

本征法布里珀罗光纤传感器温压响应研究

王宁 付剑波 朱化凤 李代林

中国石油大学(华东)理学院物理与光电工程系, 山东 青岛 266580

摘要 利用外径不同的常规单模和多模光纤成功制作了一种本征法布里-珀罗干涉型光纤传感器,对其温压响应进行了研究。由材料力学和光弹理论得出了压力响应理论模型,为了增加压力响应灵敏度,在考虑泊松效应导致应变方向的前提下,选择了多模光纤外径较小的结构。实验中传感器采用了经氢氟酸腐蚀外径为120 μm多模石英光纤,将制作的1 mm腔长的传感头进行了温度响应实验,温度范围为20 ℃~500 ℃,实验结果表明该传感器对温度有较好的线性响应,光程差响应灵敏度为25 nm/℃,且重复性较好;在常温20 ℃条件下进行了压力响应实验,实验结果表明该传感器具有较好的压力线性响应,其压力响应灵敏度为4.7 nm/MPa。该传感器能够对温度、压力实现较好的响应,同时具备准分布式测量的潜力。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 本征法布里珀罗腔; 温压响应

中图分类号 TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.100604

Temperature and Pressure Response Study of Intrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensor

Wang Ning Fu Jianbo Zhu Huafeng Li Dailin

Department of Physics and Optoelectronic Engineering, College of Science, China University of Petroleum (huadong), Qingdao, Shandong 266580, China

Abstract An intrinsic Fabry-Perot interferometric fiber sensor is successfully fabricated by normal single mode fiber and multimode fiber with different outer diameters. Its temperature and pressure response performance is investigated. The pressure responding theoretical model is got by materials mechanics theory and photoelastic theory. Considering the strain direction caused by Poisson effect, the multimode fiber with small diameter is used to improve the pressure sensitivity. In experiments, the diameter of multimode fiber is 120 μm after the fiber is corroded by hydrofluoric acid. The temperature responding experiment is done by this sensor with varied temperature from 20 ℃ to 500 ℃, with 1 mm cavity length. The experiment results show the sensor have a good temperature linear response and repeatability. The temperature sensitivity is 25 nm/℃. The pressure experiment results are also got at 20 ℃ temperature. The experiment results show the sensor also has a good pressure linear response. The pressure sensitivity is 4.7 nm/MPa in this experiment. This kind of optic fiber sensor can be well responded by temperature and pressure, and with the potential of multiplexing sensors.

Key words fiber optics; optic fiber sensing; intrinsic Fabry-Perot cavity; temperature and pressure response

OCIS codes 060.2370; 230.2285

1 引言

法布里-珀罗干涉型光纤传感器已发展多年,被广泛应用于温度、压力、应变等测量场合^[1-3]。该种传感器分为本征型^[4]和非本征型^[5]两类,与非本征型法布里-珀罗干涉型光纤传感器相比,本征型法布里-珀罗腔光纤传感器的优势在于插入损耗大大降低,因而具备了传感器复用的能力^[6]。如利用该种传感器可进行准分布式温度和应力测量^[7],但目前该种传感器在压力传感方面的研究报道较少。美国弗吉尼亚理工大学

收稿日期: 2015-04-17; 收到修改稿日期: 2015-05-21; 网络出版日期: 2015-08-26

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2012DL12)、青岛市科技计划项目(13-1-4-225-jch)、青岛市黄岛区重点科技发展计划(2014-1-46)、中央高校基本科研业务费专项资金(14CX02023A,14CX02021A)

作者简介: 王宁(1977—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: qfwangning@163.com

研究人员曾利用套管式单模和多模光纤复合本征法布里-珀罗腔实现了压力测量^[6],同时该传感器具备准分布式测量潜力,但目前该种传感器的制作工艺难度较大,压力响应灵敏度仍需提高。Wu等^[8]利用光子晶体光纤和单模光纤(SMF)熔接构成的法布里-珀罗腔光纤传感器,进行了压力响应研究,但其在单模光纤与光子晶体的熔接工艺以及压力响应灵敏度方面仍需提高。

由于本征型法布里-珀罗光纤传感器具备准分布式温压双参量测量潜力,其温度和压力响应特性备受关注。本文提出了一种利用外径不同的单模和多模光纤熔接而成的本征法布里-珀罗干涉型光纤传感器,该传感器制作工艺简单、成本低,具备温度和压力的双参量响应能力,同时具备准分布式测量的潜力。本文给出了该种结构的压力响应理论模型,并对利用该结构制作的光纤传感头进行了温度和压力的响应实验。研究结果对分布式压力传感器,特别是分布式多参量光纤传感器的研究有一定意义。

2 传感器结构及原理

如图1所示,该传感器由外径不同的单模和多模光纤熔接而成,单模/多模/单模光纤复合结构构成了法布里-珀罗腔,其中多模光纤(MMF)外径较小。由于光纤法布里-珀罗腔对外界温度变化能够响应,同时单模多模光纤的外径差异赋予了法布里-珀罗腔对压力的敏感性,因而该种结构也就具备了温度、压力的双参量响应能力。为了增加压力响应的灵敏度,在考虑泊松效应导致的应变方向的前提下,选择了多模光纤外径较小的结构设计。

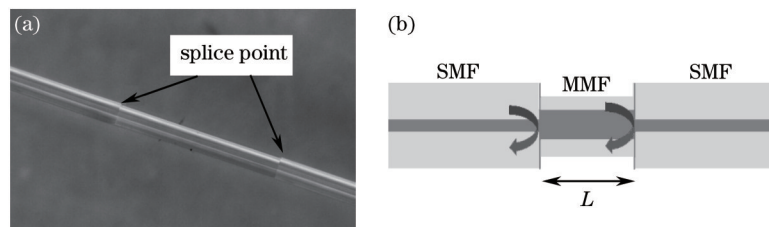


图1 传感器结构。(a) 传感器照片;(b) 结构示意图

Fig.1 Structure of optic fiber sensor. (a) Sensor photo; (b) schematic structure

如图1所示,由于法布里-珀罗腔的存在,光纤中传输光会在2种光纤的交界面处发生反射,2束反射光的光程差(即法珀腔光学腔长)为

$$D = 2n_{\text{eff}}L, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为法布里-珀罗腔的有效折射率, L 为法布里-珀罗腔腔长。根据材料力学知识^[9-10]和弹光理论^[6]可以得到,法布里-珀罗腔光学腔长的变化与外界压力 P 的变化关系可表示为

$$\Delta D = \frac{2n_{\text{eff}}L}{E} \cdot \left(\frac{r^2}{R^2} - 1 + 2\mu \right) \cdot P \cdot (1 - P_e), \quad (2)$$

其中 R 为多模光纤直径, r 为单模光纤直径, E 为杨氏模量, μ 为泊松比, P_e 为有效弹光系数。由于光纤法布里-珀罗腔温度响应理论已为大家所熟悉,不再给出。

显然,由于单模和多模光纤直径存在差异,这种结构起到了一种应变转换器的作用,将环境压力转变为光纤轴向的应变,同时泊松效应也引起了法布里-珀罗腔在光纤轴向上的应变,进而引起法布里-珀罗腔

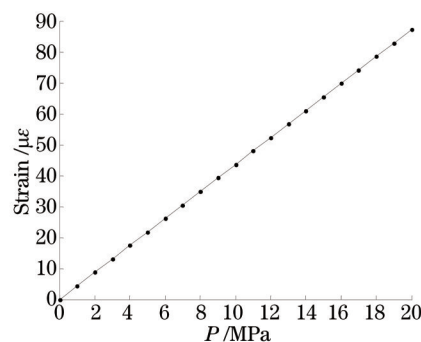


图2 压力-应变响应理论模拟曲线

Fig.2 Simulated curve of pressure-strain

长变化。在文献[11]中,曾对类似结构进行了前期的理论研究。而此优化的结构设计,2种应变的作用方向是相同的,因而法布里-珀罗腔的腔长变化也会较为明显,压力的响应灵敏度较高。根据(2)式,可以得到该传感结构的压力-应变响应理论模拟曲线,如图2所示。

3 温度压力响应实验

3.1 实验系统

利用光纤熔接机将一段多模光纤熔接在2根单模光纤之间,形成本征法布里-珀罗腔,熔接参数经过多次反复优化,得到了较为可靠稳定的熔接参数。正是由于该方法制作的传感头插入损耗小,因而使其具备了可以多个级联的潜力,可以构成准分布式测量的传感器阵列。利用该方法制作了实验中所采用的传感器,所用单模光纤为 Corning SM28e 型标准单模石英光纤,多模光纤为 Corning 62.5/125 μm 标准多模石英光纤,多模光纤经氢氟酸处理,为便于制作光纤传感头,选取多模光纤样品直径为 120 μm ,法布里-珀罗腔的腔长为 1 mm。

温度压力响应实验装置如图3所示。光纤传感器通过光纤环形器与光纤传感分析仪相连。光谱分析设备使用了 Micro Optics 公司生产光纤传感分析仪,在本实验中提供光源并进行反射光谱的采集;光纤环形器可以使光纤法布里-珀罗腔的反射干涉光谱传输至光纤传感分析仪。光纤传感器放入专用的温压测试室,利用专用的温压控制系统调节温度和压力。

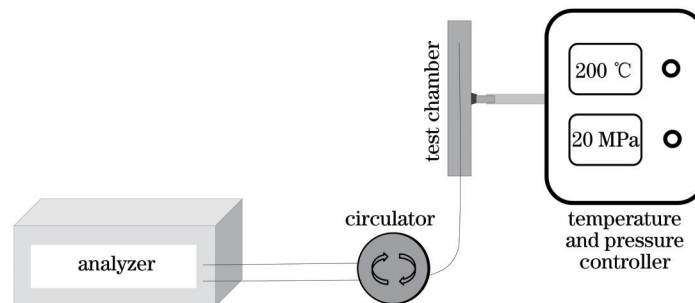


图3 实验系统图

Fig.3 Structure of experiment system

将制作好的传感头放入温压测试室进行了实验,实验中所得反射光谱如图4所示。当外界温度或压力发生变化,反射光谱谱线会平移,如图4所示,3条谱线分别是温度为 180 $^{\circ}\text{C}$ 、190 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ 时法布里-珀罗腔的反射光谱谱线。

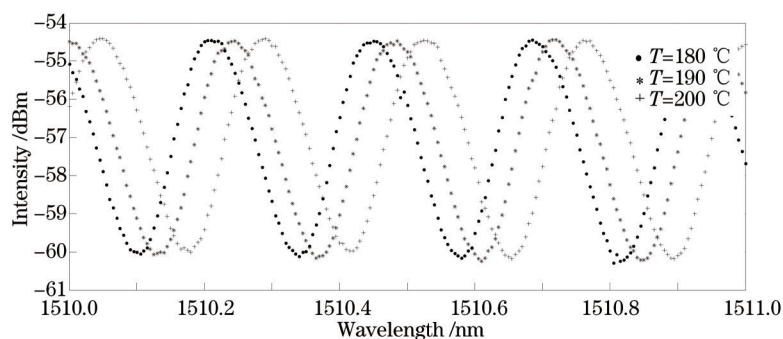


图4 法布里珀罗腔反射光谱随温度变化

Fig.4 Reflection spectra of Fabry-Perot cavity with varied temperatures

3.2 实验结果

利用实验中获得的反射光谱数据,配合腔长解调程序,可以得到法布里-珀罗腔光学腔长随温度和压力的响应实验曲线。图5为该传感器的温度响应实验曲线,温度范围为 20 $^{\circ}\text{C}$ ~500 $^{\circ}\text{C}$ 。由图可知,该传感器能够对温度变化正常响应,且响应曲线线性度较好,其光程差温度响应灵敏度为 25 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。图中的2条实验曲线分别代表升温过程数据和降温过程数据,2条实验曲线数据重合性很好,该传感头的温度测量重复性较好。图6为升温和降温实验数据的残差数据图,由图可知,残差数据值较为均匀地分布在0值附近。

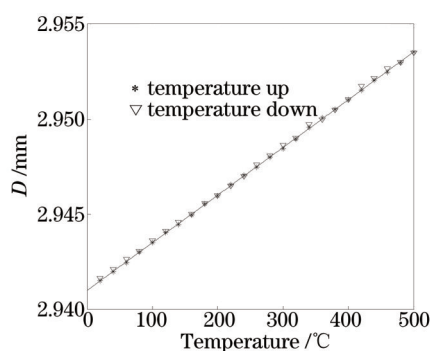


图5 腔长 1 mm 条件下的温度响应实验曲线

Fig.5 Temperature responding experiment curve with 1 mm cavity length

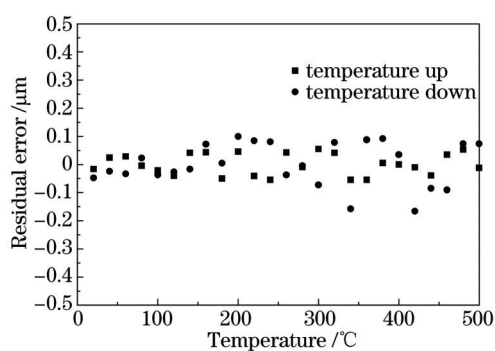


图6 温度响应实验数据残差

Fig.6 Residual errors of temperature responding experiment data

将该传感器在常温 20 °C 条件下进行了压力响应实验,压力变化范围为 0.1~20 MPa,数据采集超过 200 个测量点。压力响应实验数据如图 7 所示,由图可知该传感器对外界压力变化具有正常响应,且线性度较好,其光程差压力响应灵敏度为 4.7 nm/MPa,灵敏度较高。由于该传感器对温度变化也有响应,实验中,在该传感器后级联了一个可精确测定温度的本征法布里-珀罗腔光纤传感器,由于该压力传感器的温度响应规律已经掌握,可利用温度测量值对该压力传感器进行温度补偿(即扣除温度引起的腔长变化量),以获得较为准确的压力响应数据。图 8 为压力响应实验数据残差,残差数值较为均匀分布在 0 值附近,其分布规律较好。

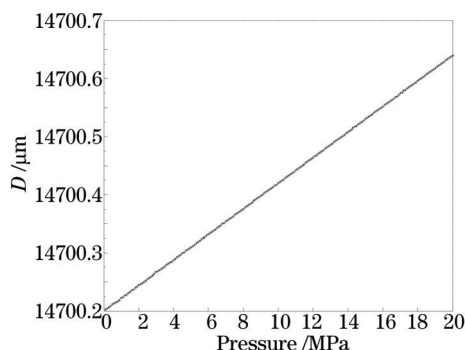


图7 常温 20 °C 下压力响应实验曲线

Fig.7 Pressure responding experiment curves at 20 °C

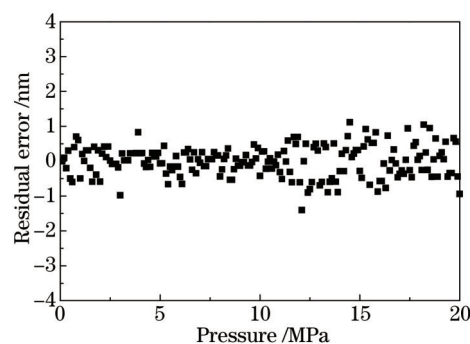


图8 压力响应实验数据残差

Fig.8 Residual errors of pressure responding experiment data

4 结 论

利用外径不同的单模和多模光纤成功制作了一种本征法布里-珀罗干涉型双参量光纤传感器,该传感器能够对温度、压力进行双参量响应,同时具备准分布式传感潜力。得到了压力响应理论公式,给出了压力-应变响应理论模拟结果。进行了温度和压力响应实验,从实验结果来看,该传感器的温度、压力响应灵敏度高,线性度和重复性较好。

参 考 文 献

- Xu Laicai, Deng Ming, Duan De-Wen, *et al.*. High-temperature measurement by using a PCF-based Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(10): 1391-1396.
- Zhu Jiali, Wang Ming, Cai Dongyan, *et al.*. A fiber Fabry-Perot micro pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0428002.
- 朱佳利, 王 鸣, 蔡东艳, 等. 光纤法布里-珀罗微压传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0428002.
- Shu Zhuo, Tong Bin, Xu Chunhui, *et al.*. Dual-fiber Fabry-Perot displacement sensor based on ratio method fringe counting demodulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1005003.
- 舒 卓, 童 斌, 徐春晖, 等. 基于双路比值条纹计数法的法布里-珀罗腔位移传感器[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1005003.
- V R Machavaram, R A Badcock, G F Fernando. Fabrication of intrinsic fiber Fabry-Perot sensors in silica fibres using

- hydrofluoric acid etching[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2007, 138(1): 248-260.
- 5 Zhao Ziwen, Wang Weiyu, Zhang Min, *et al.*. A new temperature compensation method by optimizing the structure of extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090605.
- 赵子文, 王为宇, 张敏, 等. 通过改进非本征法布里-珀罗干涉型光纤传感器结构实现温度补偿的新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 090605.
- 6 Ma Cheng, Wang Ning, M L Evan, *et al.*. Intrinsic Fabry-Pérot interferometric (IFPI) fiber pressure sensor[C]. *SPIE*, 2010, 7677: 76770T.
- 7 Huang Zhengyu, Zhu Yizhen, Chen Xiaopei, *et al.*. Intrinsic Fabry-Pérot fiber sensor for temperature and strain measurements[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17(11): 2403-2405.
- 8 Wu Chuang, H Y Fu, K Q Khurram, *et al.*. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(3): 412-414.
- 9 B B Muvdi, J W McNabb. *Engineering Mechanics Materials*[M]. Macmillan: New York, 1984: 597-602.
- 10 Xiao Hai, Deng Jiangdong, Wang Zhiyong, *et al.*. Fiber optic pressure sensor with self-compensation capability for harsh environment applications[J]. *Opt Eng*, 2005, 44(5): 054403.
- 11 Wang Ning, Mao Jieying, Zhu Huafeng. Theoretical research of intrinsic Fabry-Perot interferometric fiber pressure sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050601.
- 王宁, 毛洁莹, 朱化凤. 本征法布里珀罗腔光纤压力传感器理论研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012(5): 050601.

栏目编辑: 王晓球