

全石英光纤法布里-珀罗高温振动传感器

赵祺瑞 刘乙辉 王铎瑞 任乾钰 贾平岗

Research on all-silica fiber-optic fabry-perot high-temperature vibration sensor

ZHAO Qi-Rui, LIU Yi-hui, WANG Hua-rui, REN Qian-yu, JIA Ping-gang

引用本文:

赵祺瑞, 刘乙辉, 王铎瑞, 任乾钰, 贾平岗. 全石英光纤法布里-珀罗高温振动传感器[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0018

ZHAO Qi-Rui, LIU Yi-hui, WANG Hua-rui, REN Qian-yu, JIA Ping-gang. Research on all-silica fiber-optic fabry-perot high-temperature vibration sensor[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0018

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于冲击波测量的硅MEMS光纤法珀压力传感器

Fiber-optic Fabry Perot pressure sensor for shock wave measurements based on silicon MEMS

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 452 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0010>

用于高压测量的MEMS硅-玻光纤FP压力传感器

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

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 771 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0224>

具有温度补偿的金属膜片式光纤法珀压力传感器

Metal-sensitive diaphragm fiber optic Fabry-Perot pressure sensor with temperature compensation

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1255 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0021>

光纤法珀传感器的改进型相位生成载波法解调

An improved phase generated carrier demodulation algorithm of fiber optic fabry-perot sensor

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 312 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0108>

卷积拟合在法布里-珀罗谐振腔线宽测量中的应用

Application of convolutional fitting in Fabry-Perot (F-P) resonator linewidth measurement

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 672 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0024>

基于可拉伸光纤和干涉测量的振动传感器

Vibration sensor based on stretchable optical fiber and interferometric measurement

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1200 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0010>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-10

全石英光纤法布里-珀罗高温振动传感器

赵祺瑞, 刘乙辉, 王铎瑞, 任乾钰, 贾平岗*

(中北大学 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对高温环境下振动监测面临的传感器失效与信号失真问题, 本文提出了一种全石英光纤法布里-珀罗高温振动传感器。设计了基于石英球透镜的准直耦合结构, 实现了光纤与高温区振动敏感结构的一体化集成。利用微机电系统 (MEMS) 加工技术与热压键合技术实现传感器敏感单元批量化制备。采用三波长动态解调与光谱互相关解调相结合的方法, 实现了对高温环境下振动信号的提取和温度补偿, 消除了温度波动对振动灵敏度的干扰。实验结果表明, 从室温 (23 °C) 至 800 °C, 传感器的灵敏度由 1.051 nm/g 降低到 0.8915 nm/g; 经温度补偿后, 传感器的残差平方和最大为 0.168, 全量程误非线性误差不大于 1.033%; 在动态响应测试中, 该传感器的特征频率远高于 6000 Hz, 在 100–2000 Hz 的频率响应范围内表现出较高的平坦度, 其灵敏度在 2000–6000 Hz 之间逐渐增加, 最大增量仅为 0.177 nm/g。此外, 传感器具有高一致性、全无胶化集成、抗电磁干扰等优点, 为高温环境下的振动测量提供了一种新的解决思路, 在高温振动领域具有广泛的应用前景。

关键词: 光纤传感器; 法布里-珀罗; 微机电系统; 振动; 高温

中图分类号: TP212

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2026-0018

CSTR: 32171.14.CO.2026-0018

Research on all-silica fiber-optic fabry-perot high-temperature vibration sensor

ZHAO Qi-Rui, LIU Yi-hui, WANG Hua-rui, REN Qian-yu, JIA Ping-gang*

(State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies,
North University of China, Taiyuan, Shanxi, 030051)

* Corresponding author, E-mail: pgjia@nuc.edu.cn

Abstract: To address sensor failure and signal distortion in extreme environments, an all-silica fiber-optic Fabry-Perot (F-P) high-temperature vibration sensor is proposed. A collimated coupling structure based on a silica ball lens enables integrated, non-contact signal transmission between the fiber and the sensitive structure. The sensitive units are batch-fabricated using MEMS and thermal pressure bonding technologies. By combining three-wavelength dynamic demodulation with spectral cross-correlation, precise vibration signal extraction and temperature compensation are achieved, effectively eliminating thermal cross-sensitivity. Experimental results indicate that as the temperature increases from room temperature (23 °C) to 800 °C, the sensitivity of the sensor decreases from 1.051 nm/g to 0.8915 nm/g. After temperature compensation, the

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52505617); 山西省青年科学基金 (No. 202303021212192)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52505617); Shanxi Province Science Foundation for Youths (No. 202303021212192)

maximum residual sum of squares (RSS) of the sensor is 0.168, and the full-scale nonlinearity error does not exceed 1.033%. In dynamic response tests, the characteristic frequency of the sensor is considerably higher than 6000 Hz. The sensor exhibits high flatness within the frequency response range of 100–2000 Hz, and its sensitivity gradually increases between 2000 Hz and 6000 Hz, with a maximum increment of only 0.177 nm/g. Featuring high consistency, adhesive-free integration, and electromagnetic immunity, this sensor provides a robust solution for vibration measurement in high-temperature environments.

Key words: fiber optic sensor; fabry-perot; MEMS; vibration; high-temperature

1 引言

在航空航天、能源勘探及核工业领域,对关键部件进行实时振动监测是评估结构健康状态的核心手段^[1-3]。高温环境下积聚的交变载荷与机械应力极易引发叶片断裂、机体疲劳或非预期共振。因此,准确可靠的高温振动测量对于提升装备性能和保障运行安全至关重要。目前,传统的电学式传感器主要包括压电式、电容式及压阻式传感器。基于高温压电材料的振动传感器在高温振动测量领域得到广泛应用^[4]。尽管在一定条件下可提供可用的测量结果,但仍然存在材料居里点失效、灵敏度衰减及温度漂移问题^[5-7]。

与之相比,光纤传感器凭借抗电磁干扰、本质无源及耐高温等优势,成为高温环境下振动监测的理想选择之一^[8-9]。光纤传感器主要有光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器与光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)传感器等。利用飞秒激光制备的耐高温 FBG 传感器工作温度一般可以达到 400 °C 以上,因其封装往往依赖高温粘接剂,胶粘层在持续高温下的蠕变和软化影响了传感器的可靠性^[10-11]。

基于多光束干涉原理的 F-P 传感器,凭借其结构紧凑、灵敏度高以及结构一致性好等显著优势,成为高温振动监测领域的研究热点^[12]。影响 F-P 传感器性能的主要因素包括敏感元件的加工方法、构成材料等,加工方法主要包括机械加工、激光加工以及微机电系统(MEMS)加工。其中机械加工的加工精度不易控制,尤其对于部分硬脆的单晶材料而言,其加工精度对光学传感器的性能影响很大^[13]。随着激光加工技术的发展,敏感单元的高精度加工问题得到了解决,同时出现了更多小型化的振动传感器。如 Ran 等^[14]利用激

光加工技术制备的光纤 F-P 加速度计最小检测加速度为 20 μg , 并且具备小型化结构和高精度测量的特点。为了解决激光加工效率的问题, MEMS 技术在确保高可靠性与高重复性的同时,实现了传感器敏感单元的批量化制备。目前,基于硅^[15]、碳化硅^[16-17]、蓝宝石^[18]及单晶 MgO^[19]等耐高温材料的微加工工艺已日趋成熟,并被广泛应用于各类高温振动传感器的制备中。其中,石英材料凭借其较低的热膨胀系数与优异的光学均匀性,成为高温 FP 传感器的理想敏感元件^[20-21]。如 Liu 等^[22]提出了基于 MEMS 和激光焊接的全石英高温振动传感器,其全石英结构采用均质集成,在一定程度上减小了热膨胀带来的影响,保证在高温环境下具备长期可靠性。该传感器还在内部集成了用于温度解耦的 FBG 传感器,这样可以降低温度与振动之间的串扰。虽然这样的温度补偿机制可以解决温度带来的影响,但不能完全做到实时监测振动信号。那么可以利用石英敏感单元自身来构建“原位温度补偿”机制,实现对传感器温度补偿。通过实时监测背板固体腔随热膨胀产生的微小偏移,反演环境温度并对传感器灵敏度实时修正,实现振动信号的精确提取。该“原位”解耦机制可显著提升传感器在高温环境下的测量精度与可靠性^[23-24]。

本文提出了一种基于全石英的光纤法珀高温振动传感器。该传感器采用了 MEMS 工艺,构建了全石英均质材料的敏感芯片,消除了热膨胀失配引起的热应力隐患,确保传感器在高温下的结构稳定性。设计了基于石英球透镜的光束耦合结构,实现了光纤与振动敏感结构的一体化集成,同时利用飞秒激光技术抑制了寄生干涉噪声。针对高温引起的灵敏度漂移以及零点漂移的难题,构建了三波长动态解调与光谱互相关解调并联系系统,配合温度补偿模型,实现了高温条件下振动信

号的精确解耦。该传感器在宽温域内具有高信噪比、低交叉敏感度等优势, 为高温环境下的振动监测提供了一种具有广泛应用前景的解决方案。

2 传感器原理与结构设计

振动传感器的结构示意图如图 1(a)所示, 它主要是由镀金石英光纤(美国 Fiberguide 公司的 ASI 系列金层涂覆光纤), 石英球透镜以及传感器芯片组成。光纤的金镀层具有优异的热传导性, 可以减少温度带来附加应力的影响, 在高温环境中维持光纤的完整性。传感器芯片是由三层 SiO₂ 直接键合形成的, 第一层是带有刻蚀沉孔的背板, 其主体厚度形成固体温度腔用于温度解耦, 沉孔底面与质量块形成空气振动腔。第二层是振动敏感单元, 接收外界的加速度激励, 第三层设计沉孔结构为振动敏感单元提供充足的位移空间。

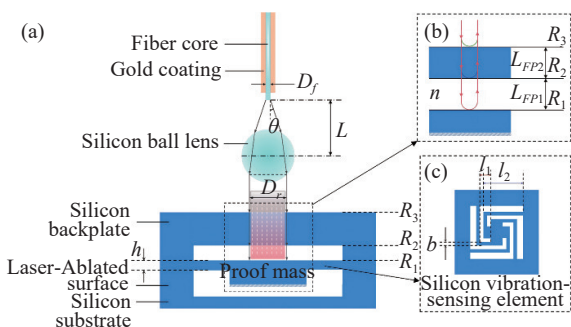


图 1 (a) 振动传感器的结构示意图; (b) “梁-质量块”的结构模型图; (c) 双 FP 腔的干涉模型

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the vibration sensor; (b) “Structural model of beam-mass block”; (c) Interference model of the dual FP cavities

2.1 光学原理

该传感器基于非本征光纤法珀(EFPI)干涉原理, 采用非接触式的准直型耦合系统。在系统中由镀金光纤发出的所有光线经过球透镜后实现近似准直耦合, 并且在传感器芯片的三层反射面上都形成直径为 D_r 的光斑。光纤端面到球透镜球心的距离 L 是确保传感器干涉信号具有高信噪比。设光纤的直径为 D_f , 数值孔径为 $NA = \sin\theta$, 球透镜半径为 r_l , 其折射率为 n_l , 故而球透镜的焦距为

$$f_l = \frac{r_l}{2} \frac{n_l}{n_l - 1}, \quad (1)$$

则光线沿传播路径在传感器芯片的反射面上

形成的光斑直径为 D_r , 进而得到光纤端面到球透镜球心的距离为

$$L = \frac{D_r - D_f}{2 \tan \theta} = \frac{r_l}{2} \frac{n_l}{n_l - 1} - \frac{D_f}{2 \tan \theta}, \quad (2)$$

根据实际情况对式 (2) 中的各参数进行赋值, 光纤纤芯直径 $D_f = 9 \mu\text{m}$, 数值孔径 $NA = 0.29$ ($\theta = 17^\circ$); 石英球透镜的折射率 $n_l \approx 1.51$, 由传感器微型化决定其直径 $2r_l = 2 \text{ mm}$ 。由此得到球透镜的焦距 $f_l \approx 1.48 \text{ mm}$, 在传感器芯片的反射面上光斑直径 $D_r \approx 0.9 \text{ mm}$, 光纤端面到球透镜球心的距离 $L \approx 1.465 \text{ mm}$ 。

准直光束垂直入射至传感器芯片, 通过三个反射面构建复合腔干涉模型。如图 1(b)所示, 反射面包含质量块上表面 R_1 , 背板沉孔面 R_2 和背板上表面 R_3 。由 R_1 和 R_2 组成的 FP_1 用于测量振动信号, 长度为 L_{FP_1} ; 由 R_2 和 R_3 组成的 FP_2 用于温度解耦, 长度为 L_{FP_2} 。反射光束经球透镜汇聚并耦合回纤芯, 形成干涉信号, 其表示为

$$I_r = I_1 + I_2 + I_3 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta_1 + 2\sqrt{I_2 I_3} \cos \theta_2 + 2\sqrt{I_1 I_3} \cos(\theta_1 + \theta_2), \quad (3)$$

其中 I_r 表示反射光的强度, I_1, I_2, I_3 分别表示三个反射面的反射光强, θ_1 和 θ_2 分别是由 FP_1 和 FP_2 的上下表面反射的光产生的干涉相位, 可以表示为 $\theta_1 = 4\pi n_1 L_{FP_1} / \lambda + \pi$ 和 $\theta_2 = 4\pi n_2 L_{FP_2} / \lambda + \pi$ 。 n_1 和 n_2 是空气和 SiO₂ 的折射率, λ 表示光的波长。

当外界施加的加速度激励作用于传感器时, FP_1 的腔长 L_{FP_1} 因十字梁的变形而发生变化, 进而干涉信号的相位也会发生变化, 通过解调相位变化量 $\Delta\theta_1$ 可以得到 FP_1 的腔长变化量 ΔL_{FP_1} :

$$\Delta L_{FP_1} = \frac{\lambda}{4\pi n_1} \cdot \Delta\theta_1, \quad (4)$$

2.2 力学原理

图 1(c) 是“梁-质量块”的结构模型图, 根据牛顿第二定律和欧拉-伯努利梁理论, 当沿质量块轴向位移方向施加加速度激励 a 时, 质量块产生的总惯性力 $F = ma$ 被平均分配到四根支撑梁上, 即单根悬臂梁承受的载荷为 $F_s = ma/4$, 由于中心质量块具有较大的刚度且采用中心对称分布, 在振动过程中质量块只发生平移而不发生转动。因此, 单根支撑梁的形变模式可等效为一端固定、

另一端仅允许平移的单悬臂梁模型。悬臂梁承受的载荷会使空气振动腔长 ΔL_{FP_1} 发生改变,在最大挠度 ΔY_{\max} 远小于“L”型梁厚度的前提下, ΔL_{FP_1} 在数值上相当于梁的最大挠度 ΔY_{\max} ,即为^[25]

$$\Delta Y_{\max} = -\frac{mal^3}{4Ebh^3}, \quad (5)$$

式中, m 为质量块质量, l , b , h 是单根梁的长,宽,厚,其中“L”型梁的等效有效长度可以表示为 $l = l_1 + l_2$, E 是 SiO_2 的杨氏模量, a 是加速度激励。

传感器的灵敏度 S 可以表示为质量块在 1g 加速度下的位移量,即表示为

$$S = \frac{mgl^3}{4Ebh^3}, \quad (6)$$

传感器的谐振频率 f 表示为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{Ebh^3}{ml^3}}, \quad (7)$$

其中, $K = ma/\Delta Y_{\max}$ 表示“梁-质量块”结构的刚度系数。根据公式(6)和(7)可知,在传感器敏感单元尺寸一定的情况下,灵敏度 S 和谐振频率 f 的平方成反比关系。通过优化梁长与质量块尺寸,使传感器在获得高灵敏度的同时,具备较高的谐振频率。传感器敏感单元的具体物理参数见表1。

表1 敏感单元的结构参数

Tab. 1 Structural Parameters of the Sensitive Unit

Parameters	Symbol	Value
Length of the beam	l_1	0.9 mm
Length of the beam	l_2	3.3 mm
Width of the beam	b	0.3 mm
Thickness of the beam	h	0.3 mm
Density of SiO_2	ρ	2650 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Young's modulus of SiO_2	E	73.1 GPa
Sensitivity	S	1.374 nm/g
Frequency	f	16 100 Hz

在实际测量过程中,外界加速度 a 最终通过机械结构转化为光学信号。结合公式(4)和(6),传感器测得的加速度 a 与 FP_1 的腔长变化量 ΔL_{FP_1} 之间的关系为

$$a = \frac{g}{S} \cdot \Delta L_{FP_1} = \frac{g\lambda}{4\pi n_1 S} \Delta\theta_1, \quad (8)$$

2.3 温度补偿原理

传感器在高温环境下会出现零点漂移和灵敏度变化,实现准确的振动测量需要对其温度补偿。当仅有温度变化时, FP_1 和 FP_2 的腔长变化一致,其中 FP_1 腔的长度对温度和振动信号都很敏感,相比之下, FP_2 腔的长度仅取决于热膨胀。利用光谱互相关解调算法通过对实际光谱数据向量与法珀腔产生的模拟光谱数据向量进行互相关运算,得到互相关系数。当互相关系数取最大值时,表明两向量间具有最佳相关性,此时对应的模拟腔长被确定为 FP_2 腔的绝对腔长 L_{FP_2} ,并将其作为参考基准反馈至三波长解调系统,从而动态修正温漂对 FP_1 腔的干扰,确保加速度信号的精确还原。

温度补偿量化了温度 T_i 与传感器的温度腔腔长 L_{FP_2} ,初始振动腔腔长 $L_0(T_i)$ 和不同温度下的灵敏度 $S(T_i)$ 之间的关系,从而消除零点漂移以及随温度变化而产生的灵敏度变化,并且参数间的关系还可以测量传感器所处的环境温度。具体关系如下:

$$\begin{cases} T(L_{FP_2}) = T_i \\ S(T_i) = S_i \\ L_0(T_i) = L_{0i} \\ L_{FP_1} = L_{0i} - S_i V_a \end{cases}, \quad (9)$$

对式(9)进行运算得到温度解耦后的加速度 V_a 表示为:

$$V_a = \frac{L_0(T(L_{FP_2})) - L_{FP_1}}{S(T(L_{FP_2}))}, \quad (10)$$

3 传感器制备

该传感器的敏感芯片由三层双面抛光的 SiO_2 晶圆通过MEMS工艺协同制备而成。采用同种材料的集成消除了不同材料间的热应力失配问题,确保传感器在高温环境下的结构可靠性。核心制备流程包括单层精密微加工、飞秒激光烧蚀及直接键合等工序。

在传感器敏感芯片的制备中, SiO_2 背板下表面刻蚀的沉孔深度直接定义了用于测量振动激励的法珀腔的初始腔长。 SiO_2 具有极高的化学惰性,为了高效准确地制备法珀腔结构,采用基于感应耦合等离子体深反应离子刻蚀(ICP-RIE)技术,

制备法珀腔结构的工艺流程如图 2(a)所示。首先对 SiO₂ 晶圆进行标准 RCA 清洗去除表面杂质, 随后, 利用磁控溅射技术在晶圆表面沉积 Cr/Ni (50 nm/2 μm) 复合金属层作为干法刻蚀的硬掩模。通过紫外光刻与刻蚀工艺完成图形转移后,

将晶圆放入 ICP-RIE 反应腔中进行干法刻蚀。实测刻蚀速率约为 420 nm/min, 通过控制刻蚀时间为 107 min, 最终获得深度为 45.368 μm 且表面平整的干涉微腔结构。最后使用稀硝酸和去铬液去除剩余的复合金属层。

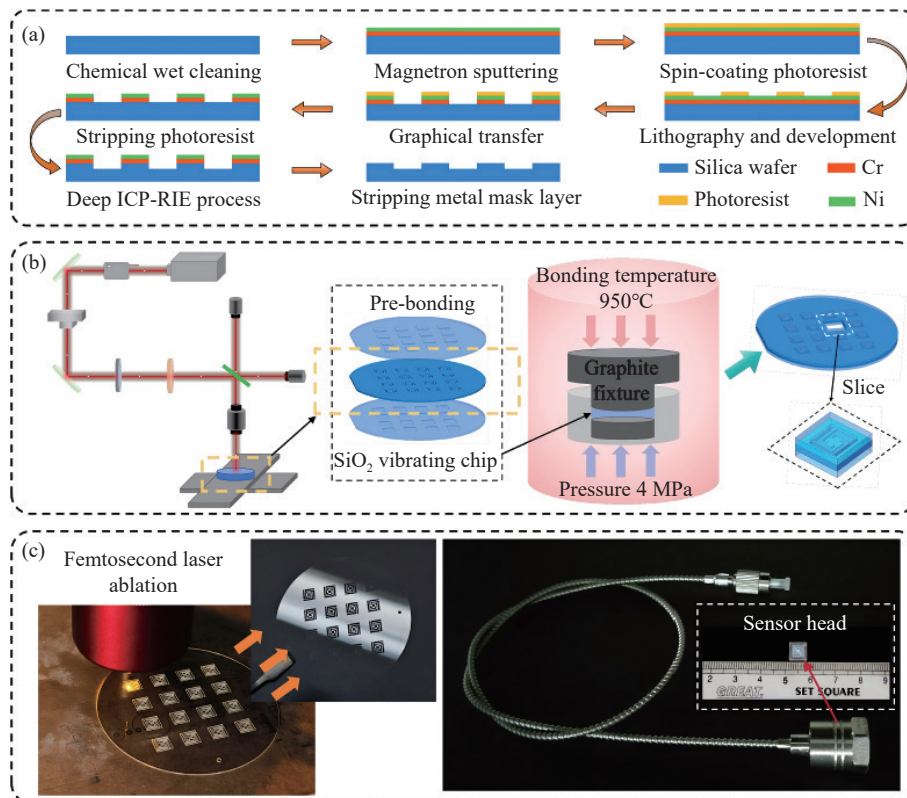


图 2 (a) 干法刻蚀制备振动法珀腔; (b) 飞秒激光粗糙化处理及芯片直接键合流程; (c) 传感器芯片制备及实物图

Fig. 2 (a) Fabrication of vibrating FP cavity by dry etching; (b) Process of femtosecond laser roughening and direct chip bonding; (c) Preparation of sensor chip and its physical image

芯片敏感层与盖板层均采用计算机数控 (CNC) 技术制备。盖板层加工深度为 350 μm 的沉孔以提供振动空间, 其粗糙底面可减少寄生反射。敏感层由四条“L”型的悬臂梁和方形质量块组成的中心对称的“梁-质量块”结构。为了减少反射面获得高信噪比的干涉信号, 利用飞秒激光在敏感层的质量块下表面进行微米级浅层烧蚀, 构建微纳复合散射结构, 从物理层面抑制寄生干涉, 如图 2(b)所示。完成各层晶圆的图形化加工后, 采用高温热压键合技术实现芯片的整体集成。键合前对所有晶圆进行标准 RCA 清洗, 随后利用 O₂ 等离子体及含有 OH 的溶液中进行表面活化处理, 再对三层晶圆对准贴合, 完成预键合。将晶圆放入高温热压键合炉, 在压力 4 MPa, 温度 950 °C 下进行真空键合。最后对晶圆进行划

片得到图 2(c)中的传感器芯片。

搭建传感器信号传输耦合光路, 得到传感器敏感芯片、石英球透镜和镀金光纤之间的最佳距离, 设计基于高温合金的封装结构实现对传感器的装配, 如图 2(c)所示。

4 测量测试与分析

为了研究该传感器在不同温度下的加速度响应, 采用三波长动态解调与光谱互相关解调相结合的方法建立解调系统, 并搭建高温振动测试系统, 如图 3 所示。解调系统使用宽带光源通过单模光纤和环形耦合器传输到振动传感器, 传感器反射的光通过内部的耦合器分为两路: 一路进入三波长解调模块, 利用高速 PD 采集动态干涉相

位;另一路进入光谱解调模块,利用光谱互相关算法计算出温度腔腔长 L_{FP_2} 以及初始振动腔腔长 $L_0(T_i)$ 反馈给三波长系统的解调算法,从而实现了自补偿。

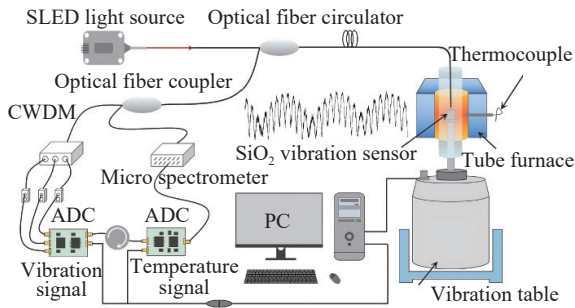


图3 高温振动复合测试系统

Fig. 3 High-temperature vibration combined testing system

在高温振动测试系统中将标准加速度计固定在振动台表面, SiO₂振动传感器通过转接件连接在振动台上,并保持在管式炉的恒温区,同时配置标准热电偶实现实时温度检测。利用标准加速度计标定SiO₂振动传感器,通过解调系统获得振动

传感器的加速度信号。

测试振动传感器在高温环境下的性能,首先需要保证常温下它具有较好的动态响应特性。实验设定激励频率为160 Hz,在2 g至20 g范围内以2 g为增量进行加速度测试。为消除随机噪声干扰,系统在振动台稳定运行1分钟后连续采集三组数据并取均值作为有效输出。实验结果表明,传感器的灵敏度为1.051 nm/g,非线性误差为0.247%,与当前先进的光纤法珀振动传感器的性能指标相近。

随后,通过高温加热装置对振动传感器进行加热,在常温(23 °C)至1000 °C的温度范围内以200 °C为增量对传感器进行测试。在每个温度点下同样采用激励频率为160 Hz,在2 g至20 g范围内以2 g为增量进行加速度测试。图4是振动传感器在23 °C和800 °C下的时域信号和频域信号,从结果可以看出,在相同温度下传感器的腔长变化量峰值随加速度激励的增加而增加,在相同加速度下传感器的腔长变化量峰值随温度的增加而降低。

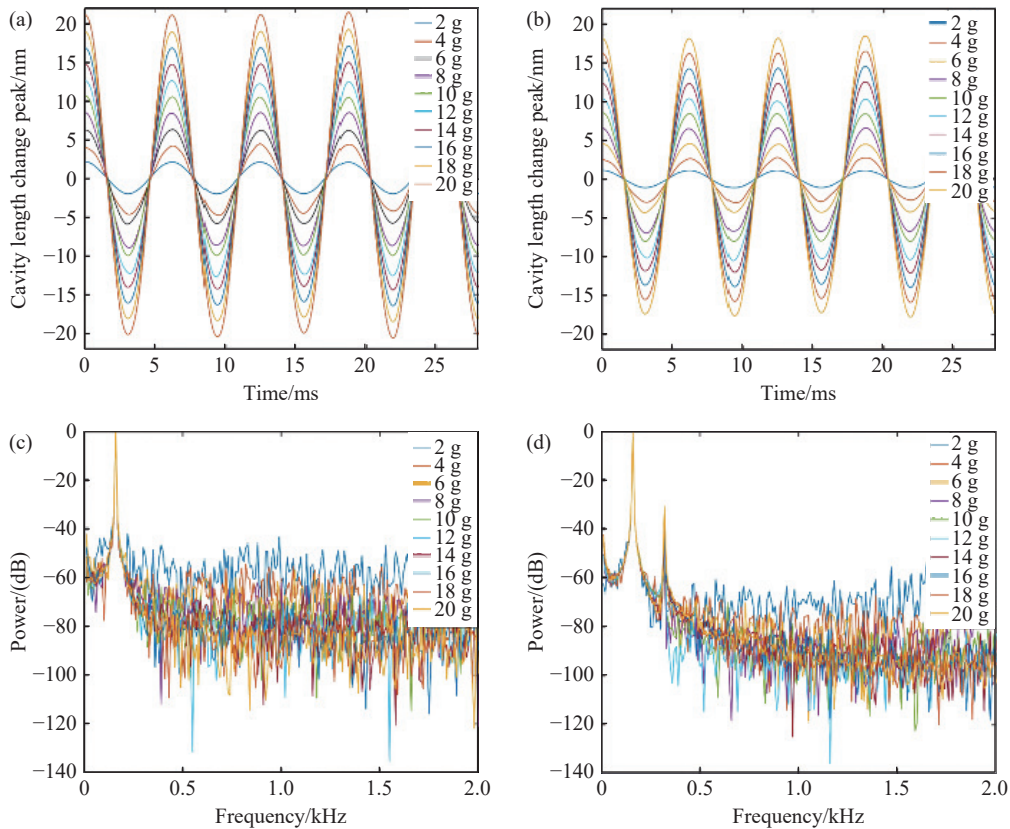


图4 (a) 23 °C 下的时域响应; (b) 800 °C 下的时域响应; (c) 23 °C 下的频率响应; (d) 800 °C 下的频率响应

Fig. 4 (a) Time-domain response at 23 °C; (b) Time-domain response at 800 °C; (c) Frequency response at 23 °C; (d) Frequency response at 800 °C

测得传感器在 23 °C 和 800 °C 温度下的灵敏度为 1.051 nm/g 和 0.8915 nm/g, 图 4(c)和(d)是通过图 4(a)(b)中信号对应的快速傅里叶变换频谱图, 可以看出解调信号频率为 160 Hz, 与振动激励信号的频率一致, 图 4(d)中出现的微弱次高峰主要源于环境机械噪声和系统非线性引起的谐波, 但其幅值不足以影响对主振频率的提取。

为了进一步分析传感器的温度交叉灵敏度, 记录并分析传感器在 23 °C 至 800 °C 温度区间内不同加速度下的腔长变化量, 图 5 利用函数将测量结果进行拟合表达, 可以看出每个温度点下传感器输出与被测加速度值之间存在线性关系。在此基础上, 提取图 5 中各拟合直线的斜率作为该温度下的灵敏度 $S(T)$, 并由此构建了灵敏度随温度变化的趋势图, 如图 6 所示。由图 6 的拟合结果可见, 传感器的灵敏度随温度的升高而降低。这种灵敏度漂移主要归因于 SiO_2 材料的反常热膨胀效应: 随着温度升高, SiO_2 的杨氏模量逐渐增大, 导致敏感结构的等效刚度 K 增强, 从而抑制了相同惯性力下的弹性挠度。因此需要提高传感器的测量精度, 根据传感器的温度耦合特性对温度交叉灵敏度进行解耦校正。

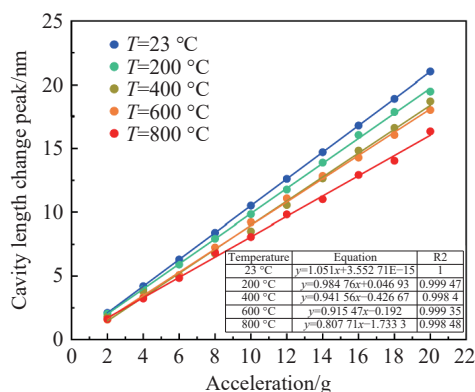


图 5 不同温度下的腔长变化量

Fig. 5 variation of cavity length at different temperatures

基于温度补偿原理, 对传感器芯片进行 23 °C 到 800 °C 并以 100 °C 进行递增的高温测试实验, 并记录芯片的振动腔的初始腔长 $L_0(T_i)$ 和温度腔的腔长 L_{FP_2} , 图 7 是实测数据点及其对应的函数拟合曲线。拟合公式可以表达为:

$$L_0(T) = 45.37329 - 1.90745 \times 10^{-4}T + 2.48691 \times 10^{-7}T^2 - 1.44879 \times 10^{-10}T^3, \quad (11)$$

$$L_{FP_2}(T) = 377.37194 + 3.64096 \times 10^{-4}T - 4.91421 \times 10^{-7}T^2 + 3.25011 \times 10^{-10}T^3, \quad (12)$$

对拟合结果进行残差分析, 验证温度自补偿模型的精度, 拟合残差如图 8 所示。分析结果显示, 在 23 °C 至 800 °C 的全域内, 振动腔初始腔长 $L_0(T_i)$ 和温度腔腔长 L_{FP_2} 的拟合残差均表现出明显的随机分布特性, 并且极小的拟合残差证明了三阶模型不仅捕捉到了热膨胀的主效应, 还精确修正了高阶非线性偏差。利用 FP_2 腔作为实时的物理温标, 对加速度信号进行归一化校正。实时监测 L_{FP_2} 并解算出当前环境温度 T , 解调系统自动调取对应的灵敏度修正系数 $S(T)$ 。

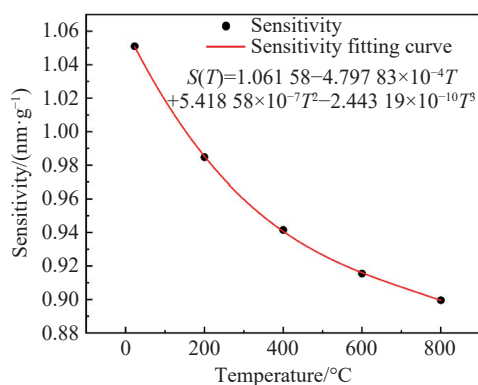


图 6 不同温度下的灵敏度

Fig. 6 The sensitivity at different temperatures

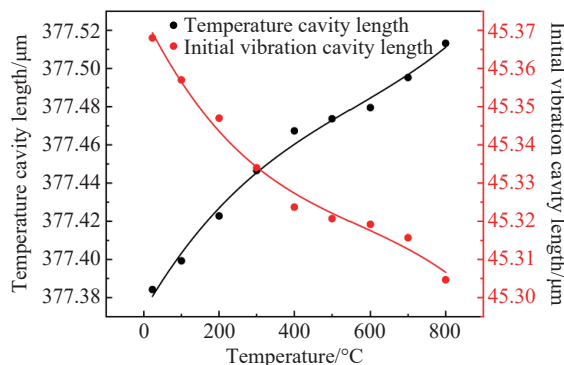


图 7 振动腔初始腔长和温度腔腔长随温度变化曲线

Fig. 7 Variation of Initial Vibration-Cavity Length and Temperature-Cavity Length with Temperature

图 9 是温度补偿后的加速度测量值与实际加速度值之间的线性对比, 实验数据表明, 经过温度补偿后, 传感器输出的加速度测量值与实际值表现出极高的一致性。传感器的残差平方和最大为 0.168, 全量程非线性误差不大于 1.033%。

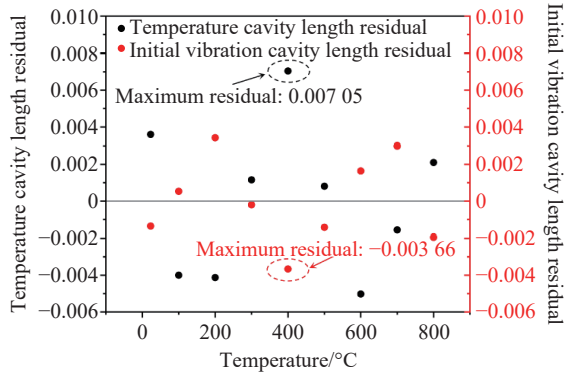


图 8 振动腔初始腔长和温度腔长拟合残差分析图

Fig. 8 Vibration initial cavity length and cavity temperature chamber cavity length fitting residual analysis diagram

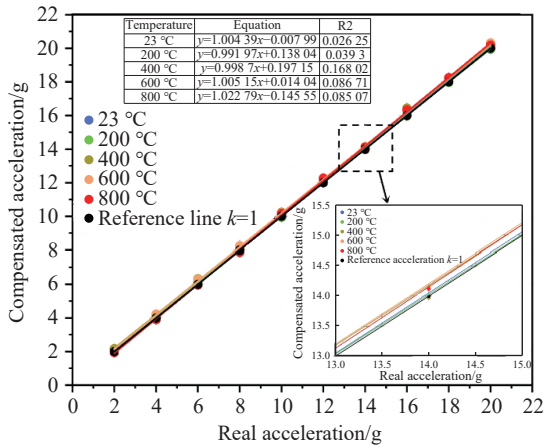


图 9 温度补偿后加速度的测量值与实际值的线性拟合

Fig. 9 Linear Fit of Measured versus Actual Acceleration after Temperature Compensation

进一步评估传感器的动态响应, 对其进行了频率响应测试。测试是在 1 g 的恒定加速度下进行, 激励频率从 100 Hz 到 6000 Hz 以 200 Hz 为增量变化, 采集到的传感器输出值可视为在该频率下的灵敏度值。图 10 是传感器灵敏度在不同频率下的变化, 可以看出传感器在每个频率点下没有明显的振幅波动。由于振动台的频率范围有

限, 测量频率的范围受到限制。从图 10 可以看出, 传感器在 100 Hz 至 2000 Hz 的频率响应范围内表现出较高的平坦度, 且灵敏度在 2000 Hz 至 6000 Hz 之间逐渐增加但增量较小, 最大增量仅为 0.177 nm/g。实验结果表明, 传感器的特征频率远高于 6000 Hz, 并且能够在 100–6000 Hz 的频率范围内稳定工作。

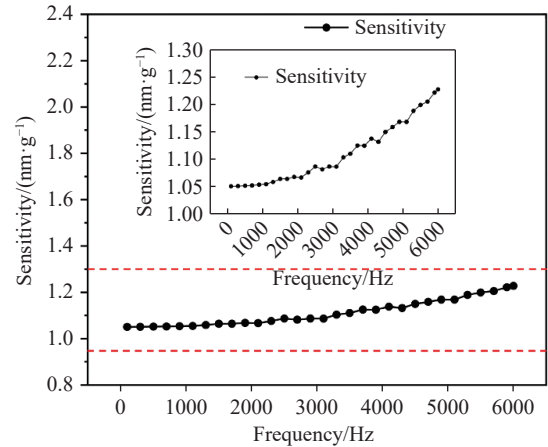


图 10 不同频率下的传感器灵敏度变化

Fig. 10 Sensor sensitivity variation at different frequencies

本文提出的全石英光纤法珀高温振动传感器与现有的几种高温振动传感器性能进行对比, 汇总于表 4。与现有的传感器相比, 该传感器器通过 MEMS 加工技术实现传感器敏感单元的批量化制备, 并且采用镀金光纤与球透镜进行光传输, 避免了胶粘带来的热膨胀系数不匹配问题, 以及传统焊接工艺在强振动环境下易发生断裂的问题。传感器的金属封装工艺提高了工作温度, 实现了小型化集成。在未来研究过程中可以通过更换耐温性能更好的材料(比如蓝宝石光纤和蓝宝石晶圆)来提高传感器的工作温度, 在实际工程应用中会有很好的应用前景。

表 2 不同的高温 F-P 振动传感器的特性

Tab. 2 Characteristics of several high-temperature F-P vibration sensors.

	Signal Transmission Method (in High-Temperature Area)	Packaging Method	The Highest Working Temperature (°C)	Sensitivity
[13]	Reflector and sphere lens	Mechanical coupling	500	7.69 nm/g
[15]	Sapphire optical fiber	Heat-resistant inorganic adhesives	1200	17.86 mV/g
[17]	Quartz optical fiber	Ceramic glue	1000	0.0073 rad/g
[20]	Gold-plated FBG	Laser welding	800	0.0093 rad/g
this work	Gold-plated optical fiber and Silicon ball lens	Mechanical coupling	800	1.051 nm/g

5 结 论

本文提出了一种基于全石英结构的光纤法珀(F-P)振动传感器。通过 MEMS 制造工艺, 构建了全石英材料的敏感芯片, 利用高温直接键合技术, 消除异质材料热膨胀失配产生的热应力隐患, 确保了传感器在高温环境下的结构完整性与长期可靠性。设计了基于石英球透镜的光束耦合结构, 实现了光纤与振动敏感结构的非接触式信号传输。并结合飞秒激光加工技术对非工作面进行粗糙化处理来提升信噪比。实验结果表明, 该传感器在 23 °C 至 800 °C 的宽温域内表现出优异

的性能, 传感器灵敏度从常温下的 1.051 nm/g 单调递减至 1000 °C 时的 0.8915 nm/g, 但其保持了良好的线性响应。结合三波长动态解调与光谱互相关解调相结合的方法, 实现了振动信号与温度漂移的精确解耦, 传感器的最大残差平方和为 0.168, 全量程非线性误差不大于 1.033%。动态响应测试中, 该传感器在 100 Hz 至 2000 Hz 的频率响应范围内表现出较高的平坦度, 其灵敏度在 2000 Hz 至 6000 Hz 之间逐渐增加, 最大增量仅为 0.177 nm/g, 且证明该传感器的特征频率远高于 6000 Hz。综上所述该传感器具有批量化生产的优点以及高温环境下的性能可靠性, 为高温环境下的振动监测提供了应用前景的解决方案。

参考文献:

- [1] WU D F, LIN L J, REN H Y. Thermal/vibration joint experimental investigation on lightweight ceramic insulating material for hypersonic vehicles in extremely high-temperature environment up to 1500 °C[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 14439-14447.
- [2] MILLS A R, KADIRKAMANATHAN V. Sensing for aerospace combustor health monitoring[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 2020, 92(1): 37-46.
- [3] RATH N, MISHRA R K, KUSHARI A. Aero engine health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance: an overview[J]. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2023, 40(s1): s279-s292.
- [4] 魏象锋. 柔性压电传感器设计与振动监测应用研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2025.
Wei X F. *The design of flexible piezoelectric sensor and application research of vibration monitoring*[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2025. (in Chinese).
- [5] ZHANG H, WANG Y, CHEN L, *et al.*. Recent advances and perspectives in optical fiber sensors for corrosive and high-temperature environments[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-15. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [6] YANG Y, ZHAO Y, WANG L K, *et al.*. High-temperature SiC piezoresistive accelerometer fabricated by femtosecond laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(11): 17461-17469.
- [7] WANG Z B, ZHOU W Y, XIAO Z J, *et al.*. A high-temperature accelerometer with excellent performance based on the improved graphene aerogel[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(15): 19337-19348.
- [8] FENG R, CHU Y, LIU Z H, *et al.*. Study on high temperature resistant packaging of ultra high temperature Fabry-Pérot optical fibre vibration sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(23): 27045-27050.
- [9] CHEN F Y, LI X Y, WANG R H, *et al.*. Sensitivity enhancement of fiber-optic accelerometers using thin-cladding fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(18): 5988-5994.
- [10] XIAO X ZH, HE J, XU X ZH, *et al.*. High-temperature-resistant fiber laser vector accelerometer based on a self-compensated multicore fiber Bragg grating[J]. *Sensors*, 2022, 22(17): 6459.
- [11] WEI H M, ZHUANG CH Q, CHE J W, *et al.*. Highly stabilized fiber Bragg grating accelerometer based on cross-type diaphragm[J]. *Optics Express*, 2024, 32(12): 21447-21458.
- [12] 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).
- [13] MA W Y, JIANG Y, ZHANG H, *et al.*. Miniature on-fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric vibration sensors based on micro-cantilever beam[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2019, 8(1): 293-298.

- [14] RAN Z L, LU E, RAO Y J, *et al.*. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer tip accelerometer fabricated by laser-micromachining[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7753: 212-215.
- [15] 秦锋, 郑婷婷, 谭佳航, 等. 复合腔高温法珀加速度传感器的设计与实验[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(21): 3174-3183.
- QIN F, ZHENG T T, TAN J H, *et al.*. Design and experiment of high temperature Fabry-Perot acceleration sensor with composite cavity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(21): 3174-3183. (in Chinese).
- [16] MAHISSI M, MA X L, CAI W M, *et al.*. Optimization of wide frequency range 6H-SiC MEMS chips for a fiber optic Fabry-Perot accelerometer[J]. *Chinese Physics B*, 2025, 34(7): 074203.
- [17] HUANG Y G, TANG F, MA D W, *et al.*. Design, fabrication, characterization, and application of an ultra-high temperature 6H-SiC sapphire fiber optic vibration sensor[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 6802512.
- [18] CUI Y, JIANG Y, ZHANG Y T, *et al.*. Sapphire optical fiber high-temperature vibration sensor[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 1056-1065.
- [19] SU CH X, JIA P G, ZHAO A H, *et al.*. Temperature-decoupled single-crystal MgO Fiber-Optic Fabry-Perot vibration sensor based on MEMS technology for harsh environments[J]. *Micromachines*, 2024, 15(5): 616.
- [20] WANG W H. Fabry-Perot interference fiber acoustic wave sensor based on laser welding all-silica glass[J]. *Materials*, 2022, 15(7): 2484.
- [21] QIAN J, JIA P A, REN Q Y, *et al.*. An accelerometer based on all silica in-line fiber Fabry-Perot etalon for high temperature up to 800 °C[J]. *Micromachines*, 2022, 13(4): 548.
- [22] LIU J, QIAN J, ZHAO Q R, *et al.*. All-silica optical fiber Fabry-Perot vibration sensor based on MEMS and Laser Welding for High Temperature up to 800 °C[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2026, 399: 117497.
- [23] LI CH X, ZHAO X Y, QI H CH, *et al.*. Integrated fiber-optic Fabry-Perot vibration/acoustic sensing system based on high-speed phase demodulation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 169: 110131.
- [24] JIA P G, WANG D H, YUAN G, *et al.*. An active temperature compensated fiber-optic Fabry-Perot accelerometer system for simultaneous measurement of vibration and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(6): 2334-2340.
- [25] LIU H, JIA P G, SU CH X, *et al.*. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot vibration sensor based on single-crystal sapphire[J]. *Sensors*, 2023, 23(10): 4952.

作者简介:



贾平岗(1982—),男,陕西宝鸡人,博士,教授,博士生导师,主要从事极端环境光纤传感技术研究。主要学习经历:2006年7月毕业于中国矿业大学理学院获应用物理学学士学位;2013年6月毕业于重庆大学光电工程学院获仪器科学与技术博士学位;2013年9月开始工作于中北大学仪器与电子学院;2022年9月开始工作于中北大学半导体与物理学院。E-mail: pgjia@nuc.edu.cn