

用于高压测量的MEMS硅-玻光纤FP压力传感器

付雨薇 王睿楠 唐文婷 杜喜昭 王伟 陈海滨

MEMS silicon-glass fiber-optic FP pressure sensor for high-pressure measurements

FU Yu-wei, WANG Rui-nan, TANG Wen-ting, DU Xi-zhao, WANG Wei, CHEN Hai-bin

引用本文:

付雨薇, 王睿楠, 唐文婷, 杜喜昭, 王伟, 陈海滨. 用于高压测量的MEMS硅-玻光纤FP压力传感器[J]. *中国光学*, 2024, 17(4): 771-779. doi: 10.37188/CO.2023-0224

FU Yu-wei, WANG Rui-nan, TANG Wen-ting, DU Xi-zhao, WANG Wei, CHEN Hai-bin. MEMS silicon-glass fiber-optic FP pressure sensor for high-pressure measurements[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 771-779. doi: 10.37188/CO.2023-0224

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0224>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

油气井下光纤光栅温度压力传感器

Fiber bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1224 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0008>

光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展

Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 609 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0219>

光纤法珀传感器光楔式解调系统设计

Design of optical wedge demodulation system for fiber Fabry-Perot sensor

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1259 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0204>

惯性传感器地面弱力测量系统热设计

Thermal design of ground weak force measurement system for inertial sensors

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1404 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0022>

基于表面等离子体共振的光子准晶体光纤甲烷氢气传感器

A novel methane and hydrogen sensor with surface plasmon resonance-based photonic quasi-crystal fiber

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 174 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0006>

高精度硅基集成光学温度传感器研究

High-precision silicon-based integrated optical temperature sensor

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1355 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0054>

文章编号 2097-1842(2024)04-0771-09

用于高压测量的 MEMS 硅-玻光纤 FP 压力传感器

付雨薇¹, 王睿楠¹, 唐文婷¹, 杜喜昭², 王伟¹, 陈海滨^{1*}

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 西安外事学院 工学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 研究了一种基于微机电系统 (MEMS) 技术用于高压测量的硅-玻光纤法布里-珀罗 (FP) 压力传感器。该传感器以硅材料作为敏感元件, 将电感耦合等离子体 (ICP) 干法刻蚀后的单晶硅膜片和高硼硅玻璃阳极键合构成 FP 腔。传感头使用 MEMS 技术批量制造, 结构稳定、抗过载能力强、在高压环境下不容易失效。实验结果表明, 该传感器能够实现 30 MPa 的高压压力测量, 灵敏度为 46.94 nm/MPa, 线性拟合度为 0.99897, 测量结果具有较好的一致性和可靠性, 所设计的压力传感器在高压检测方面有很强的应用前景。

关键词: MEMS; 光纤传感器; 压力测量; FP 干涉

中图分类号: TP212 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0224

MEMS silicon-glass fiber-optic FP pressure sensor for high-pressure measurements

FU Yu-wei¹, WANG Rui-nan¹, TANG Wen-ting¹, DU Xi-zhao², WANG Wei¹, CHEN Hai-bin^{1*}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. College of Engineering, Xi'an International University, Xi'an 710077, China)

* Corresponding author, E-mail: chenhaibin@xatu.edu.cn

Abstract: We investigate a silicon-glass fiber-optic Fabry-Perot (FP) pressure sensor based on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) technology for high-pressure measurements. Silicon material was used as the sensitive element, and the Inductively Coupled Plasma (ICP) dry-etched monocrystalline silicon diaphragm was anode bonded with a high borosilicate glass to form the FP cavity. The sensor head was manufactured in batches utilizing MEMS technology, which is structurally stable, strongly resistant to overload, and not prone to fail in high-pressure environments. The experimental results show that the sensor can achieve high-pressure measurements up to 30 MPa with a sensitivity of 46.94 nm/MPa and a linearity of 0.99897, with high consistency and reliable measurement results. The designed pressure sensor has strong application prospects in high-pressure sensing.

Key words: MEMS; fiber-optic sensor; pressure measurement; FP interferometer

收稿日期: 2023-12-18; 修订日期: 2024-01-18

基金项目: 陕西省重点研发计划 (No. 2023-GHZD-52); 陕西省教育厅重点研究计划 (No. 22JY026)

Supported by Key Research and Development Project of Shaanxi Province (No. 2023-GHZD-52); Key Research Programs of Shaanxi Provincial Education Department (No. 22JY026)

1 引言

压力是在实际应用中需要重点监测的物理量。高压油井、天然气勘探、航空工业以及深海探测^[1-2]中,压力测量较多使用高压压力传感器。根据工作原理的不同,压力传感器可分为电学式压力传感器和光纤压力传感器。电学式压力传感器又包括压阻式、压电式和电容式三种。光纤传感技术是伴随光通信迅速发展形成的新技术,它通过光谱的变化来反映外界参数的变化。以光纤传感技术为核心的光纤压力传感器与传统电学式压力传感器相比,具有抗电磁干扰能力强、耐恶劣环境、精度高、体积小、易复用等优点^[3-5]。

光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot, FP) 传感器是光纤传感器的一个重要分支,广泛应用于恶劣环境下的压力测量。2008 年,王琦等人^[6]研制了一种带气隙的用于井下测量的光纤压力传感器,压力测量范围为 0~30 MPa,压力灵敏度为 33.33 nm/MPa。2011 年,马军等人^[7]提出了用于高压测量的全石英小型光纤尖端微腔传感器,在光纤端面制作微泡式法珀腔,可测压力高达 40 MPa。同年,吴闯等人^[8]设计了基于光子晶体光纤 FP 高压传感器,也实现了对 40 MPa 压力的测量。2012 年,刘正勇等人^[9]设计了基于双芯晶体光纤与单模光纤耦合制成的 FP 压力传感器,经实验验证该传感器可测量不超过 45 MPa 的压力。光纤 FP 压力传感器已被证明可用于各种环境下的压力测量,但目前的 FP 传感器存在制造复杂和一致性差的缺点,从而限制了其潜在应用,难以进行大规模批量化生产制作。

基于微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 的技术已逐渐成为研究热点。该技术成熟并可批量生产,将 MEMS 技术用于制作光纤传感器,可以避免上述传感器的缺点^[10]。通过此技术制成的 MEMS 光纤 FP 压力传感器具有体积小、成本低、可靠性高、适于批量化生产的优点,并且具有较高的稳定性,极大地提高了传感器的工业应用价值,为其商业生产和大规模应用创造了条件,具有丰富的应用潜力^[11-12]。2015 年,尹进德等人^[13]提出了一种同时用于压力和温度测量的传感器,测量范围为 0.01~0.25 MPa。2018 年,葛益娴等人^[14]研究了一种膜片式光纤压力传感

器,在 0~0.1 MPa 的测压范围内,传感器的灵敏度高达 74.6 nm/MPa。2019 年,北京理工大学的张韬杰等人^[15]提出并通过实验研究了一种 MEMS 光纤 FP 压力传感器,压力测量范围为 0~10 MPa,虽然测量压力低但传感器精细度高。2022 年,梁晓波等人^[16]采用全 SiC 结构设计了一种光纤法珀式碳化硅压力传感器,实现了 6 MPa 的压力测量。上述所有的光学 MEMS 压力传感器都集中在中低压检测中的传感器特性研究,缺少用于高压的检测应用。

本文设计了一种基于 MEMS 技术的硅-玻光纤 FP 高压压力传感器。在此基础上,搭建光纤 FP 压力测试系统,可在 0~30 MPa 的高压压力范围内,对传感器的性能进行了测试和分析。

2 工作原理

图 1 为硅-玻光纤 FP 压力传感器的结构示意图。其由传感头、毛细玻璃管和单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 组成。其中,传感头采用 MEMS 技术和阳极键合技术批量制造,由带有凹槽的单晶硅膜片和 BF33 型高硼硅玻璃基座两部分组成。单模光纤插入玻璃管辅助准直后,再插入玻璃基座的通孔中,使其与压力传感器的硅敏感膜片对齐,此时在膜片内表面和光纤端面之间就形成一个低精细度的 FP 腔,从而构成一个完整的传感器。当敏感膜片感知外界压力时,会引起 FP 腔的腔长变化,进而导致其干涉光谱发生变化。通过光谱信息解调腔长,即可实现对压力的测量。

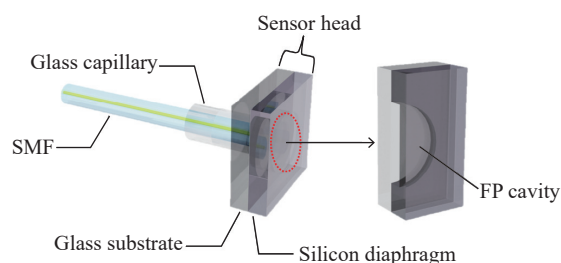


图 1 光纤 FP 压力传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber-optic FP pressure sensor

当入射光通过光纤传入传感器时,硅膜片的内表面作为法珀腔的一个反射面,玻璃管中内插光纤的端面作为另一个反射面,光线在 FP 腔的两个界面之间会发生多光束干涉。又由于硅膜片

内表面和光纤端面的反射率都很低,多光束干涉可以近似看成双光束干涉模型^[17]。其反射光谱的强度可以表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda} + \pi\right), \quad (1)$$

式中, I_1 和 I_2 分别表示硅膜片内表面和光纤端面的反射强度, n 为 FP 腔的折射率, L 为 FP 腔长, λ 为光波长, π 为半波损耗引起的相位差。

选用硅敏感膜片作为压力传感器的传感元件,敏感膜片在外部压力(气压)作用下将产生形变,导致腔长 L 发生改变,膜片形变公式^[18]为:

$$Y = \frac{3(1-\mu^2)P}{16Eh^3}(r^2 - l^2)^2, \quad (2)$$

式中, Y 为膜片形变量, μ 为泊松比, P 为膜片所受压力, E 为弹性模量, h 为膜片厚度, r 为膜片有效半径, l 为膜片任意部位的半径。

根据公式(2)可得出,最大弹性形变发生在膜片中心,即 $l=0$ 处,沿光纤轴向的膜片中心形变量 ΔY 满足下式:

$$\Delta Y = \frac{3r^4(1-\mu^2)P}{16Eh^3}. \quad (3)$$

受压时,膜片中心形变量 ΔY 即为腔长变化量。由公式(1)可得,腔长 L 发生变化时,反射光谱的强度随之改变。故通过分析反射光谱的变化,解调出腔长变化量,从而获得外部压力。

由小挠度弯曲理论可知,为了保证敏感膜片的线性形变,膜片中心的最大形变量通常不超过膜片厚度的 30%,即:

$$\Delta Y = P \times S \leq 0.3h, \quad (4)$$

式中, S 为膜片的压力灵敏度,其由敏感膜片的尺寸、杨氏模量和泊松比共同决定,可以表示为:

$$S = \frac{\Delta Y}{P} = \frac{3r^4(1-\mu^2)}{16Eh^3}. \quad (5)$$

分析式(5)可知,膜片有效半径越大,厚度越小,传感器的灵敏度越高。

3 传感器参数设计

由传感器的传感原理可知,膜片材料选定后,传感器的灵敏度将直接由硅膜片的厚度和有效半

径决定。灵敏度与敏感膜片有效半径的 4 次方成正比,与膜片厚度的 3 次方成反比。在理论公式的基础上使用有限元软件进行仿真分析,观察敏感膜片有效半径和厚度对传感器性能的影响。

首先进行稳态研究,在边界压力载荷为 1 MPa 的情况下,分析不同膜片厚度和有效半径对膜片中心形变的影响。设置膜片有效半径和厚度分别为 300 μm 和 50 μm , 构建敏感膜片模型,得到的膜片形变分布,如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

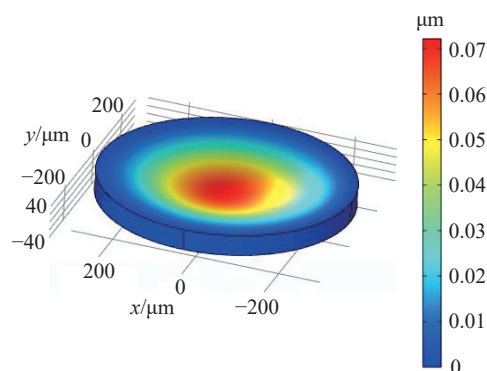


图2 膜片形变分布三维图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of diaphragm deformation distribution

令边界压力载荷为 1 MPa,不断改变模型参数,得到不同膜厚下膜片中心形变量与有效半径的关系图,如图 3 所示。以膜厚 50 μm 即图中黑线为例可以看出,当有效半径从 300 μm 增加到 500 μm ,膜片形变量呈逐渐增加的趋势且斜率不断增大。同时,对膜片厚度分别取 50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm 、250 μm 、300 μm 的 6 种情况进行计算。以有效半径为 500 μm 为例,可以观测到形变量随着膜片厚度的增大而减小,厚度越小,膜片产生的形变越剧烈。

由图 3 可知,仿真结果与理论分析相符。敏感膜片的厚度和有效半径两者相互制约,膜片的厚度越小,有效半径越大,灵敏度越高。在设计时需要两者兼顾,选择合适的膜片参数。针对油井下恶劣环境及狭小空间的压力测量需求和 MEMS 加工工艺的难度及制作成本,光纤压力传感器设计需满足小型化和压力测量范围 ≥ 20 MPa 的要求,最终设计参数如表 1 所示。

其次,为了保证传感器结构的稳定性,以及验证其抗过载能力,对传感器的结构力学性能进行进一步仿真分析。在软件中利用结构力学模块,

对整个传感头进行模型仿真,敏感膜片材料为硅材料,基座为高硼硅玻璃,按照表 1 设置相关参数,并对结构模型施加 1 MPa 的边界载荷。对模型四周与底面施加约束,以保证计算的稳定性,得到的三维受压图如图 4(彩图见期刊电子版)所示。为了得到受压形变图和模型中心形变与压力的关系,需对其进行后处理。

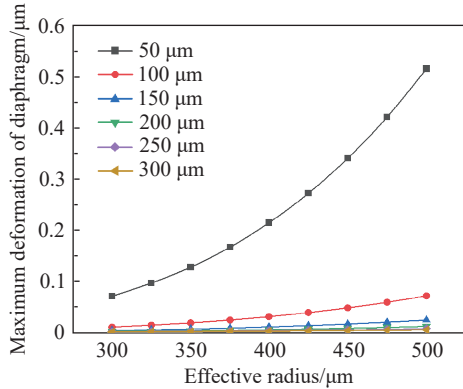


图 3 不同膜厚条件下膜片中心形变量与有效半径关系
Fig. 3 Relationship between diaphragm center deformation and effective radius at different diaphragm thicknesses

表 1 传感器的参数
Tab. 1 Sensor parameters

Sensor	Parameter	Value
Silicon diaphragm	Effective radius	0.375 mm
	Thickness	0.1 mm
Glass substrate	Thickness	0.4 mm
Sensor head	Side length	2.5 mm

从模型的二维受压形变图 5(a)(彩图见期刊电子版)可以看出,压力载荷为 1 MPa 时,模型最大形变发生在法珀腔的中心位置,且从法珀腔的中心位置到边缘位置形变逐渐减小,与公式 (2) 分析结果一致。为了更直观地观察模型形变量与压力的关系,选取压力敏感结构的中心点位置,对其依次施加 0~30 MPa 的压力载荷,得到图 5(b)所示的不同压力下的模型中心形变量。

从 5(b) 可以明显看出,形变量随压力的增大而增大,且二者间存在线性关系,此时传感器的灵敏度为 48.33 nm/MPa。由此可知,在静态压力 30 MPa 的测量范围内,压力敏感结构模型形变呈线性变化。在 30 MPa 载荷下,模型最大应力值出现在法珀腔边缘处,为 361.207 MPa,小于硅敏

感膜片的最大许用应力 600 MPa,处于材料的许用应力范围内。通过仿真分析可知,设计的传感器结构稳定,抗过载能力良好,可以测量 30 MPa 的高压,性能满足应用需求。

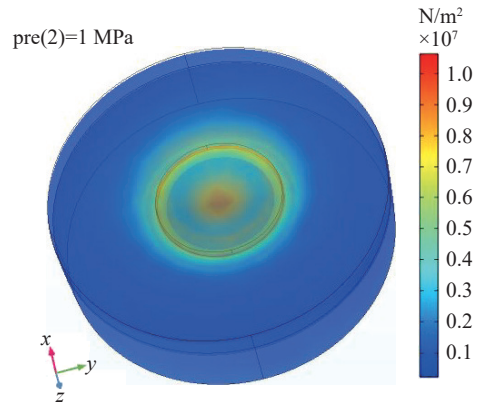
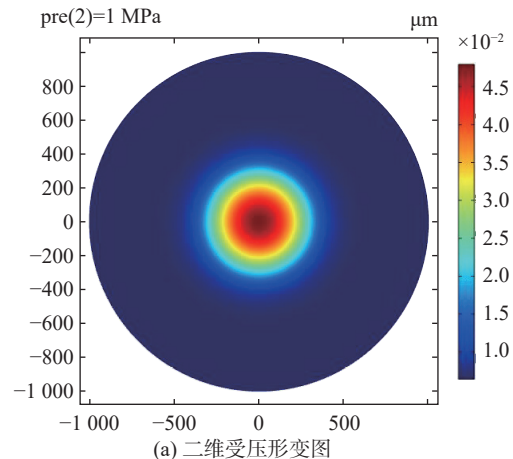


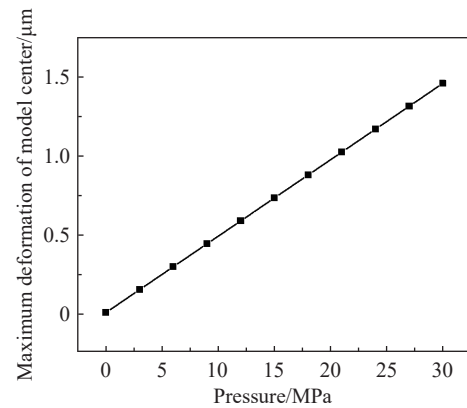
图 4 压力敏感结构模型三维受压图

Fig. 4 Three-dimensional diagram of the pressure sensitive structure model under pressure



(a) 二维受压形变图

(a) Two-dimensional deformation diagram under pressure



(b) 模型中心形变与压力关系

(b) Relationship between model center deformation and pressure

图 5 压力敏感结构模型受压形变图

Fig. 5 Deformation varying with pressure for pressure-sensitive structural model

4 传感器制备

由于玻璃材料具有良好的透光特性,故选用其作为传感器结构的基座。单晶硅材料具有较好的机械特性与光学特性,能与玻璃高温阳极键合形成高平行度的光学表面,被用作传感器的压力敏感膜片。然而,当两种不同材料在阳极键合时,会因为材料间的热膨胀系数不匹配产生热应力,热应力过大可能会导致传感器失效。为了避免上述情况的发生,玻璃要能与单晶硅材料的热膨胀系数较好地匹配,使得两种材料之间的键合应力最小。最终选用德国肖特公司生产的 BF33 型高硼硅玻璃。

材料均采用 6 英寸,厚度为 300 μm 的硅片及厚度为 400 μm 的 BF33 型高硼硅玻璃片。传感头制作工艺采用 MEMS 技术,主要包括硅片光刻、硅片刻蚀、玻璃片打孔、阳极键合、减薄抛光等步骤,图 6 为传感头制作工艺流程图。步骤依次为:(1)利用光刻工艺,经过涂胶、软烘、曝光、显影、后烘等工艺,将定制好的掩模板上的图形转移到光刻胶膜上,在硅片表面形成光刻胶图案,如图 6(a)、6(b) 所示,为刻蚀做好准备;(2)对涂有光刻胶保护层的硅片进行 ICP 干法刻蚀,批量刻蚀 FP 腔腔体。将光刻完成的硅片放入深硅离子刻蚀机中,控制刻蚀时间为 10 分钟,在硅片上形成半径为 375 μm 、深度 50 μm 的 FP 腔,如图 6(c) 所示。对刻蚀后的硅片去除光刻胶保护层,如图 6(d) 所示;(3)为保证 FP 腔与玻璃上的孔位对齐,按照硅片掩模版绘制玻璃加工版图,利用重复频率为 100 kHz,单脉冲能量约 80 μJ 的脉冲激光在玻璃片上打孔,批量形成直径为 130 μm 的通路,如图 6(e) 所示;(4)将处理后的硅片和玻璃片利用键合机制实现阳极键合,键合温度为 360 $^{\circ}\text{C}$,键合压力为 5000 N。键合完成后,硅片与玻璃片构成完整的 FP 腔,如图 6(f) 所示;(5)对键合后的结构进行减薄抛光处理。为了工艺方便直接选用市面上厚度为 300 μm 的硅片,将硅片减薄至 150 μm ,因其有 50 μm 的腔体,所以腔体上方厚度为 100 μm ,满足设计需求,如图 6(g) 所示。

硅-玻光纤 FP 压力传感器包括传感头,毛细玻璃管和 SMF。通过上述步骤完成了批量传感

头的制作,随后使用飞秒激光将单个传感头从键合后的晶片上分离出来。图 7(a) 为单个传感头显微图,图 7(b) 为单个传感头实物图。经实际测量,传感头边长为 2.56 mm,其中敏感膜片的有效半径为 375.19 μm (设计有效半径值: 375 μm),厚度为 101.06 μm (设计厚度值: 100 μm)。根据实际尺寸进行仿真,得到的传感器灵敏度为 47.49 nm/MPa,与设计值 48.33 nm/MPa 较为接近。

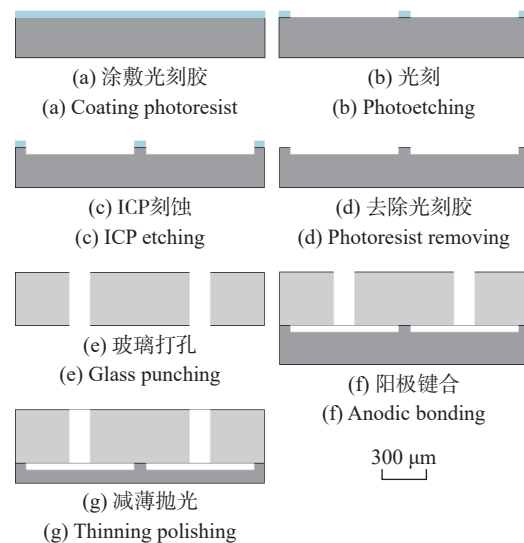


图 6 传感头制作工艺流程图

Fig. 6 Flow chart of sensor head production process

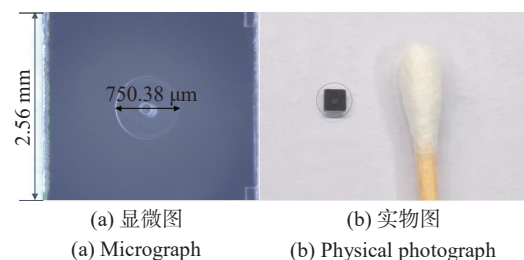


图 7 单个传感头

Fig. 7 Single sensor head

最后将传感头与 SMF 组装起来。为保护 SMF,选取外径为 1 mm、内部开孔直径为 0.127 mm 的高硼硅毛细玻璃管对其进行固定,将切平后的高硼硅毛细玻璃管对其进行固定,将切平后的 SMF 端面插入一端为喇叭口的玻璃管后通过 UV 胶在喇叭口位置对 SMF 进行固定。固定后将套入玻璃管的 SMF 集成至传感头,确认对准后将套入玻璃管的 SMF 集成至传感头,确认对准后将套入玻璃管的 SMF 集成至传感头,确认对准后将套入玻璃管的 SMF 集成至传感头,完成传感器的制作。传感器的实物图如图 8 所示。

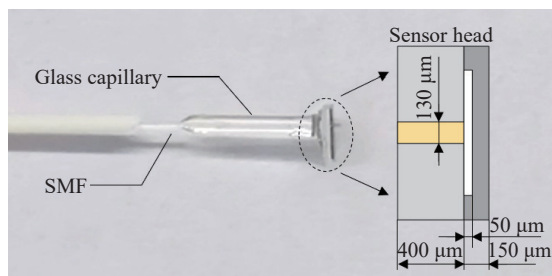


图 8 传感器实物图

Fig. 8 Physical photograph of the sensor

5 实验测试与分析

为了使传感器输出的光信号中仅含有传感器 FP 腔的腔长信息, 而不会引入如硅片厚度等干扰信息, 宽带光源选择中心波长为 850 nm, 3 dB 带宽为 60 nm 的 SLED 光源。对于单晶硅材料来说, 当波长大于 1033 nm 时, 材料为光学透明; 当波长小于 1033 nm 时, 材料为光学吸收, 即单晶硅对近红外以上波段的光是近乎透明

的^[19-20]。此时 SLED 光源发出的光大部分无法透过膜片, 会在硅膜片底面发生反射, 经膜片上表面反射的光强较弱, 对 FP 腔干涉信号影响较小。

设计并搭建如图 9 所示的压力测试系统, 用来检验传感器的实际测压性能。该系统包括 SLED 宽带光源 (VLSS-850-B, Connet, 上海, 中心波长: 850 nm, 3 dB 带宽: 60 nm)、光谱分析仪 OSA (AQ6370D, Yokogawa, Japan, 光谱测量范围: 600~1700 nm, 最高分辨率: 0.02 nm, 宽动态范围: 70 dB)、1×2 光纤耦合器、台式油压泵 (ConST135A, 康斯特, 北京, 压力范围: 0~100 MPa) 和硅-玻光纤 FP 压力传感器。图中 SLED 宽带光源出射的光, 通过 1×2 光纤耦合器进入光纤 FP 压力传感器, 在传感器内部形成双光束干涉, 携带腔长信息的干涉光再次通过 1×2 光纤耦合器传输至光谱分析仪, 图 10 为光谱仪得到的未加压传感器反射光谱。对光谱仪采集到的干涉光谱进行互相关算法^[21]解调分析, 最终实现压力测量。

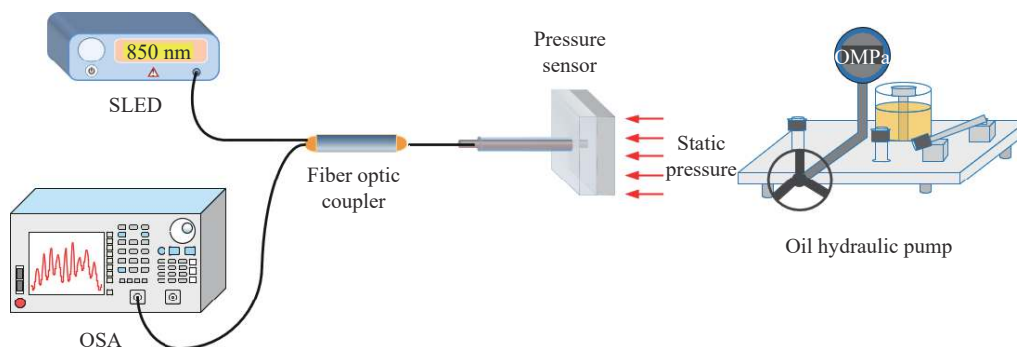


图 9 压力测试系统

Fig. 9 Pressure testing system

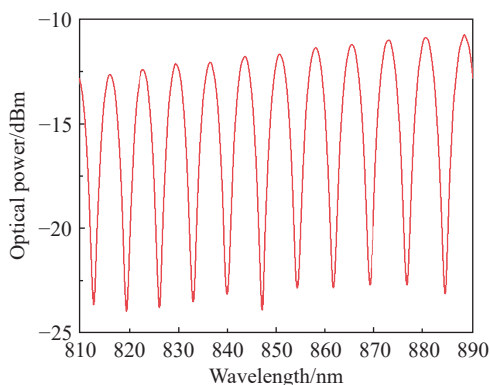


图 10 传感器反射光谱

Fig. 10 Reflection spectrum of the sensor

由图 10 可知, 初始腔长为 49.9835 μm 。对传感器进行测压实验, 实验中需要对传感器进行

封装并将其固定在台式油压泵中, 利用油压泵的手柄和手轮进行加压。以 3 MPa 为步长将压力由 0 MPa 逐渐增加至 30 MPa, 待每次加压稳定后使用光谱仪在 810~890 nm 波长范围内记录反射光谱信号。然后以同样的步长降低至 0 MPa, 记录反射光谱信号。对得到的光谱信息进行处理, 计算不同压力下的 FP 腔腔长, 得到升、降压过程中压力与腔长之间的关系, 拟合曲线如图 11(彩图见期刊电子版) 所示。可见, 升压过程中, 腔长随压力增大呈线性递减, 拟合直线表达式为 $y=49.94973-0.04702x$, 线性度为 0.99897; 降压过程中, 腔长随压力减小呈线性递增, 拟合直线表达式为 $y=49.87799-0.04693x$, 线性度为 0.99244。升压、降

压实验的传感器灵敏度分别为 47.02 nm/MPa 和 46.93 nm/MPa, 两次实验的灵敏度几乎一致且线性拟合度很高, 说明在实验中传感器的性能能够保持稳定状态, 测量结果的一致性高、可靠性高。

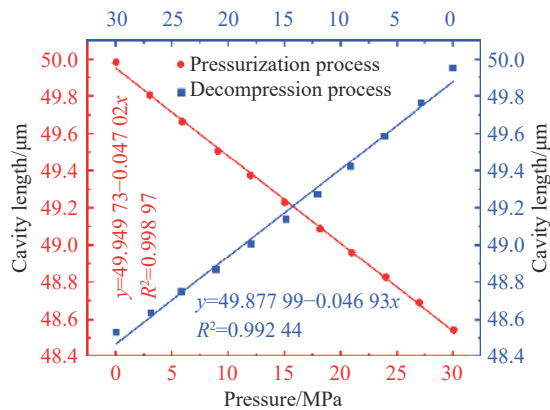


图 11 腔长与压力关系实测结果

Fig. 11 Experimental results of relationship between the cavity length and pressure

实验结果表明, 该传感器可以承受 30 MPa 的高压压力。当压力值从 0 MPa 增长至 30 MPa 时, 传感器的腔长减小了 1.4348 μm 。对应的实际尺寸仿真敏感模型中心最大形变为 1.4248 μm , 实验结果与仿真结果较为相符, 验证了理论设计的合理性。

为了进一步测试传感器的重复性和稳定性, 连续五天在 0~30 MPa 下对传感器进行压力测试, 以 6 MPa 的步长解调 FP 腔腔长值, 并计算不同压力下的腔长变化量, 结果显示在图 12 中。在压力分别为 6 MPa、12 MPa、18 MPa、24 MPa 和 30 MPa 下 FP 腔长变化量的最大相对误差约为 0.22%、0.22%、0.18%、0.21%、0.28%, 计算的平均相对误差为 0.22%, 对传感器灵敏度影响很小。说明该传感器稳定性强、重复性高, 其腔长波动可能是由于油压泵的压力不稳定和解调算法存在一定的局限性所造成的。对五天实验结果进行计

参考文献:

- [1] QI X G, WANG SH, JIANG J F, *et al.*. Fiber optic Fabry-Perot pressure sensor with embedded MEMS micro-cavity for ultra-high pressure detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2719-2725.
- [2] 吴妮珊, 夏历. 基于微波光子学的准分布式光纤传感解调技术[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 245-263.
WU N SH, XIA L. Interrogation technology for quasi-distributed optical fiber sensing systems based on microwave photonics[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 245-263. (in Chinese).
- [3] CUI Y, JIANG Y, LIU T M, *et al.*. A dual-cavity Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of high-temperature and high-gas-pressure[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 80582-80587.

算, 得出传感器的灵敏度分别为 47.02 nm/MPa, 46.93 nm/MPa, 46.68 nm/MPa, 47.05 nm/MPa 和 47.03 nm/MPa, 对应均值为 46.94 nm/MPa, 与实际尺寸的仿真结果 47.49 nm/MPa 较吻合, 误差为 1.16%, 误差主要来源于膜片的实际直径和膜厚加工精度。

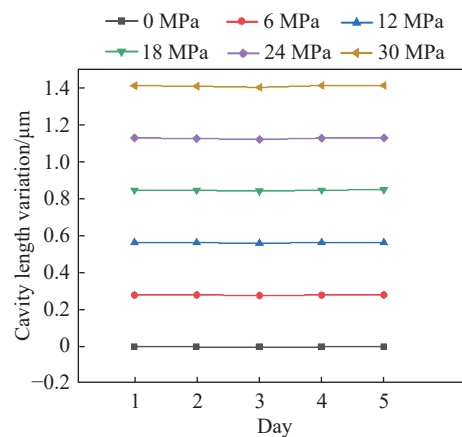


图 12 传感器重复性与稳定性

Fig. 12 Repeatability and stability of the sensor

6 结 论

本文基于 MEMS 技术设计并制作了一种硅-玻光纤 FP 高压压力传感器, 传感器包括传感头、毛细玻璃管和 SMF 三部分。由单晶硅膜片和 BF33 型高硼硅玻璃基座阳极键合形成 FP 腔, 实现了传感头的高度一致性和批量化生产, 降低了传感头的加工成本。实验结果表明, 传感器能承受 30 MPa 的压力, 在 0~30 MPa 范围内对压力表现出良好的线性响应, 灵敏度达到了 46.94 nm/MPa。该传感器重复性强、稳定性高。所研究的 MEMS 硅-玻光纤 FP 高压压力传感器, 由于体积小、成本低、结构简单且可批量生产的优点, 在石油开采、航空航天和深海探测等领域有很广的应用前景。

- [4] 李爱武, 单天奇, 国旗, 等. 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(4): 609-624.
- LI A W, SHAN T Q, GUO Q, *et al.*. Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 609-624. (in Chinese).
- [5] 薛兆康, 国旗, 刘善仁, 等. 油气井下光纤光栅温度压力传感器[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1224-1230.
- XUE ZH K, GUO Q, LIU SH R, *et al.*. Fiber Bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1224-1230. (in Chinese).
- [6] WANG Q, ZHANG L, SUN CH S, *et al.*. Multiplexed fiber-optic pressure and temperature sensor system for down-hole measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(11): 1879-1883.
- [7] MA J, JU J, JIN L, *et al.*. A compact fiber-tip micro-cavity sensor for high-pressure measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21): 1561-1563.
- [8] WU CH, FU H Y, QURESHI K K, *et al.*. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 412-414.
- [9] LIU ZH Y, TSE M L V, WU CH, *et al.*. Intermodal coupling of supermodes in a twin-core photonic crystal fiber and its application as a pressure sensor[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21749-21757.
- [10] LI J SH, JIA P G, FANG G CH, *et al.*. Batch-producible all-silica fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for high-temperature applications up to 800 °C[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 334: 113363.
- [11] BRACE E, GHADERIAN S, GHANNOUM A, *et al.*. Impact of support material deformation in MEMS bulk micromachined diaphragm pressure sensors[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2021, 31(5): 055001.
- [12] 张亮亮, 胡腾江, 李村, 等. 适用于极端环境的 MEMS 传感器研究进展[J]. *无人系统技术*, 2021, 4(5): 15-22.
- ZHANG L L, HU T J, LI C, *et al.*. Research progress of MEMS sensors applied in extreme environment[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2021, 4(5): 15-22. (in Chinese).
- [13] YIN J D, LIU T G, JIANG J F, *et al.*. Batch-producible fiber-optic Fabry-Perot sensor for simultaneous pressure and temperature sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2070-2073.
- [14] GE Y X, CAI K J, WANG T T, *et al.*. MEMS pressure sensor based on optical Fabry-Perot interference[J]. *Optik*, 2018, 165: 35-40.
- [15] 张韬杰, 江毅, 马维一. 一种高精细度 MEMS 光纤 F-P 压力传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170625.
- ZHANG T J, JIANG Y, MA W Y. A high fineness optical fiber F-P pressure sensor based on MEMS[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170625. (in Chinese).
- [16] 梁晓波, 黄漫国, 刘德峰, 等. 全 SiC 结构高温压力传感器制备及测试[J]. *测控技术*, 2022, 41(6): 15-18,25.
- LIANG X B, HUANG M G, LIU D F, *et al.*. Preparation and testing of high temperature pressure sensor with full SiC structure[J]. *Measurement & Control Technology*, 2022, 41(6): 15-18,25. (in Chinese).
- [17] 李加顺, 贾平岗, 王军, 等. 基于石英 MEMS 技术的光纤法布里-珀罗高温压力传感器[J]. *光子学报*, 2022, 51(6): 0606005.
- LI J SH, JIA P G, WANG J, *et al.*. Silica-MEMS-based fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for high-temperature applications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(6): 0606005. (in Chinese).
- [18] 胡振朋, 贾平岗, 钱江, 等. 蓝宝石高温光纤压力传感器的设计与仿真[J]. *传感技术学报*, 2021, 34(1): 1-7.
- HU ZH P, JIA P G, QIAN J, *et al.*. Design and simulation of sapphire high temperature optical fiber pressure sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(1): 1-7. (in Chinese).
- [19] 郝道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics*[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese).
- [20] 张璐, 柯少颖, 汪建元, 等. 硅基 IV 族材料外延生长及其发光和探测器件研究进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2021, 51(3): 030005.
- ZHANG L, KE SH Y, WANG J Y, *et al.*. Research progress in the epitaxial growth of silicon-based group IV materials, and their light emitters and photodetectors[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2021, 51(3): 030005. (in Chinese).
- [21] CHEN H B, LIU J, ZHANG X X, *et al.*. High-order harmonic-frequency cross-correlation algorithm for absolute cavity

length interrogation of white-light fiber-optic Fabry-Perot sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(4): 953-960.

作者简介:



陈海滨(1981—), 男, 山东昌邑人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事光电探测及光纤传感技术方面的研究。E-mail: chenhaibin@xatu.edu.cn

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 100元, 全年1200元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/04

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

<http://www.fgxb.org>