

双芯光子晶体光纤横向压力特性分析

马小翠¹, 钱诗婷¹, 柳淘¹, 张克非^{2*}

(1. 西南科技大学 理学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 传统光纤式压力传感装置由于结构及材料的限制, 其灵敏度难以进一步提升。基于马赫-曾德尔干涉传感原理, 设计一种掺杂型双芯光子晶体光纤(DC-PCF)横向压力传感结构。根据不同掺杂材料和光纤截面结构参数对压敏特性的影响, 分析压力灵敏度与光纤结构关系, 综合模场面积, 获得高压灵敏度 DC-PCF 结构。仿真结果表明: 当入射传输波长为 1550 nm、双芯光子晶体长度为 6 cm 时, 横向压力下 X 偏振压力灵敏度可达 37.56 nm/MPa, Y 偏振压力灵敏度可达 35.27 nm/MPa。相对传统光子晶体横向压力传感器, 该传感结构的压力灵敏度提高了近 60 倍。

关键词: 双芯光子晶体光纤; 横向应力; 聚甲基丙烯酸甲酯; 有效折射率差

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)08-0018-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of transverse pressure characteristics of dual core photonic crystal fiber

MA Xiaocui¹, QIAN Shiting¹, LIU Tao¹, ZHANG Kefei^{2*}

(1. School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;

2. School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: Due to the limitation of structure and material, the sensitivity of traditional optical fiber pressure sensor is difficult to be further improved. Based on the principle of Mach Zehnder interferometer, transverse pressure sensing structure of doped dual core photonic crystal fiber (DC-PCF) is designed. The relationship between pressure sensitivity and fiber structure is analyzed according to the influence of different doping materials and cross-section structure parameters of optical fiber on the pressure-sensitive characteristics, the DC-PCF structure with high pressure sensitivity is obtained by synthesizing the mode field area. The simulation results show that when the incident transmission wavelength is 1550 nm and the length of the dual core photonic crystal is 6 cm, the X polarization pressure sensitivity can reach 37.56 nm/MPa and the Y polarization pressure sensitivity can reach 35.27 nm/MPa. Compared with the traditional photonic crystal transverse pressure sensor, the pressure sensitivity of the sensor structure is increased by nearly 60 times.

Key words: dual core photonic crystal fibers; transverse stress; polymethyl methacrylate; effective refractive index difference

0 引言

在大型复杂桥梁、隧道和边坡等监测中, 光纤压力传感器以其耐腐蚀、抗电磁干扰和灵敏度高等优点,

成为该领域广泛应用的传感装置^[1-3]。但传统的光纤传感器受到结构和材料的限制, 阻碍了传感网探测能力的进一步提升^[4-5]。

光子晶体光纤^[6-8]具有灵活的设计结构特性, 光纤包层与纤芯易获得高折射率差。双芯光子晶体光纤(DC-PCF)除了具有光子晶体光纤优异特点之外, 凭借其具有 2 个导光纤芯的特性, 能产生双芯耦合效应和干涉效应, 实现了单根光纤 2 种模式的传输与干涉, 成为光子晶体光纤传感领域的一个研究热点。Annesha Maity 等人^[9]在双芯光纤中写入双芯长周期光栅, 实现了高灵敏的光栅传感器设计。何惠梅等人^[10]

收稿日期: 2020-02-17。

基金项目: 国家级大学生创新创业训练项目(201910619021)资助; 四川省科技计划项目(2018GZ0212)资助。

作者简介: 马小翠(1998—), 女, 四川绵阳人, 西南科技大学本科在读, 主要研究方向为光子晶体光纤及传感, 目前研究用于海防的水听器。参与国家级大学生创新创业训练项目《基于光纤激光器的大模场光子晶体光纤设计》。

* 通信作者: 张克非(E-mail: zhangkefeijike@163.com)。



设计的复合空气孔结构 DC-PCF 的压力灵敏度为 50.6 pm/MPa。吕健滔等人^[11]基于表面等离子体共振效应,设计了一种以 DC-PCF 为光波导的横向应力传感器,2 个偏振状态的横向应力灵敏度分别达到 -6.07 nm/N 与 4.07 nm/N。Lou J 等人^[12]将液体分析物填充到中心大气孔中,建立了高灵敏度圆双核光子晶体光纤传感器,最大灵敏度可达 22071 nm/RIU。综上所述,国内外在 DC-PCF 压力传感方面已取得实质性进展,但仍存在压力灵敏度不够高,对其性能的研究不够充分,导致在实际应用中具有局限性。

针对上述情况,本文提出在 DC-PCF 中设计包层周期性排列六边形空气孔,用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 填充 DC-PCF 中的一芯,将掺杂纤芯环绕一圈小孔径空气孔,有效增加双芯有效折射率差,提高对单位横向应力的波长响应,并综合模场面积,实现高灵敏度横向压力传感。

1 DC-PCF 传感原理

DC-PCF 传感器类似于全光纤马赫-曾德尔干涉仪^[13],将干涉臂集成到单根光纤,使单根光纤实现 2 种模式的传输与干涉。DC-PCF 横向压力传感示意图如图 1 所示。

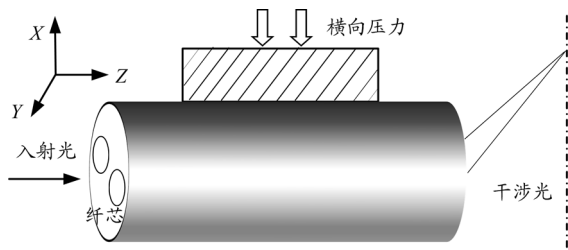


图 1 DC-PCF 横向压力传感示意图

DC-PCF 在均匀横向压力作用下,光纤的折射率会发生改变(弹光效应)。根据弹性力学理论,压力作用 DC-PCF 后,可得其应力分布对应的折射率为:

$$\begin{cases} n_x = n_0 - C_1 \sigma_x - C_2 (\sigma_y + \sigma_z) \\ n_y = n_0 - C_1 \sigma_y - C_2 (\sigma_x + \sigma_z) \\ n_z = n_0 - C_1 \sigma_z - C_2 (\sigma_x + \sigma_y) \end{cases} \quad (1)$$

其中, n_0 为不受任何压力下的各方向折射率, n_x 、 n_y 和 n_z 为不同轴向方向双芯传感单元受压后的模式折射率,受 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 3 个轴向方向的正应力的影响; C_1 、 C_2 分别为光纤材料光弹性系数,是决定材料敏感性的的重要影响因子。

因弹光效应引起的出射端两纤芯的相位差 φ 变

化为:

$$\varphi = \frac{2\pi L \Delta n_{\text{eff}}}{\lambda} \quad (2)$$

其中, L 为双芯光子晶体的长度 (即压力传感长度), λ 为真空中的波长, Δn_{eff} 为双芯的传输模式有效折射率差。

因相位差引起的模式干涉透射谱的变化为:

$$I_{\text{out}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\varphi + \frac{2\pi dx}{\lambda_{\text{in}} L}\right) \quad (3)$$

其中, I_1 、 I_2 分别为 2 个纤芯干涉模式的光强, d 为纤芯间距, x 为 X 方向的位置, λ_{in} 为输入光波长。若施加压力进一步扩大双芯的差异性,增大 2 种模式的相位差 φ ,干涉透射谱会随之改变,根据解析透射峰的移动得到传感特性。

DC-PCF 的压敏特性如式(4)所示:

$$\frac{\Delta \lambda_p}{P} = \frac{\lambda_p - \lambda_{p0}}{P} \quad (4)$$

其中, $\Delta \lambda_p$ 为某一波谷在压力 P 作用后的移动量,同偏振模式下波谷的波长移动量与光纤所加载的静压力的比值作为 X 、 Y 偏振压力灵敏度。其中,传统单芯光纤存在 X 和 Y 偏振方向 2 种单模模式,分别近似平行于 X 和 Y 方向;而 DC-PCF 拥有 XX 、 YY 、 XY 、 YX 4 个束缚模式。本文研究 DC-PCF 的同偏振模 XX (X 偏振)、 YY (Y 偏振)有效折射率差的变化。

2 数值模拟与分析

2.1 DC-PCF 基本结构与模型仿真

2.1.1 DC-PCF 基本结构设计

本文设计一种掺杂型 DC-PCF 横向压力结构,如图 2 所示。采用石英材料作为光子晶体光纤的背景材料,利用压敏材料与石英材料有较大的弹性系数差异的特点,向 DC-PCF 中的一芯掺入压敏材料以提高敏感性,建立六边形六层空气孔排列光子晶体光纤模型。该 DC-PCF 两纤芯距 l 为 11 μm ,右纤芯直径 $d_0 = 4.5 \mu\text{m}$,左纤芯(掺杂)直径 $d_1 = 2.2 \mu\text{m}$,掺杂纤芯区域环绕一圈 $\Lambda_1 = 2.5 \mu\text{m}$ 、间距为 2 μm 的小孔径空气孔。

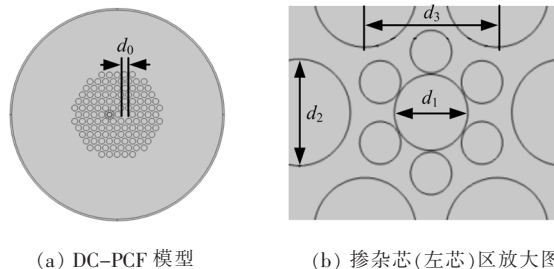


图 2 掺杂型 DC-PCF 横向压力传感结构

光纤其它结构参数: 光纤直径 $D=125\ \mu\text{m}$, 包层空气孔直径 $d_2=2.2\ \mu\text{m}$, 包层空气孔的水平间距 $d_3=4.4\ \mu\text{m}$, 空气孔层数 $N=6$ 层, 双芯光子晶体长度 $L=6\ \text{cm}$, 入射波长 $\lambda_{\text{in}}=1550\ \text{nm}$ 。

2.1.2 模型仿真

本文首先利用 COMSOL 模拟仿真横向压力加载 DC-PCF 的受压形变情况, 在电磁波频域模块中求得同偏振模式下折射率的改变量; 结合不同压力作用下的同偏振有效折射率差, 通过 Matlab 计算相位改变量, 画出干涉透射谱; 最后以透射谱同一波谷波长的移动量和压力的比值, 求得该双芯传感结构的压力灵敏度。

2.2 掺杂材料对压敏特性的影响

本文选择 2 种弹性系数较大的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 和聚碳酸酯 (PC) 作为掺杂材料^[14-15]。PMMA 弹性系数: $C_1=6.4\times 10^{-11}\ \text{m}^2/\text{N}$ 、 $C_2=5.57\times 10^{-11}\ \text{m}^2/\text{N}$; PC 弹性系数: $C_1=6.5\times 10^{-13}\ \text{m}^2/\text{N}$ 、 $C_2=4.2\times 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{N}$ 。将 2 种材料分别掺杂于左纤芯中, 研究 X 与 Y 偏振有效折射率在同一掺杂材料下随不同压力作用的变化, 获得透射谱波谷的移动量与 X 方向横向压力对应关系。

掺杂纤芯的压力灵敏度拟合曲线如图 3 所示。可以看出, 波谷位置的变化与压力大致呈线性关系, 在填充 PMMA 时波谷的移动量比填充 PC 时的波谷移动量更大, 通过式 (4) 计算出掺 PMMA 时 X 偏振压力灵敏度 $8.61\ \text{nm}/\text{MPa}$, 掺 PC 时 X 偏振压力灵敏度为 $0.292\ \text{nm}/\text{MPa}$, 因此选择掺 PMMA 材料对探测压力更有优势。

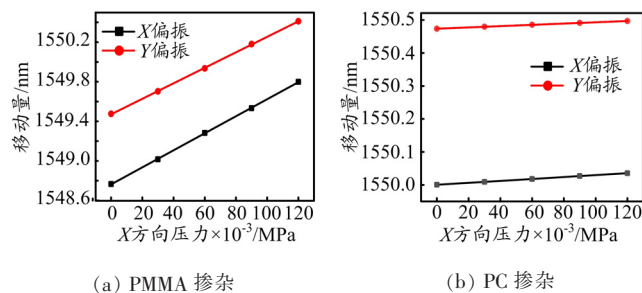


图 3 掺杂纤芯的压力灵敏度拟合

2.3 改变结构参数对压敏和模场面积的影响

当 DC-PCF 两纤芯模场面积大致相同时, 纤芯间的功率越是接近, 消光比越大, 干涉效果越好^[16]。在光子晶体中掺杂 PMMA, 保持其它参数不变, 在横向压力作用下, 改变掺杂直径 d_1 、空气孔直径 d_2 和空气孔间距 d_3 , 得到 X、Y 偏振下的压敏特性和模场面积变化, 如图 4、图 5 和图 6 所示。

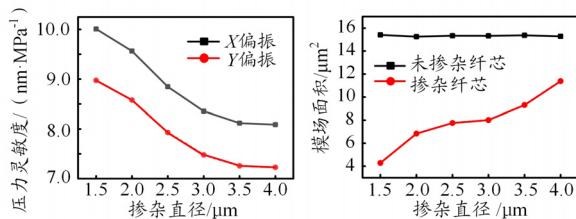


图 4 X 方向应力下掺杂直径对灵敏度和模场面积的影响

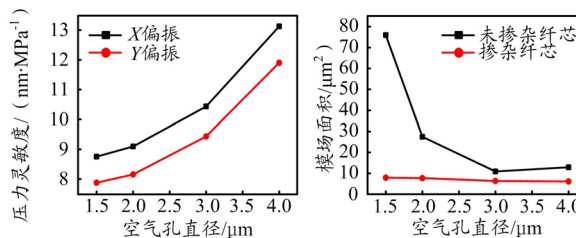


图 5 X 方向应力下空气孔直径对灵敏度和模场面积的影响

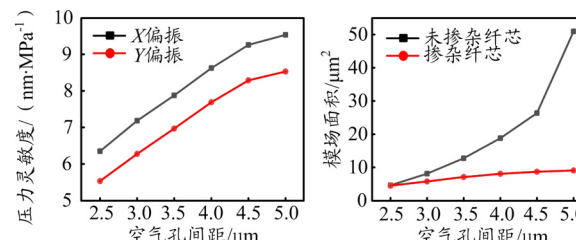


图 6 X 方向应力下空气孔间距对灵敏度和模场面积的影响

由图 4 可知, 随着掺杂直径的增大, X、Y 偏振压力灵敏度下降。掺杂直径为 $1.5\ \mu\text{m}$ 时, 压力灵敏度最大, 但两纤芯模场面积相差较大。为提高压力灵敏度并增大消光比, 掺杂直径可设置在 $2.5\ \mu\text{m}$ 左右。

由图 5 可知, 随空气孔直径增加, X 与 Y 偏振压力灵敏度保持增速增长的趋势逐渐增大。空气孔直径的增加, X 与 Y 偏振有效折射率差逐渐增大, 压力灵敏度提高。光子晶体光纤未掺杂纤芯是由空气孔围绕而成, 随着空气孔直径的增加, 其面积被空气孔挤占, 使得纤芯变小, 模场面积也随之变小。在图 5(b) 空气孔直径为 $3\ \mu\text{m}$ 处, 两纤芯模场面积最相近, 但灵敏度不高。综合 2 个参数考虑, 空气孔直径可设置为 $3.5\ \mu\text{m}$ 。

由图 6 可知, 当空气孔间距为 $2.5\ \mu\text{m}$ 时, 两芯模场面积几乎相同; 在空气孔间距为 $2.5\ \mu\text{m}$ 以后模场面

积则相差越来越大。而随着空气孔间距的增大, X 、 Y 偏振压力灵敏度保持着平缓的增速一直增大。在保证高灵敏度时, 应选择模场面积较为相近的空气孔直径, 可设置孔间距为 $4.5\ \mu\text{m}$ 。

2.4 结果分析

本文在 DC-PCF 中设计包层周期性排列六边形空气孔, 用 PMMA 填充双芯光子晶体光纤中的一芯, 将掺杂纤芯环绕一圈小孔径空气孔。掺杂纤芯的模场面积与掺杂面积基本吻合, 但掺杂纤芯直径的提升会迅速提高有效折射率, 降低压力灵敏度, 模场面积匹配与提升压力灵敏度存在矛盾。本文将掺杂纤芯适当提升, 获得了较高的压力灵敏度, 通过式 (2) 计算得该传感结构 X 偏振压力灵敏度为 $37.56\ \text{nm/MPa}$, Y 偏振压力灵敏度为 $35.27\ \text{nm/MPa}$ 。传统的横向压力光子晶体传感器灵敏度为 $0.56\ \text{nm/MPa}$, 本文所设计的传感结构的压力灵敏度提高了近 60 倍; 模场面积分别为 $12.7915551\ \mu\text{m}^2$ 、 $13.0449536\ \mu\text{m}^2$, 有效提高了消光比, 增强了干涉效果。

在此传感结构上施加横向压力, 模拟干涉透射谱在不同压力下的移动, 如图 7 所示。可以看出, 随着横向压力的增大, 透射谱波谷位置出现了明显的位移, 且移动波长间隔与所施加的压力具有良好的线性。

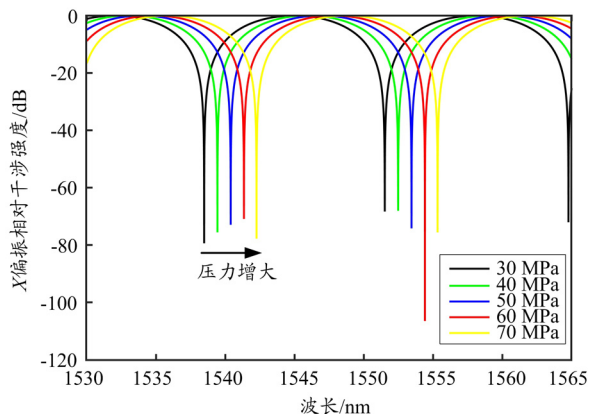


图 7 不同压力下透射谱的移动

3 结束语

本文利用掺杂材料和双芯光子晶体横截面结构参数影响双芯有效折射率差, 进而影响压敏特性的机理基础, 提出了一种高灵敏掺杂型 DC-PCF 横向压力传感结构。通过在 DC-PCF 中单芯掺杂压敏体, 改变掺杂直径 d_1 、空气孔直径 d_2 和空气孔间距 d_3 , 综合模场面积考虑, 得到 X 偏振压力灵敏度为 $37.56\ \text{nm/MPa}$ 、 Y 偏振压力灵敏度为 $35.27\ \text{nm/MPa}$, 较传统光子晶体横

向压力传感器, 灵敏度提高了近 60 倍, 可用于桥梁、大坝及山体滑坡等安全性检测领域。

参考文献:

- [1] 朱清. 大型桥梁结构健康监测技术[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [2] 韩博, 高朋. 基于 Mach-Zehnder 干涉的光子晶体光纤传感技术研究进展[J]. 传感器世界, 2018, 24(2): 7-11.
- [3] 李好学. 光子晶体光纤传感结构的优化及其工程应用的方案设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [4] SEN S, CHOWDHURY S, AHMED K, et al. Design of a porous cored hexagonal photonic crystal fiber based optical sensor with high relative sensitivity for lower operating wavelength [J]. Photonic Sensors, 2017, 7(1): 55-65.
- [5] 马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017(7): 69-80.
- [6] WANG Guangyao, LU Ying, YANG Xianchao, et al. High-sensitivity magnetic field sensor based on a dual-core photonic crystal fiber [J]. Applied optics, 2019, 58(21): 110-116.
- [7] BING Pibin, HUANG Shichao, SUI Jialei, et al. Analysis and Improvement of a Dual-Core Photonic Crystal Fiber Sensor. [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(7): 2051-2057.
- [8] WANG Haiyang, YAN Xin, LI Shuguang, et al. High Sensitivity Refractive Index Sensor Based on Dual-Core Photonic Crystal Fiber with Hexagonal Lattice[J]. Sensors, 2016, 16(10): 1655-1660.
- [9] MAITY A, VARSHNEY S K. Ultrasensitive Properties of a Long-Period Grating Inscribed in a Dual-Mode Photonic Crystal Fiber [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2833-2840.
- [10] HE H, WANG L. Numerical analysis of birefringence and coupling length on dual-core photonics crystal fiber with complex air holes[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(23): 5941-5944.
- [11] LYU Jiantao, WANG Chunming, ZHU Chenghao, et al. Dual-Core Photonic Crystal Fiber Transverse-Stress Sensor Based on Surface Plasmon Resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 828-830.
- [12] LOU J, CHENG T, LI S. High sensitivity photonic crystal fiber sensor based on dual-core coupling with circular lattice[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48(13): 110-116.
- [13] 康泽新, 孙将, 马林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测传感系统[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 82-87.
- [14] KRAMER S L B, MELLO M, RAVICHANDRAN G, et al. Phase Shifting Full-Field Interferometric Methods for Determination of In-Plane Tensorial Stress[J]. Experimental Mechanics, 2009, 49(2): 303-315.
- [15] WAXLER R M, HOROWITZ D, FELDMAN A. Optical and physical parameters of Plexiglas 55 and Lexan [J]. Applied Optics, 1979, 18(1): 101-104.
- [16] 蔡海文, 黄锐, 瞿荣辉, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪和取样光纤光栅的全光纤梳状滤波器[J]. 中国激光, 2003, 30(3): 243-246.
- [17] 何惠梅. 多芯结构的光纤、光子晶体光纤耦合及传感特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.