

基于 F-P 干涉的膜片式光纤压力传感器的设计

梁有程,陈海涛

(广州民航职业技术学院,广东广州 510403)

【摘要】本文设计了一种基于 Fabry-Pérot(F-P)干涉的膜片式光纤传感器及其压力信号测量方案。基于光学干涉理论对该 F-P 腔的反射信号进行计算与分析,得出在不同端面反射率下,该 F-P 腔的反射信号与干涉腔腔长的对应关系。该 F-P 腔选用弹性金属膜作为外参量的感应面,通过金属膜的形变来调整 F-P 干涉腔的腔长参数,调整了光纤 F-P 干涉式传感器的构建方式,使得干涉腔的移动臂具有更高的外参量感应性能,提升了干涉腔的压力测试灵敏度。

【关键词】F-P 干涉;膜片;压力;光纤传感器

【doi:10.3969/j.issn.2095-7661.2021.02.001】

【中图分类号】TP212

【文献标识码】A

【文章编号】2095-7661(2021)02-0001-03

Design of Diaphragm Optical Fiber Pressure Sensor Based on F-P Interference

LIANG You-cheng, CHEN Hai-tao

(Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou, Guangdong, China 510403)

Abstract: A diaphragm optical fiber sensor based on Fabry-Perot (F-P) interference and its pressure signal measurement scheme is designed. The reflection signal of the F-P cavity is calculated and analyzed based on the optical interference theory and the corresponding relationship between the reflection signal of the F-P cavity and the length of the interference cavity under different end reflectivity is obtained. The elastic metal film is used as the sensing surface of the external parameter in the F-P cavity. The cavity length parameters of the F-P interference cavity are adjusted by the deformation of the metal diaphragm, and the construction mode of the F-P interference cavity is adjusted. The moving arm of the interference cavity has higher external parameter test sensitivity.

Keywords: F-P interference; diaphragm; pressure; optical fiber sensor

传感器技术是测量技术、信息处理技术、微电子学、光学、精密机械、材料科学等众多学科相互交叉的综合性高新技术和密集型前沿技术。光纤传感技术始于 20 世纪 70 年代,是以光波为媒体、光纤为媒质,感知和传输外界测量信号的新型传感技术^[1-2]。光纤传感包含对外界信号的感知与传递两种功能。所谓感知,是指外界信号按照其变化规律使光纤中传播光波的物理特征参量,如强度、波长、频率、相位等发生变化,测量光参量的变化即可“感知”外界信号的变化。所谓传递,是指光纤将收到外界信号调制的光波传输到光探测器进行检测,将外界信号从光波中提取出来并按需要进行处理,也就是解调^[3-4]。

对比各类光纤传感器,光纤 F-P 传感器在灵敏度、动态范围、微型化等方面优势明显^[5]。光纤 F-P 传感器一般采用反射或透射型信号传输,在封装上多采用金属管管式封装,在应力、压力、温度等参量的测量方面都得到一定的应用^[6-7]。

基本的 F-P 干涉腔具有结构简单、稳定性好的特点,在光纤滤波器、光纤传感器等领域得到广泛的应用^[8-9]。但作为光纤传感器,稳定的性能也限制了其对外界参量的直接感知及其测试的灵敏度,为提高光纤 F-P 干涉式传感器的测试灵敏度,本文从光纤传感器的信号测量原理出发,分析了光纤 F-P 干涉式传感器的传感参量传递模型,得出传感器腔长的变化

【收稿日期】2021-03-13

【作者简介】梁有程(1981-),男,广东茂名,广州民航职业技术学院副教授,硕士,研究方向:电子信息技术、民航通信技术。

【基金项目】2019 年广东省教育厅科研平台项目“机场周界安防系统的新型光纤传感器件及其信号检测技术研究”(项目编号:2019GK-TSCX006)。

值与外界压力参量的对应关系,通过优化光纤传感器的传感膜片结构,提升传感器对外参量变化的感应,设计出一种基于金属膜片感应的新型光纤 F-P 干涉式传感器,并对其信号测量原理及测试方案进行仿真计算及数据分析。

1 光纤 F-P 干涉原理

基于 F-P 干涉的光纤传感器的结构与基本的 F-P 干涉仪的结构类似,通过将两种光纤端面镀膜后平行放置构成互相平行的干涉面,如图 1 所示。传感器探头由嵌套在石英毛细管的两根单模光纤构成,两光纤端面间距一般为几十微米,并与中间的空气隙形成 F-P 干涉腔。入射光信号从单模导光光纤输入后,一部分光在第一个反射端面处被反射,另一部分光继续传播进 F-P 腔的腔体,并在第二个反射端面发生部分反射,反射回的光会有一部分再次耦合进光纤中,并产生与干涉腔腔长有关的位移,与第一个端面的反射光发生干涉,多次反射的光信号在干涉腔内多次反射后形成多光束干涉。若外界传感量的变化引起 F-P 腔长的变化,导致干涉条纹的相位变化,通过测量传感器探头的反射信号或透射信号可测定两光纤端面间距(传感器腔长)的变化量。为提高传感器反射信号的对比度,可以在光纤端面镀制多层反射膜。假设 F-P 干涉腔的腔长为 L ,在外界应力或温度等参量的作用下干涉腔的腔长 L 将发生变化,通过测量腔长的改变量 ΔL 可以实现对外参量的测量。

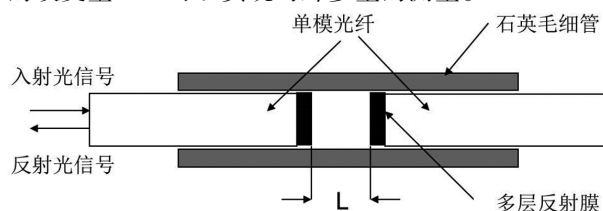


图 1 光纤 F-P 干涉传感器的结构图

光纤 F-P 干涉腔是基于光的多光束干涉原理。光信号经入射光纤进入干涉腔,将在干涉腔内发生多次反射,每次反射后光信号的光强与光程都不相同。假设入射光信号的分布为 $I_0(\lambda)$,波长为 λ ,干涉腔两个反射面的有效反射率分别为 R_1 、 R_2 ,干涉腔腔体的折射率为 n_0 ,腔长为 L ,光信号在腔内多次反射引起的附加相移为 δ ,则 F-P 微腔的反射光谱 $I_r(\lambda)$ 可表述为^[9]:

$$I_r(\lambda) = I_0(\lambda) \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n_0 L}{\lambda} + \delta\right)}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n_0 L}{\lambda} + \delta\right)} \quad (1)$$

从图 1 可以看出,该 F-P 干涉腔腔长的变化主要由封装毛细管的形变或连接光纤的位移引起。一般来说,常见的镀膜材料或玻璃材料都具有较高的温度稳定性,外参量的微小变化很难直接通过传感器腔长

变化来表现出来,这也限制了光纤 F-P 干涉腔的测试灵敏度。

2 膜片式光纤 F-P 干涉传感器设计

为提高光纤 F-P 干涉腔的信号灵敏度,分析计算了光纤 F-P 干涉腔的腔长变化量与传感器结构的对应关系,发现可通过调整干涉腔干涉面材料与面积的方式来增加传感器的灵敏度,对反射型 F-P 干涉腔的结构进行调整可改善传感器的干涉信号的灵敏度。优化后的光纤传感器结构如图 2 所示,F-P 干涉腔的入射光信号连接端直接固定在封装套件上,而另一端由固定在弹性金属膜片的介质基底来构建。为对传感器进行有效保护,在金属膜片前增加了外保护盖,保护盖一方面可以对金属膜片进行有效保护,另一方面也保证了外界压力能均匀作用在金属膜片上。为提高干涉信号的对比度,在干涉腔的两个反射端面采用离子溅射技术镀制多层介质膜,金属膜片粘接有介质基底,介质基底上镀制的是反射率为 98.2%~99.8% 的高反膜,单模光纤经切割抛光后镀制有反射率为 46.5%~54.5% 的多层介质膜。介质基底为圆形且直径 d_1 与裸光纤的直径 d_2 相等,它们之间相互平行且在同一轴向上,并保持一定的间隙(腔长) L ,构成光纤 F-P 干涉微腔。光信号从光源传输进导引连接光纤后,一部分光信号在第一个反射端面处被反射,另一部分光继续传播进 F-P 腔的腔体,并在第二个反射端面发生部分反射,反射回的光会有一部分再次耦合进光纤中,并产生与腔长值相关的相移,与第一个端面的反射光发生干涉。光信号在多次反射后在干涉腔内进行 F-P 干涉,干涉信号并从连接光纤输出,通过测量反射的干涉信号可实现对干涉腔变化参量的测量。

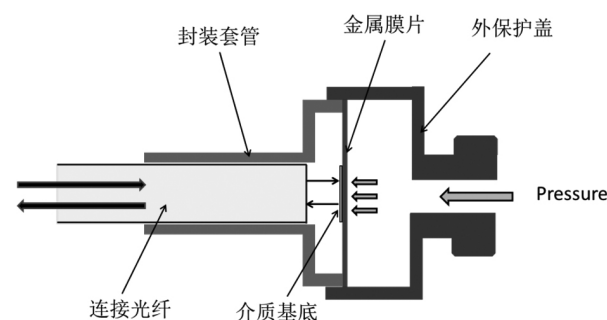


图 2 膜片式光纤传感器结构图

当外界压力载荷 P 均匀作用于金属膜片时,金属膜片会发生弯曲形变,金属膜片距中心点位置的形变可用挠度 $w(x, y)$ 来表述^[10]:

$$w(x, y) \cong \frac{1}{47} P \frac{r^2}{D} \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right)^2 \left(1 - \frac{y^2}{r^2}\right)^2 \quad (2)$$

式(2)中, D 为抗弯刚度,主要取决于膜片的材料和厚度, r 为金属膜片的直径。

当外界压力均匀作用于膜片,膜片中心处的位移最大,位移 ΔS 可表述为:

$$\Delta S = \frac{1}{47} P \frac{r^4}{D} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,对光纤 F-P 传感器,其 r 和 D 为固定值,位移 ΔS 与外界压力 P 成正比。在本设计方案中,位移 ΔS 可看成光纤传感器的腔长变化量 ΔL ,传感器的腔长变化量与膜片所受压力成正比。在一定的压力作用下,膜片的有效半径越大、膜片厚度越薄,光纤 F-P 干涉腔的腔长变化量也越大,能够获得的检测灵敏度也就越高。通过优化传感器膜片材料的半径与厚度可得出较高检测灵敏度的光纤 F-P 干涉式传感器结构的相应参数。

从图 2 可以看出,设计的光纤传感器在结构上充分利用了弹性金属膜的形变性能,具有更好的外参量感应灵敏度,可将其作为压力传感器。若外界压力参量作用在金属膜片上,将引起金属膜片的形变并改变粘贴在金属膜片上的介质基底的位置,进而引起 F-P 干涉腔腔长的变化,导致干涉条纹的相位变化。通过检测相位变化或与之相对应的光强变化,就可以获取压力参量的信息。

3 测试方案

对设计的膜片式光纤压力传感器的测试方案进行测试方案分析,选择圆形膜片作为压力感应元件来构建光纤传感。利用本方案所述的光传感器,按照图 3 所示的实验原理图搭建传感器测试分析系统。在本系统中选用中心波长为 1550 nm 超辐射发光二极管光源作为信号光源,采用光谱分析仪测量光纤传感器的反射信号。光源发出的光信号经 3 dB 耦合器耦合进入待测光纤传感器,在待测光纤传感器内干涉后形成反射光谱,再经 3 dB 耦合器进入光谱分析仪。耦合器的另一路输出端插入折射率匹配液中以消除光纤端面反射。改变作业在光纤传感器上金属膜片所受的力,金属膜片将发生机械形变。引起粘贴在金属膜片上的介质基底的位置发生变化,进而引起 F-P 干涉腔的腔长变化,根据公式(1)可知,干涉腔腔长的变化会引起干涉腔反射信号的变化。通过采用光谱分析仪测量本设计的传感器在不同压力下的反射光谱特性,再通过金属膜片的压力参量与反射光谱数据的响应关系曲线可得出光纤 F-P 腔与外界压力之间的对应关系,实现对外界压力参量的测量。

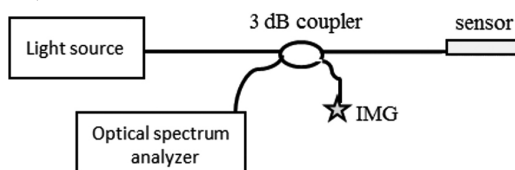


图 3 膜片式光纤 F-P 压力传感器测试原理图

4 分析计算

从公式(1)可以看出,当采用宽光谱光源作为入射光源时,传感器的反射光强 I_r 为波长 λ 和腔长 L 的双参量函数 $I_r=f(\lambda, L)$ 。当腔长 L 一定时,反射光强 I_r 与波长 λ 之间存在确定的光谱分布关系。当腔长 L 改变时,其光强与波长的光谱分布也会发生变化。

为了验证前面设计的传感模型的正确性,对公式(1)得出的反射光谱进行数值分析计算,计算出不同腔长数值下的传感器反射信号并进行对比分析,得到的比较曲线如图 4 所示。

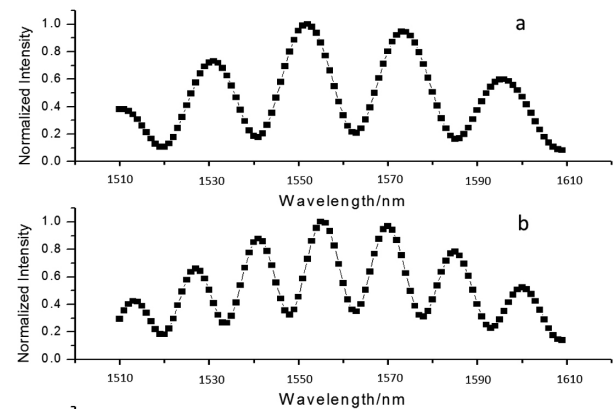


图 4 不同腔长下的反射光谱曲线对比图

图 4(a)和图 4(b)为传感器在不同腔长时输出的光谱分布的数值模拟示意图。在模拟计算中,把光源的光信号按实际光源的高斯分布进行处理。从图 4 可看出,当 F-P 腔的腔长改变时,传感器反射光谱的光谱强度发生了变化,而且各波段峰值或谷值的位置也发生了改变。在特定的腔长变化量下,光谱峰峰值变化量与传感器的腔长存在对应关系,通过测量光谱峰峰值的位移量可实现传感器腔长的测定,再结合公式(3)腔长与压力的对应关系,可进行外界压力参量的间接判定。

5 结论

本文设计了一种基于光纤 F-P 腔的膜片式光纤压力传感器及其信号测量方案。该光纤传感器由固定在封装套管上的单模光纤及粘贴有介质基底的金属膜片构成,连接光纤端面镀制有反射率 50% 左右的中反膜,介质基底上镀制有反射率 98% 以上的高反膜。基于光信号干涉理论,得到该干涉腔的反射信号与干涉腔腔长的相应关系。基于反射信号关系曲线,设计出该光纤 F-P 传感器进行压力测量的具体方案。该光纤传感器解调系统具有结构简单、灵敏度高的优点,在压力参量测量方面具有较好的应用前景。

【参考文献】

[1]赵士元,崔继文,陈勳勳.光纤形状传感技术综述[J].光学精密工程,2020(1):10-29.

(下转第 35 页)

3 市场应用前景

本产品的推广应用具有明显的社会效益。在当今快节奏的年代,人们追求的是方便快捷,健康检查亦是如此。视力问题是近几年越发严重的问题,人们对视力的随时检测也越来越重视,而该款视力检测仪可以为视力测量用户提供方便,无需过多的操作就能检测到自己的视力情况。远程 IO 视力检测仪不仅使用方便,而且应用范围广泛,例如医院、工厂、福利机构等,特别是一些人员密集、体检人流量多的场所。科技让大家的的生活更加便捷,远程 IO 视力检测仪是顺应这个时代的产物,响应人们对健康的需求,如投入市场,会得到快速推广。

4 结论

远程 IO 视力仪是结合“互联网+技术”、智能控制技术、步进驱动技术于一体,具有全自动视力测试功能,并可随意根据用户情况进行 PLC 或单片机程序下载、上传与监控、升级。视力被测人员只需扫手机 App 进入远程控制云平台便可连接远程服务器进行视标自动检测,医护工作者也可通过手机连接云平台监视测试过程,及时获知被测者的测试级别结果。

【参考文献】

- [1]吴永强,王希娟,高海燕,花建新.分布式远程 I/O 通信在大型矿用磨机上的应用[J].矿山机械,2015(1):134-137.
- [2]菲尼克斯.PLCnext 与菲尼克斯 IO 的“完美关系”[J].今日制造与升级,2020(4):28-29.
- [3]刘雄飞,陈浩,聂伟,赖思敏.基于 MT7623A 的远程室内环境监测系统设计[J].传感器与微系统,2018(8):79-81.
- [4]吴程浩.基于 MQTT 及云平台的 PLC 远程监控系统[J].工业控制计算机,2019(11):39-40,42.
- [5]霍寅龙,周复.基于鲁棒滤波的细分驱动步进电机速度估计[J].微型电脑应用,2021(1):103-106.
- [6]王德民,严云帆,方程.船舶智能 IO 设备的模数转换设计[J].机电设备,2018(1):30-33.
- [7]李喜文,韩高翔,吴永强,郭庶,孔自亮.基于远程 I/O 的立磨控制系统设计[J].矿山机械,2020(4):37-41.
- [8]刘雄飞,陈浩,聂伟,赖思敏.基于 MT7623A 的远程室内环境监测系统设计[J].传感器与微系统,2018(8):79-81.
- [9]马林联,马铭泽.基于 PLC 和组态软件的沸腾锅炉监控系统设计[J].电气传动,2021(2):58-61.
- [10]车健生.PLC 教学中组态软件编程模拟梯形图方法探析[J].数字技术与应用,2020(12):16-19.

(上接第 3 页)

- [2]赵鸿,曹正元,顾绍德.光纤传感器在土木工程中的应用研究[J].激光与光电子学进展,2000(6):21-24.
- [3]郭芳,闫光等.基于光纤光栅传感器的海水入侵温度测量系统[J].激光与红外,2019(11):1357-1362.
- [4]常莹.航天液体发动机光纤应变测量技术应用研究[J].中国计量,2019(6):70-75.
- [5]高红春,唐才杰,蓝天,王学锋.高温光纤法珀压力传感器研究进展[J].仪表技术与传感器,2020(12):26-31.
- [6]Kim D-H, Koo B-Y, Kim C-G, Hong C-S. Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic Fabry Perot interferometric sensor system [J].Smart Materials

- and Structures,2004(13): 593-598.
- [7]赵煜,朱志成等.光纤传感技术在流量检测方面的应用研究[J].光通信技术,2019(5):9-12.
- [8]姚军,朱涛等.基于大偏置熔接的全光纤法布里珀罗湿度传感器[J].中国激光,2012(6):407-411.
- [9]Bao M.Analysis and design principles of MEMS devices [M]. The Netherlands: Elsevier, 2005.
- [10]Wang F, Shao Z, et al. Extrinsic Fabry-Perot underwater acoustic sensor based on microma-chined center embossed diaphragm [J].Journal of Lightwave Technology,2014 (32): 4026-4034.

(上接第 12 页)

- [2]郑正广,赵明月,许建新.4G 网络视频业务感知保障策略分析[J].电信技术,2018(2):85-88.
- [3]刘毅,肖涛,郭宝,张阳.提升 VoLTE 用户感知的保障策略研究[J].移动通信,2017(18):6-10.
- [4]林浩凌,吴奕生,郑伟旭,刘昕.基于移动互联网应用的感知评估体系研究[J].电信科学,2014(S1):1-5.
- [5]黄昭文.VoLTE 端到端客户感知评估方法的研究[J].移动通信,2017(21):64-69.
- [6]严斌峰,董慧,侯玉华.基于终端的感知技术浅析[J].电信科学,2015(3):8-14.

- [7]杨辉宇,郑浩彬,李金生,吕汉鑫.智能终端网络性能与问题定位方法研究及应用[J].电信科学,2014(1):110-115.
- [8]李钟瑞,戴明珠.移动用户业务感知时延类 KQI 优化[J].软件导刊,2019(2):169-173.
- [9]张丹,王磊,王晓琦,席思雨.5G 网络中 NSA 控制面和用户面时延性能分析[J].电信科学,2020(9):141-147.
- [10]中国移动终端实验室.中国移动 2020 年智能硬件质量报告(第一期)[EB/OL].https://www.sohu.com/a/428199320_354883,2020-10-29.