

选择性填充光子晶体光纤应变特性研究

于文兵^{1,2}, 田 婕², 王 英²

(1. 上海电机学院工业技术中心, 上海 201306; 2. 武汉工程大学理学院, 湖北武汉 430073)

摘 要: 微结构的光子晶体光纤, 通过填充光敏等功能材料, 具有可调谐、全光纤结构和易于集成等优点, 是光纤光子器件发展的重要方向. 毛细管法将高折射率的匹配液, 填充到空心光子晶体光纤中邻近纤芯的空气孔中, 两端熔接单模光纤, 制成高灵敏的应变传感器. 实验表明, 当填充 30mm 长, 折射率为 1.508 的匹配液时, 测得应变灵敏度约为每应变 4.36pm. 实验结果与仿真结果相符, 这种装置可用于高灵敏的应变传感.

关键词: 光纤光学; 光子晶体光纤; 选择性填充; 应变测量

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)09-2164-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.021

Strain Characteristics for Selectively Infiltrated Photonic Crystal Fibers

YU Weng-bing^{1,2}, TIAN Jie², WANG Ying²

(1. Industrial Technology Center, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430073, China;)

Abstract: Functional materials infiltrated photonic crystal fibers are optical devices that are wavelength tunable, all in fiber structure and easy to be integrated into optical systems, and have been a prominent research focus in optical fiber photonic devices. A highly sensitive strain sensor is made by selectively infiltrating high refractive index matching liquid into the air holes adjacent to the fiber core of a hollow core photonic crystal fiber (PCF) by capillary force, and splicing single mode fibers at both ends of the PCF. A strain sensitivity of 4.36pm/ $\mu\epsilon$ is obtained by a device with infiltration length of 30mm and liquid refractive index of 1.508. The experimental results agree well with the simulation predictions. Such a device can be used for strain sensing with high sensitivity.

Key words: fiber optics; photonic crystal fiber; selective infiltration; strain measurement

1 引言

光纤应变传感器具有抗电磁干扰能力强、稳定性好、适用范围广等优点, 广泛用于桥梁、隧道、轨道、油气管道和水库大坝等结构的健康监测, 一般光纤应变传感器较多使用光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 和光纤法布里-帕罗 (Fabry-Perot, F-P) 传感器. 紫外曝光法写入的光纤布拉格光栅传感器在高温下的稳定性差, 通常最高温不超过 400°C, 并且存在温度与应变的交叉影响^[1-3], 不适合高温应变测量. 光纤法布里-帕罗传感器由于体积小、线性度好、应变灵敏度高和重复性好等优点, 成为桥梁监测和压力测量等应变测量的主要传感器之一^[4,5], 但光纤 F-P 传感器存在光损耗

大、模式不匹配和腔长短等不利因素, 同时也无法克服温度对应变的交叉影响大的缺点^[6].

光子晶体光纤区别于传统光纤具有无截止单模传输、可调节色散、高双折射、大有效单模面积和高非线性有效小面积等特性, 成为国内外研究的一个热门课题^[7-9]. 通过对光子晶体光纤包层或纤芯中的空气孔进行掺杂或选择性填充材料来实现一些具有独特性能的器件, 如在光子晶体光纤纤芯中填充液晶材料, 利用液晶的温度特性实现了可调的温度传感器^[10], 在光子晶体光纤空气孔中填充金属或半导体^[11]产生一些新的光学特性. 本文研究在光子晶体光纤空气孔中选择性填充温度系数小的匹配液, 应用于高灵敏应变传感领域, 实现温度影响小、灵敏度高的应变传感测量.

收稿日期: 2015-01-25; 修回日期: 2015-10-10; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 61108016); 湖北省自然科学基金面上项目 (No. 2014CFB770); 武汉市科技局项目 (No. 2015010101010002)

2 光子晶体光纤传感器模式耦合原理

光子晶体光纤传感器的工作原理,可用定向耦合器的标准耦合模式理论来解释.在选择性填充的 PCF 中,芯区模与包层模之间的距离足够远时不存在模式耦合,图 1 中的填充孔 a 靠近纤芯 b,填充孔和纤芯不再独立传导模式,可以看成引入了微扰,每个传导模式可在空气孔和纤芯中分布,当两个纤芯模式在一定的频率达到了相同的相位速度时,微扰达到了最大值.用平面波展开法得到微扰方程,考虑两个模式耦合,得到双芯光纤模式耦合方程^[12]:

$$\frac{dA(z)}{dz} = -j\kappa_{ab}B(z)e^{-j[(\beta_a+M_a) - (\beta_b+M_b)]z} \quad (1)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = -j\kappa_{ba}A(z)e^{j[(\beta_a+M_a) - (\beta_b+M_b)]z} \quad (2)$$

方程式(1)和(2)中, $A(z)$ 和 $B(z)$ 分别是填充孔和纤芯中的输入能量, $\kappa_{ab(ba)}$ 是互耦合系数, $M_{a(b)}$ 是自耦合系数, $\beta_{a(b)}$ 是传播参数, z 是传播距离.

当填充孔和纤芯比较接近的时候,同时,两个模式的振幅发生周期性变化,模式的能量在两个模式之间周期性交换耦合,沿 z 方向传播时,能量从纤芯 b 到填充孔 a 需要的传播距离 $z_m = \pi/2\kappa_{ab}$;当两个模式远离耦合点时,互耦合系数 $\kappa_{ab(ba)}$ 减小,填充孔和纤芯中传导的模式,一个为高能量模式另一个为低能量模式.

利用有限元方法数值计算图 1 结构中的纤芯和填充孔中的模式色散特性,色散曲线如图 2 所示,填充液的折射率略高于二氧化硅的折射率,从色散曲线可以看到 a、b 两个模式的耦合在一定的耦合波长 λ_c 下才能发生,在波长远小于 λ_c 时,两个导光孔近似可以看做是两个独立的波导,互相作用很小;当波长在 λ_c 附近时,两个模式的有效折射率非常接近,而 a、b 两个模式在两个导光孔内都有很强的模式分布;当波长大于 λ_c 时,a、b 两个模式的导光位置发生了互换,模式 a 到了纤芯 b 的位置导光.由图 2 中的 1440nm 至 1510nm 处的 2 条

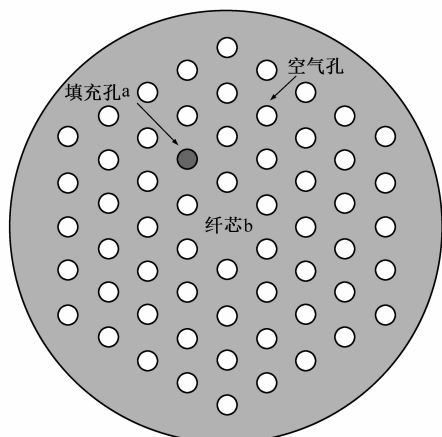


图1 光子晶体光纤结构图

色散曲线的放大图可以看到,并没有交点,仅仅在 1485nm 处相聚最近.由于耦合器微扰的存在,这 2 条曲线分裂成了相互靠近但不相交的曲线.在相聚最近的点是耦合器的最佳工作点,这个波长下两个孔内的能量分布相当.

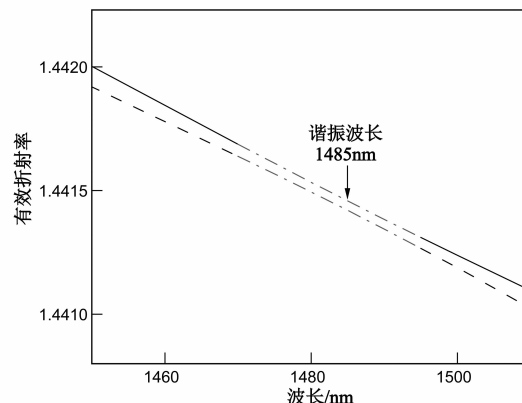


图2 PCF的色散曲线

3 实验结果及讨论

应变实验装置如图 3 所示,安杨公司的宽带光源光谱范围为 400nm ~ 1600nm,光子晶体光纤采用 NKT 公司的商用 LMA-10 光子晶体光纤,光纤空气孔平均直径为 3.04 μm ,孔距为 6.26 μm ,选取靠近纤芯的空气孔 a,用毛细管法填充美国 Cargille 公司的折射率为 1.508 的匹配液,使其高于 LMA-10 使用的硅玻璃折射率 1.445,填充长度为 30mm.在选择性填充的光子晶体光纤的两端,纤芯对纤芯熔接普通单模光纤,透射光谱由一台高精度光谱仪 OSA (AQ6370C, YOKOGAWA, Japan) 扫描检测.实验前,将 PCF 的涂覆层剥离,固定于两个间距 120cm 的高精度微动平台上,调节微动平台使光纤处于预拉紧状态,逐步调节微动平台,测试应变.

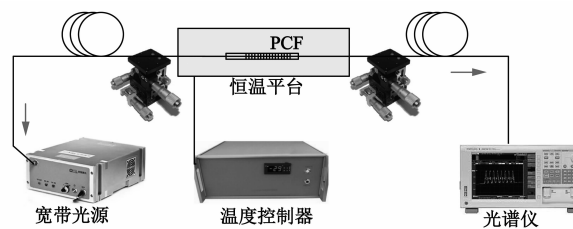


图3 应变实验结构图

开始时,将 PCF 置于恒温平台上,温度稳定在室温,通过光谱仪观测到在 1250 ~ 1650nm 的波长区域,没有明显的谐振峰.根据数值模拟结果,纤芯模和填充模之间的谐振波长,在室温时远小于 1250nm,所以观察不到谐振峰.经过 1 小时温度稳定后,以 30 μm 为单位调节微动平台,沿光纤轴线拉伸 PCF,引起轴向应变,继续沿轴向拉伸,记录应变数据,取应变分别为 0、225 μm 、

450 μm 、670 μm 的 4 组数据,用光谱仪记录透射光谱曲线如图 4 所示.当以每 30 μm 应变,测量室温下填充光子晶体光纤的透射谱线,得到损耗峰值对应的波长,重复 3 次取平均值,绘制其应变曲线如图 5 所示.数据和曲线表明,选择性填充的 PCF 的应变重复性好,灵敏度约为 4.36 $\text{pm}/\mu\text{e}$,没有滞后现象.

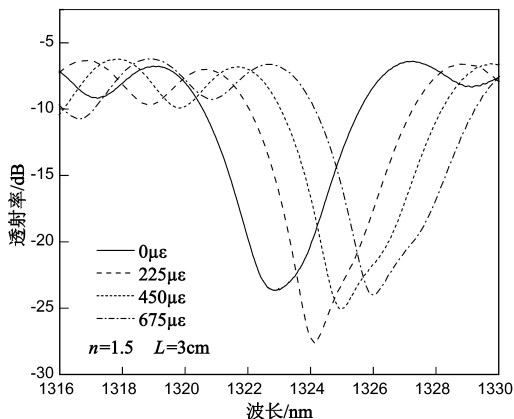


图4 PCF透射光谱与应变关系图

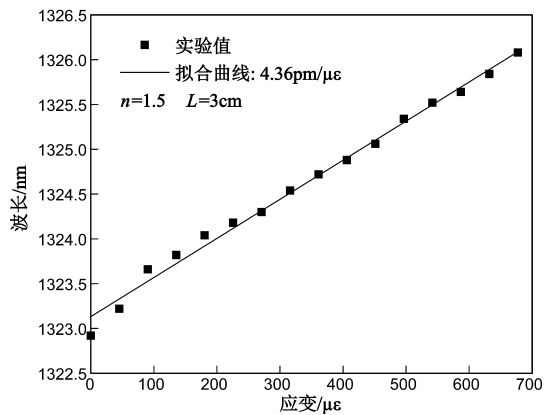


图5 PCF室温轴向应变曲线

由耦合理论可知,纤芯中的传导模经过一个单位耦合长度 L_c 会耦合到填充模,经过下一个耦合长度 L_c ,光能量将返回到纤芯.填充长度过短或过长,都有可能

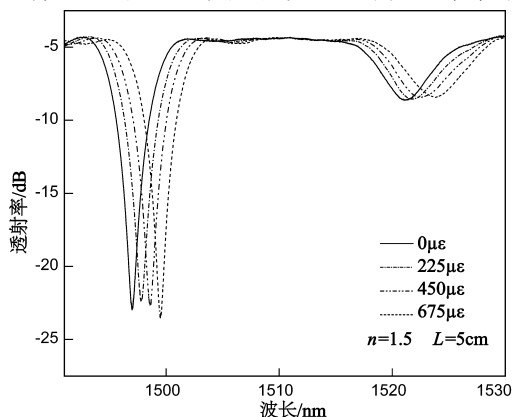


图6 PCF透射光谱与应变关系图

使传感器失效.为此,应变实验中我们换用另一根填充 50mm 长的 PCF,两端熔接同样的普通单模光纤,按应变 0、225 μm 、450 μm 、670 μm 重做上述实验,观察透射光谱如图 6 所示,绘制应变曲线如图 7 所示,数据显示其应变灵敏度约为 3.77 $\text{pm}/\mu\text{e}$.但在透射光谱图 6 中,靠近右端出现了损耗峰,这是由于填充模式经过一个耦合长度部分光能量返回到纤芯模,说明耦合长度应该小于 50mm.

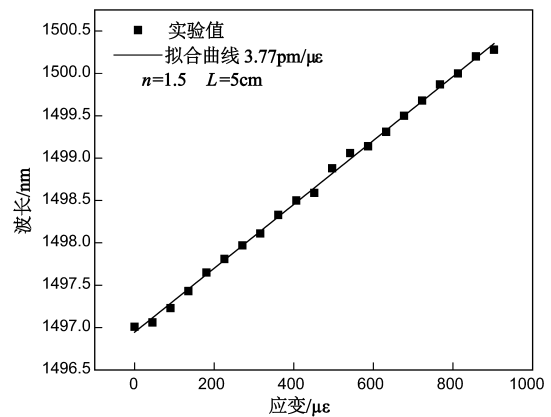


图7 PCF室温轴向应变曲线

4 结论

对利用选择性填充的 PCF 制作的光纤传感器,本文填充适当长度的温度敏感系数低的匹配液,研究其应变特性,结果显示在不超过耦合长度下,PCF 具有应变灵敏度高、温度不敏感和重复性好的特点.常温下,温度对应变灵敏度的交叉影响小,没有滞后现象,这种传感器能满足常温高灵敏度的应变测量的需要,具有极大的潜在应用价值.

参考文献

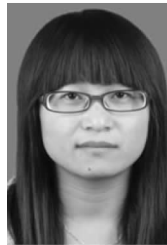
- [1] 朱涛,饶云江,莫秋菊,等.温度/应变/扭曲三参量同时测量低成本传感系统[J].光子学报,2006,35(5):655-658.
Zhu Tao, Rao Yunjiang, Mo Qiuju, et al. Low cost sensing system for simultaneous measurements of temperature strain and torsion[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 655-658. (in Chinese)
- [2] 乔学光.光纤布拉格光栅传感器应力和温度同时测量时的误差分析[J].光电子·激光,1998,9(5):272-274.
Qiao Xueguang. Error analysis of simultaneous strain and temperature measurement with optical fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1998, 9(5): 272-274. (in Chinese)
- [3] Grayson A C R, Shawgo R S, Johnson A M, et al. A BioMEMS review: MEMS technology for physiologically in-

- egrated devices[J]. Proc IEEE,2004,92(1):6-21.
- [4] 甘雄,朱永,章鹏,等. 石板坡长江大桥多通道光纤法布里-帕罗应变测量系统[J]. 中国测量技术,2008,34(1):128-130.
Gan Xiong,Zhu Yong,Zhang Pen,et al. Multi-channel fiber optical Fabry-Perot strain testing system for the shibanpoyangtze river bridge [J]. China Measurement Technology, 2008,34(1):128-130. (in Chinese)
- [5] L M Hu,C C Chan,X Y Dong,et al. Photonic crystal fiber strain sensor based on modified Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Photonics Journal,2012,4(1),114-118.
- [6] 张晓晶,武湛君,张博明,等. 光纤布拉格光栅温度和应变交叉灵敏度的实验研究[J]. 光电子·激光,2005,16(5):566-569.
Zhang Xiaojing,Wu Zhanjun,Zhang Boming,et al. Experimental study on cross-sensitivity of temperature and strain of fiber optic Bragg gratings[J]. Journal of Optoelectronics · Laser,2005,16(5):566-569. (in Chinese)
- [7] Ningliang Liu,Yuhua Li,Ying Wang,et al. Bending insensitive sensors for strain and temperature measurements with Bragg gratings in Bragg fibers[J]. Optics Express,2011,19(15),13880-13891.
- [8] 饶云江,黎宏,朱涛,等. 基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉式高温应变传感器[J]. 中国激光,2009,36(6):1484-1492.
Rao Yunjiang,Li Hong,Zhu Tao,et al. High temperature strain sensor based on in-line fabry-perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal Fiber[J]. Chinese Journal of Lasers,2009,36(6):1484-1492. (in Chinese)
- [9] Ying Wang,C R Liao,D N Wang. Femto second laser-assisted selective infiltration of microstructured optical fibers [J]. Optics Express,2010,18(17),18056-18060.
- [10] Dora Juanjuan Hu,Jun Long Lim,Ying Cui,et al. Fabrication and characterization of a highly temperature sensitive device based on nematic liquid crystal-filled photonic crystal fiber [J]. IEEE Photonics Journal,2012,4(5):1248-1255.
- [11] H K Tyagi,MA Schmidt,L Prill Sempere,et al. Optical properties of photonic crystal fiber with integral micron-sized Gewire [J]. Optics Express,2008,16(22):17227-17236.
- [12] Ying Wang,Minwei Yang,Wang D N,et al. Selectively infiltrated photonic crystal fiber with ultrahigh temperature sensitivity[J]. IEEE Photon Technol Lett,2011,23(20),1520-1522.

作者简介



于文兵 男,1972年出生于湖北洪湖,华中科技大学光学工程硕士研究生,武汉工程大学光电信息科学与工程专业副教授、硕士生导师.研究方向为光纤传感技术、超快激光技术与应用.
E-mail:yuwhtc@163.com



田婕 女,1991年出生于河北张家口,武汉工程大学光学工程在读硕士研究生,研究方向为光纤传感技术与应用.
E-mail:953533143@qq.com



王英 男,1983年出生于河南洛阳,华中科技大学光学工程博士研究生,武汉工程大学理学院特聘教授.研究方向为光纤传感和超快激光微加工.
E-mail:7079150@qq.com