

端面薄膜法布里-珀罗腔光纤动态压力传感器仿真与实验研究

张雄星^{1*}, 孙哲¹, 赵学庆², 高子皓¹, 冯晓军³, 潘文³, 陈海滨¹¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;²西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;³西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065

摘要 为实现冲击波动态信号的测量,研制了一种光纤端面镀金-派瑞林-金三层结构的薄膜式光纤法布里-珀罗压力传感器。对该传感器进行了理论分析与仿真,搭建了静态和动态压力测量系统,并对其进行测试与分析。结果表明:在0~60 MPa的静态压力测量范围内,传感器的波长灵敏度和腔长灵敏度分别为0.0809 nm/MPa和0.3200 nm/MPa,与仿真结果一致;在动态压力测量中,传感器成功捕捉到了压力峰值为7.41 MPa和上升时间为75 ns的冲击波信号。

关键词 光纤传感器; 法布里-珀罗腔; 薄膜; 压力测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231618

1 引言

冲击波是一种波面以突跃面形式在弹性介质中传播的压缩波,其典型特征是,在突跃面上,介质的压强、密度、温度等状态参数发生不连续的突跃变化。冲击波的形成与传播具有持续时间短、压力幅值变化大、上升时间快的特点^[1]。弹药爆炸、子弹或战斗机以超音速运动,均会产生冲击波。冲击波对弹药的毁伤效果、子弹的飞行状态、战斗机的飞行安全等有重要影响,因此被深入研究^[2]。随着对冲击波研究的深入,人们发现冲击波技术还有广泛的民用价值,已被用于石油开采、环境清洁、生物医学和材料加工等领域^[3-6],因此对冲击波信号的测量也变得日益重要。

冲击波的形成与传播均伴随超压以及压强的快速变化过程,因此,对相应压力传感器的响应速度与可靠性有较为苛刻的要求。传统的冲击波压力传感器多采用电学压阻或压电式动态压力传感器^[7]。这些传感器压力测量范围量程可达数十兆帕到百兆帕量级,其上升时间多在微秒到亚微秒水平,可以满足一般炸药爆炸或小口径枪炮冲击波压力的测试需求。不过,电学类冲击波压力传感器存在易受电磁干扰、耐受温度范围有限、上升时间不够短等问题,这限制了此类传感器的应用范围。光纤法布里-珀罗(F-P)压力传感器作为光纤传感器的一个重要分支,因其响应速度快、灵敏度

高、尺寸小、抗电磁干扰能力强等优点,受到了研究者与技术人员的广泛关注,为冲击波的动态压力测量提供了新的可能性^[8]。

光纤F-P压力传感器依赖于F-P腔的形变量实现对外界压力的测量。目前,光纤F-P压力传感器的制作工艺有微机电系统(MEMS)技术、电弧放电、化学腐蚀、化学气相沉积等^[9-11]。光纤F-P压力传感器敏感元件有金属薄膜、石英膜片、有机物薄膜等^[12-14]。Beard等^[15]将聚合物薄膜材料作为敏感元件,以金属铝作为反射薄膜材料,覆盖在单模光纤的端面处,完成低精细度的光纤F-P传感器的制作,用于工业超声、医学超声的测量。Zou等^[16]制作了二氧化硅膜片厚度为3 μm、谐振频率为4.11 MHz的光纤F-P压力传感器用于多介质中冲击波压力的测量。Cranch等^[17]采用光纤端面镀膜的方式,研究了固体介质中冲击波的传播规律,确定了冲击波信号的特性。王俊杰等^[18]制作了膜厚为2.9 μm的超微型全石英光纤压力传感器用于水下冲击波压力的测量。王昭等^[19]以厚度为35 μm、半径为8 mm的不锈钢薄膜为膜片设计薄膜式的光纤压力传感器,用于测量冲击波反射超压峰值,所测压力信号的幅值为0.994 MPa,压力信号的上升时间为2.5 μs。这里以及下文所说的压力都表示传感器端面单位面积所受到的压力,因此单位用MPa表示。

面向冲击波信号的动态压力测量,本文研制了一

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2023-12-29; 录用日期: 2024-01-10; 网络首发日期: 2024-01-20

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室开放基金(SKLLIM2007)、陕西省国际科技合作重点项目(2023-GHZD-52)

通信作者: *zhangxiongxing@xatu.edu.cn

种基于光纤端面镀膜的薄膜式光纤 F-P 压力传感器。通过磁控溅射^[20]和化学气相沉积法,将不同厚度的金膜和派瑞林有机薄膜依次镀制在单模光纤端面处,制作了微型化、快响应、高精度的薄膜型光纤 F-P 压力传感。派瑞林是一种高聚合物有机材料,机械性能优异、高频性能突出,并且杨氏模量较低,在同等压力作用下,会产生较大的形变量,腔长明显变化,灵敏度高。因此选用派瑞林作为传感器的压力敏感元件即 F-P 腔的腔体,可以实现对外界压力信号的快速响应与较高灵敏度,实现冲击波压力信号的动态测量。

2 传感器的结构与制作

所研究的薄膜式光纤 F-P 传感器的基本结构如图 1 所示,主要由两个不同厚度的金膜、一层作为 F-P

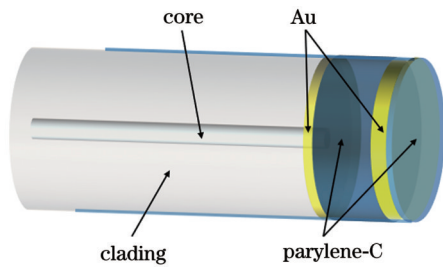


图 1 薄膜式光纤 F-P 压力传感器的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of thin-film fiber-optic F-P pressure sensor

腔体的派瑞林薄膜和用于光场耦合的单模光纤组成。当冲击波或超声波作用到传感器时,派瑞林薄膜受到压力作用,产生形变,造成 F-P 腔腔长的改变,进而影响 F-P 腔前后表面两个金膜所产生反射光之间的干涉。

在传感器的三层膜结构中,金膜通过磁控溅射的方式制备,派瑞林薄膜通过化学气相沉积的方式制备。其制作步骤为:1)对一批同规格的单模光纤进行处理,除去涂覆层 2~3 mm,用切割刀切割光纤端面,尽可能保证光纤端面垂直于光纤轴线;2)采用磁控溅射法在处理好的光纤端面上镀一层金膜,金膜厚度约为 13 nm;3)采用化学气相沉积法在金膜外镀一层数微米厚的派瑞林有机薄膜,作为传感器的 F-P 腔;4)采用磁控溅射法在派瑞林薄膜外再镀一层金膜,金膜厚度约为 50 nm;5)采用化学气相沉积法在金膜外再镀一层厚度约为 2 μm 的派瑞林薄膜作为传感器的保护膜。

采用以上制备步骤,完成了薄膜式光纤 F-P 传感器传感探头的制作,所制备的传感器如图 2 所示,其中,图 2(a)为传感探头在光学显微镜下的侧视图。单模光纤直径仅为 125 μm,传感探头所有膜层厚度总计仅不到 6 μm,可见传感探头尺寸非常小,属于探针型的压力传感器,非常适合各种狭小空间内的压力测试。最后,将制作好的薄膜式光纤 F-P 传感器传感探头与光纤跳线熔接在一起,便于插拔反复使用,最终实物如图 2(b)所示。

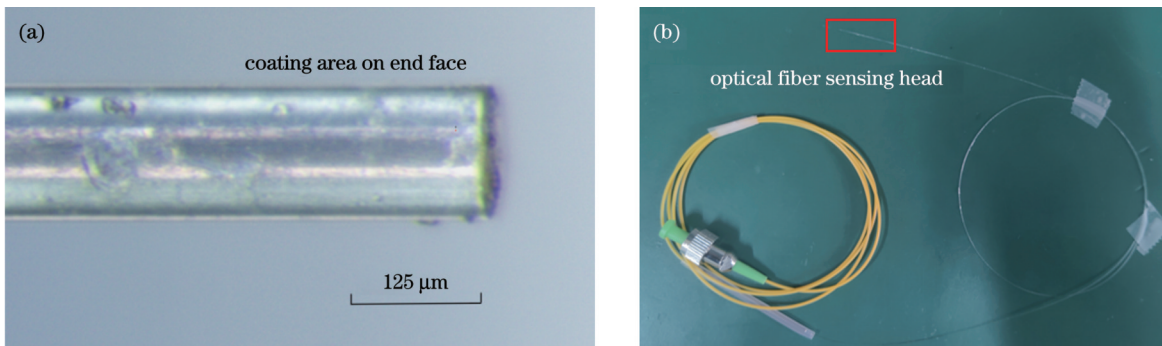


图 2 薄膜式光纤 F-P 压力传感器。(a)传感探头光学显微图(侧视);(b)薄膜式光纤 F-P 压力传感器实物图

Fig. 2 Thin-film fiber-optic F-P pressure sensor. (a) Optical micrograph of sensor head (side view); (b) physical photograph of thin-film fiber-optic F-P pressure sensor

3 传感器测量原理与仿真

3.1 测量原理

当光波由单模光纤(SMF)耦合至多层介质膜传感器时,一部分光从 SMF 端面处的金膜反射,另一部分光入射到 F-P 腔,经第二层金膜反射后再进入到 SMF 中。因此,双光束干涉中的反射光强 I_r 可以写为

$$I_r = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi} I_i, \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{4\pi n d}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: R_1 和 R_2 分别为第一层金膜和第二层金膜的端面反射率; n 为 F-P 腔的折射率; d 为 F-P 腔的长度; I_i 为入射光强。

不同的频率范围,传感器的响应灵敏度有所不同^[21]。在低频范围内,传感器的静压灵敏度为

$$S = \frac{4\pi n d (1 - \mu)}{\lambda E}, \quad (3)$$

式中: n 为折射率; E 为杨氏模量; μ 为泊松比; d 为聚合物 F-P 腔的长度; λ 为激光光源的波长。

在高频范围内,传感器的压力灵敏度可以表现为派瑞林 F-P 腔层厚度的变化。本文所提出的薄膜式光纤 F-P 压力传感器的介质层可以被视为一种线性、弹性、层状介质。因此,当压力波传递至传感器时,实际的三维模型可以等效为二维模型。图 3 为薄膜式光纤 F-P 压力传感器的二维结构示意图,从右至左介质顺序分别为空气、派瑞林保护层、金、派瑞林传感层、金和 SMF,相应的声阻抗为 $Z_1 \sim Z_6$ 。除去第一层流体层,第二层到第五层介质层的厚度为 $L_2 \sim L_5$ [19]。

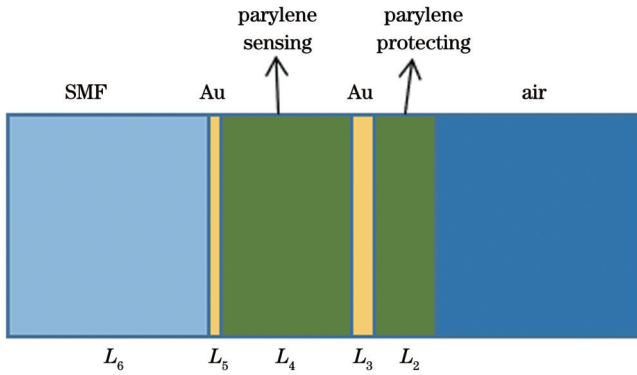


图 3 二维等效模型

Fig. 3 Two-dimensional equivalent model

根据波动方程和欧拉方程,派瑞林 F-P 腔层的压力 p 和振动速度 u 的公式可以表示为

$$\begin{cases} p_4(x) = A_4 e^{-jk_3(x-L_2-L_3)} + B_4 e^{jk_3(x-L_2-L_3)} \\ u_4(x) = \frac{1}{Z_4} [A_4 e^{-jk_3(x-L_2-L_3)} - B_4 e^{jk_3(x-L_2-L_3)}] \\ A_4 = \frac{[A_3(1 + \frac{Z_4}{Z_3})e^{-jk_3L_3} + B_3(1 - \frac{Z_4}{Z_3})e^{-jk_3L_3}]}{2}, (4) \\ B_4 = \frac{[A_3(1 - \frac{Z_4}{Z_3})e^{-jk_3L_3} + B_3(1 + \frac{Z_4}{Z_3})e^{-jk_3L_3}]}{2} \\ k = \frac{2\pi f}{c} \end{cases}$$

式中: A 和 B 为每层介质中正向波和后向波振幅; k 表示相关介质传输过程中声波的波数; c 表示相关介质下的声波传递速度。

由式(4)可以求得 F-P 腔介质层应力波的大小。声应力波可以改变派瑞林薄膜的厚度,完成薄膜厚度改变量的求解:

$$dl = \int_0^{L_4} \frac{p_4(x, t)}{E} dx, \quad (5)$$

式中: p_4 为 F-P 腔介质层的应力波; E 为 F-P 腔介质层的杨氏模量。

3.2 传感器仿真

利用有限元仿真软件 COMSOL 的波动光学模块和结构力学模块对薄膜式光纤 F-P 压力传感器进行仿真分析。仿真分析的基本步骤为:1)构建传感器模型,定义模型材料参数;2)调整物理场参数,添加物理场条件;3)网格划分;4)仿真计算。仿真流程如图 4 所示。

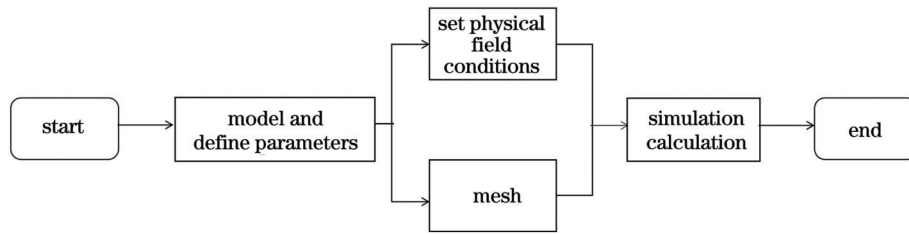


图 4 仿真流程

Fig. 4 Simulation process

利用波动光学模块对光纤 F-P 压力传感器的电磁场能量分布进行仿真,分析不同频率下传感器纤芯中的能量场分布以及传感器的反射率。为减少模型的计算量,选取 SMF 的纤芯直径为模型直径进行结构绘制。对所构建的传感器结构模型进行仿真,输入光谱范围设置为 1400~1700 nm,从仿真结果中分别选取了 1600、1543、1535.6 nm 的电磁能量分布图,如图 5 所示。可以看出,光在两层金膜之间的派瑞林层中产生了干涉现象,并且不同波长下干涉现象呈现出不同对比度的周期性驻波场。

利用软件的后处理功能采集传感器的反射率,

并利用 Origin 软件进行绘图,其结果如图 6 所示。从反射光谱的仿真结果可以看出,传感器中光的干涉现象存在周期性变化,这与电磁能量分布的仿真结果分析保持一致,这一结果表明,本文所设计的结构符合 F-P 腔特征,可以作为 F-P 传感器来进行后续的实验。

利用结构力学模块分析薄膜式光纤 F-P 压力传感器受到静态压力后的薄膜形变量,计算传感器的 F-P 腔形变量。对建模的传感器结构模型施加边界载荷,并根据实际情况在模型的底面施加固定约束,保证计算时的稳定。传感器结构受压后的形变图如图 7(a)

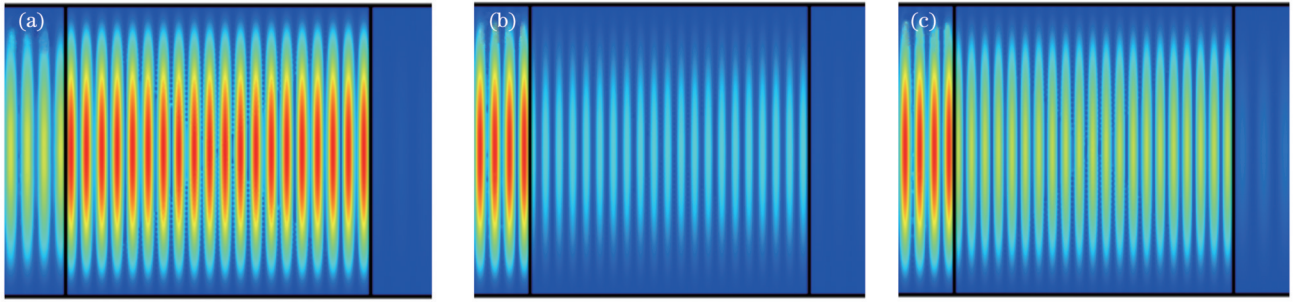


图 5 不同波长下传感器的电磁能量分布图。(a)波长为 1600 nm;(b)波长为 1543 nm;(c)波长为 1535.6 nm

Fig. 5 Electromagnetic energy distributions of sensor at different wavelengths. (a) At wavelength of 1600 nm; (b) at wavelength of 1543 nm; (c) at wavelength of 1535.6 nm

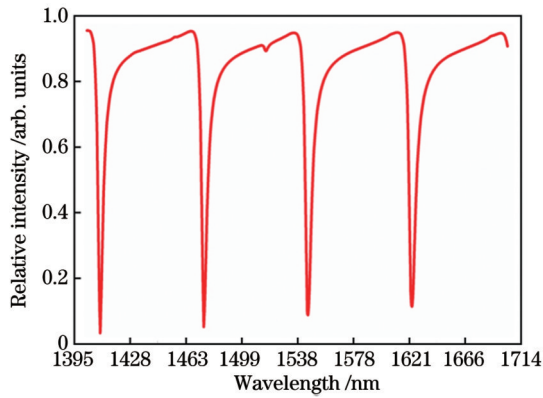


图 6 传感器的反射光谱

Fig. 6 Reflection spectrum of sensor

所示,从该仿真结果中可以得知传感器腔长受压后的形变量。图 7(b)所示为传感器结构受压后的三维观察图,从该仿真结果中可以得知传感器端面受压后的应力分布情况。为突出传感器受压后的形变程度,仿真软件在模型的形变处进行了放大。

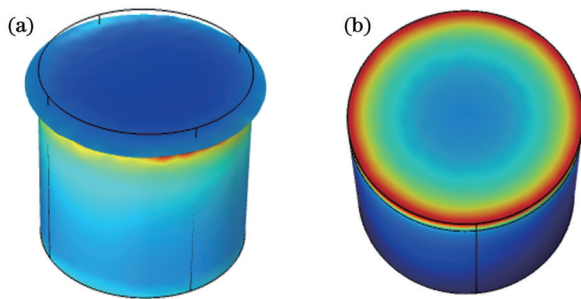


图 7 薄膜式光纤 F-P 压力传感器结构模型受压仿真图。(a)传感器结构受压形变图;(b)传感器受压三维观察图

Fig. 7 Simulation diagram of thin-film fiber-optic F-P pressure sensor structure model under pressure. (a) Pressure deformation diagram of sensor structure; (b) three-dimensional observation diagram of sensor under pressure

改变边界压力载荷和薄膜厚度,边界压力载荷从 0 MPa 至 60 MPa,每次增加 5 MPa;薄膜厚度从 5 μm 到 15 μm ,每次增加 1 μm ,对传感器模型进行仿真分

析。对薄膜上下表面中心点处的形变量进行差值分析,计算传感器 F-P 腔受到压力后的形变量。仿真结果如图 8 所示,可以看出,随着薄膜厚度的增加,传感器中的 F-P 腔受压后的形变量逐渐增大;随着压力边界载荷的增大,传感器 F-P 腔腔长变化量呈线性增大。

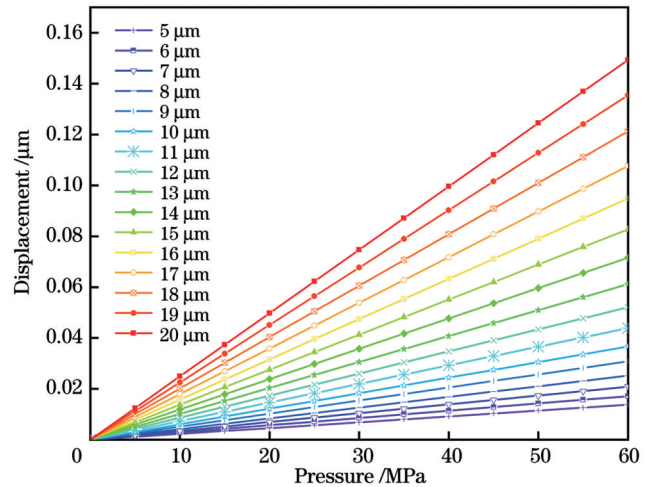


图 8 不同压力载荷作用下传感器 F-P 腔腔长的变化量

Fig. 8 F-P cavity length variations of sensors under different pressure loads

如图 8 所示,在 60 MPa 压力边界载荷作用下,不管薄膜厚度是 5 μm 还是 15 μm ,在以 SMF 为基底、薄膜为 F-P 腔的结构中,F-P 腔的最大形变量要小于薄膜厚度的 1/5。因此,薄膜厚度从 5 μm 变化至 15 μm 的薄膜,在静态压力为 60 MPa 的压力测量范围内均处于线性变化范围内。

传感器所能捕捉到的信号频率与传感器的谐振频率紧密相关,利用仿真软件对传感器模型进行谐振频率研究,仿真得到不同薄膜厚度的谐振频率,其结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,当传感器的薄膜厚度在 5 μm 时,该模型的一阶谐振频率最大,达到 41.26 MHz,随着薄膜厚度的增加,传感器模型的谐振频率在逐渐降低。当传感器的薄膜厚度为 15 μm 时,传感器的谐振

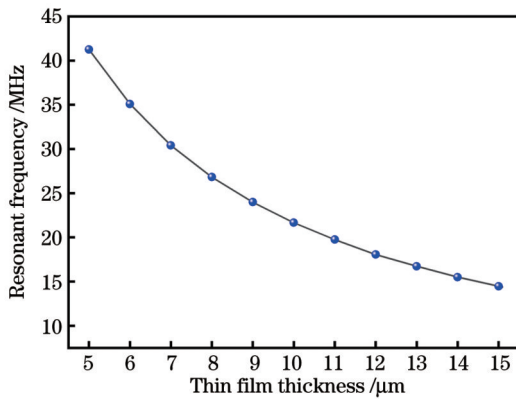


图9 传感器的谐振频率

Fig. 9 Resonance frequency of sensor

频率为 14.47 MHz。为了满足测量冲击波动态信号的需求,考虑 0~60 MPa 压力下不同薄膜厚度下的 F-P 腔形变量和谐振频率,传感器 F-P 腔腔长范围设置在 5~7 μm 最为合适。

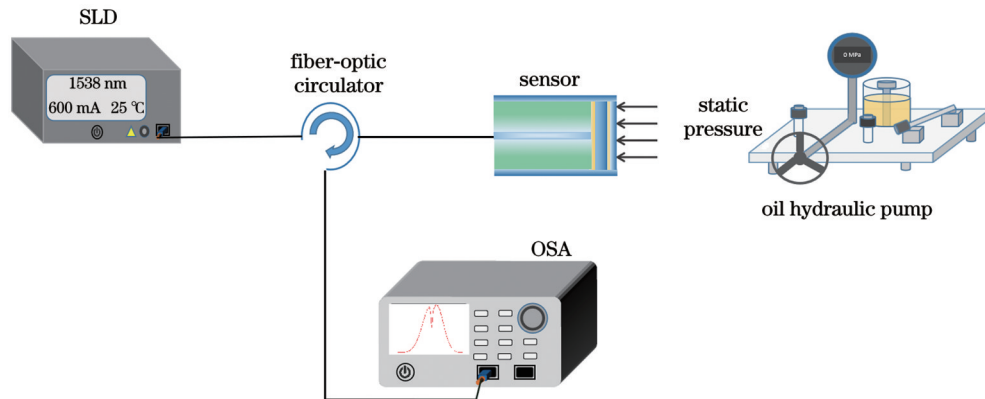


图 10 压力测试实验系统

Fig. 10 Experimental system for pressure testing

在 1400~1700 nm 波长范围内,测量未加压的薄膜式光纤 F-P 压力传感器的反射光谱,如图 11 所示。

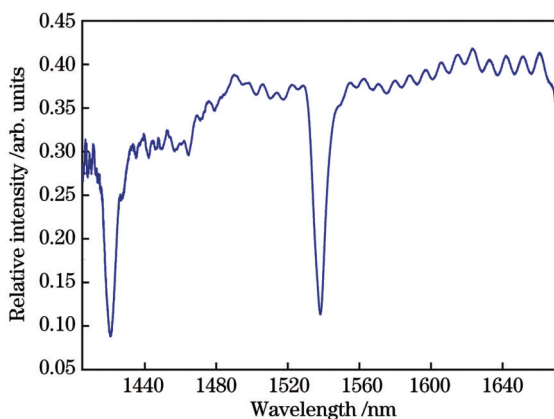


图 11 未加载压力条件下薄膜式光纤 F-P 压力传感器的反射光谱

Fig. 11 Reflection spectrum of thin-film fiber-optic F-P pressure sensor without pressure loading

4 实验与分析

4.1 静压压力测量实验

首先,设计并搭建了如图 10 所示的静态压力实验测量系统,对传感器的静态压力性能进行实验测试。系统由超辐射发光二极管(SLD)、光谱分析仪(OSA, AQ6370D, Yokogawa, 日本, 光谱测量范围为 600~1700 nm, 最高分辨率为 0.02 nm, 宽动态范围为 70 dB)、台式油压泵和薄膜式光纤 F-P 压力传感器组成。SLD 光源的中心波长为 1568 nm, 3 dB 带宽为 90 nm。实验中需要对薄膜式光纤 F-P 压力传感器进行封装,并将传感器固定在台式油压泵中,利用油压泵的手柄和手轮进行加压。在 0~60 MPa 的压力范围内,以 5 MPa 压力为步进对传感器进行加压,每次加压后,待压力稳定时使用 OSA 在波长为 1400~1700 nm 范围内进行扫描,记录反射光谱数据。

因为传感器结构中的金膜是通过磁控溅射工艺进行镀制的,该工艺无法精确地控制镀制金膜的沉积速率,可能会导致镀制出的金膜表面出现较大的晶粒,粗糙不平的薄膜表面影响了光的折射与透射,进而影响干涉光谱致使实际光谱与仿真光谱存在一定差距。考虑加工工艺对 F-P 腔干涉的影响,将传感器光谱与第 2 节利用有限元仿真软件得到的反射光谱进行比较。结果发现,传感器的反射光谱与仿真得到的光谱具有一致性。

在 0~60 MPa 的压力范围内,利用台式油压泵对薄膜式光纤 F-P 压力传感器进行静态压力测量实验,获得传感器的反射光谱信号。对传感器的反射光谱信号进行处理,计算不同压力传感器 F-P 腔的腔长值。

不同压力下传感器的波长和对应光强的反射光谱曲线如图 12 所示。可以看出,随着压力的增大,传感器的反射光谱整体向左漂移。

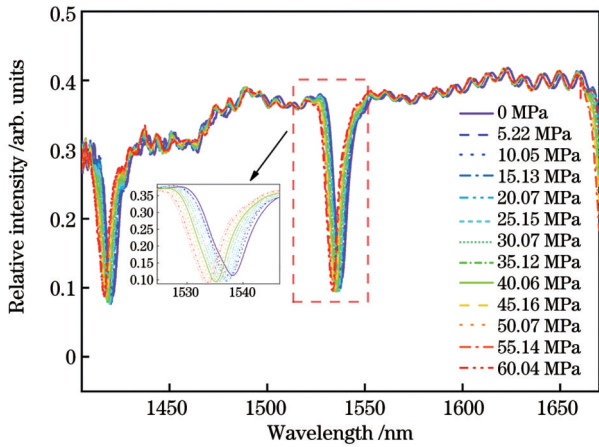


图 12 不同压力条件下薄膜式光纤 F-P 压力传感器的反射光谱
Fig. 12 Reflection spectra of thin-film fiber-optic F-P pressure sensor under different pressures

根据实验中采集到的反射光谱信号,构造一个与反射光谱相似的模板函数,对模板函数与反射光谱信号进行互相关运算计算出传感器对应压力下的腔长的信息,如下式所示:

$$R_{YC}(L, l) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Y(\lambda) C(\lambda) d\lambda = B \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \cos\left(\frac{4\pi n L \lambda}{c}\right) \cos\left(\frac{4\pi n l \lambda}{c}\right) d\lambda, \quad (6)$$

式中: l 是模板函数的腔长,并且 l 覆盖了 F-P 腔传感器腔长 L 的变化范围; $Y(\lambda)$ 为反射光谱信号的余弦形式; $C(\lambda)$ 为模板函数; λ_1 和 λ_2 为涵盖整个光源光谱范围的波长上下限; $R_{YC}(L, l)$ 为互相关系数,当互相关系数取得最大值,即 $L = l$ 时, L 即为 F-P 腔的腔长。

图 13 中绘制出了不同压力下的波谷值散点图和腔长值散点图,并进行了线性拟合。

如图 13 格点所示,当压力值从 0 MPa 增加至

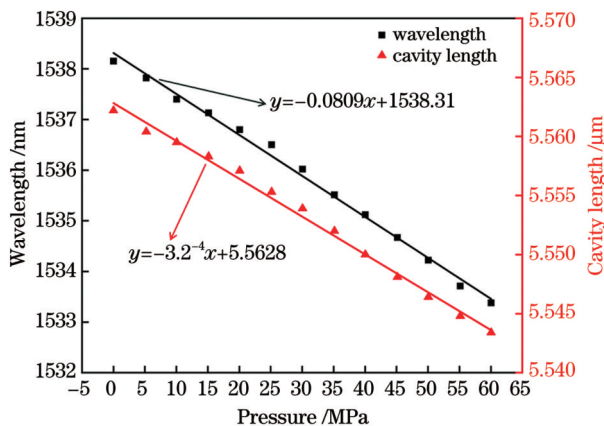


图 13 薄膜式光纤 F-P 压力传感器的压力与波长的关系
Fig. 13 Relationship between pressure and wavelength of thin film fiber-optic F-P pressure sensor

60.04 MPa 时,传感器反射光谱的波谷位置向左漂移了 4.77 nm。经过线性拟合后,可以得出波谷位置与压力之间的线性表达式,其斜率表征传感器的灵敏度。通过计算,可以得出传感器的压力灵敏度为 0.0809 nm/MPa,线性度为 0.994。

如图 13 三角点所示,当压力值从 0 MPa 增加至 60.04 MPa 时,传感器的腔长减小了 18.8 nm。经过线性拟合后,可以得出腔长值与压力之间的线性表达式,其斜率表征传感器的灵敏度。经计算,可以得出传感器的腔长灵敏度为 0.3200 nm/MPa,线性度为 0.993。

静态压力测量实验说明传感器可以承受 60 MPa 的压力。对传感器的加压实验过程中,当压力从 0 MPa 增加至 60.04 MPa 时,传感器的腔长减小 18.8 nm,反射光谱漂移了 4.77 nm。即压力每增加 1 MPa,腔长减小 0.3200 nm,波长变化 0.0809 nm。

在第 2 节结构力学的有限元仿真中,当压力从 0 MPa 增加至 60.04 MPa 时,传感器的 F-P 腔腔长值减小了 15.9 nm。即压力每增加 1 MPa,传感器的腔长减小 0.2650 nm。仿真结果与实验结果进行比较,在每兆帕压力下,腔长减小量两者相差 0.0550 nm。考虑外层派瑞林保护层,以及制作工艺的不确定性,派瑞林整体保护层的厚度要大于腔长值。那么,该传感器在 60 MPa 压力作用下,腔长减小范围应在 15.9~21.3 nm。计算得到的 18.8 nm 处于仿真范围内,因此实验结果与仿真结果保持一致。

4.2 动态压力测量实验

在动态压力测量实验中,利用激光诱导等离子体技术将灯泵 YAG 激光器出射的短脉冲高峰值激光通过透镜聚焦在合金靶材上。激光使靶材产生电离并产生微小的爆炸生成冲击波信号。实验采用强度法对传感器采集信号进行解调,实验装置原理图如图 14 所示,可调谐激光器(波长可调谐范围为 1529~1567 nm,最大输出功率可达 40 mW,调谐分辨率为 1 pm,功率稳定性小于 ± 0.03 dB/hr)发出中心波长为 λ 的光经 2×1 光纤耦合分束器分成两束光功率相等的光,其中一束光通过环行器与传感器相连接。将传感器置于激光器的焦点处,感受到冲击波压力后的光信号通过环行器的 3 端口返回到光电探测器(波长响应范围为 800~1700 nm,上升时间为 70 ps),完成光电信号的转换,最后电信号到达示波器完成数据的采集和保存,其结果如图 15 所示。

传感器在 0.622 μ s 时候被触发,并在示波器上产生一个脉冲信号。在时间为 0.639 μ s 时,信号幅值为最大幅值的 10%,在时间为 0.714 μ s 时,信号幅值为最大幅值的 90%。信号变化过程中,电压值变化了 0.32 V。根据强度法,通过示波器采集的两路电压值相除可以得到传感器的反射率,进而可通过式(1)和式(2)计算出腔长值,而根据静态压力实验可知,传感器不同腔长值对应着不同的压力值,所以电压值与压

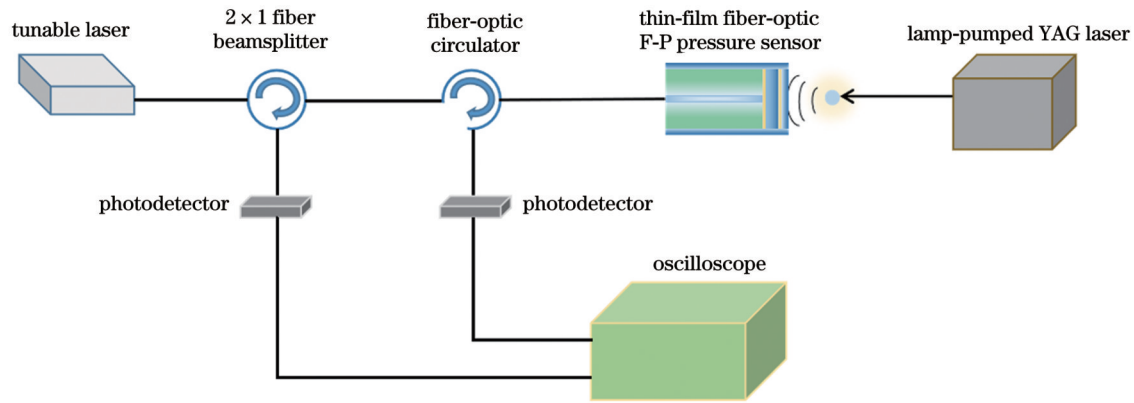


图 14 动态压力测量实验装置原理图

Fig. 14 Schematic diagram of dynamic pressure measuring experimental setup

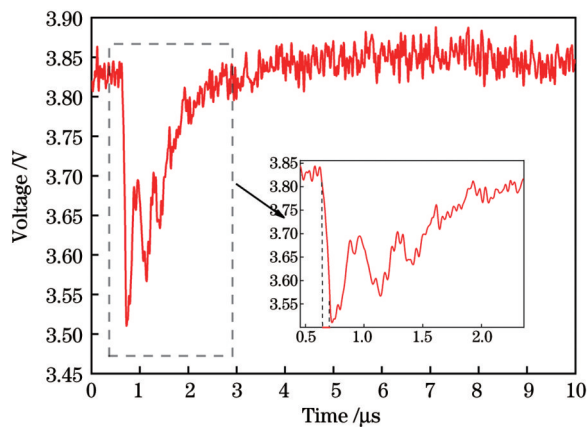


图 15 冲击波压力信号

Fig. 15 Shock wave pressure signal

力值之间存在着线性关系,根据该线性关系解算出冲击波压力峰值为 7.41 MPa,冲击波信号的上升时间为 75 ns。动态实验测试中捕捉到的动态信号与冲击波信号的特性相吻合。动态测试实验说明,传感器能够对激光器产生的冲击波信号进行响应,且响应时间较快,结合本文使用的解调方法,传感器冲击波动态信号测量精度为 0.01 MPa。

5 结 论

针对冲击波信号的测量,本文提出了一种薄膜式光纤 F-P 压力传感器,该传感器的有效结构由金膜-聚合物薄膜-金膜三层膜结构组成,利用传感器反射光谱波谷位置的变化,引起光谱强度的变化实现对信号压力的测量。在 0~60 MPa 压力测量范围内,传感器的波长灵敏度为 0.0809 nm/MPa,腔长灵敏度为 0.3200 nm/MPa。在动态压力测量范围内,传感器可以实现对压力上升时间为 75 ns、压力上升幅值为 7.41 MPa 的动态信号的测量。

参 考 文 献

[1] 周会娟,任辉启,余尚江,等. 空气冲击波动态测试技术研究

综述[J]. 防护工程, 2019, 41(3): 61-69.

Zhou H J, Ren H Q, Yu S J, et al. Review on measurement technology of dynamic pressure of air shock wave[J]. Protective Engineering, 2019, 41(3): 61-69.

[2] 李丽萍,孔德仁,苏建军. 毁伤工况条件下冲击波压力电测法综述[J]. 爆破, 2015, 32(2): 39-46.

Li L P, Kong D R, Su J J. Review on electrometric test method of shockwave pressure on damage condition[J]. Blasting, 2015, 32(2): 39-46.

[3] Shaimova V A, Shaimov T B, Shaimov R B, et al. Evaluation of YAG-laser vitreolysis effectiveness based on quantitative characterization of vitreous floaters[J]. Vestnik Oftalmologii, 2018, 134(1): 56-62.

[4] 李和,魏飞,刘志,等. 油井井口激动压力脉冲解堵增油技术[J]. 化工机械, 2021, 48(4): 523-526, 603.

Li H, Wei F, Liu Z, et al. Plug removal and oil increase technology through exciting pressure pulse at wellhead[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2021, 48(4): 523-526, 603.

[5] 倪鹏,刘会霞,董振,等. 激光冲击波动态压实铜粉实验研究[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202012.

Ni P, Liu H X, Dong Z, et al. Experimental study on dynamic compaction of copper powder by laser shock wave[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202012.

[6] Zhong D, Li Z M. Material measurement method based on femtosecond laser plasma shock wave[J]. Photonic Sensors, 2017, 7(1): 1-10.

[7] 刘东来,王伟魁,李文博,等. 冲击波超压传感器研究现状[J]. 遥测遥控, 2019, 40(5): 7-15.

Liu D L, Wang W K, Li W B, et al. Research status of shock wave overpressure sensor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(5): 7-15.

[8] 陈伟民,雷小华,张伟,等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328010.

Chen W M, Lei X H, Zhang W, et al. Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328010.

[9] Chen X P, Shen F B, Wang Z, et al. Micro-air-gap based intrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensor[J]. Applied Optics, 2006, 45(30): 7760-7766.

[10] Lu L D, Zhu L Q, Zhuang W, et al. Random rotational entire-angle sensor using two chemical etching intrinsic Fabry-Pérot interferometers[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(15): 6196-6202.

[11] Zhang Y N, Yuan L, Lan X W, et al. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4609-4612.

[12] 于清旭,贾春艳. 膜片式微型 F-P 腔光纤压力传感器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2887-2892.

- Yu Q X, Jia C Y. Diaphragm based miniature fiber optic pressure sensor with F-P cavity[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(12): 2887-2892.
- [13] Ma J, Xuan H F, Ho H L, et al. Fiber-optic Fabry-Pérot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 932-935.
- [14] 许佳伟. 光纤-金膜短腔 F-P 水声传感单元研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- Xu J W. Research of fiber-gold film short-cavity Fabry-Perot underwater acoustic sensor unit[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [15] Beard P C, Hurrell A M, Mills T N. Characterization of a polymer film optical fiber hydrophone for use in the range 1 to 20 MHz: a comparison with PVDF needle and membrane hydrophones[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(1): 256-264.
- [16] Zou X T, Wu N, Tian Y, et al. Ultrafast Fabry-Perot fiber-optic pressure sensors for multimedia blast event measurements [J]. Applied Optics, 2013, 52(6): 1248-1254.
- [17] Cranch G A, Grün J, Weaver J, et al. High power laser and explosive driven shock wave characterization in solids using fiber optic probes[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9634: 96341T.
- [18] 王俊杰, 刘劲, 傅正义, 等. 超微型全石英光纤 Fizeau 腔水下激波压力传感器[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0212010.
- Wang J J, Liu J, Fu Z Y, et al. Miniature underwater shock wave pressure sensor based on all-silica optical fiber Fizeau cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0212010.
- [19] 王昭, 吴祖堂, 温广瑞, 等. 一种薄膜式的光纤压力传感技术[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 77-84.
- Wang Z, Wu Z T, Wen G R, et al. A fiber optic pressure sensing technology based on thin diaphragm structure[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 77-84.
- [20] 董丽丽, 吴家森, 夏祥宇, 等. 基于磁控溅射技术的钴掺杂氧化铜薄膜的 LIBS 多维度分析研究[J/OL]. 中国激光: 1-15 [2023-11-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20231120.1102.056.html>.
- Dong L L, Wu J S, Xia X Y, et al. Multi-dimensional analysis of cobalt-doped copper oxide thin film based on magnetron sputtering with LIBS[J/OL]. Chinese Journal of Lasers: 1-15 [2023-11-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20231120.1102.056.html>.
- [21] Wang J J, Wang M, Xu J, et al. Underwater blast wave pressure sensor based on polymer film fiber Fabry-Perot cavity [J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6494-6502.

Simulation and Experimental Research on Fiber-Optic Dynamic Pressure Sensor Based on a Fiber-Tip Film-Type Fabry-Perot Cavity

Zhang Xiongxing^{1*}, Sun Zhe¹, Zhao Xueqing², Gao Zihao¹, Feng Xiaojun³, Pan Wen³,
Chen Haibin¹

¹School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

²Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China;

³Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China

Abstract

Objective Shock wave is a kind of compression wave in which the wavefront propagates in the form of a synoptic surface in an elastic medium. Its typical feature is the discontinuous abrupt changes of state parameters of the medium on the abrupt surface, such as pressure, density, and temperature. As the study of shock waves progresses, it has been found that shock wave technology has great civilian value, so the measurement of shock wave signals has become increasingly important. The formation and propagation of shock waves are accompanied by overpressure and rapid changes in pressure. The response speed and reliability of the corresponding pressure sensors have more demanding requirements. Traditional electrical shock wave pressure sensors are susceptible to electromagnetic interference, temperature range tolerance, rise time, and other issues, which limit the application of such sensors. Fiber-optic Fabry-Perot (F-P) pressure sensors, as an important branch of fiber-optic sensors, provide new possibilities for dynamic pressure measurement of shock waves due to their advantages of fast response speed, high sensitivity, small size, and high resistance to electromagnetic interference. To achieve the dynamic pressure measurement of shock waves, a thin-film fiber-optic F-P pressure sensor with a fiber-tip coating is studied.

Methods The basic structure of the thin-film fiber-optic F-P sensor studied in this paper mainly consists of two gold films with different thicknesses, a layer of parylene film serving as the F-P cavity, and a single-mode optical fiber for optical field coupling. When the shock wave pressure was applied to the end surface of the sensor, the parylene film was subjected to pressure, and deformation was produced, causing a change in the F-P cavity length. This change in length then affected the interference of reflected light produced by the two gold films on the front and back surfaces of the F-P cavity. Before the sensor was fabricated, the optical and mechanical aspects of the sensor were simulated using finite element simulation software, and the performance of the sensor under different parameters was calculated by combining theoretical formulas.

In addition, the parameters of the sensor were determined. After the sensor was fabricated, the static and dynamic pressure measurement system was designed and constructed, and the experimental results were analyzed.

Results and Discussions In the pressure range of 0–60 MPa, a static pressure measurement experiment is conducted on a thin-film fiber-optic F-P pressure sensor using a bench-top oil pressure pump. The reflected spectrum signal of the sensor is obtained and processed to calculate the cavity length of the F-P cavities of different pressure sensors. From the reflectance spectrum curves (Fig. 12) of the wavelength and corresponding light intensity under different pressures, it can be seen that with increasing pressure, the overall reflectance spectrum of the sensor drifts to the left. Based on the wave valley values at different pressures, the length information of the sensor cavity corresponding to the pressure is calculated (Fig. 13), yielding wavelength sensitivity and cavity length sensitivity of the sensor of 0.0809 nm/MPa and 0.3200 nm/MPa, respectively, which are consistent with the simulation results. In the dynamic pressure measurement experiments, the sensor successfully captures the shock wave signal with a peak pressure of 7.47 MPa and a rise time of 75 ns (Fig. 15).

Conclusions For measuring shock wave signals, we propose a thin-film fiber-optic F-P pressure sensor. The effective structure of the sensor is a three-layer structure consisting of gold film, polymer film, and gold film. By utilizing the change of the peak position of the sensor's reflected spectral wave, the sensor causes a change of spectral intensity, so as to realize the measurement of the signal pressure. In the pressure measurement range of 0–60 MPa, the wavelength sensitivity is 0.0809 nm/MPa, and the cavity length sensitivity is 0.3200 nm/MPa. Within the range of dynamic pressure measurement, the sensor can measure the dynamic signals with a pressure rise time of 75 ns and a pressure rise amplitude of 7.41 MPa. The experimental results show that the sensor has a large range of pressure measurement ability and high sensitivity, and it has a small size, light weight, and anti-electromagnetic interference. Therefore, the sensor has greater application prospects in the field of shock wave pressure measurement.

Key words fiber-optic sensor; Fabry-Perot cavity; thin film; pressure measurement