

温度弱敏感光纤高温压力传感器

王伟 李金洋[†] 毛国培 杨艳 高志强 马骢 钟翔雨 史青

(北京遥测技术研究所, 北京 100076)

(2023 年 7 月 17 日收到; 2023 年 8 月 16 日收到修改稿)

针对高温压力测量需求, 提出了一种温度弱敏感的光纤微机械电子 (MEMS) 压力传感技术. 该技术采用非本征光纤法布里-珀罗干涉模型, 利用 MEMS 压力敏感膜片对干涉光信号进行被动调制, 进而实现压力信号测量. 通过仿真计算热应力和材料自身热膨胀引入的温度寄生响应来分析温度信号对膜片位移的影响. 在此基础上结合亚微米级白光干涉响应技术和低热应力封装工艺, 研制了高温压力传感器样机. 实验测试结果表明, 在 20—400 °C 范围内, 可满足 0—100 kPa 压力测量, 由温度变化引入测量误差低于 4%.

关键词: 高温, 光纤压力传感, 法布里-珀罗干涉, 微机械电子芯片**PACS:** 42.81.-i, 42.87.-d, 85.60.-q, 07.07.Df**DOI:** 10.7498/aps.73.20231155

1 引言

在航空航天、石油化工、燃气轮机等高温恶劣环境中, 对压力的精准测量一直都是亟待解决的难题^[1-4]. 现有的电学高温压力传感器在高温环境下存在压阻系数急剧减小、元器件失效、材料蠕变等问题, 难以在高温环境下长期使用^[5-8]. 近年来, 随着光纤传感技术的发展, 光纤传感器电绝缘性好, 能耐受电磁干扰, 被广泛用于高压、高温或危险环境中. 由于具有重量轻, 分辨率高和尺寸小等优点, 使光纤传感器非常适合监测机器中的小裂缝或机电系统中的纳米位移^[9,10]. 光纤式传感器的前端敏感头不包含电学部件, 工作温度由敏感元件和封装结构的材料工作温度决定, 因此其具有工作温度高、测量精度高、抗电磁干扰、易于组网、易多参量复合等优势. 利用微机械电子 (MEMS) 技术制作光学敏感芯片、实现传感器封装, 又使得传感器具有一致性高、灵敏度高、体积小、易于工程化等优点, 可以满足极端环境下对压力的测量需求^[11-14].

英国 Oxsensis 公司早在 2005 年就开始研究

基于蓝宝石单晶光纤的非本征光纤法布里-珀罗干涉 (extrinsic Fabry-Pérot interference, EFPI) 高温压力传感器, 其敏感芯片采用 MEMS 工艺结合蓝宝石烧结工艺制备, 信号解调方面采用强度解调和光谱解调相结合的方式实现多 EFPI 腔的高速高精度解调^[15-17]. 但该传感器的谐振频率较低 (仅 5 kHz 左右), 针对特殊环境的高频要求仍有差距. 2014 年 Yi 等^[18-20] 研制了 MEMS 全蓝宝石光纤 EFPI 压力传感器, 后续对芯片制备工艺和封装方法进行了优化, 但采用的蓝宝石光纤存在模式数量巨大、高阶导模色散严重及传输损耗大等问题, 信号解调难度极大, 传感器的信噪比较低, 经降噪处理后的动态范围也仅有约 50 dB. 2022 年 Tomboza 等^[21] 利用飞秒激光, 在光纤内部制备空腔和光纤光栅, 实现的压力/温度复合传感器, 最高工作温度可达 900 °C, 适用于大压力量程应用 (9×10^6 Pa). 2009 年饶云江^[22] 在微加工系统中使用 157 nm 激光器研制出基于空气腔的自封闭光纤法珀传感器, 使得传感器可在 800 °C 的高温环境下正常工作. 2018 年张硕和江毅^[23] 采用氢氧火焰加工光纤毛细管与玻璃套管, 用耐高温玻璃胶加工玻璃套管与玻

[†] 通信作者. E-mail: lijinyang@mail.brit.com.cn

璃片,制作的法珀干涉型压力传感器,短时间工作温度为 300 °C,压力灵敏度为 23.158 $\mu\text{m}/\text{MPa}$. 2022 年 Zhang 等^[24]通过在光纤一端用飞秒激光刻蚀微孔,用无芯光纤与其拼接形成封闭法珀腔,光纤端面打磨消除反射,在低温-196 °C, 0—7 MPa 压力范围呈线性关系. 2022 年盛天宇等^[25]报道的光纤法珀式 SiC 耐高温压力传感器,能够实现 600 °C 高温环境下 0—4 MPa 范围内的压力测量. 还有技术途径借鉴国外方案,采用 MEMS 技术和光纤传感技术相结合. 其中 Li 等^[2]研制传感器的短时工作温度可达到 800 °C 以上,郭雪涛^[26]研制的传感器经测试可耐 800 °C 高温. 陈青青等^[27]实现了三层小片蓝宝石的直接键合;李奇思^[28]在芯片制备过程中,采用湿法清洗、等离子体激活、热压键合等步骤实现了 SiC—SiC 的直接键合. 解调方面颜维海^[29]采用相位解调中互相关解调法,利用腔长匹配原理,通过传感器输出信号与模板函数进行互相关运算,可以实现对法珀腔腔长的解调. Li 等^[30]采用 CO₂ 激光熔接封装技术,形成全硅压力传感器,该全硅压力传感器可在室温至 800 °C 范围内实现 1 MPa 压力测量.

但需要指出的是,上述技术路线需要实现多个 EFPI 腔体的交叠干涉光谱测量及后续数据变换,高度依赖宽带光源光谱分析模块或扫描激光器,一方面显著提高了光纤动态压力传感器的应用成本,限制了其推广应用;另一方面也由于大规模光谱数据测量、传输、处理,影响了传感器在高频信号测量方面的能力. 可以看出,高温工况下的温度补偿问题,已成为限制光纤压力传感器技术应用、推广的重要瓶颈^[31]. 基于此,本文从传感器设计根源出发,研制了一种全石英封装的低温度系数光纤 MEMS 压力传感器,通过采用微腔绝压芯片配合激光熔接工艺,有效降低了 EFPI 腔腔长的温度响应,进而避免了复杂温度补偿体系. 同时,研究人员基于白光干涉快速响应技术,搭建了光纤动态压力传感器及解调终端样机,在高温压力测试环境下验证了方案的有效性和可行性.

2 传感器理论模型

气密封装是保证压力测量准确性的基本前提. 考虑传感器气密性要求和内部气体热膨胀影响,采用绝压 MEMS 敏感芯片进行压力感知. 在此基

础上,采用敏感芯片与测量光路分离的指导思想,通过引入测量光路,对芯片变化进行无损、无接触测量.

基于上述思想,设计的光纤压力传感器如图 1 所示,主要由机械外壳、MEMS 敏感芯片、光纤、支撑结构这四部分构成. 机械外壳为耐高温合金,用于防护传感器并提供安装接口; MEMS 敏感芯片用于感受压力信息; 光纤用于传输和接收光信息; 支撑结构用于固定光纤和机械外壳,使 MEMS 敏感芯片、光纤的相对位置保持固定. 在该结构中,光源发出信号光通过接口耦合到尾纤,经过光纤传输后入射到 MEMS 敏感芯片,遇到反射面依次被反射并原路返回到光纤中,最后经过光环行器将信号传输到接收端.

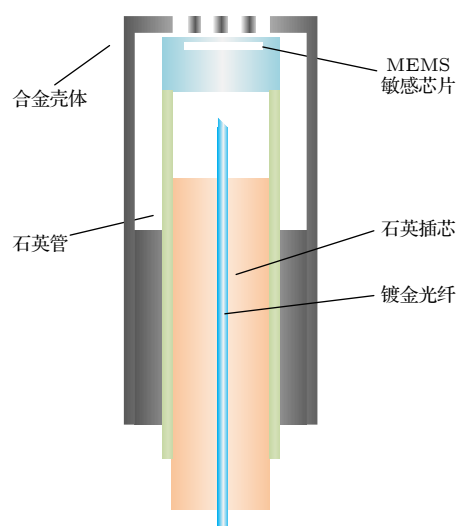


图 1 光纤压力传感器模型
Fig. 1. Fiber optic pressure sensor model.

MEMS 压力敏感芯片是传感器的核心元器件,采用全固态真空绝压设计. 芯片膜片与基底间通过 MEMS 工艺加工凹槽结构,使膜片受压发生变形. MEMS 敏感芯片通过压力敏感膜片感受外界压力变化,其理论模型如图 2 所示.

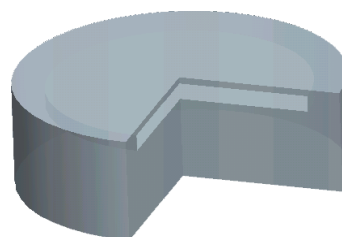


图 2 压力敏感芯片结构模型
Fig. 2. Structural model of the pressure-sensitive chip.

芯片内部保持真空, 在内外压力差作用下, 膜片向芯片内部凹陷, 此时膜片中心的位移 L , 即真空腔腔长的变化量为

$$L = \frac{3P(1-\mu^2)}{16Eh^3} \cdot r^4, \quad (1)$$

其中, P 为外界施加压力, μ 为泊松比, E 为弹性模量, h 为膜片的有效厚度, r 为膜片有效半径.

当光信号入射芯片时, 芯片基底底部、凹槽上表面、膜片下表面、膜片上表面分别对光信号进行反射, 如图 3 所示. 其中, 凹槽上表面、膜片下表面构成真空 EFPI 腔, 随着外界压力变化, 膜片受压变形, 进而导致该 EFPI 腔腔长变化, 通过测量 EFPI 腔长变化获得压力信息.

为提高传感器耐温能力, 光纤选用耐高温镀金光纤, 可耐受 700 °C 工况 [32]. 同时, 为避免光纤端面反射光信号参与干涉, 将光纤端面研磨 8°. 将膜片上表面打磨, 使其发生漫反射, 这样可忽略反射光 E_4 , 同时减少一次干涉. 因此, 对于上述双 EFPI 腔结构, 其反射光信号 E_1 , E_2 , E_3 分别可写为

$$E_1 = R_1 E_0 e^{i\varphi_0}, \quad (2)$$

$$E_2 = R_2 E_0 \exp \left[i \left(\varphi_0 + 4\pi \frac{n_1 L_1}{\lambda} + \pi \right) \right], \quad (3)$$

$$E_3 = R_3 E_0 \exp \left[i \left(\varphi_0 + 4\pi \frac{n_1 L_1 + n_0 L_0}{\lambda} + 2\pi \right) \right]. \quad (4)$$

输出反射干涉光信号强度 I 可表示为

$$\begin{aligned} I &= |E_1 + E_2 + E_3|^2 \\ &= \left| R_1 E_0 e^{i\varphi_0} + R_2 E_0 \exp \left[i \left(\varphi_0 + 4\pi \frac{n_1 L_1}{\lambda} + \pi \right) \right] \right. \\ &\quad \left. + R_3 E_0 \exp \left[i \left(\varphi_0 + 4\pi \frac{n_1 L_1 + n_0 L_0}{\lambda} + 2\pi \right) \right] \right|^2 \\ &= R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 - 2R_1 R_2 \cos \left(4\pi \frac{n_1 L_1}{\lambda} \right) \\ &\quad + 2R_1 R_3 \cos \left(4\pi \frac{n_1 L_1 + n_0 L_0}{\lambda} \right) \\ &\quad - 2R_2 R_3 \cos \left(4\pi \frac{n_0 L_0}{\lambda} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, R_1 , R_2 , R_3 分别为 E_1 , E_2 , E_3 三路光信号的电场强度衰减系数; I_0 , E_0 , φ_0 分别为入射光信号强度、电场强度和相位; L_0 和 L_1 分别为真空 EFPI 腔长和基底厚度 (固体 EFPI 腔腔长); n_0 和 n_1 分别为真空折射率和石英折射率; λ 为入射光信号波长.

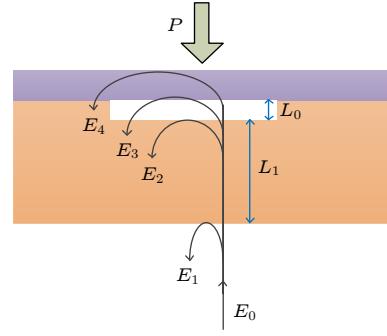


图 3 压力敏感芯片中光路传播示意图

Fig. 3. Diagram of light path propagation in pressure sensitive chip.

定义 $d_0 = n_0 L_0$, $d_1 = n_1 L_1$ 分别为真空 EFPI 腔、固体 EFPI 腔光学腔长, 为方便描述, (5) 式可写为

$$\begin{aligned} I &= C_0 + C_1 \cos \left(4\pi \frac{d_0}{\lambda} \right) + C_2 \cos \left(4\pi \frac{d_1}{\lambda} \right) \\ &\quad + C_3 \cos \left(4\pi \frac{d_0 + d_1}{\lambda} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

由于传感器结构参数固定, C_0 , C_1 , C_2 , C_3 均为常数项. 可以看出, 反射干涉光信号由直流信号和 3 个不同频率的余弦信号叠加而成, 前两个余弦函数成分的频率分别与真空、固体 EFPI 光学腔长直接相关. 因此, 通过获取对应余弦函数的频率成分, 即可得到目标腔长. 可以看出, 除了反映压力信息的真空 EFPI 腔干涉成分外, 反射光信号中仍存在大量干涉量, 并随温度导致材料热膨胀等因素变化. 为避免该情况, 采用白光干涉技术进行芯片信息读取. 该技术基于强度测量方案, 运算速度快且支持高频响应.

白光干涉技术解调方案如图 4 所示. 该方案采用宽带光源, 对宽带光信号反射干涉强度进行测量. 宽带光源信号经 1:99 光纤耦合器分为两路, 1/100 强度光信号用于进行宽带光源强度监测及修正, 99/100 强度光信号经光纤环形器后入射传感器. 传感器反射光信号经光纤环形器进入光电探测器进行模数转换, 在探测器的电压端口加入电容进行滤波处理, 为了提高信号的精度, 消除共有的误差干扰, 采用差分放大电路对光电探测器输出的电信号进行放大处理. 解调采用傅里叶变换及相关增强算法, 实现频率成分提取, 进而实现 EFPI 腔频率定位和 EFPI 腔光学腔长精确解调. 由于宽带光信号的有效干涉长度 L_c 较短, 即仅当两路光信

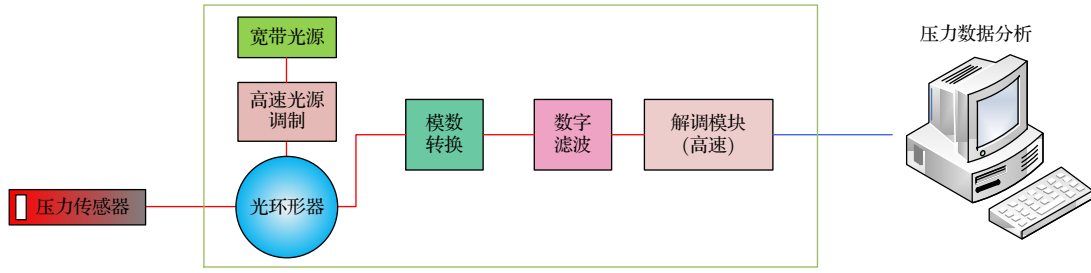


图4 光纤解调系统

Fig. 4. Fiber optic demodulation system.

号光程差 ΔL 小于 L_c 时, 能够发生干涉. 通过设计芯片膜片、基座和真空腔厚度, 可仅使 E_2 和 E_3 光信号形成干涉.

绝压敏感芯片主要通过真空腔腔长来感知芯片受力变化, 腔长的改变会影响干涉信号变化, 这样便可通过对发射光信号的解调测量压力的变化. 但相应地, 任何能引起芯片腔长的微小变化都会给传感器的压力测量带来干扰. 在高温状态下, 不可避免地会出现热膨胀及热应力等问题. 其中, 石英的热膨胀系数较低, 约为 $5.5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 根据热膨胀系数公式:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T \cdot V}, \quad (7)$$

可知腔长越小, 热膨胀变化越小, 因此, 采用小腔长来感知外界压力. 而 MEMS 芯片与光路结合部位也会带来热应力问题. 在结合部位采用耐高温陶瓷胶固定, 通过数值仿真软件对其进行热应力仿真, 仿真结果如图 5 所示. 由图 5 可知, $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境下由于热应力的影响, 导致结合部位有较大位移 (约为 $0.056 \text{ } \mu\text{m}$), 对压力测量产生干扰. 因此, 采用激光熔接的方式, 避免了在高温环境下不同材料之间热膨胀系数不匹配产生的传感器不稳定问题, 从而可进行压力精确测量.

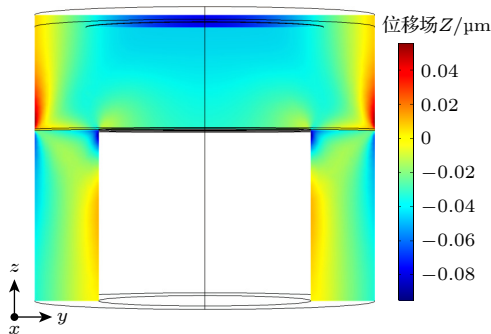


图5 热应力影响

Fig. 5. Influence of thermal stress.

3 芯片设计与实现

绝压敏感芯片的主要机理源于薄板小挠度变形理论, 当施加的压力均匀到薄板中心表面时, 为保证薄板的线性形变, 薄板发生的最大挠度变化小于薄板厚度的 $1/5$, 即可通过外界施加压力使芯片产生形变, 导致光学干涉强度发生变化, 从而解调得到压力变化^[33].

3.1 芯片敏感特性仿真分析

通过理论计算与数值仿真, 对敏感芯片的结构尺寸进行优化, 具体结构参数在表 1 列出. 采用数值仿真软件对芯片的敏感特性进行分析. 根据表 1 的结构设计方案进行建模, 如图 6 所示. 可以得出, 优化后感压膜在 100 kPa 压力下, 中心位置向真空腔处凹陷, 形变产生的位移为 $0.23 \text{ } \mu\text{m}$, 而真空腔体长度为 $2 \text{ } \mu\text{m}$, 满足薄板小挠度变形理论, 因此, 敏感芯片性能满足压力监测需求, 芯片结构设计合理.

表 1 敏感芯片的结构参数

Table 1. Structural parameters of the chip.

结构	芯片直径	芯片厚度	感压腔直径	感压膜厚	腔体长度
尺寸/mm	2	0.7	1.4	0.08	0.002

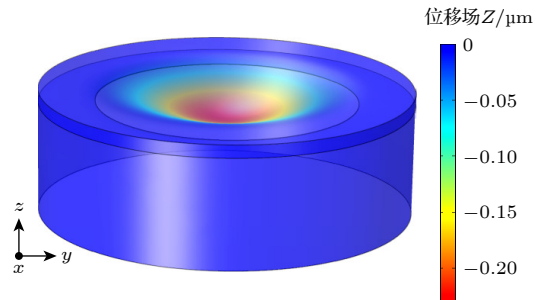


图6 敏感芯片受力位移模型

Fig. 6. Force displacement model of pressure sensitive chip.

3.2 芯片工艺实现

敏感芯片主体为通过 MEMS 微加工工艺得到, 工艺流程图如图 7 所示, 主要工艺包括光刻技术、湿法腐蚀、真空键合、减薄抛光、研磨划片等工艺. 在制备过程中, 由于真空腔体较小, 且石英膜片较薄, 因此在工艺流程中需进行多次激光划片来制备验证.

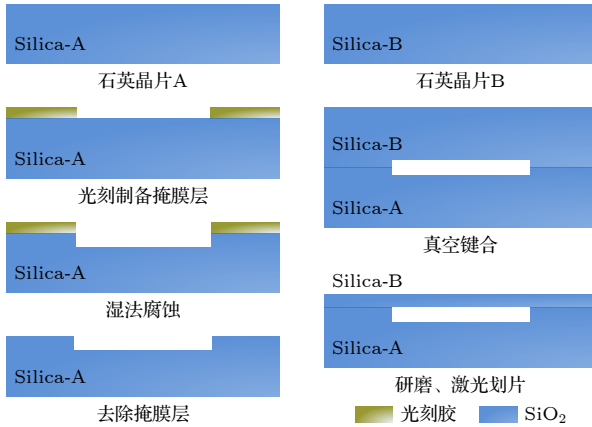


图 7 敏感芯片制备工艺流程图

Fig. 7. Chip preparation process steps.

对石英元件进行湿法刻蚀, 可以获得具有高阈值的低粗糙度光学元件表面. 图 8 为绝压敏感芯片实物图, 可以看到芯片表面较为光滑, 内部则存在真空腔腔体.

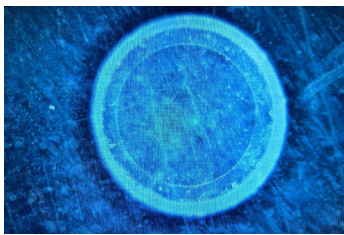


图 8 绝压敏感芯片

Fig. 8. Absolute pressure sensitive chip.

4 传感器制备

在传感器制备方面, 采用 CO₂ 激光熔接平台对传感器各部位进行熔接固定. 首先, 将绝压敏感芯片放置于熔接平台位移调节架上, 同时用夹具将玻璃管固定在位移调节架另一侧, 通过内置 CCD 相机将该部位放大显示在电脑一体机屏幕上, 从而进行熔接. 然后将镀金光纤插入石英插芯中, 通入激光使插芯受热进而使光纤与插芯熔接. 最后将带

有熔接芯片的玻璃管放置于位移调节台上, 另一端将带有镀金光纤的插芯插入玻璃管中并固定位置, 通入激光将玻璃管与石英插芯熔接.

图 9 为传感器实物元件熔接工艺照片, 其中图 9(a) 为敏感芯片与玻璃管熔接部位; 图 9(b) 为插芯与玻璃管熔接部位. 图 10 为传感器实物封装结构. 传感器采用金属结构将其封装, 尾端则使用金属波纹管对光纤进行保护.

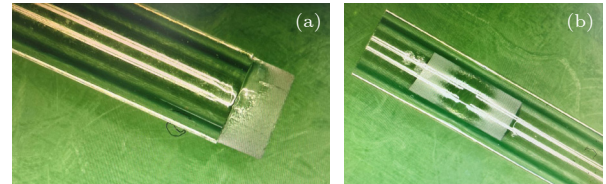


图 9 传感器熔接元件 (a) 敏感芯片与玻璃管熔接部位; (b) 插芯与玻璃管熔接部位

Fig. 9. Sensor welding element: (a) Welding position of sensitive chip and glass tube; (b) core and glass tube welding position.



图 10 传感器实物封装结构

Fig. 10. Sensor package structure.

5 实验测试

为了检验传感器的实际测量能力, 分别对传感器做了压力和高温测试. 实验测试设备如图 11 所示, 其中图 11(a) 为压力箱, 图 11(b) 为管式炉. 通过压力箱与管式炉来搭建测试系统, 对传感器进行后续测试.

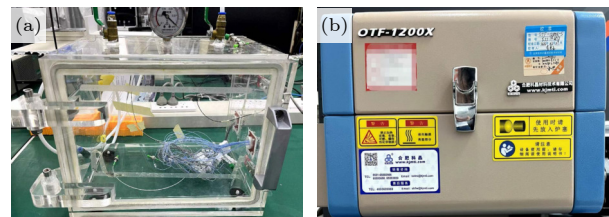


图 11 实验测试设备 (a) 压力箱; (b) 管式炉

Fig. 11. Sensor test equipment: (a) Pressure chamber; (b) tubular furnace.

5.1 压力测试

首先在常温 (20 ℃) 下对传感器进行压力测试. 测试系统采用亚克力真空密封压力箱, 如图 11(a) 所示, 压力箱有两个气阀, 一个与真空抽气泵连接, 另一个通过放气改变箱内压力. 将传感器放入压力箱中, 通过箱壁一侧密封光纤将其接入解调仪, 改变箱内压力来引起敏感芯片真空腔腔长改变. 最后通过计算机显示并记录传感器光谱以及光强信号变化等数据. 在实际压力测试过程中, 采取压力变化范围为 0—100 kPa, 得到的测试数据如图 12 所示. 可以看到, 在气压改变后, 反射光谱波形会发生明显改变, 这是因为敏感芯片感受到压力变化后, 真空腔会发生形变, 从而导致干涉光谱发生变化.

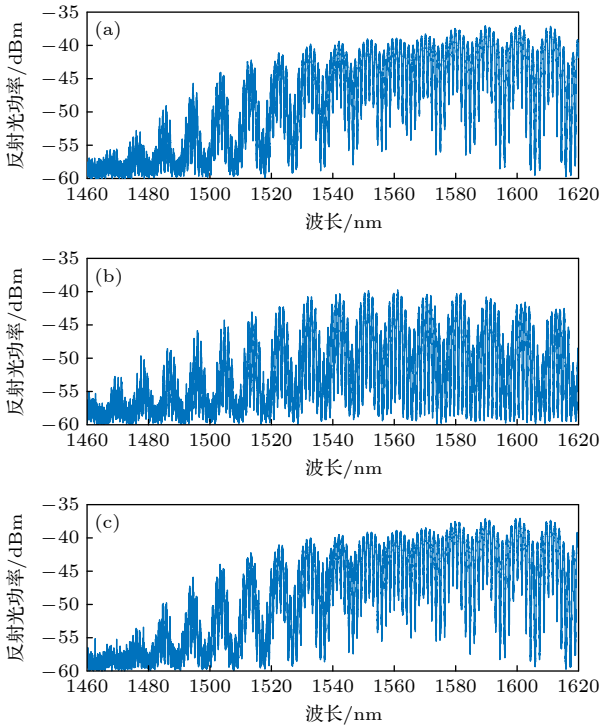


图 12 20 ℃ 下, 传感器压力变化反射光谱 (a) 100 kPa; (b) 0 kPa; (c) 100 kPa
Fig. 12. Sensor pressure change reflection spectrum at 20 ℃: (a) 100 kPa; (b) 0 kPa; (c) 100 kPa.

压力从 100 kPa 到 0 kPa 再到 100 kPa 时, 传感器光信号相对强度的实时变化如图 13 所示. 在降压阶段, 压力箱接近真空时排气速率下降, 因此出现强度从陡降到缓降的过程; 在升压阶段, 进气速率均匀, 出现强度匀速上升的变化.

图 14 为传感器光谱强度随压力变化关系图, 在 0—100 kPa 的升压过程与 100—0 kPa 的降压过程中, 整体上光谱强度与压力呈线性关系, 即传

感器可通过测量压力得到的相对光谱强度便可得出此时的压力值.

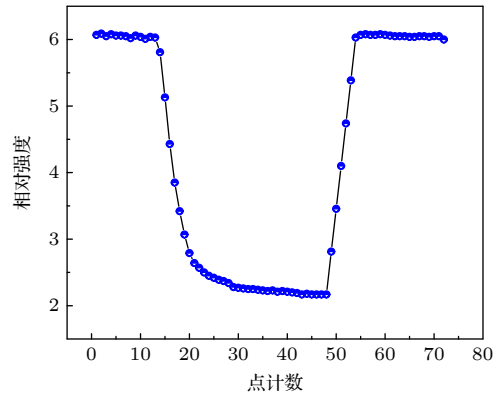


图 13 传感器光谱强度随压力实时变化

Fig. 13. Sensor spectral intensity varies with pressure in real time.

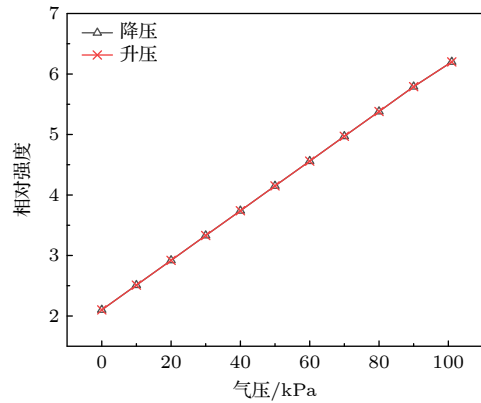


图 14 传感器光谱强度随压力变化关系

Fig. 14. Sensor spectral intensity varies with the pressure.

5.2 高温测试

在常压 (100 kPa) 环境下对传感器进行高温测试, 采用高温管式炉进行温度测试. 将传感器放入管式炉内, 另一端通过光纤接入解调仪, 同样通过计算机显示记录传感器数据. 将传感器放入管式炉中, 设置目标温度为 400 ℃. 管式炉升温速率为 10 ℃/min, 从常温 20 ℃ 开始对传感器进行温度测试. 图 15 记录了传感器在 20 ℃ 升温到 400 ℃ 然后降温到 20 ℃ 时产生的干涉光谱. 由图可知, 在 400 ℃ 时传感器干涉光谱并未产生较大的变化, 表明此温度下传感器仍能进行工作.

图 16 为传感器信号随温度变化示意图, 其中温度从 20 ℃ 升温到 400 ℃ 然后降温到 20 ℃. 由于石英热膨胀原因, 会导致真空腔腔长产生微小变化, 从而使干涉光谱发生变化, 进而导致光强产生

微弱波动. 综上, 常温下传感器的压力变化范围为 0—100 kPa, 其强度最大值为 6.23, 最小值为 2.12; 常压下传感器的温度变化范围为 20—400 °C, 其强度在 5.87—6.02 之间波动. 由温度变化引入测量误差约为 3.6%. 相比于压力响应测试, 380 °C 的温度变化引起的光信号强度变化可以忽略.

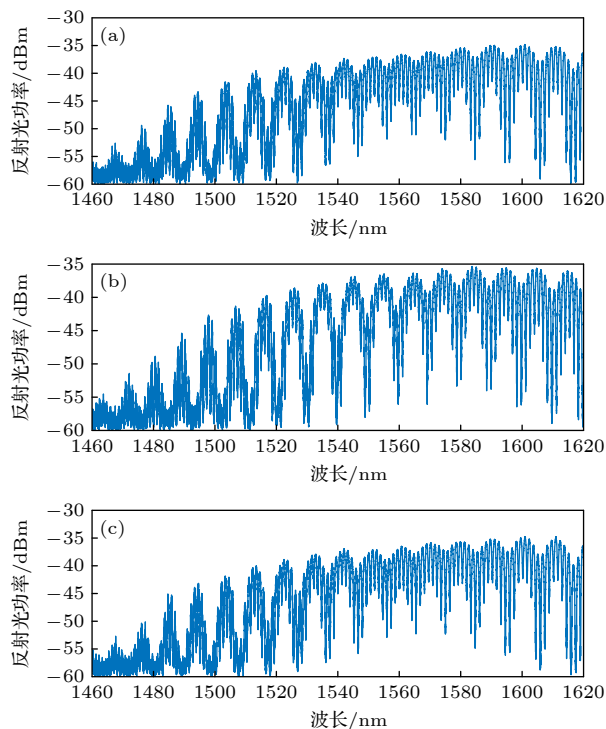


图 15 常压 100 kPa 下, 传感器温度变化反射光谱 (a) 20 °C; (b) 400 °C; (c) 20 °C

Fig. 15. Sensor temperature change reflection spectrum at normal pressure of 100 kPa: (a) 20 °C; (b) 400 °C; (c) 20 °C.

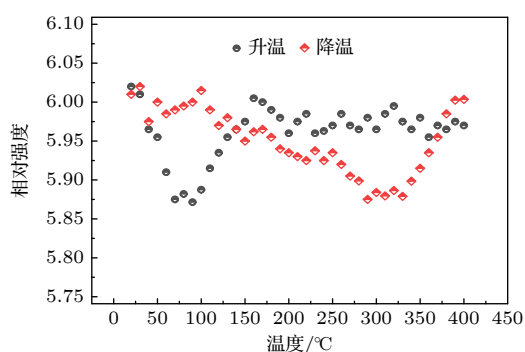


图 16 传感器相对强度随温度变化关系

Fig. 16. Sensor strength varies with the temperature.

6 结 论

本文提出了一种温度弱敏感的 MEMS 压力传感器技术, 采用 MEMS 芯片压力敏感膜片对干涉

光信号进行被动调制, 进而实现压力信号测量. 在此基础上结合亚微米级白光干涉响应技术和低热应力封装工艺, 研制了高温压力传感器样机. 实验测试结果表明, 在 20—400 °C 范围内, 可满足 0—100 kPa 压力测量, 由温度变化引入测量误差低于 4%. 相对传统压力传感器, 具有尺寸小、损耗低、灵敏度高、可多点分布测量、工作温度高等优点. 适用于燃气轮机、航空、航天发动机等高温恶劣环境, 用于实现对其运行状态的监控和健康评估, 为极端环境下压力测量提供了新的研究思路.

参考文献

- [1] Wang Z, Chen J, Wei H, Liu H, Ma Z, Chen N, Wang T, Pang F 2020 *Appl. Opt.* **59** 5189
- [2] Li W W, Liang T, Jia P G, Lei C, Hong Y P, Li Y W, Yao Z, Liu W Y, Xiong J J 2019 *Appl. Opt.* **58** 1662
- [3] Ma W Y, Jiang Y, Gao H C 2019 *Meas. Sci. Technol.* **30** 025104
- [4] He W T, Li Y H, Zou J B, Zhang S M, Zhao H P, Jin X F, Yang L 2016 *J. Telem. Track. Command.* **37** 61 (in Chinese) [何文涛, 李艳华, 邹江波, 张世名, 赵和平, 金小锋, 杨龙 2016 *遥测遥控* **37** 61]
- [5] Guo S W, Eriksen H, Childress K, Fink A, Hoffman M 2009 *Sens. Actuator A Phys.* **154** 255
- [6] Li D, Bai X P, Wang W X, Yi C, Li G, Jia L S, Li S Z 2018 *China Offshore Oil Gas* **30** 196 (in Chinese) [李达, 白雪平, 王文祥, 易丛, 李刚, 贾鲁生, 李书兆 2018 *中国海上油气* **30** 196]
- [7] Fraga M A, Furlan H, Pessoa R S, Massi M 2014 *Microsyst. Technol.* **20** 9
- [8] Shi X H, Lu R, Hang C, Ji C Y 2016 *China Offshore Platf.* **45** 135 (in Chinese) [施兴华, 路瑞, 杭岑, 稽春艳 2016 *中国海洋平台* **45** 135]
- [9] Liu T G, Wang S, Jiang J F, Liu K, Yin J D 2014 *Chin. J. Sci. Instrum.* **35** 1681 (in Chinese) [刘铁根, 王双, 江俊峰, 刘琨, 尹金德 2014 *仪器仪表学报* **35** 1681]
- [10] Ma Z B, Cheng S L, Kou W Y, Chen H B, Wang W, Zhang X X, Guo T X 2019 *Sensors* **19** 4097
- [11] Dai L H, Wang M, Cai D Y, Rong H, Zhu J L, Jia S, You J J 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 2505
- [12] Yu Q X, Zhou X L 2011 *Photonic Sens.* **1** 72
- [13] Chen X Z, Tong X L, Zhang C, Deng C W, Mao Y, Chen S M 2022 *Opt. Commun.* **506** 127580
- [14] Mao G P, Li J Y, Shi Q 2020 *J. Telem. Track. Command.* **41** 12 (in Chinese) [毛国培, 李金洋, 史青 2020 *遥测遥控* **41** 12]
- [15] Harpin A 2009 *Sensor and Test Conference Nuremberg, Germany, May 26–28, 2009* p89
- [16] Pechstedt R D 2013 *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors Krakow, Poland, May 19–22, 2013* p879405
- [17] Sposito A, Pechstedt R D 2016 *Metrology for Aerospace. IEEE Florence, Italy, June 22–23, 2016* p97
- [18] Yi J H, Lally E, Wang A B, Xu Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 9
- [19] Mills D A, Alexander D, Subhash G, Sheplak M 2014 *SPIE Sensing Technology + Applications Baltimore, MD, United States, June 5–6, 2014* p9113
- [20] Zhou H C, Mills D A, Vera A, Garraud A, Oates W, Sheplak

- M 2019 *AIAA Scitech 2019 Forum* San Diego, California, January 7–11, 2019 p2044
- [21] Tomboza W, Cotillard R, Roussel N, Huy M C P, Bouwmans G, Laffont G 2022 *Optica Advanced Photonics Congress Maastricht, Limburg Netherlands*, July 24–28, 2022 pBTh2A. 3
- [22] Rao Y J 2009 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. China* **38** 487 (in Chinese) [饶云江 2009 电子科技大学学报 **38** 487]
- [23] Zhang S, Jiang Y 2018 *Instrum. Tech. Sens.* **1** 10 (in Chinese) [张硕, 江毅 2018 仪表技术与传感器 **1** 10]
- [24] Zhang Y T, Jiang Y, Cui Y, Feng X X, Hu J 2022 *Meas. Sci. Technol.* **33** 055117
- [25] Sheng T Y, Li J, Li H C, Jiang Y G 2022 *Chin. J. Mech. Eng. En.* **33** 1803 (in Chinese) [盛天宇, 李建, 李鸿昌, 蒋永刚 2022 中国机械工程 **33** 1803]
- [26] Guo X T 2019 *M. S. Thesis* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [郭雪涛 2019 硕士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [27] Chen Q Q, Tang Y, Wang K N, Chen H B, Ma Z B 2018 *Laser Optoelectron. Prog.* **55** 110603 (in Chinese) [陈青青, 唐瑛, 王可宁, 陈海滨, 马志波 2018 激光与光电子学进展 **55** 110603]
- [28] Li Q S 2019 *M. S. Thesis* (Taiyuan: North University of China) (in Chinese) [李奇思 2019 硕士学位论文 (太原: 中北大学)]
- [29] Yan W H 2022 *M. S. Thesis* (Xi'an: Xi'an Technological University) (in Chinese) [颜维海 2022 硕士学位论文 (西安: 西安工业大学)]
- [30] Li J S, Jia P G, Fang G C, Wang J, Qian J, Ren Q Y, Xiong J J 2022 *Sens. Actuator A Phys.* **334** 113363
- [31] He W T, Zhao G Z, Ning J C, Li J Y, Shi Q 2019 *J. Telem. Track. Command.* **40** 17 (in Chinese) [何文涛, 赵光再, 宁佳晨, 李金洋, 史青 2019 遥测遥控 **40** 17]
- [32] Xu P B 2018 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [徐鹏柏 2018 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [33] Zhang W H 2016 *M. S. Thesis* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [张伟航 2016 硕士学位论文 (天津: 天津大学)]

Optical fiber high-temperature pressure sensor with weak temperature sensitivity

Wang Wei Li Jin-Yang[†] Mao Guo-Pei Yang Yan Gao Zhi-Qiang
Ma Cong Zhong Xiang-Yu Shi Qing

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

(Received 17 July 2023; revised manuscript received 16 August 2023)

Abstract

In aerospace, petrochemical, gas turbines and other high-temperature environments, pressure measurement of equipment has always been a challenge to be solved. The electrical high temperature pressure sensor has the problem of component failure in high temperature environment, and it is difficult to use in the high temperature environment for a long time. The detection device of the optical fiber sensor does not include electrical components, so it has the advantages of high working temperature, high measurement accuracy, anti-electromagnetic interference and so on. In order to use a sensor to measure pressure in high temperature environment, a temperature-weakly sensitive optical fiber micro-electro-mechanical system (MEMS) pressure sensing technology is proposed. The technique uses extrinsic Fabry-Pérot interference (EFPI) model. It uses the MEMS pressure chip to passively modulate the optical signal of the interference, and then realizes the pressure signal measurement. Among them, MEMS pressure sensitive chip is the core component of the sensor. The MEMS pressure sensitive chip adopts the design method of all solid state vacuum absolute pressure. Change in environmental pressure will deform the membrane. This phenomenon can cause change in the cavity of the EFPI cavity. Therefore, stress information can be obtained by measuring changes in EFPI cavity. The thermal stress and temperature parasitical response introduced by thermal expansion of the material are calculated by simulation. The influence of temperature signal on chip displacement is analyzed by the above results. On this basis, a prototype of high temperature pressure sensor is developed by combining the sub-micron white light interference response technology and low thermal stress packaging technology. In order to test the ability of the sensor to implement actual measurement, this paper carry out the pressure test and high temperature test respectively. When the pressure changes from 0 kPa to 100 kPa, the spectral intensity of the sensor output has a linear relationship with the pressure. During the temperature changing from 20–400 °C, the spectral intensity of the sensor output does not change significantly. The experimental test results show that the pressure measurement of 0–100 kPa can be satisfied in the range of 20–400 °C, and the measurement error introduced by temperature change is less than 4%. Therefore, the fiber pressure sensor can be used to measure the pressure in high temperature environment.

Keywords: high temperature, fiber pressure sensor, extrinsic Fabry-Pérot interference, micro-electro-mechanical system chip

PACS: 42.81.-i, 42.87.-d, 85.60.-q, 07.07.Df

DOI: [10.7498/aps.73.20231155](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231155)

[†] Corresponding author. E-mail: lijinyang@mail.brit.com.cn



温度弱敏感光纤高温压力传感器

王伟 李金洋 毛国培 杨艳 高志强 马聪 钟翔雨 史青

Optical fiber high-temperature pressure sensor with weak temperature sensitivity

Wang Wei Li Jin-Yang Mao Guo-Pei Yang Yan Gao Zhi-Qiang Ma Cong Zhong Xiang-Yu Shi Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 014208 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231155

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231155>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

方镁石高压结构预测和高温结构稳定性研究

High-pressure structure prediction and high-temperature structural stability of periclase

物理学报. 2019, 68(12): 126201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190204>

高温对MOSFET ESD防护器件维持特性的影响

Effect of high-temperature on holding characteristics in MOSFET ESD protecting device

物理学报. 2022, 71(12): 128501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220172>

氮化硅微波高温介电函数深度学习分子动力学模拟

Deep learning molecular dynamics simulation on microwave high-temperature dielectric function of silicon nitride

物理学报. 2022, 71(24): 247803 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221002>

面向高温介电储能应用的聚合物基电介质材料研究进展

Research progress of polymer based dielectrics for high-temperature capacitor energy storage

物理学报. 2020, 69(21): 217701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201006>

芯内双微孔复合腔结构的光纤法布里-珀罗传感器研究

Dual micro-holes-based in-fiber Fabry-Perot interferometer sensor

物理学报. 2018, 67(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180528>

基于 α -MoO₃的可调谐法布里-珀罗谐振腔比色生物传感器

α -MoO₃ based tunable Fabry-Perot cavity colorimetric biosensor

物理学报. 2021, 70(4): 048701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201548>