文章编号　1004-924X(2024)21-3174-10

# 复合腔高温法珀加速度传感器的设计与实验

秦　锋，郑淳淳，谭佳航，王　宁*

（重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室，重庆 400044）

**摘要**：针对铅铋堆高温高压液态流动金属环境下（500 ℃，2 MPa），堆内组件流致振动磨损监测中高灵敏度、小量程振动监测的需求，提出了一种基于MEMS工艺的复合腔高温法珀加速度传感器。依据十字梁-质量块敏感结构的力学模型，分析了不同结构参数对传感器灵敏度、量程和一阶固有频率的影响，从而确定敏感结构的尺寸参数。然后，采用双面键合工艺实现复合腔传感器芯片的加工，并完成传感器的封装及制作。最后，搭建传感器测试平台，测试了传感器的动态特性、灵敏度、量程及温度特性。实验结果表明：传感器的工作温度可达 500 ℃，在 2～30 Hz 的频率内能够实现 7.69 nm/$g$ 的灵敏度，量程为 −11$g$～11$g$，分辨率为 0.04$g$。该加速度传感器能够满足铅铋堆内的流致振动测量的需求，有望实现燃料组件磨损状态的有效监测。

**关　键　词**：加速度传感器；复合腔；高温；振动测量

**中图分类号**：TP212　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.37188/OPE.20243221.3174

# Design and experiment of high temperature Fabry-Perot acceleration sensor with composite cavity

QIN Feng, ZHENG Tingting, TAN Jiahang, WANG Ning*

(*Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems*, *Ministry of Education*, *College of Optoelectronic Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*)

* *Corresponding author*, *E-mail*: *ningw@cqu.edu.cn*

**Abstract**: This study presents the development of a novel MEMS-based Fabry-Perot accelerometer with a composite cavity, designed for high-sensitivity, small-range vibration monitoring in the extreme conditions (500°C, 2 MPa) of lead-bismuth reactors. To optimize the sensor's performance, a detailed analysis was conducted using a mechanical model of a cross-beam and mass block structure to evaluate the influence of structural parameters on sensitivity, measurement range, and resonant frequency. This analysis guided the determination of optimal design parameters for the sensitive structure. The chip structure, featuring a composite cavity, was fabricated through a precise double-sided bonding process, ensuring the achievement of the required mechanical properties and thermal stability. Following fabrication, the sensor was assembled and manufactured to conform to stringent design specifications. A dedicated testing platform was established to evaluate the sensor's dynamic characteristics, sensitivity, operational range, and thermal performance under high-temperature conditions. Experimental results demonstrated the sensor's robust functionality, maintaining performance at temperatures up to 500 ℃, and achieving a high sensitivity of

**收稿日期**：2024-05-11；**修订日期**：2024-06-26.

**基金项目**：国家自然科学基金面上项目（No. 51875067）

7.69 nm/$g$ within a frequency range of 2-30 Hz. The device provides a measurement range from −11$g$ to +11$g$ with a resolution of 0.04$g$, enabling precise detection of flow-induced vibrations critical for wear monitoring in reactor components. These attributes enable effective assessment of the wear state of fuel assemblies, a key factor in reactor safety and operational reliability. The accelerometer's high sensitivity and operational reliability underscore its potential as an advanced tool for early detection of vibration-induced component wear in extreme environments. This development marks a significant contribution to improving reactor safety and efficiency, offering a powerful solution for proactive maintenance and monitoring in lead-bismuth reactors.

**Key words**: accelerometer; composite cavity; high temperature; vibration measurement

## 1　引　言

核能是清洁、安全、高效的能源，随着人们对能源需求的增长，建立健全预防核事故发生的安全机制成为重要议题。燃料组件是核反应堆堆芯中最重要的部分，冷却剂对燃料组件的冲刷会引起流致振动，一旦产生磨损失效将引发严重的核泄漏事故[1]。铅铋反应堆作为第四代核反应堆的代表堆型，正处于从研发走向工程应用的关键阶段[2]。因此，在热工水力实验中开展针对铅铋反应堆燃料组件的流致振动实验，监测微振动对组件的磨损，对于分析燃料组件的结构完整性具有重要意义。

现阶段对振动信号监测的加速度传感器大多为电类加速度传感器，如压电式、电容式、压阻式以及MEMS加速度传感器[3-6]。相比之下，光纤法珀加速度传感器具有抗电磁干扰能力强、结构简单、耐高温等优势[7-10]，因此，对于高温高压下铅铋反应堆中燃料组件的振动监测，光纤法珀加速度传感器具有很好的适用性。

近年来，研究人员围绕光纤法珀加速度传感器做了大量的研究。Huang等[11]基于相位解调设计了一款直径为11.5 mm的圆形加速度传感器，30～180 Hz内灵敏度为17.55 μm/$g$，分辨率为2.8 μ$g$，可用于中低频率的振动信号监测。Cui等[12]提出一种具有外征法珀干涉仪结构的蓝宝石光纤高温加速度传感器，在0～10$g$内灵敏度为20.91 nm/$g$，该传感器可在室温至1 500 ℃内工作。Wang等[13]提出一种基于法珀干涉仪的高灵敏度光纤加速度传感器，该传感器在频率为300 Hz时的灵敏度为3.81 nm/$g$，分辨率为0.263 m$g$。Qu等[14]采用20 mm的球形外框架和三维弹簧-质量结构作为传感元件，在光纤表面和质量块之间形成3个法珀腔，在1～80 Hz的工作频段下，灵敏度为42.6 dB re rad/$g$，横向灵敏度小于3%。Liu等[15]采用紫外激光烧蚀和三层直接键合工艺研制出一种高温法珀加速度传感器，在20 ℃下，2$g$～20$g$内的灵敏度为0.876 nm/$g$，高温非线性误差为0.87%。Li等[16]采用传递矩阵法和有限元分析研究了一种具有金属法珀微腔的加速度传感器，量程为−251$g$～251$g$，灵敏度为20.79 nm/$g$。Mahissi等[17]利用回字形悬臂梁，与光纤端面形成法珀腔，在100～1 000 Hz内传感器的灵敏度为370 mV/$g$，可在室温至800 ℃工作。

现有大多数光纤法珀加速度传感器采用法珀单腔结构，而光纤的高温粘接工艺会导致光纤随外界温度变化发生不可逆的轴向伸缩效应，导致传感器的温度重复性较差，降低传感器的高温测量精度。本文针对高温高压液态金属环境下的微振动监测，在法珀单腔的基础上加入硅基底形成法珀复合腔结构，设计了一种基于MEMS工艺的复合腔高温法珀加速度传感器。该传感器有效避免了轴向伸缩效应的不可逆影响，提高了传感器的温度重复性和精度，有望实现铅铋堆中燃料组件磨损状态的有效监测。

## 2　原　理

### 2.1　传感器光学特性分析

如图1所示，构成光纤法珀加速度传感器的

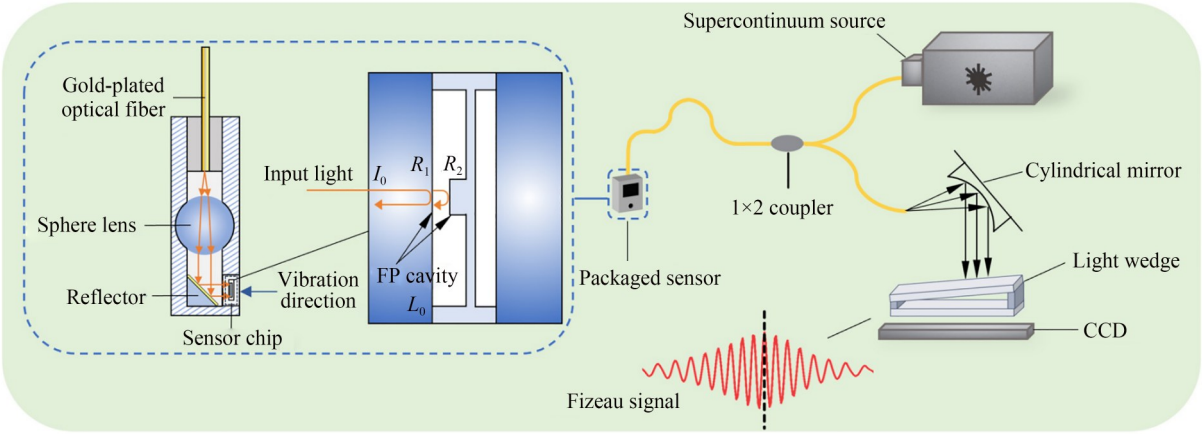



图 1　光纤法珀加速度传感器结构

Fig. 1　Structure diagram of fiber Fabry-Perot accelerometer

法珀腔由顶层硅基底的内表面和质量块的上表面组成。当传感器受激振动时，由于惯性力的作用，质量块相对于顶层硅基底移动，法珀腔的长度发生改变。

法珀腔内会发生低细度双光束干涉，本文采用基于斐索干涉仪的解调系统，根据干涉仪的白光干涉解调模型，可得探测器采集到的光强信号 $I_{\mathrm{CCD}}(x)$[18]为：

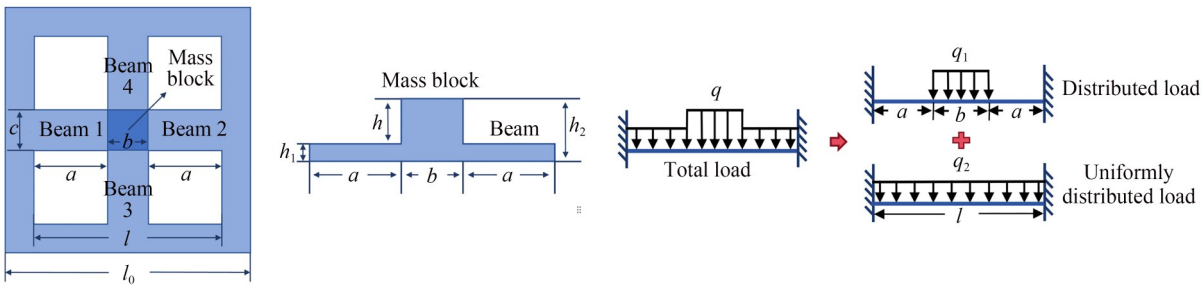
$$I_{\mathrm{CCD}}=\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}}\frac{R_1+R_2+2\sqrt{R_1R_2}\cos\dfrac{4\pi nD}{\lambda}}{1+R_1R_2+2\sqrt{R_1R_2}\cos\dfrac{4\pi nD}{\lambda}}\cdot\frac{(1-\sqrt{R_3R_4}\,)^2}{1+R_3R_4-2\sqrt{R_3R_4}\cos\dfrac{4\pi nx\tan\theta}{\lambda}}I_0\mathrm{e}^{-\frac{(\lambda-\lambda_p)^2}{B_4^{2.4}}}\mathrm{d}\lambda. \quad (1)$$

斐索干涉仪的解调模型本质为法珀腔腔长与光程差的匹配。腔长可以通过解调光强信号的极大值所处的像元位置得出，进而通过法珀腔腔长的变化量可得质量块的相对位移，实现对振动的测量。

## 2.2　敏感结构的挠度分析

在加速度传感器的敏感结构中，由振动引起的十字梁中心区域的挠度变化即为法珀腔的腔长变化，因此需对敏感结构进行挠度分析。采用对称性原则设计敏感结构是降低加速度传感器横向灵敏度的一种有效方法。如图 2(a)～2(b)所示，质量块位于十字梁的中央，质量块和十字梁共同构成加速度传感器的敏感结构，敏感结构采用硅作为材料。敏感结构中，单边梁的长度为 $a$，宽度为 $c$，厚度为 $h_1$，质量块的长、宽度均为 $b$，厚度为 $h$，质量块和梁的总厚度为 $h_2$，敏感结构长为 $l$，敏感结构外框边长为 $l_0$。

根据工程应用力学[19]中梁变形的叠加原理，载荷 $q$ 作用于梁上产生的转角或挠度，等于荷载 $q_1$ 和 $q_2$ 单独作用时所产生的转角或挠度的叠加，




(a) 俯视图　(b) 正视图　(c) 叠加原理的应用

(a) Top view　(b) Front view　(c) Application of superposition principle

图 2　十字梁-质量块敏感结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of cross-beam mass-sensitive structure

即分布和均布载荷的叠加。叠加原理如图 2(c)所示。分布载荷作用于十字梁时，$q_1=m_1a_0/b$，$a_0$为加速度，$m_1$为去掉中心区域内四段梁后的质量，$m_1=\rho((b-c)^2h_1+b^2h)$，$\rho$为硅材料的密度。

由于十字梁结构和载荷方式的对称性，故 4 个支座反力大小和方向均相同，为 $q_1b/4$。

在分布载荷作用下，十字梁水平方向上各段的载荷由分段函数表示为：

$$q=\begin{cases}0 & (0\leqslant x<a)\\ -\dfrac{q_1}{2} & (a\leqslant x<a+b)\\ 0 & (a+b\leqslant x<l)\end{cases}. \tag{2}$$

依据梁的截面内力分析方法，分布载荷 $q(x)$、剪力 $F_s(x)$和弯矩 $M(x)$的微分关系为：

$$\frac{\mathrm{d}^2M(x)}{\mathrm{d}x^2}=\frac{\mathrm{d}F_s(x)}{\mathrm{d}x}=q(x). \tag{3}$$

十字梁不同位置对应的截面惯性矩可表示为：

$$\begin{cases}I_{z1}=\dfrac{ch_1^3}{12}\\ I_{z2}=\dfrac{bh_2^3}{12}\end{cases}, \tag{4}$$

其中：$I_{z1}$为梁的截面惯性矩，$I_{z2}$为梁和质量块总的截面惯性矩。

边界条件为：

$$\begin{aligned}&\theta_1|_{x=0}=\theta_3|_{x=l}=\omega_1|_{x=0}=\omega_3|_{x=l}=0\\ &\theta_1|_{x=a}=\theta_2|_{x=a};\ \theta_2|_{x=a+b}=\theta_3|_{x=a+b}\\ &\omega_1|_{x=a}=\omega_2|_{x=a};\ \omega_2|_{x=a+b}=\omega_3|_{x=a+b}\end{aligned}. \tag{5}$$

设 $a_0$为 1$g$，$l_0$为 8 mm，$l$为 7.2 mm，$a$为 2.7 mm，$b$为 1.8 mm，$c$为 0.18 mm，$h_2$为 0.38 mm，$h_1$为 0.06 mm。硅材料的弹性模量为 $1.9\times10^{11}$，密度为 $2.33\times10^3$ kg/m$^3$。

由式(2)～式(5)可得十字梁的挠度曲线方程为：

$$\omega=\begin{cases}1.848x^3-7.484\times10^{-3}x^2 & (0\leqslant x<a)\\ -0.202x^4+2.909\times10^{-3}x^3-1.178\times10^{-5}x^2+9.429\times10^{-9}x-1.818\times10^{-8} & (a\leqslant x<a+b)\\ -1.848x^3+3.243\times10^{-2}x^2-1.796\times10^{-4}x+3.017\times10^{-7} & (a+b\leqslant x<l)\end{cases}. \tag{6}$$

同理，可得均布载荷作用于十字梁时的挠度曲线方程为：

$$\omega'=-16.709x^4+2.406^{-1}x^3-8.662\times10^{-4}x^2. \tag{7}$$

由式(7)可得，十字梁中心处的总挠度为 $-2.1\times10^{-8}$ m，理论结果与数值计算结果吻合。

### 2.3　敏感结构的参数对传感器性能的影响

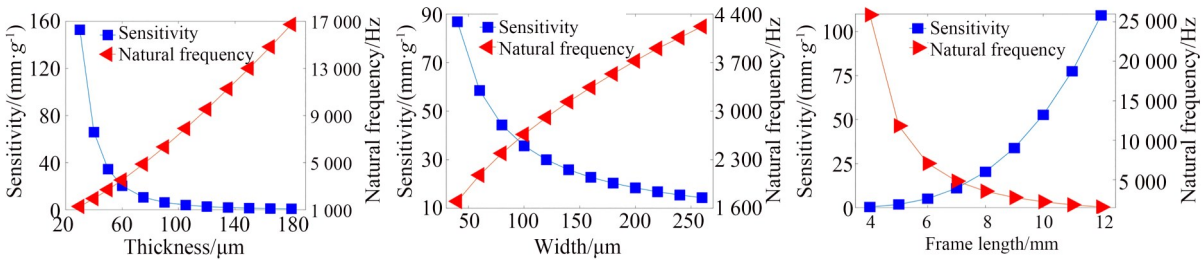
在设计敏感结构之前，研究敏感结构的参数对传感器性能的影响具有重要意义。灵敏度和量程是评估本文传感器最重要的两个性能指标。采用单一变量原则分析十字梁的厚度、宽度和敏感结构外框边长对传感器灵敏度的影响。

如图 3 所示，传感器的灵敏度与敏感结构的参数密切相关，传感器的灵敏度随着十字梁厚度、宽度的减小而增大；随着敏感结构外框边长的增大而增大。从变化趋势来看，敏感结构外框边长对灵敏度的影响最大，当敏感结构外框边长从 4 mm 增大到 12 mm 时，灵敏度提高了 280 倍左右。十字梁厚度对灵敏度的影响次之，宽度影响最小。因此，通过增大敏感结构外框边长来提高灵敏度是最有效的方法。

传感器的量程分析应考虑两方面影响因素。首先，硅材料在极限工作状态下通常以断裂的方式屈服，在 500 ℃工作环境下的屈服强度为 120 MPa，如果超过它的屈服极限，敏感结构会发生断裂，传感器的量程达到极限。其次，当硅片有效光斑照射面积内的挠度超过宽带光源中心波长的 1/8 时，传感器信号的对比度变差，解调难度增大，传感器会发生光学失效[20]。因此，传感器的量程与敏感结构的屈服极限和硅片形变导致的光学失效有关，以上参数决定了传感器的量程。

本文采用单一变量原则分析十字梁的厚度、宽度和敏感结构外框边长对传感器一阶固有频率的影响。如图 3 所示，传感器的一阶固有频率与敏感结构的参数密切相关，传感器的一阶固有频率随着十字梁厚度、宽度的增大而增大；随着敏感结构外框边长的增大而减小。各结构参数变化对传感器一阶固有频率的影响也不同，敏感结构外框边长的影响最大，十字梁厚度次之，宽度最小。

为满足铅铋堆组件高灵敏度、小量程的振动监测需求，综合分析十字梁的厚度、宽度、敏感结构外框边长对传感器性能的影响以及 MEMS 加工水平限制等因素，最终确定了传感器敏感结构的具体结构参数，如表 1 所示。




(a) 随厚度变化
(a) Variation with thickness

(b) 随宽度变化
(b) Variation with width

(c) 随边长变化
(c) Variation with frame length

图 3　敏感结构参数对传感器灵敏度和一阶固有频率的影响

Fig. 3　Impact of sensitive structural parameters on sensor sensitivity and first natural frequency

**表 1　传感器敏感结构参数**

Tab. 1　Sensitive structural parameters of sensor(mm)

| Description | Value |
|---|---|
| Side length of sensitive structure frame ($l_0$) | 8 |
| Length of the sensitive structure ($l$) | 7.2 |
| Thickness of the mass block ($h$) | 0.35 |
| Side length of the mass block ($b$) | 1.8 |
| Length of the cantilever beam ($a$) | 2.7 |
| Thickness of the cross-beam ($h_1$) | 0.08 |
| Width of the cross-beam ($c$) | 0.18 |

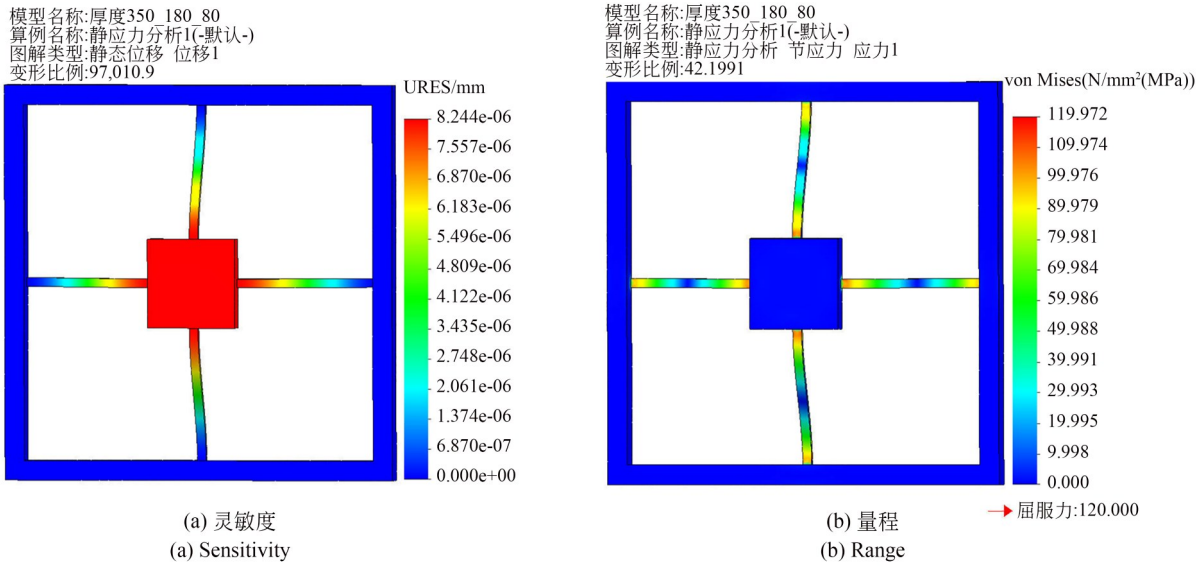
## 3　传感器性能参数分析

### 3.1　灵敏度

单位加速度下十字梁中心区域的挠曲变形值即为传感器的灵敏度。在 SolidWorks 中采用静应力分析，设置引力值为 9.81 m/s$^2$，对传感器结构进行仿真。如图 4(a)所示，敏感结构在 1$g$ 加速度信号下的挠曲变形为 8.244×10$^{-6}$ mm，故传感器的灵敏度为 8.244 nm/$g$。

### 3.2　量　程

在 SolidWorks 中采用静应力分析，如图 4(b)所示，可得敏感结构在 120 MPa 屈服强度下对应的加速度值，即传感器在屈服极限下的量程。本文设计的传感器所使用的宽带光源波长为 500～900 nm，中心波长为 700 nm，由于硅片有效光斑照射面积内的挠度不能超过宽带光源中心波长的 1/8，结合仿真结果得到的灵敏度可得传感器在达到光学失效前的量程。综上，传感器的量程为－10$g$～10$g$。




(a) 灵敏度
(a) Sensitivity

(b) 量程
(b) Range

图 4　传感器的性能仿真结果

Fig. 4　Performance simulation results of sensor

### 3.3　模　态

模态分析可反映出传感器的振动响应特性并得到其固有频率,从而确定传感器的工作带宽。传感器的1~4阶模态振型的固有频率分别为5 573,17 586,17 595,37 861 Hz,而铅铋堆振动信号的频率在30 Hz以内,因此,本文所设计的传感器的工作带宽能够充分满足铅铋堆中的振动监测需求。

## 4　传感器的加工封装与实验测试

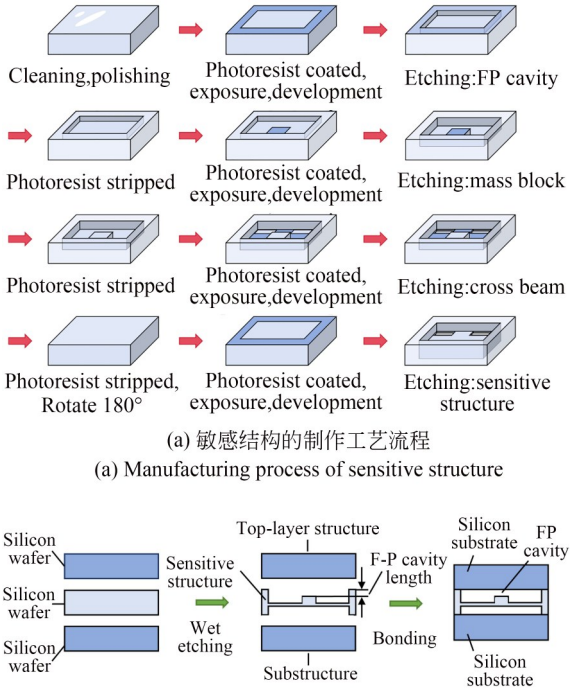
### 4.1　传感器加工

为避免高温对法珀腔的影响,本文在法珀单腔的基础上加入一个硅基底形成法珀复合腔结构。顶层硅基底与单腔结构分别构成了以硅为介质和以真空为介质的复合腔。有别于单腔结构,复合腔的光纤端面不再作为反射端面,光纤与法珀腔在空间上相互分离,从而有效避免轴向伸缩效应的不可逆影响。此外,尽管硅基底同样会在高温下产生伸缩效应,引起法珀腔初始腔长变化,产生零点漂移,但由于硅材料的轴向伸缩效应是可逆的,通过标定不同温度下法珀腔的初始腔长值,可确保振动信号测量结果的稳定性。

如图5(a)所示,在传感器敏感结构的加工过程中先后进行了4次湿法刻蚀,依次刻蚀出法珀腔的深度、质量块、十字梁并最终形成完整的敏感结构。在湿法刻蚀工艺中,刻蚀的时间、溶液的浓度会影响法珀腔的尺寸以及两个平行面的表面面形,因此,通过大量实验确定刻蚀溶液的浓度与时间,从而确保构成法珀腔的两个面的平行度和表面粗糙度。

如图5(b)所示,本文所设计的加速度传感器芯片采用三层结构,顶层和底层分别采用同种规格的硅基底,中层为十字梁-质量块一体式敏感结构。采用硅-硅直接键合工艺进行加工,直接键合工艺通过高温处理将两片硅晶圆直接键合,不需要任何黏结剂或外加电场,工艺简单,加工性能好。

传感器芯片的三层结构可提高敏感结构在真空环境中的一致性和重复性,使它在高温高压下具有较高的稳定性。此外,当燃料组件振幅较大时,顶层和底层硅基底对中层敏感结构起到限位作用,避免敏感结构因过载发生断裂。




(a) 敏感结构的制作工艺流程
(a) Manufacturing process of sensitive structure

(b) 传感器芯片的制作工艺流程
(b) Manufacturing process of sensor chips

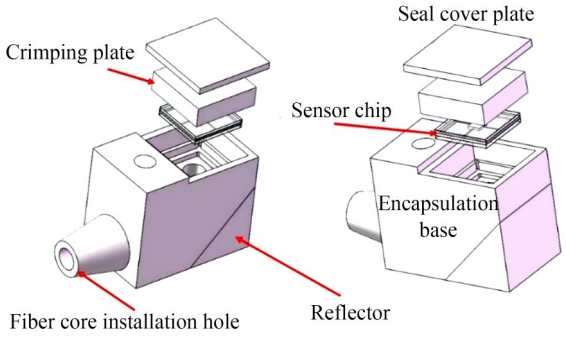
图5　传感器的加工工艺流程
Fig. 5　Processing flow of sensor

### 4.2　传感器封装

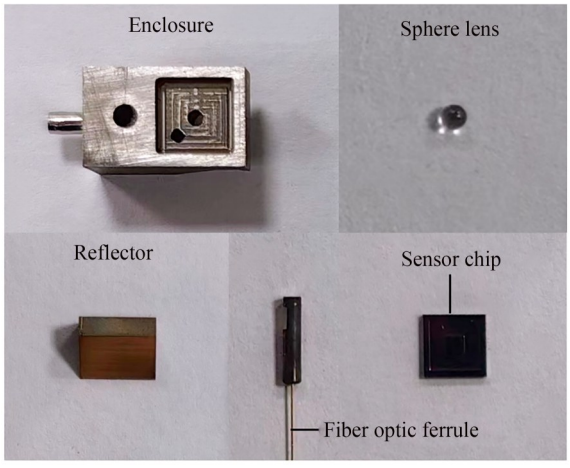
铅铋堆内的被测燃料棒之间空间狭窄,且传感器的轴线方向须与燃料棒的轴线方向垂直,这对传感器的体积提出了微型化的要求。另外,本文所涉及的应用环境为500 ℃,2 MPa的高温、高压环境,传感器的封装结构和材料对于传感器的稳定性至关重要。

传感器采用镀金光纤实现光信号传输,如图1所示。为避免光纤的90°弯挠,在传感器的封装结构中增加一个45°金属反射镜,反射镜使内部光路发生90°折转,在保证传感器可竖直安装的同时进一步缩小了传感器的体积。为提高光在反射镜表面的反射率,对反射镜的表面做了金属抛光处理。此外,要尽可能实现全部干涉光在45°反射镜上发生90°光路折转,干涉光应为平行光,而光纤的出射光具有一定的数值孔径,实际上是一种发散光,因此,需要在光路中增加一个球透镜,以实现光纤出射光的准直,提高传感器的回光效率。

如图 6(a)所示，光纤插芯通过传感器的外部接口垂直伸入至传感器内部球透镜的前方，利用激光焊接工艺实现光纤插芯与封装外壳的密封焊接，同时起到固定球透镜位置的作用。传感器芯片位于金属反射镜正上方，利用玻璃焊料烧结在封装底座上。反射镜与封装外壳采用 4J29 可伐合金材料。该材料具有抗腐蚀、耐高温的特性，且其热膨胀系数与硅接近，在高温环境下，可有效避免因热膨胀系数差异过大，传感器芯片发生损坏的可能。最外层利用密封盖板将封装结构内部与外部环境隔绝，保证传感器本体的密封性，可有效抵抗铅铋金属的流体冲刷。在该封装结构中，有 3 个密封位置：光纤插芯安装孔、金属反射镜与封装底座、密封盖板与封装底座，这 3 个密封位置均采用激光焊接工艺实现高温密封。




(a) 传感器的封装示意图
(a) Schematic diagram of sensor packaging




(b) 传感器实物
(b) Physical sensor

图 6　复合腔高温法珀加速度传感器的内部封装与实物图

Fig. 6　Internal packaging and actual image of high temperature acceleration sensor with composite cavity

制作完成的传感器如图 6(b)所示，分别为传感器的封装外壳、球透镜、金属反射镜、光纤插芯和传感器芯片。

### 4.3　性能测试

为了测试复合腔高温法珀加速度传感器的各项性能指标，初步验证传感器的设计方案，本文搭建了传感器常温下的性能测试平台，如图 7 所示。测试平台分为激励系统、被测传感器和采集模块三部分。激励系统由信号发生器、功率放大器和激振台组成，能够产生不同强度与频率的振动信号并带动传感器一同振动。被测传感器为标准加速度传感器和复合腔高温法珀加速度传感器。采集模块包括电荷采集器和基于斐索干涉仪的解调系统，前者采集标准加速度传感器的输出信号，后者对复合腔高温法珀加速度传感器的输出信号进行采集与解调。

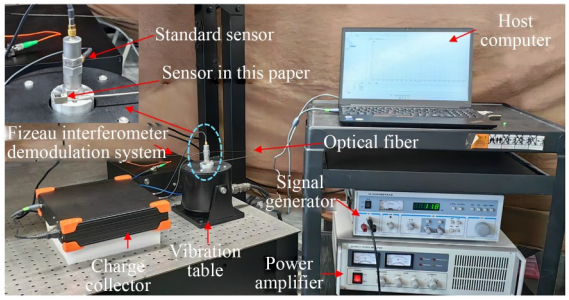


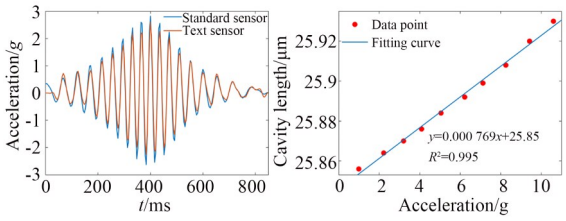

图 7　传感器的常温性能测试平台

Fig. 7　Ambient temperature performance test platform for sensor

首先对本文传感器进行常温下的性能测试，通过与标准传感器作比对，即可验证本文传感器的动态性能。将信号发生器设置为扫频模式，该模式下输出信号频率在单位时间内呈线性递增趋势。设置频率下限为 2 Hz，上限为 30 Hz，采集本文传感器和标准传感器的输出信号，得到本文传感器和标准传感器的扫频曲线，如图 8(a)所示。在 2～30 Hz 的扫频信号下，本文传感器的输出波形与标准传感器一致，具有较好的动态性能。

为测试本文传感器的灵敏度，在不同加速度的振动信号下测量法珀腔的腔长值，以获取传感器的灵敏度。设置信号发生器的频率为 20 Hz，分别输入 10 个不同峰值的正弦加速度信号，测量本文传感器输出的腔长峰值，测量结果如图 8(b)

所示，传感器的灵敏度为 7.69 nm/$g$，线性度为 0.995。结合传感器的灵敏度与斐索干涉仪的分辨率测试结果，可得出传感器的分辨率为 0.04$g$。




(a) 动态性能　(b) 灵敏度
(a) Dynamic performance　(b) Sensitivity

图 8　传感器的常温性能测试

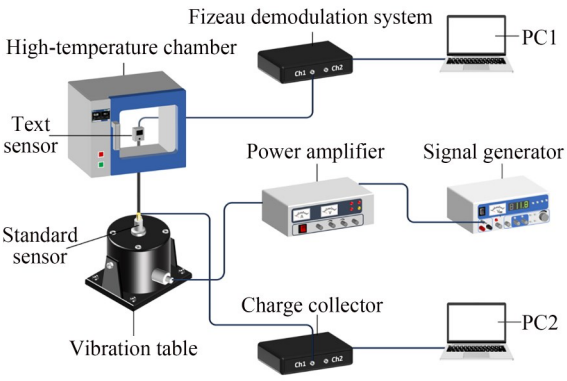
Fig. 8　Ambient temperature performance test of sensor

由于本文传感器需应用于高温环境中，因此需要对传感器进行高温性能测试。测试平台如图 9(a)所示，标准传感器置于激振台上，本文传感器置于高温箱中，两个传感器刚性连接。

首先对传感器进行温度灵敏度测试。将传感器放入高温箱中，以 100 ℃为步长，温度从 25 ℃逐渐升高至 500 ℃，测量结果如图 9(b)所示。随着温度的升高，传感器的灵敏度逐渐增大，这主要是因为温度的升高对硅材料的杨氏模量和热膨胀系数产生了一定的影响。

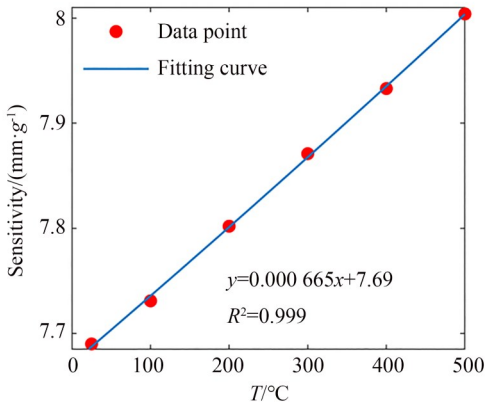
在此基础上进行了 10 组重复性测试，验证传感器在不同温度下的稳定性和一致性，测试结果如图 9(c)所示。在多次加热冷却实验中，传感器法珀腔长度的变化量是相同的，且在同一温度下法珀腔长的最大误差为±0.736 nm。在回到室温后，传感器的法珀腔长度可以恢复到初始状态，表明该传感器具有良好的温度重复性。根据初始腔长与温度的标定曲线可以确定初始腔长随温度变化的关系，以便对高温下的腔长测量结果进行校正补偿，从而保证传感器在高温下的测量精度。

本文传感器需满足铅铋堆内的高压环境，应验证传感器的高压稳定性。在 0.5，1.0，1.5 及 2.0 MPa 下，对传感器的法珀腔初始腔长进行测量。随着压强的变化，传感器的腔长变化量均小于 0.3 nm，该变化量与解调分辨率一致，表明压强变化对传感器的输出影响极为有限，可以忽略



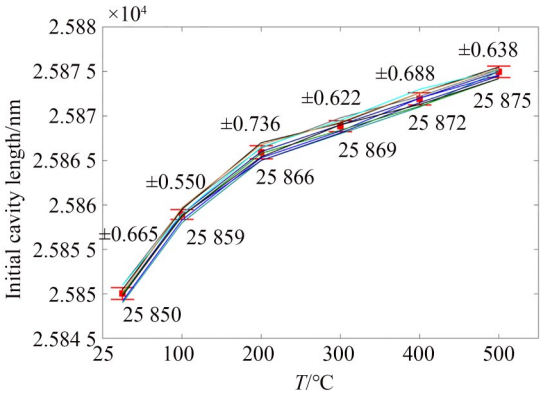

(a) 传感器高温性能测试平台

(a) High temperature performance test platform for sensor




(b) 温度灵敏度测试

(b) Temperature sensitivity test




(c) 重复性测试

(c) Repeatability test

图 9　传感器的高温性能测试

Fig. 9　High temperature performance test of sensor

不计。因此，本文传感器在高达 2 MPa 的压力环境下能够保持稳定的工作性能。

在传感器的量程测试中，将设置信号发生器的频率为 20 Hz，分别输入 12 个不同峰值的

正弦加速度信号，测量本文传感器的输出。图10为本文传感器在峰值为12.48$g$，11.30$g$，6.22$g$，2.22$g$的正弦加速度信号下的输出曲线。

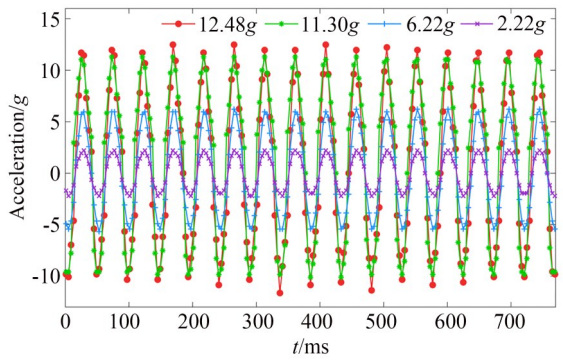



图10　本文传感器在不同加速度下的输出曲线

Fig. 10　Output curves of text sensor at different accelerations

如图10所示，在输入加速度峰值为11.30$g$，6.22$g$，2.22$g$时，传感器的输出特性良好，波形未出现失真。在输入加速度为12.48$g$时，本文传感器的输出峰值开始跳变，波形出现失真，因此本文传感器的满量程输出为输入加速度峰值为11.30$g$时对应的腔长值，即25.938 μm。结合灵敏度拟合结果可得，本文传感器的量程为−11$g$～11$g$。

## 5　结　论

本文根据铅铋堆高温高压液态流动金属环境下，堆内组件流致振动磨损监测的需求，提出了一种复合腔高温法珀加速度传感器。通过建立传感器敏感结构的力学模型，分析了敏感结构材料和结构尺寸对传感器性能参数的影响。结合MEMS加工工艺设计了敏感结构的参数，完成了传感器的加工、封装和制作。最后，搭建了传感器性能测试平台，利用解调仪实现了复合腔高温法珀加速度传感器的性能测试。实验结果表明：该加速度传感器可以稳定工作在500 ℃下，在2～30 Hz的频率内能够实现7.69 nm/$g$的灵敏度，量程为−11$g$～11$g$，分辨率为0.04$g$，具有良好的低频特性和温度特性，能够满足铅铋堆内的振动测量需求，有望实现燃料组件磨损状态的有效监测。

**参考文献：**

[1] 喻丹萍，马建中，席志德，等. 反应堆堆内构件流致振动试验研究综述[J]. 核动力工程，2016，37(S2)：47-51.
YU D P，MA J ZH，XI ZH D，*et al*. Site measurement of flow-induced vibration of reactor internal of unit 1 of Qinshan phase II NPP project[J]. *Nuclear Power Engineering*，2016，37(S2)：47-51.(in Chinese)

[2] 樊亦江. 铅铋快堆堵流事故工况下组件内流动传热数值模拟[D]. 合肥：中国科学技术大学，2022.
FAN Y J. *Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer in the Assembly of Lead-bismuth Fast Reactor Under the Condition of Plugging Accident*[D]. Hefei：University of Science and Technology of China，2022.(in Chinese)

[3] GE C，CRETU E. A polymeric piezoelectric MEMS accelerometer with high sensitivity，low noise density，and an innovative manufacturing approach [J]. *Microsystems & Nanoengineering*，2023，9：151.

[4] POURNIA M，KOLAHDOUZ M，FATHIPOUR M，*et al*. Empirical model for substrate resistivity influence on MEMS capacitive accelerometer performance [J]. *Sensors and Actuators A：Physical*，2023，358：114422.

[5] YU M Z，ZHAO L B，HAN X G，*et al*. Development of a high-performance microaccelerometer with position independent pure-axial stressed piezoresistive beams [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*，2023，70(8)：8546-8556.

[6] 贾书海，申鹏程，汪永林，等. 菲涅尔波带片及其在光学加速度传感器中的应用[J]. 光学 精密工程，2016，24(10s)：267-271.
JIA SH H，SHEN P CH，WANG Y L，*et al*. Fresnel zone plate and its application in optical acceleration sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*，2016，24(10s)：267-271.(in Chinese)

[7] 王宁，朱永，张洁. 高温高压环境下光纤法布里-珀罗传感技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(11)：3788/LOP230722.
WANG N，ZHU Y，ZHANG J. Research status of

fiber fabry-perot sensing technology under high temperature and high pressure environment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(11): 3788/LOP230722.(in Chinese)

[8] LU Q B, WANG Y N, WANG X X, *et al*. Review of micromachined optical accelerometers: from mg to sub-μg [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(3): 200045.

[9] ZHU C, ZHENG H K, MA L M, *et al*. Advances in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric physical and mechanical sensors: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(7): 6406-6426.

[10] ZHENG B L, LIU H J, PAN Z, *et al*. A high-sensitivity dual-axis accelerometer with two FP cavities assembled on single optical fiber[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9614.

[11] HUANG J Y, ZHANG Y J, GUO M, *et al*. Ultra-high-resolution phase demodulation based miniature fiber-optic accelerometer at low and medium frequencies [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175: 110753.

[12] CUI Y, JIANG Y, ZHANG Y T, *et al*. Sapphire optical fiber high-temperature vibration sensor[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 1056-1065.

[13] WANG D, WU Y, SONG Y M, *et al*. High sensitivity fiber optic acceleration sensor based on Fabry-Perot interferometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 72: 102989.

[14] QU Z Y, LU P, ZHANG W J, *et al*. Miniature tri-axis accelerometer based on fiber optic Fabry-Pérot interferometer[J]. *Optics Express*, 2022, 30(13): 23227-23237.

[15] LIU H, JIA P G, SU C X, *et al*. High-temperature fiber-optic fabry-perot vibration sensor based on single-crystal sapphire[J]. *Sensors*, 2023, 23(10): 4952.

[16] LI G H, CAI C C, ZHANG Y, *et al*. High sensitivity optical MEMS accelerometer based on a metal fabry-Pérot microcavities wavelength modulation system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(4): 4304-4314.

[17] MAHISSI M, TONG X L, ZHANG C, *et al*. Study on the vibration performances for a high temperature fiber F-P accelerometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 62: 102471.

[18] TAN J H, WANG Q, WANG N, *et al*. Hardware optical correlation method for dynamic detection of micrometer gaps with sub-nanometer resolution[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32660-32669.

[19] 杨咸启, 李晓玲, 张伟林. 工程应用力学[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2018.
YANG X Q, LI X L, ZHANG W L. *Engineering Applied Mechanics*[M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2018.(in Chinese)

[20] 邵志强. 蓝宝石光学法珀高温压力传感器关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
SHAO ZH Q. *Research on Key Technologies of Sapphire Optical Fabry-perot High Temperature Pressure Sensor*[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.(in Chinese)

**作者简介:**

**秦　锋**(1992－),男,河南洛阳人,博士研究生,2017年于上海海事大学获得硕士学位,主要从事光纤法珀加速度传感器方面的研究。E-mail: 20230801026@stu.cqu.edu.cn

**通讯作者:**

**王　宁**(1983－),河南南阳人,博士,教授,博士生导师,2011年于重庆大学获得博士学位,主要从事极端环境下的传感技术、光谱仪器研制及测量技术方面的研究。E-mail: ningw@cqu.edu.cn