

文章编号: 1671-7449(2026)05-0583-09

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(5): 583-591.

基于SOI的MEMS高温压力传感器

郝豹^{1,2}, 包雨豪^{1,2}, 张晓海^{1,2}, 张心茹^{1,2}, 张磊^{1,2*}

(1. 中北大学 微纳器件与系统教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 为满足航空航天、能源工业等领域在高温、振动等恶劣工况下的压力测量需求, 设计了一款基于绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI)材料的压阻式压力传感器。该传感器采用SOI材料的埋氧层实现压敏电阻与基底的电隔离, 解决了传统硅基传感器在高温下因PN结漏电导致的性能退化问题。传感器核心设计包括: 采用E型岛膜结构作为弹性敏感薄膜, 通过有限元仿真优化确定膜片尺寸, 在保证灵敏度的同时降低非线性误差; 完成芯片制备, 通过工艺实现压敏电阻与电极制备; 采用薄膜隔离充油封装工艺, 注入高温硅油传递压力, 避免金迁移对电信号传输的影响。性能测试结果表明, 该传感器满量程过载压力下表现优异, 常温下灵敏度达0.099 mV/kPa/V, 满量程输出99.990 1 mV, 压力迟滞低于0.021 2%FS, 重复性为0.020%FS, 可在高温环境下稳定工作, 满足复杂工况的测量需求。

关键词: 高温压力传感器; 充油式; 有限元分析; 绝缘体上硅

中图分类号: TP212

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026077

引用格式: 郝豹, 包雨豪, 张晓海, 等. 基于SOI的MEMS高温压力传感器[J]. 测试技术学报, 2026, 40(5): 583-591.

Hao Bao, Bao Yuhao, Zhang Xiaohai, et al. High-temperature MEMS pressure sensors based on SOI[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(5): 583-591.

High-Temperature MEMS Pressure Sensors Based on SOI

Hao Bao^{1,2}, Bao Yuhao^{1,2}, Zhang Xiaohai^{1,2}, Zhang Xinru^{1,2}, Zhang Lei^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Micro/Nano Devices and Systems, Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To meet the pressure measurement requirements in harsh conditions such as high temperatures and vibrations in fields like aerospace and energy industry, a piezoresistive pressure sensor based on insulator-on-silicon (SOI) material is designed in this paper. This sensor uses the buried oxygen layer of SOI material to achieve electrical isolation between the piezoresistive element and the substrate, solving the performance degradation problem of traditional silicon-based sensors caused by P-N junction leakage at high temperatures. The core design of the sensor includes: using an E-shaped island membrane structure as the elastic sensitive film, optimizing the membrane size through finite element simulation to ensure sensitivity while reducing non-

【收稿日期】2026-01-23

【修回日期】2026-04-07

【录用日期】2026-04-15

【基金项目】国家科技重大专项(J2022-V-0005-0031)

【作者简介】郝豹(2000—), 男, 硕士生, 主要从事高温压力传感器研究。E-mail: haobao719946817@163.com。

*【通信作者】张磊(1991—), 男, 副教授, 博士, 主要从事微传感器技术研究。E-mail: 20210022@nuc.edu.cn。

linear error; completing the chip fabrication, achieving the preparation of piezoresistive elements and electrodes through the process; adopting the film isolation filled with oil packaging technology, injecting high-temperature silicone oil to transfer pressure, avoiding the influence of gold migration on signal transmission. The performance test results show that this sensor performs excellently under full-scale overload pressure, with a sensitivity of 0.099 mV/kPa/V at room temperature, a full-scale output of 99.990 1 mV, a pressure hysteresis of less than 0.021 2%FS, a repeatability of 0.020%FS, and can work stably in high-temperature environments, meeting the measurement requirements of complex conditions.

Key words: high-temperature pressure sensor; oil-filled type; finite element analysis; silicon on insulator

0 引言

高温压力传感器在许多领域具有广泛的应用与发展需求,在航空航天领域可用于发动机燃料室压力监测,在能源工业领域可用于地热井、核反应堆压力监测,在汽车制造方面可用于涡轮增压系统压力反馈,在民用上可用于测量锅炉、管道、高温反应器内的压力和各种发动机腔体内的压力^[1-4]等。压力传感器应用于以上工况时,不仅需对压力敏感,还要确保高温环境下能够稳定可靠工作。随着微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)的发展,基于MEMS技术的高温压力传感器受到科研人员的青睐,逐渐占领了压力传感器市场^[5]。

常规硅基压力传感器是基于硅压阻效应实现力-电耦合,在结构上,压敏电阻与硅基底之间采用PN结实现电流隔离,虽然硅加工工艺成熟,容易量产,但是PN结的反向漏电流会随着温度的升高而急剧加大,当温度超过150℃时,PN结反向漏电流过大将导致传感器性能严重退化甚至失效^[6]。

为了实现更高温度下的测量,基于绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI)材料的压阻式压力传感器受到了国内外学者的关注和研究^[7]。SOI材料是在顶层硅与硅基底之间引入埋氧层,其压阻式压力传感器采用绝缘性能良好的二氧化硅作为压敏电阻与硅基底电隔离介质^[8],可以避免高温环境下普通硅片扩散电阻PN结漏电失效的现象,且SOI具有高速、低功耗的优点,可以进一步提高传感器的温度性能^[9-10]。

1 压阻式压力传感器工作原理

压阻式压力传感器主要由硅衬底、压敏电阻、背部空腔、金属焊盘和玻璃基座构成,其基于硅压阻效应将力信号转换为电信号,即弹性敏感膜片受外界力作用后发生形变,压敏电阻阻值改变,从而

输出信号发生变化。背部空腔结构的变化会影响输出信号的灵敏度和线性度^[11]。图1所示为SOI压阻式压力传感器的截面图,可以直观地看到背部空腔的设计与结构如何影响传感器的性能。

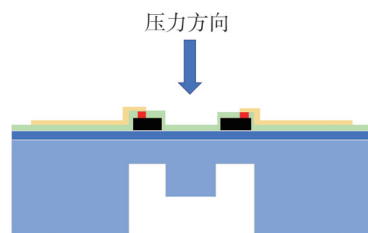


图1 SOI压力传感器截面图

Fig. 1 Cross-sectional view of SOI pressure sensor

具体来说,背部空腔的形状和尺寸会改变膜片的受力分布,进而影响灵敏度和线性响应。这种影响对于高温环境下的传感器性能尤为重要,尤其是当温度变化导致背部空腔的几何形态发生改变时,其对输出信号的影响更加显著。

SOI材料利用SiO₂绝缘层隔离P型硅与N型衬底,替代了传统的PN结电隔离技术,P型器件层与N型衬底之间被隔开,无法产生电流通路^[12],因而具有良好的抗辐射、耐高温等性能。

SOI压阻式压力传感器在SOI晶圆的P型硅层上,采用深硅刻蚀(ICP干法刻蚀)方法刻蚀出4个压敏电阻,这4个压敏电阻连接在一起构成了惠斯通电桥电路,通过检测输出电压的变化值来间接测量外界压力大小,如图2所示。理想情况下,当没有外界压力作用时,4个压敏电阻的阻值相等,电桥平衡,输出电压 $U=0$ 。当存在外界压力时,压阻效应使垂直于膜边的电阻 R_1 和 R_3 在外界压力的作用下产生正增量,平行于膜边的电阻 R_2 和 R_4 在外力作用下产生负增量,且 $|R_1|=|R_2|=|R_3|=|R_4|$,输出电压 U_{out} 为

$$U_{out} = U_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_4} - U_{in} \frac{R_2}{R_2 + R_3} = U_{in} \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \approx U_{in} \frac{\Delta R}{R}, \quad (1)$$

式中: R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为 4 个压敏电阻阻值; ΔR 为电阻受力后的变化值, 且 $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 = \Delta R$; U_{out} 为输出电压; R 为压敏电阻的初始值; U_{in} 为输入电压。

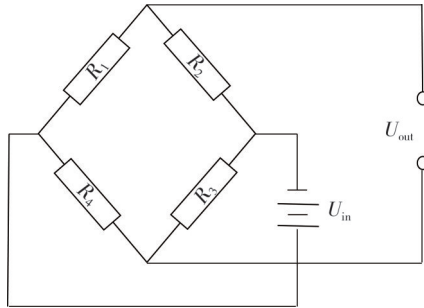


图 2 惠斯通电桥原理图

Fig. 2 Wheatstone bridge schematic diagram

2 芯片设计

2.1 弹性薄膜设计

硅敏感薄膜是压阻式压力传感器感受外界压力变化的主要敏感部件。薄膜的挠度大小与膜片的厚度密切相关, 膜片的厚度直接影响传感器的量程和灵敏度^[13]。薄膜的厚度越大, 膜片的挠度响应通常越小, 从而影响传感器的灵敏度和线性度。芯片的弹性膜片选用正方形敏感薄膜, 常用的结构为 C 型膜和 E 型膜, 如图 3 所示。

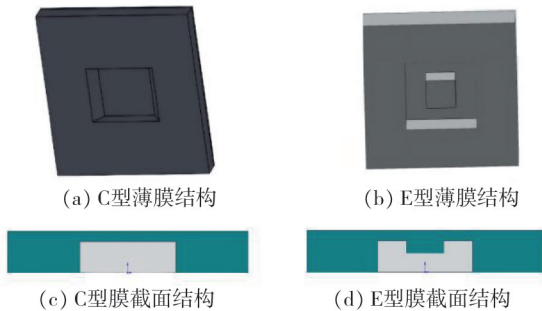


图 3 弹性薄膜结构

Fig. 3 Elastic thin-film structure

C 型膜(平膜结构)是最基础的压力敏感结构, 其膜片厚度均匀, 结构简单, 工艺实现难度较低。在小挠度理论下, C 型膜的中心挠度与压力成线性关系。然而, 当压力增大导致中心挠度超过膜厚的一半时, 膜片内部会产生明显的拉伸应力, 导致输出信号出现严重的非线性。此外, C 型膜的应力分布相对分散, 最大应力点位于膜片边缘的中点, 灵敏度的提升受限于膜片的厚度和边长。

E 型膜(岛膜结构)是在平膜中心引入了一个刚性较大的硅岛, 其横截面呈“E”字形。由于中心岛的

存在, 在压力作用下, 膜片形变主要集中在中心岛与边缘之间的环形薄槽区域。通过在这些高应力区布置压敏电阻, 可以显著提升传感器的输出灵敏度; 中心刚性岛限制了膜片中心的转动与过大位移, 使得膜片在较大压力下仍能较好地符合小挠度理论, 从而显著改善了传感器的线性度。

E 型岛膜结构在高温环境下的灵敏度保持、线性度优化、工艺适配性以及机械可靠性等方面均表现出优于 C 型平膜的特性。因此, 本文最终确定采用 E 型岛膜作为高温压力传感器的核心力学结构。

本文设计的压力传感器量程为 0~1 MPa, 过载压力 2 MPa。单晶硅的单行模量 $E=165$ GPa, 泊松比 $\nu=0.28$, 破坏应力 $\sigma_m=7 \times 10^8$ Pa。考虑到实际工作有过载保护, 最大允许使用应力为 $0.3\sigma_m$ 。根据灵敏度、非线性误差以及最大过载应力的需求, 结合小变形理论和过载保护理论, 得出^[14]

$$\begin{aligned} \omega_{\max} &= 0.01518 \frac{\rho L^4 (1-\nu^2)}{EH^3} \leq \frac{1}{5} H, \\ F_{\max} &= 0.308 p_{\max} \frac{L^2}{H^2} (1-\nu) \leq 0.3\sigma_m, \\ \frac{\Delta R}{R} &= \frac{0.308}{2} \pi_{44} p \frac{L^2}{H^2} (1-\nu) \leq 2\%, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: L 为敏感膜片边长; H 为敏感膜片膜厚; $\omega_{\max}$ 为敏感膜片中心最大挠度; $F_{\max}$ 为最大允许使用应力; $p_{\max}$ 为过载压力; p 为作用在芯片上的压力^[15]。最终得到 $18.3 \leq L/H \leq 39.2$ 。

2.2 膜片尺寸优化

由于传感器输出信号与敏感膜片的输入应力呈正比关系, 而膜片应变响应受其应力分布特性影响, 且非线性误差主要取决于膜片中心挠度, 因此, 膜片优化设计应统筹应力分布调控与中心挠度抑制, 以兼顾灵敏度与线性度。由于 L/H 处于 18.3~39.2 之间, 本文设计了 5 组数据, 如表 1 所示。

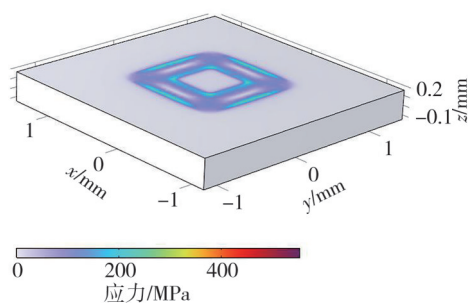
表 1 敏感膜片边长及膜厚设计

Tab. 1 Design of side length and thickness of sensitive diaphragm

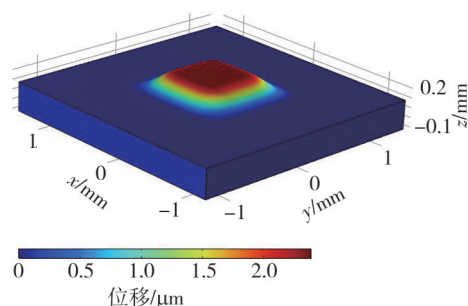
	L/H	$L/\mu\text{m}$	$H/\mu\text{m}$
组 1	39	780	20
组 2	35	1 050	30
组 3	30	1 200	40
组 4	25	1 250	50
组 5	20	1 200	60

采用 COMSOL Multiphysics 软件对岛膜结构进行应力分析, 通过非结构化网格划分技术建立了包含约 23 万个单元的有限元模型。压敏隔膜的

边界条件设置为四边固定约束,并在其受载表面施加1 MPa的压力载荷。在COMSOL软件中将膜片的长厚比作为参数,分析其对等效应力以及挠度的影响。仿真轮廓结果如图4所示。根据图5可知,随着膜片长厚比的增大,结构的等效应力显著增加,导致应力集中效应更为明显,从而提升了器件的灵敏度。然而,膜片中心区域的最大挠度也会随长厚比的增大而逐渐增大,这表明较大的长厚比会降低结构的线性响应特性。为了优化传感器的综合性能,需要在灵敏度和非线性误差之间进行权衡。通过系统的参数分析与实验验证,最终敏感膜片的关键几何参数确定为边长1 200 μm ,厚度40 μm 。



(a) 应力变化云图

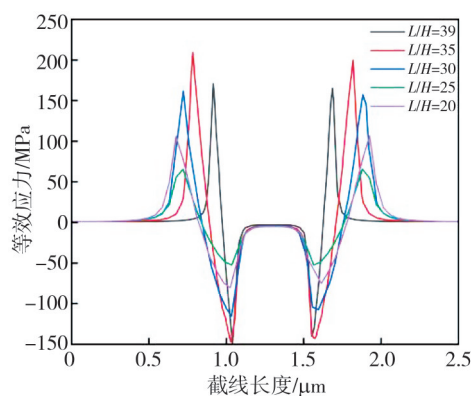


(b) 位移变化云图

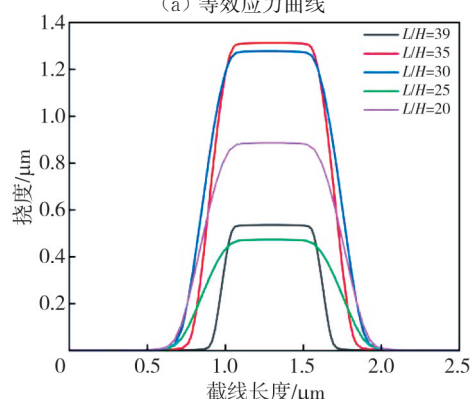
图4 位移和应力分布

Fig. 4 Displacement and stress distribution

E型敏感膜片中心岛的主要作用是增加膜片的局部厚度,提升刚度,因此,在不影响应力的情况下降低敏感膜片中心的应变范围,通过优化中心岛的尺寸来提升传感器的灵敏度和线性度。根据已有理论,中心岛的边长一般为敏感膜片边长的2/5,因此,中心岛的边长设为480 μm 。随着中心岛结构厚度的增大,敏感膜片所受的等效应力与中心点位移量均表现出明显的递减特性。这一现象表明,在中心岛厚度参数变化过程中,传感器的灵敏度与非线性指标呈现此消彼长的制约关系。综合工艺条件,最终确定中心岛的厚度为120 μm 。



(a) 等效应力曲线



(b) 挠度曲线

图5 不同尺寸下等效应力和挠度曲线

Fig. 5 Curves of equivalent stress and deflection under different dimensions

3 传感器芯片工艺流程设计

SOI压力传感器使用注氧隔离技术制备的SOI晶圆片,清洗硅片后,首先调整顶层硅掺杂浓度,硅通过特定剂量和能量的多次硼离子注入进行再氧化,然后进行快速热退火以激活杂质,使顶层硅的电阻率逐渐达到设定值并精确控制,接着通过光刻和电感耦合等离子体ICP干法蚀刻技术蚀刻压阻电阻,最后进行引线孔蚀刻和电极焊盘制造,以获得高温和高可靠性的电极。MEMS工艺流程如图6所示。

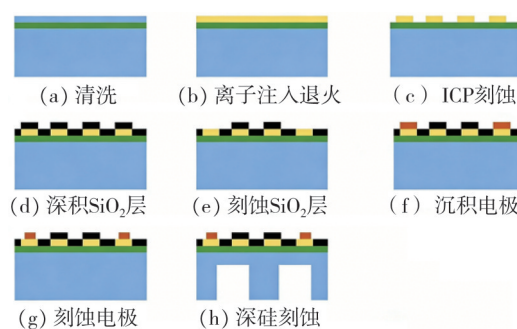


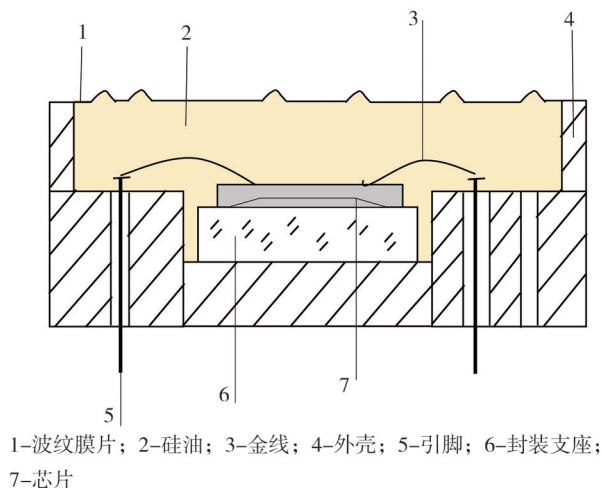
图6 芯片工艺流程图

Fig. 6 Chip manufacturing process flowchart

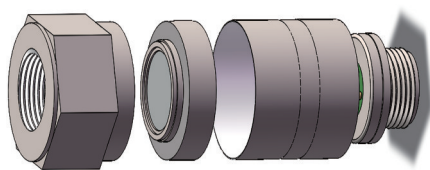
4 传感器封装结构设计

传感器封装设计是保障其性能稳定、可靠运行的关键环节。它不仅要为内部敏感元件提供物理支撑与机械保护,还需构建起抵御外界环境侵蚀(如湿度、温度、电磁干扰、化学腐蚀等)的屏障,确保传感器在复杂工况下精准感知目标信号。在传感器封装结构里,金丝引线作为电信号传输的关键通道,面临诸多性能挑战。当外界环境温度持续攀升,电极与金丝的键合区域会因材料特性产生金迁移现象,致使键合界面出现大量微小孔洞。

在传感器封装设计中,金迁移现象是一个重要的挑战,尤其在高温环境下,金属材料(如金丝)可能由于温度变化产生迁移,导致电气连接的不稳定或中断,从而影响传感器性能。为了抑制金迁移现象,本研究采用了薄膜隔离充油的封装工艺。在封装结构中,利用高温硅油填充在由油腔和波纹片构成的封闭空间中。硅油的不可压缩特性以及波纹膜片的优异线性位移性能,确保了外界压力通过膜片形变传递至硅油,并由硅油将压力传递到力敏芯片^[16]。这种封装方法有效避免了金属迁移对电信号传输的影响,提供了更稳定可靠的电气连接。封装结构如图 7 所示。



(a) 封装设计示意图



(b) 封装外壳示意图

图 7 封装结构示意图

Fig. 7 Encapsulation structure diagram

5 高温压力传感器性能测试

5.1 试验测试系统

本测试系统主要是由氮气瓶、自动打压设备、高温恒温试验箱、电源以及数字万用表构成,供电采用 (10 ± 0.01) V 的 DC 电压。

自动打压设备的压力控制精度为 0.01%FS。为了保证数据的精度和准确性,测试时需要在打压设备和测试工装(用来固定传感器,进行输气的连接部件)的连接处以及测试工装和传感器的连接处缠上密封胶带。并且每次在升压和降压时,必须等打压设备显示的压力值稳定下来再进行测试。测试平台示意图如图 8 所示。

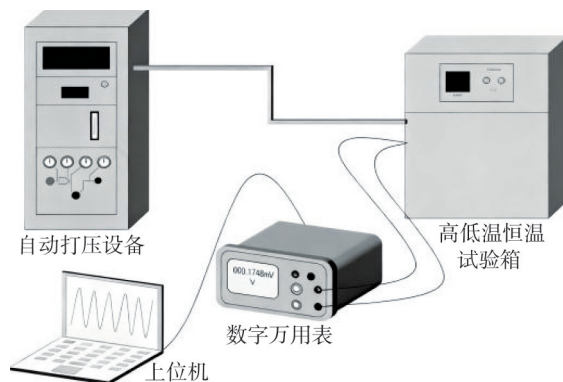


图 8 测试平台示意图

Fig. 8 Test platform schematic diagram

5.2 传感器常温性能测试标定

5.2.1 测量灵敏度

传感器灵敏度是表征其对被测量输入量变化响应特性的核心性能指标,定义为传感器输出量的变化量与引起该变化的输入被测量变化量的比值,用于量化传感器对输入量微小变化的感知与放大能力,是传感器选型、性能校准及测量系统精度分析的重要依据。

压力微传感器灵敏度测试环境温度为 25℃,将电源激励设置为 10 V,所研制的高温压力传感器的工作量程为 0~1 000 kPa(绝对压力),在进行标定测试时,将压力控制器的压力输出设置为 0 kPa,并每隔 100 kPa 设置一个压力采样节点,逐步递增至 1 000 kPa。

测试数据的压力-电压线性曲线如图 9 所示。可以看到传感器在 0~1 000 kPa 压力范围内工作良好,满量程输出为 99.990 1 mV。对标定测试数据进行线性拟合后可知,传感器输出电压与压力之间呈现

良好的线性关系,拟合方程为 $U_{\text{out}}=0.099\ 98P+0.088\ 13$, 决定系数 $R^2=0.999\ 9$, 表明该传感器在常温标定范围内具有优异的线性度。计算得到传感器的线性度为 $1.04\%\text{FS}$, 这表明在常温工况下,传感器的压力响应非常稳定,灵敏度为 $0.099\ \text{mV/kPa/V}$, 符合设计要求。此外,传感器的输出电压与输入压力的关系显示了传感器在常温下能够精确反映外界压力变化的能力。

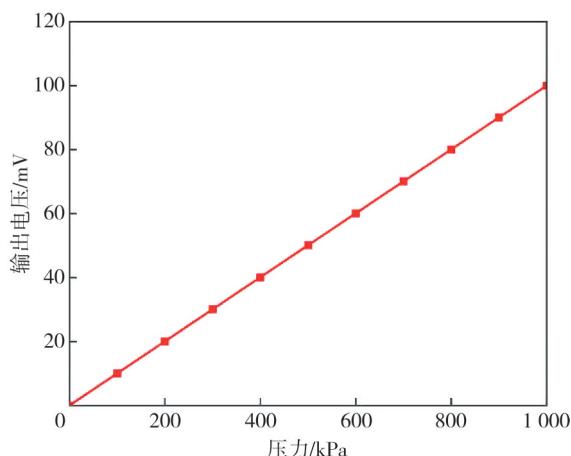


图9 传感器压力-电压线性曲线

Fig. 9 Linear curve of sensor pressure-voltage

5.2.2 测量迟滞性

迟滞性的量化表征采用迟滞误差,定义为

$$\gamma_h = \frac{\Delta Y_{\text{hmax}}}{\Delta Y_{\text{FS}}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: γ_h 为传感器的迟滞误差; ΔY_{hmax} 为全量程内正、反行程输出量的最大绝对偏差; ΔY_{FS} 为传感器满量程输出值(满量程输出—额定最大输入对应的输出量—额定最小输入对应的输出量)。迟滞误差越小,表明传感器正、反行程的输出一致性越好,迟滞性越弱。

对传感器的迟滞误差进行测试时,通过对压力控制器的输出压力进行控制,使压力测试系统的气压正行程由 $0\ \text{kPa}$ 增大至 $1\ 000\ \text{kPa}$, 反行程由 $1\ 000\ \text{kPa}$ 减小至 $0\ \text{kPa}$, 其他测试条件与传感器灵敏度测试时的参数保持一致,同时对压力和压力传感器的输出电压进行数据记录。迟滞误差测试结束后得到压力传感器的迟滞误差测试曲线,如图 10 所示。

测试过程中,随着压力的增加和减少,传感器的输出电压出现了正反程之间的差异。通过计算,得到迟滞误差为 $0.021\ 2\%\text{FS}$, 表明传感器具有较小的迟滞效应,说明其在正反程操作中表现

出较好的重复性和一致性。尽管迟滞性较低,但在实际应用中,仍需在设计上进一步优化,特别是在高温环境下,要降低高温对金属材料迁移的影响,避免出现较大的迟滞误差。

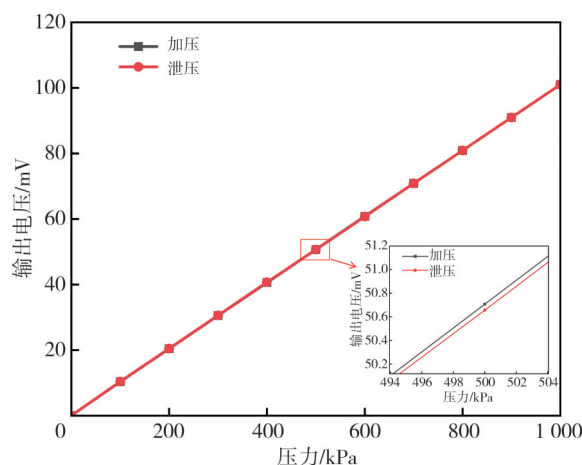


图10 传感器迟滞测试曲线

Fig. 10 Sensor hysteresis test curve

5.2.3 测量重复性

传感器重复性是表征其在相同工况下对同一输入量进行多次连续往复测量时,测量输出结果的稳定一致程度的核心静态性能指标,其数学表达式为

$$\gamma_R = \frac{3\sigma}{\Delta Y_{\text{FS}}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: γ_R 为传感器重复性误差; σ 为同一输入点下多次测量输出量的标准偏差; ΔY_{FS} 为传感器满量程输出值(ΔY_{FS} = 满量程输入对应输出量—最小量程输入对应输出量)。

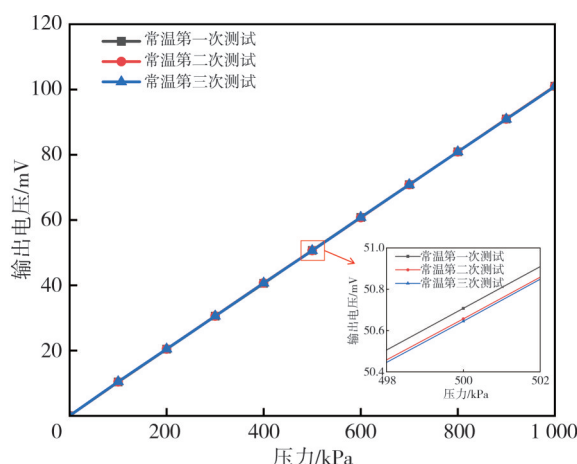


图11 传感器重复性测试曲线

Fig. 11 Sensor repeatability test curve

为获取高温压力传感器的重复性特性曲线,采用与灵敏度测试相同的试验条件,对该传感器进行3次重复检测,得到传感器的重复性测试曲线如图 11

所示。测试结果表明,在相同的工作条件下,传感器的输出电压在多次测量中保持一致,重复性误差为 0.020%FS,表明传感器具有良好的重复性,在多个测量周期内可以提供一致的输出。

5.3 传感器高温性能测试标定

在常温测试完毕后,进一步测试传感器在高温环境中的工作性能。把装有传感器并完成信号引线的压力连接底座放置于高温干燥箱内,对箱体进行升温操作。升温到 175 °C,并保温持续 30 min 以上,保障压力系统内外温度均衡且稳定不变。除温度参数外,其他测试条件均与常温测试保持一致,对采集的数据进行处理分析后,便可得出传感器在 175 °C 高温环境下的性能指标,175 °C 高温下传感器压力-输出电压的曲线如图 12 所示。

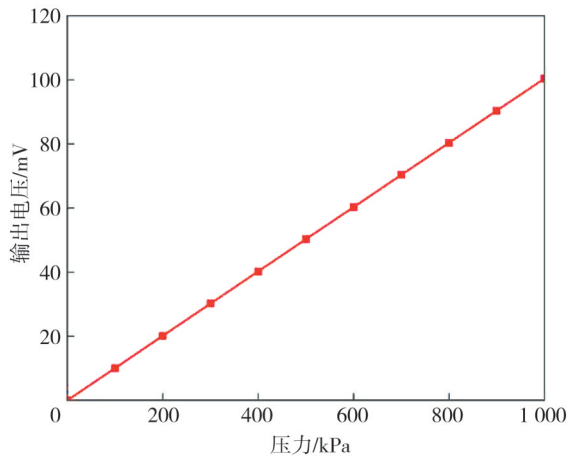


图 12 175 °C 下传感器压力-电压曲线

Fig. 12 Pressure-voltage curve of sensor under high temperature

由图 12 可知,该传感器在 175 °C 环境下的满量程输出为 100.406 7 mV,最多偏移值为 0.406 7 mV,计算可得 175 °C 环境下,该传感器的线性度为 0.405%FS。因此,高温与常温环境下该传感器的非线性度相差不大,说明该传感器的敏感元件和结构具有良好的温度稳定性。

在 175 °C 的高温环境下进行传感器的迟滞性测试时,测试方式与常温下的测试步骤一样,记录传感器在不同压力载荷下的输出电压值,曲线图如图 13 所示。计算可得该传感器在高温环境下的迟滞性为 0.587 0%FS。与常温下的 0.021 2%FS 相比,175 °C 高温环境下的迟滞性有所增加,这表明高温环境对传感器的性能产生了负面影响,特别是在材料的弹性和电信号传输稳定性上。虽然迟滞性增加,但仍处于可接受的范

围内,表明传感器在高温下的动态性能有所衰退,但仍能满足多数高温环境应用的需求。

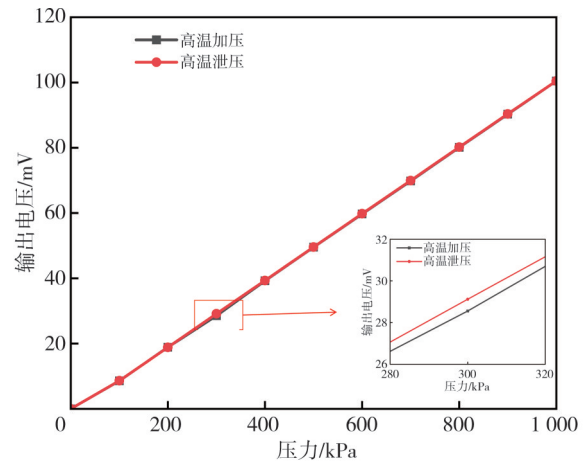


图 13 传感器高温下迟滞测试曲线

Fig. 13 Test curve of sensor's lag property under high temperature

同理,在 175 °C 的高温环境下进行传感器的重复性测试,曲线如图 14 所示。计算可得该传感器在高温环境下的重复性为 0.996%FS,显著高于常温下的 0.020%FS。这表明高温环境对传感器的重复性产生了较大影响。高温导致材料的热膨胀和弹性特性变化,从而影响了传感器的输出一致性。尽管如此,传感器在高温下仍具有较好的重复性,表明其在多次重复测量中仍能提供相对稳定的输出。

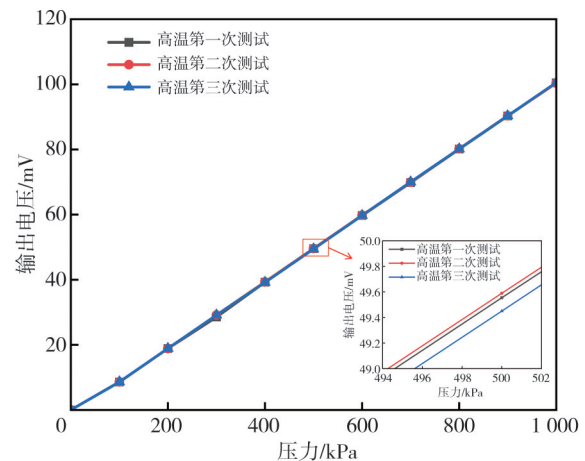


图 14 传感器 175 °C 重复性测试曲线

Fig. 14 Repeatability test curve of sensor under high temperature conditions

经过该传感器在常温和 175 °C 高温环境下的测试,可以得到传感器的静态参数结果如表 2 所示。对比可知,所研制的 SOI 高温压力传感器在 175 °C 高温下非线性度显著降低,线性度得到改善,但迟滞性与重复性有所劣化,体现了高温对

材料弹性特性与测量一致性的影响。并且,传感器热零点漂移与灵敏度热漂移均保持在极低水平,展现出优异的高温稳定性,能够满足发动机等高温工况下的压力测量需求。

表 2 传感器的静态参数

Tab. 2 The static parameters of the sensor

温度/℃	线性度/%FS	迟滞性/%FS	重复性/%FS
25	1.040	0.021 2	0.020
175	0.405	0.587 0	0.996

6 结 论

本文设计并研究了一款基于 SOI 技术的 MEMS 高温压力传感器,旨在满足航空航天、能源工业等领域在高温和振动等极端工况下对压力测量的需求。通过采用 SOI 材料的埋氧层技术,成功实现了压敏电阻与硅基底的电隔离,从而有效解决了传统硅基压力传感器在高温下因 PN 结漏电而导致的性能退化问题。

通过对该传感器的性能进行多项测试,结果表明,传感器在常温和高温条件下均表现出良好的工作性能。在常温条件下,传感器的灵敏度为 0.099 mV/kPa/V,满量程输出为 99.990 1 mV,压力迟滞小于 0.021 2%FS,重复性为 0.020%FS。在高温条件下,传感器的线性度和灵敏度保持稳定,且传感器的高温稳定性得到了显著提高,满足高温复杂工况下的精确测量需求。

本研究有效提升了基于 MEMS 技术的压力传感器在高温环境下的适用性,为涡轮机、航空发动机等高温恶劣工况下的压力测量提供了技术支持。未来,随着传感器封装技术和材料的进一步优化,传感器的高温性能和长期可靠性有望得到进一步改善。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

[1] 颜鹰. MEMS 高温压力传感器若干关键技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 1-5.
Yan Ying. Research on some key techniques of MEMS high temperature pressure transducer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 1-5. (in Chinese)

[2] 杨娇燕, 梁庭, 李鑫, 等. 基于 SOI 岛膜结构的高温压力传感器[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(9): 635-641.
Yang Jiaoyan, Liang Ting, Li Xin, et al. High temperature pressure sensor based on SOI island film structure [J]. Micronanoelectronic Technology, 2018, 55(9): 635-641. (in Chinese)
[3] 李丰超, 康振伟, 王丙寅, 等. 基于 SOI 的高抗过载颅内压力传感器设计与制备[J]. 测试技术学报, 2025, 39(5): 531-539.
Li Fengchao, Kang Zhenwei, Wang Bingyin, et al. Design and fabrication of a high anti-overload intracranial pressure sensor based on SOI [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(5): 531-539. (in Chinese)
[4] Ma C, Xiong C, Zhao R, et al. Capacitive pressure sensors based on microstructured polymer-derived SiCN ceramics for high-temperature applications. [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 678: 503-510.
[5] Zhang J, Chen Y L, Zhang L, et al. Application of sine cosine algorithm-support vector regression on temperature compensation of MEMS shear stress sensor [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 14(3): 263-269.
[6] 郭玉刚, 饶浩, 陶茂军, 等. MEMS SOI 高温压力传感器芯片[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(11): 92-95.
Guo Yugang, Rao Hao, Tao Maojun, et al. MEMS SOI high temperature pressure sensor chip [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(11): 92-95. (in Chinese)
[7] Hao L, Li C, Wang L, et al. Design and fabrication of a high-temperature SOI pressure sensor with optimized crossbeam membrane [J]. Micromachines, 2023, 14(5): 1045.
[8] 董志超, 雷程, 梁庭, 等. SOI 高温压力传感器无引线倒装式封装研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(11): 65-68.
Dong Zhichao, Lei Cheng, Liang Ting, et al. Research on leadless flip chip packaging of SOI high temperature pressure sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(11): 65-68. (in Chinese)
[9] Guo Y, Li Y H, Guo Z Q, et al. Bio-inspired stretchable absolute pressure sensor network [J]. Sensors, 2016, 16(1): 55-58.
[10] 李俊龙, 朱平. 无引线封装的 SOI 压阻式压力传感器

- 设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(12): 20-24
- Li Junlong, Zhu Ping. Design of leadless packaging soi piezoresistive pressure sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(12): 20-24. (in Chinese)
- [11] 江浩, 黄晶, 袁宇鹏, 等. 硅基 MEMS 梁-复合膜-岛压阻式压力传感器设计研究[J]. 压电与声光, 2024, 46(1): 118-123.
- Jiang Hao, Huang Jing, Yuan Yupeng, et al. Design and research of a beam-composite membrane-island pressure resistance pressure sensor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2024, 46 (1) : 118-123. (in Chinese)
- [12] 王伟. SOI 高温压力传感器设计及制备技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2014: 5-30.
- Wang Wei. Design and fabrication of SOI high temperature pressure sensor [D]. Taiyuan: North University of China, 2014: 5-30. (in Chinese)
- [13] 高颖, 姜岩峰. 高性能 SOI 基纳米硅薄膜微压阻式压力传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(6): 839-848.
- Gao Ying, Jiang Yanfeng. Research on SOI-Based nano-silicon film micro-piezoresistive pressure sensor with high performance [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(6): 830-848. (in Chinese)
- [14] 李闯, 赵立波, 张磊, 等. 基于 SOI 的 E 型结构 MEMS 压力芯片优化设计与制造[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(4): 73-76.
- Li Chuang, Zhao Libo, Zhang Lei, et al. Optimal design and fabrication of E-type structural MEMS SOI pressure sensor chip [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(4): 73-76. (in Chinese)
- [15] 李闯, 赵立波, 王尊敬, 等. 基于 SOI 的 E 型膜结构耐高温压力芯片的设计与制造[J]. 仪表技术与传感器, 2021(1): 20-24.
- Li Chuang, Zhao Libo, Wang Zunjing, et al. Design and fabrication of E-type membrane structural high temperature pressure chip based on SOI [J]. Instrument Technique and Sensor, 2021 (1) : 20-24. (in Chinese)
- [16] 付政伟, 康梓睿, 鲁宁, 等. 基于 SOI 的高温压力微传感器研制与测试[J]. 宇航计测技术, 2026, 42(2): 98-105.
- Fu Zhengwei, Kang Zirui, Lu Ning, et al. Development and testing of high-temperature pressure micro-sensors based on SOI [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2026, 42(2): 98-105. (in Chinese)