有效折射率,令液芯高阶模色散曲线抬升,耦合波长发生红移。同时,纤芯基模有效折射率受到空气孔直径和间距影响而发生变化,空气孔直径减小或间距增大都会使纤芯基模场覆盖区域空气孔面积减小,而使基模有效折射率增大,色散曲线抬升,耦合波长蓝移。仿真研究中,以初始结构为模型,保持其他参数不变,分别改变填充液体折射率(1.475~1.503 RIU, RIU表示单位折射率)、空气孔直径(2.5~3.5 μm)和空气孔间距(5~10 μm)3个参数,求解耦合器工作波长,结果如图6所示。

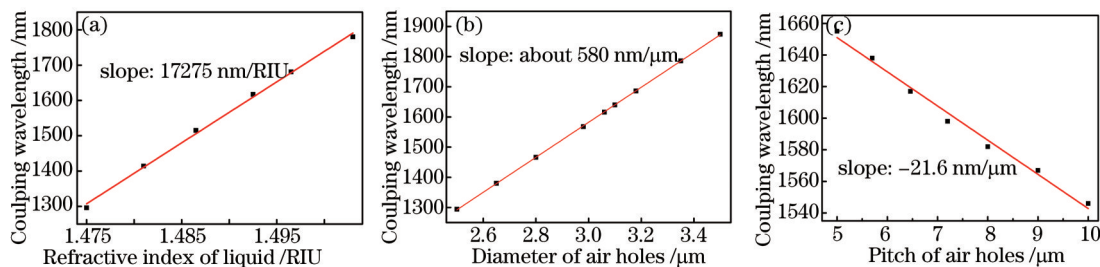


图6 耦合器的工作波长。(a) 填充液体折射率的影响; (b) 空气孔直径的影响; (c) 空气孔间距的影响

Fig.6 Working wavelength of the coupler. (a) Influenced by RI of infiltrated liquid; (b) influenced by diameters of air holes; (c) influenced by pitches of air holes

图6结果与理论分析一致,填充液体折射率的提高和空气孔直径的增大均使耦合器工作波长发生线性红移,而空气孔间距的变大令工作波长蓝移。在计算区间内,填充液体折射率增大0.028 RIU,耦合波长红移48 nm,变化率达到17275 nm/RIU;空气孔直径每增大1 μm ,耦合波长红移580 nm;相比较,空气孔间距变化对耦合器工作波长的影响较小,变化率为 $-21.6 \text{ nm}/\mu\text{m}$ 。仿真结果表明,耦合器的工作波长主要由填充液体折射率和空气孔直径2个参数决定,因此在耦合器的设计阶段,需对PCF结构及填充液体材料进行精确的选择,以满足特定工作波长的要求。

3.3 耦合器的弯曲灵敏度

耦合器的弯曲灵敏度(S)可由耦合波长漂移量($\Delta\lambda$)和弯曲的曲率求得: $S = \Delta\lambda/C$ 。将图5中纤芯基模和液芯高阶模色散曲线近似为直线,令 k_{core} 为纤芯基模色散斜率, k_{rod} 为液芯高阶模色散斜率,当液芯高阶模有效折射率变化量为 $\Delta n_{\text{rod}}^{\text{eff}}$ 时,弯曲灵敏度可表示为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{C} = \frac{1}{k_{\text{core}} - k_{\text{rod}}} \cdot \frac{\Delta n_{\text{rod}}^{\text{eff}}}{C} \quad (3)$$

(3)式第一项中,纤芯基模的色散斜率 k_{core} 仅由PCF结构确定,在填充液体或弯曲情况发生变化时,始终保持恒定; k_{rod} 与液芯折射率相关,当填充液体折射率较高时,液芯与周围石英材料形成较大折射率差, k_{rod} 较大,耦合波长漂移量较小,弯曲灵敏度低;而填充液体折射率较低时,液芯高阶模色散曲线较平缓,弯曲灵敏度高。(3)式第二项由液芯与纤芯的距离决定,距离越远,由(2)式确定的材料等效折射率变化越剧烈,液芯模式的 $\Delta n_{\text{rod}}^{\text{eff}}$ 就越大,器件灵敏度也就越高。仿真研究中,以初始结构为模型,保持其他参数不变,分别改变填充液体折射率(1.475~1.503 RIU)和空气孔间距(5~10 μm),以 $C = \pm 20 \text{ m}^{-1}$ 求解耦合波长漂移量,并计算得到器件的灵敏度,如图7所示。

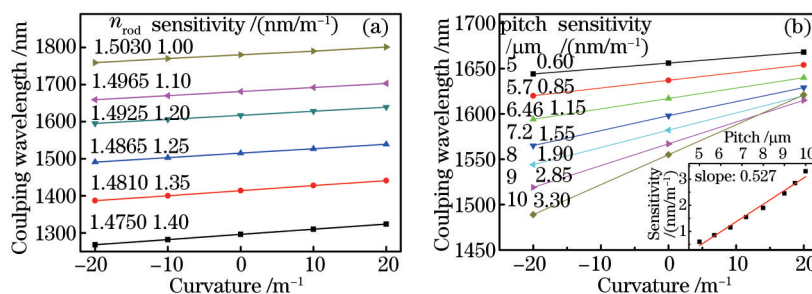


图7 耦合器的弯曲灵敏度。(a) 填充液体折射率的影响;(b) 空气孔间距的影响

Fig.7 Bending sensitivity of the coupler. (a) Influenced by RI of infiltrated liquid; (b) influenced by pitches of air holes

仿真结果表明,耦合器的弯曲灵敏度虽然受到填充液体折射率的影响,但更主要由包层空气孔间距决定。如图7(a)中,填充液体折射率由1.4750升至1.5030时,器件灵敏度仅由 $1.40 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ 降至 $1.0 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$;而图7(b)中,空气孔间距由5 μm 增大到10 μm 时,灵敏度由 $0.60 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ 大幅提高至 $3.30 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ 。

由以上对传感性能的全面分析可知,基于选择填充PCF耦合器发生弯曲时,耦合波长对曲率具有大范围线性响应,并具方向指示性,工作波长可控且灵敏度高,在传感领域有巨大应用潜力。另外,填充孔选择的实质是纤芯与液芯2条波导间距的变化,其对耦合器性能的影响与空气孔间距变化相似,因此文中没有做单独讨论。

4 二维弯曲矢量传感器设计

根据前述分析结果,可对耦合器做如下假设:选择PCF中相互正交的2个空气孔进行液体填充,形成2条液体波导,这2条液体波导各自与纤芯耦合,而2条液体波导间的相互影响可以忽略。此时,2条波导与纤芯耦合波长的变化,分别表征了PCF器件在相互垂直的2个方向上的弯曲情况,监测2个耦合波长的移动,即可实现弯曲曲率及二维弯曲方向的同时测定。为使2条液体波导的耦合峰在光谱上分离,可对2个空气孔填充不同折射率的液体。使用仿真模型中的光纤初始结构,选定PCF截面上第2圈的A和B 2个孔进行模拟填充,并定义二维弯曲方向,如图8所示。

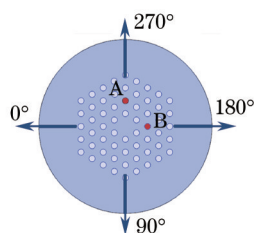


图8 填充2个正交空气孔的弯曲传感器截面图(图中箭头描述弯曲方向)

Fig.8 Cross view of bending sensor with two orthogonal air holes infiltrated (The arrows in picture indicate the bending direction)

令孔A填充液体折射率为1.4925,孔B填充液体折射率为1.4870,求解模式有效折射率得到2条液体波导与纤芯的耦合情况及弯曲响应,结果如表1所示,则PCF器件的二维弯曲矢量(曲率 C 和方向角 θ)可表示为

$$C^2 = (S_A \Delta\lambda_A)^2 + (S_B \Delta\lambda_B)^2, \quad \theta = \arctan\left(\frac{\Delta\lambda_A}{\Delta\lambda_B}\right), \quad (4)$$

式中 $\Delta\lambda_A = \lambda_A - 1617$, $\Delta\lambda_B = \lambda_B - 1524$, 分别表示2个波导耦合峰($\Delta\lambda_A, \Delta\lambda_B$)的波长移动, S_A 和 S_B 为2个耦合峰的弯曲灵敏度, 分别为 1.15 nm/m^{-1} 及 1.05 nm/m^{-1} 。以表1中耦合波长和弯曲灵敏度为参数、 45° 为间隔, 对二维空间中8个方向的弯曲矢量进行模拟, 获得耦合波长与弯曲矢量的关系, 如图9所示, 表明该器件可实现空间中任意弯曲矢量的测量。

表1 2条液体波导特征参数

Table 1 Characters of the two liquid waveguides

	RI of infiltrated liquid n_{rod} /RIU	Coupling wavelength λ /nm	Bending sensitivity S / (nm/m^{-1})	Coupling length L_c /cm
Waveguide A	1.4925	1617	1.15	2.31
Waveguide B	1.4870	1524	1.05	0.75

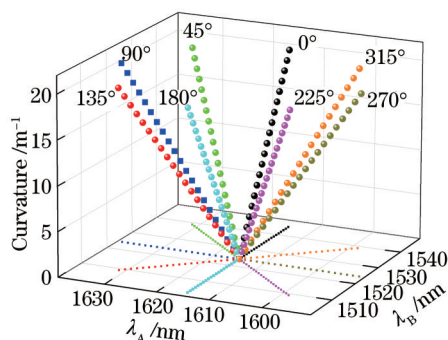


图9 PCF器件的二维弯曲矢量传感仿真

Fig.9 Simulation on two-dimensional bending vector sensing of the PCF device

5 结 论

从模式耦合理论出发, 利用Comsol多物理场分析软件, 对选择填充PCF器件的弯曲特性进行了仿真, 研究了各物理量对器件性能的影响, 基于仿真结果设计了选择填充2个空气孔的二维弯曲矢量传感器, 可对空间中任意弯曲的曲率和方向进行同时测量。该器件具有线性度好、测量范围大及全空间测量的特点, 具有巨大的应用潜力。

参 考 文 献

- Zhou Jinlong, Dong Xiaopeng, Shi Zhidong. Theoretical and experimental investigation of bending sensitivity of the D-shape fiber Bragg gratings[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(11): 1734-1737.
周金龙, 董小鹏, 石志东. D形光纤Bragg光栅弯曲灵敏度的理论和实验研究[J]. 光子学报, 2006, 35(11): 1734-1737.
- Jiang Haili, Sun Weimin, Dong Mingwei, et al.. The theory of measuring bend-curvature based on three-core fiber Bragg grating[J]. Applied Science and Technology, 2011, 38(6): 50-53.

- 姜海丽, 孙伟民, 董明伟, 等. 基于三芯 Bragg 光纤光栅的弯曲曲率计算理论[J]. 应用科技, 2011, 38(6): 50-53.
- 3 Shao Liyang, Albane Laronche, Mateusz Smietana, *et al.*. Highly sensitive bend sensor with hybrid long-period and tilted fiber Bragg grating[J]. Optics Communications, 2010, 283: 2690-2694.
- 4 Shao Liyang, Xiong Lingyun, Chen Chengkun, *et al.*. Directional bend sensor based on re-grown tilted fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(18): 2681-2687.
- 5 Wang Yiping, Rao Yunjiang, Zeng Xiangkai. Bending characteristics analysis of long period fiber gratings using coupled mode theory [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(10): 1205-1208.
王义平, 饶云江, 曾祥楷. 长周期光纤光栅弯曲特性的模式耦合理论分析[J]. 光子学报, 2002, 31(10): 1205-1208.
- 6 Cao Ye, Pei Yongwei, Tong Zhengrong. Simultaneous measurement of temperature and bending-curvature using a single local micro-structured long period fiber grating[J]. Acta Physica Sinica 2014, 63(2): 024206.
曹 晔, 裴庸惟, 童峥嵘. 仅用一根局部微结构长周期光纤光栅实现温度与弯曲曲率的同时测量[J]. 物理学报, 2014, 63(2): 024206.
- 7 Wang Yiping, Rao Yunjiang. A novel long period fiber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultaneously [J]. IEEE Sensor Journal, 2005, 5(5): 839-843.
- 8 Guo Xinchun, Ning Tigang, Li Jing, *et al.*. Fiber-optic curvature sensor based on a core-offset structure[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(8): 1476-1450.
郭新春, 宁提纲, 李 晶, 等. 基于偏芯结构的光纤弯曲传感器及其特性研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(8): 1476-1450.
- 9 Gong Yuan, Zhao Tian, Rao Yunjiang, *et al.*. All-fiber curvature sensor based on multimode interference[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(11): 679-681.
- 10 D Monzon-Hernandez, A Martinez-Rios, I Torres-Gomez, *et al.*. Compact optical fiber curvature sensor based on concatenating two tapers [J]. Optics Letters, 2011, 36(22): 4380-4382.
- 11 J R Guzman-Sepulveda, D A May-Arriola. In-fiber directional coupler for high-sensitivity curvature measurement[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11853-11861.
- 12 G L Yin, S Q Lou, W L Lu, *et al.*. A high-sensitive fiber curvature sensor using twin core fiber-based filter[J]. Applied Physics B-Lasers and Optics, 2013, 115(1): 99-104.
- 13 Geng Kaisheng, Guan Jianfei. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber with rectangular lattice[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305007.
耿开胜, 关建飞. 矩形晶格双芯光子晶体光纤的耦合特性[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305007.
- 14 Shi Weihua, Wu Jing. Photonic crystal fiber sensor based on surface plasmonic and directional resonance coupling[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0206002.
施伟华, 吴 静. 基于表面等离子体共振和定向耦合的光子晶体光纤传感器[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0206002.
- 15 Wang Ying, Yang Minwei, D N Wang, *et al.*. Selectively infiltrated photonic crystal fiber with ultrahigh temperature sensitivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(20): 1520-1522.
- 16 Darran K C Wu, Boris T Kuhlmeiy, Benjamin J Eggleton. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor[J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 322-324.
- 17 Zhang Chengdong, Zhou Xuanfeng, Chen Zilun, *et al.*. Low loss fusion splicing for seven-core photonic crystal fiber by selected air hole collapse technique[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1005004.
张成栋, 周旋风, 陈子伦, 等. 选择性空气孔塌缩技术实现七芯光子晶体光纤低损耗熔接[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1005004.
- 18 Chen H F, Wang Y, Wang D N. Selectively infiltrated photonic crystal fiber for directional bend sensing with large bending range[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(5): 502-505.
- 19 D Chen, G Hu, X A Liu, *et al.*. Bending analysis of a dual-core photonic crystal fiber[J]. Progress in Electromagnetics, 2011, 120: 293-307.
- 20 T A Birks, F Luan, G J Pearce, *et al.*. Bend loss in all-solid bandgap fibres[J]. Optics Express, 2006, 14(12): 5688-5698.

栏目编辑: 王晓琰