

文章编号: 1671-7449(2026)05-0575-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(5): 575-582.

温度与热应力对SOI压阻式压力传感器的性能影响

肖楚译, 梁庭*, 赵佳龙, 李腾腾, 冀鹏飞, 雷程

(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: 针对绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI)压阻式压力传感器在 $-50\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温域范围内因热应力作用而引发显著零点漂移这一关键技术难题, 推导环境温度下输出电压与压敏电阻应力的耦合关系, 明确了温度与热应力对传感器的性能影响。借助COMSOL多物理场仿真平台, 对SOI压阻式压力传感器的三层关键结构开展优化仿真研究。结果表明, 复合金属层(Ti/Pt/Au)厚度为50 nm/60 nm/300 nm, 钝化层($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$)厚度为300 nm/200 nm时, 能够有效抑制界面热失配和阻隔外部应力传导。此外, 当键合玻璃层厚度优化为700 μm 时, 压敏电阻区热应力降低至6.38 MPa, 传感器零点输出同步降低至1.755 mV。最后, 对参数优化后的传感器完成 $-50\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 静态性能测试。结果表明, 室温下该器件基本输出误差仅约为0.22%, 灵敏度为29.35 mV/MPa/5 V; 在整个工作温域内, 热零点漂移低至0.039 3%FS, 实测漂移与仿真结果趋势一致。

关键词: 绝缘体上硅; 压阻式; 压力传感器; 热应力; 热零点漂移

中图分类号: TP212

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026065

引用格式: 肖楚译, 梁庭, 赵佳龙, 等. 温度与热应力对SOI压阻式压力传感器的性能影响[J]. 测试技术学报, 2026, 40(5): 575-582.

Xiao Chuyi, Liang Ting, Zhao Jialong, et al. Influence of temperature and thermal stress on performance of SOI piezoresistive pressure sensors[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(5): 575-582.

Influence of Temperature and Thermal Stress on Performance of SOI Piezoresistive Pressure Sensors

Xiao Chuyi, Liang Ting*, Zhao Jialong, Li Tengting, Ji Pengfei, Lei Cheng

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

Abstract: Addressing the critical technical challenge of significant zero drift in SOI piezoresistive pressure sensors caused by thermal stress across the wide temperature range of $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. The coupling relationship between output voltage and piezoresistive stress at ambient temperature is derived, clarifying the impact of temperature and thermal stress on sensor performance. Utilizing the COMSOL multiphysics simulation platform, an optimization simulation study is conducted on the three-layer critical structure of the SOI piezoresistive pressure sensor. Simulation results indicate that a composite metal layer (Ti/Pt/Au) with thicknesses of 50 nm/60 nm/300 nm and a passivation layer ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) with thicknesses of 300 nm/200 nm effectively suppress interfacial thermal mismatch and block external stress transmission.

【收稿日期】2025-11-04

【修回日期】2025-12-20

【录用日期】2025-12-29

【基金项目】国家重点研发计划资助项目(2023YFB3209100)

【作者简介】肖楚译(2000—), 男, 硕士生, 主要从事MEMS高温压力传感器研究。E-mail: a2498988617@163.com。

*【通信作者】梁庭(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事MEMS高温压力传感器、集成电路先进封装技术、宽禁带半导体传感器、MEMS微加工工艺以及微光学集成气体传感器等研究。E-mail: liangtingnuc@163.com。

Furthermore, when the bonding glass layer thickness was optimized to 700 μm , thermal stress in the resistive sensing region decreased to 6.38 MPa, and the sensor's zero-point output simultaneously reduced to 1.755 mV. Static performance testing was conducted on the parameter-optimized sensor across the temperature range of $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Test results indicate that at room temperature, the device exhibits a basic sensor output error of only approximately 0.22%, with a sensitivity of 29.35 mV/MPa/5 V. Throughout the entire operating temperature range, thermal zero drift is as low as 0.039 3%FS, and the measured drift trend aligns with simulation results.

Key words: silicon on insulator (SOI); piezoresistive; pressure sensors; thermal stress; thermal zero drift

0 引言

宽温域压力监测在航空航天发动机、新能源汽车电池热管理与石油开采等极端环境中具有关键作用。MEMS压力传感器是一种能在极端环境下稳定测量压力的装置,硅压阻式压力传感器作为压力传感器的分支,具有高灵敏度和机械稳定性的优异特性^[1-2]。然而,当此类传感器工作温度超过 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,会导致电阻和衬底之间的PN结漏电流显著增加,最终导致传感器输出不稳定,使用寿命缩短,甚至故障。但SOI压阻式压力传感器由于 SiO_2 绝缘层的存在,在某种程度上减轻了漏电流的问题^[3-4]。然而,SOI压阻式压力传感器在宽温域工作条件下存在显著的热应力诱导高零点漂移问题,其根源在于多层结构(金属互连层、钝化层、阳极键合玻璃基板)间热膨胀系数失配,严重制约了传感器的测量精度与可靠性^[5-6]。

Zhou等^[7]提出被动阻力补偿网络来改善SOI压力传感器的热零点漂移问题,该方法有效地将器件热零点漂移从0.09%FS降至0.042%FS。Wang等^[8]通过优化离子注入工艺与封装结构,开发了一种应用于 $-40\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围的高频响、抗干扰SOI压力传感器,精度误差为 $\pm 0.2\%$ FS。传感器显示实现了0.006%FS的超低热零点漂移,温区范围为 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而本研究的工作温区为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,特别是上限温度提高了 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。传感器测试在超过 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温下,材料特性(如杨氏模量、压阻系数等)的非线性变化以及不同材料界面反应加剧会使得热应力管理呈指数级增加。2024年,Zhang等^[9]提出一种膜片二次应力利用方法,不用改变膜片结构,测得的零点漂移为0.052%FS。

然而,上述工作都未从源头解决材料界面产生的热机械应力引起的热零点漂移。本文通过对

传感器进行仿真优化、工艺加工及封装测试等工作,明确了温度与热应力对SOI压阻式压力传感器的性能影响。通过优化器件各层工艺参数,制备出热零点漂移低至0.039 3%FS的高性能SOI压阻式压力传感器。

1 原理与设计

MEMS压阻式压力传感器的基础原理为半导体材料的压阻效应^[10]。当半导体受到应力时,该位置处的载流子迁移率随之产生变化,进而影响能带使材料本身的电阻率发生变化而影响电阻变化,压敏电阻的电阻变化率为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi \sigma, \quad (1)$$

式中: R 为电阻; ρ 为电阻率; $\Delta R/R$ 为电阻变化率; $\Delta \rho/\rho$ 为电阻率变化率; π 为压阻系数矩阵; σ 为应力矩阵。

根据原理,单晶硅的压阻系数在晶面为 $[100]$ 、晶向为 $[011]$ 或 $[110]$ 时达到最大值。单晶硅的电阻变化率为^[11]

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_l - \sigma_t), \quad (2)$$

式中: σ_l 为材料横向的应力值; σ_t 为材料纵向分布时的应力值; π_{44} 为材料整体的剪切压阻系数。

掺杂浓度影响器件的温度效应,图1所示为掺杂浓度与压敏电阻温度系数(Temperature Coefficient of Resistance, TCR)、压阻系数温度系数($\text{TC}\pi$)的关系,其中,上方虚线为 $\text{TC}\pi$ 的镜像, TCR 与 $\text{TC}\pi$ 的镜像的交点为 $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 和 $2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 。当压敏电阻掺杂浓度在这两个交点时, TCR 和 $\text{TC}\pi$ 大小相同、方向相反,即可以相互抵消而达到理想最优值,输出灵敏度不随温度变化产生漂移^[12]。本研究采用掺杂浓度 $2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 。

压阻系数是P型硅掺杂水平和温度的函数,用 $\pi_{44}(T, N_s)$ 表示,表达式为^[13]

$$\pi_{44}(T, N_s) = \pi_0 \left[1 + \left(\frac{T}{T_0} \right)^m \right]^{-1} \left[1 + \left(\frac{N_s}{N_{s0}} \right)^\gamma \right]^{-1}, \quad (3)$$

式中: N_{s0} 为设计的掺杂浓度 $2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$; N_s 为本研究实际测得的注入掺杂浓度 $9.7 \times 10^{19}/\text{cm}^3$; T 为室温 25°C ; m 为 P 型硅的空穴迁移率温度指数, $m \approx 2.2$; γ 为 P 型硅浓度衰减指数, $\gamma \approx 0.6$ 。则该压阻系数 $\pi_{44} = 3.5 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 。

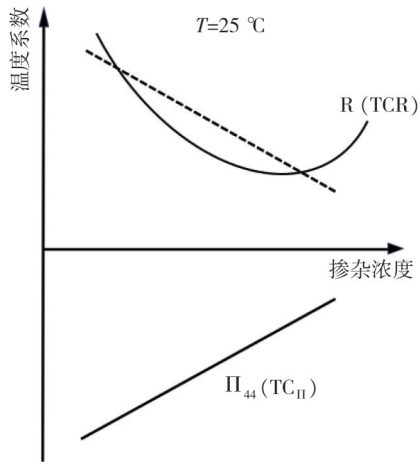


图 1 $|TC\pi|$ 、TCR 与掺杂浓度关系

Fig. 1 Relationship of $|TC\pi|$ and TCR with doping concentration

当施加在膜片上的压力载荷为 0 且 4 个压阻完全匹配时, 传感器输出电压为 0, 但温度变化会改变电阻值, 导致传感器的输出电压也将发生变化。温度对压敏电阻的影响为^[14]

$$R_i(T) = R_i(1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T^2), \quad (4)$$

式中: $R_i(T)$ 为温度 T 下的导体电阻, i 为电阻器的数量 ($i=1, 2, 3, 4$); ΔT 为参考温度与工作温度之差(参考温度通常为室温); R_i 为参考温度下的电阻; α 和 β 为对应电阻的电阻温度系数。

如图 2 所示, 惠斯通电桥分为左半桥和右半桥。左半桥包括电阻 R_1 和 R_2 , 右半桥包括电阻 R_3 和 R_4 , 整个惠斯通电桥输出电压为^[15]

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right). \quad (5)$$

理想的 4 个电阻 R 均相等 ($R_1=R_2=R_3=R_4=R$), 在实际制备电阻中, 由于刻蚀工艺存在偏差, 拆解式(5)可以得到

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R + \Delta R_1}{(R + \Delta R_1) + (R + \Delta R_2)} = \frac{R + \Delta R_1}{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2}. \quad (6)$$

根据泰勒展开式 $\frac{1}{1+x}$, 只保留一阶项, 则

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{2R} \right), \quad (7)$$

同理,

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Delta R_3 + \Delta R_4}{2R} \right). \quad (8)$$

将式(7)与式(8)代入式(5)得到输出电压为

$$U_{\text{out}} = \frac{U_{\text{in}}}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4). \quad (9)$$

考虑温度对电阻和压阻系数的影响, 结合式(2)和式(4)得到

$$U_{\text{out}}(T) = \frac{1}{2} \pi_{44}(T, N_s) U_{\text{in}} \cdot$$

$$[\sigma_1(T) - \sigma_2(T) - \sigma_3(T) + \sigma_4(T)]. \quad (10)$$

理论分析表明, 传感器输出在宽温域的热零点漂移主要源于制备传感器过程的热失配应力对压敏电阻的影响。

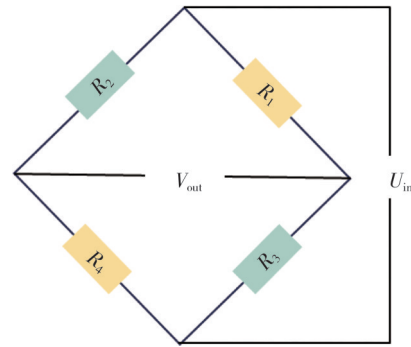


图 2 惠斯通电桥

Fig. 2 Schematic of Wheatstone bridge

2 传感器热应力仿真

本文制备的 SOI 压阻式压力传感器如图 3 所示, 4 个压敏电阻通过多折弯结构构成惠斯通电桥, 增强了传感器的灵敏度。SOI 压阻式压力传感器的材料包含 SOI 晶圆、复合金属层、钝化层薄膜以及玻璃基底, 因各部分材料的热膨胀系数存在差异, 会在工作过程中由于环境温度产生热适配引力, 本文利用 COMSOL 多物理场分析以下 3 个方面:

- 1) 复合金属层与 SOI 衬底的界面热应力;
- 2) 钝化层薄膜对压敏电阻的热应力;
- 3) Pyrex 7740 键合玻璃对压敏电阻的热应力。

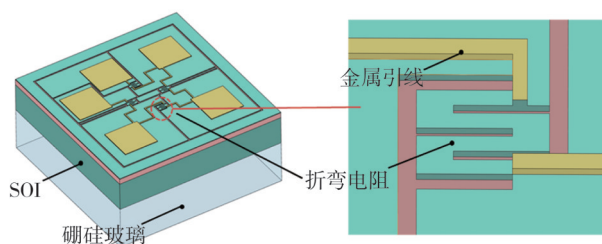
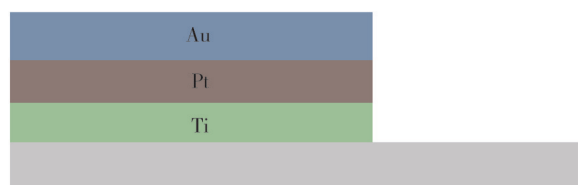


图3 压力传感器芯片三维图以及芯片正面图

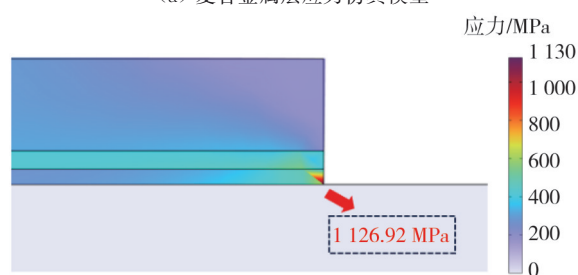
Fig. 3 3D model and front-view layout of pressure sensor chip

2.1 复合金属层仿真

图4(a)为复合金属层仿真模型,金属采用复合金属薄膜Ti/Pt/Au形式,中间层采用Pt作为阻挡层,防止顶层金属Au在高温环境下向金属Ti扩散而形成高阻化合物,Au层因其低电阻率主要充当导电层。模型的温度环境为200℃,对SOI底部施加固定约束。



(a) 复合金属层应力仿真模型



(b) 300 nm Au层热应力分布图

图4 复合金属层仿真模型及应力分布图

Fig. 4 Composite metal layer simulation model and stress distribution diagram

Pt、Ti和Au的热膨胀系数为 8.8×10^{-6} 、 8.6×10^{-6} 和 $14.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。Au的热膨胀系数约为Ti、Pt的1.62倍,会导致在高温情况下,Au受热膨胀而应力分布不均,使金属层产生翘曲现象。如图4(b)所示,在Au薄膜层厚度为300 nm时,复合金属层与SOI界面最大热应力约为1126.92 MPa。

改变Au膜层厚度从200 nm到700 nm,得到如图5所示的仿真结果,随着Au层厚度增加,金属层与SOI界面的热应力也随之增大。在后期封装中,考虑到顶层Au层热膨胀,使用Au引线与Au层进行引线键合。尽管仿真表明200 nm Au层可降低SOI界面热应力至988.18 MPa,但过薄的Au层将引发键合界面失效风险,致使引线键合的

强度在长时间工作下可靠性降低,电信号在传递过程受影响。因此,综合考虑复合金属层Ti/Pt/Au厚度为50 nm/60 nm/300 nm。

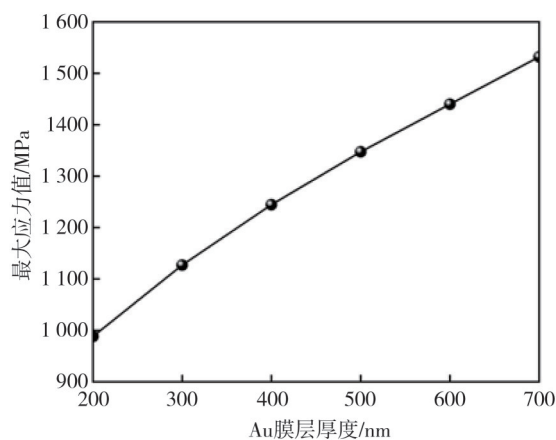


图5 Au膜层厚度与SOI界面热应力的变化关系

Fig. 5 Relationship between thermal stress at SOI interface and gold layer thickness

2.2 钝化层仿真

将 SiO_2 和 Si_3N_4 复合薄膜作为钝化层, SiO_2 薄膜热膨胀系数($1.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)与SOI晶圆上的P型顶层硅的热膨胀系数($2.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)接近,且杨氏模量较低(70 GPa)^[16],能吸收界面热失配应力而充当缓冲层; Si_3N_4 薄膜表面分子致密且有较好的化学惰性,可提供环境防护,但 Si_3N_4 杨氏模量较高(300 GPa),固有拉应力高,需要 SiO_2 缓冲层抑制开裂风险。

实验设定环境温度为200℃,总复合钝化层厚度为500 nm,对SOI晶圆底部进行固定约束。图6所示为敏感薄膜以及电阻距离膜片20 μm的排布位置,利用三维截线在应力分布图采集4只压敏电阻的平均热应力。

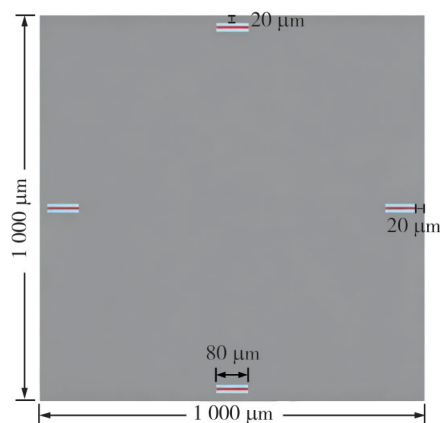


图6 电阻在敏感薄膜的排布位置

Fig. 6 Layout of resistors on sensing membrane

设定 7 组厚度比例($\text{SiO}_2:\text{Si}_3\text{N}_4=100:400\sim 400:100$)的复合层进行热应力仿真,分别在 SiO_2 薄膜与 Si_3N_4 薄膜提取对应压敏电阻的热应力,其变化趋势如图 7 所示。当 SiO_2 和 Si_3N_4 厚度比为 300:200 和 350:150 的区间里有应力平衡点。

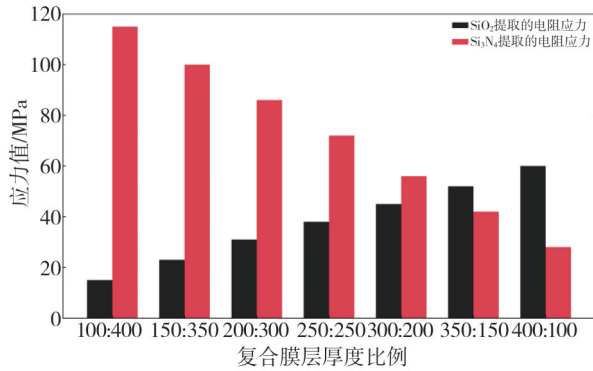


图 7 SiO_2 和 Si_3N_4 提取的电阻应力随复合膜层厚度比例的变化
Fig. 7 Thermal stress extracted from resistors on SiO_2 and Si_3N_4 films varies with thickness ratio of composite film layer

图 8(a) 和 (c) 为 SiO_2 和 Si_3N_4 厚度比为 300:200 的应力图以及对应扰度图,从衬底至薄膜

的应力梯度为 0.575~547 MPa, 最大扰度为 0.708 μm 。图 8(b) 和 (d) 为 SiO_2 和 Si_3N_4 厚度比为 350:150 的应力图以及对应扰度图,从衬底到薄膜的应力梯度为 0.577~425 MPa, 最大扰度为 0.701 μm 。 SiO_2 作为低杨氏模量材料,当 SiO_2 层变厚,其压缩应力在堆叠中的权重增加,使得整体应力梯度范围收窄,由仿真压力分布图可知,最大应力集中在高强度的 Si_3N_4 层,547 MPa 仍在 Si_3N_4 的安全应力范围;并且, Si_3N_4 作为高模量材料,减薄会显著降低抗弯刚度,200 nm Si_3N_4 的刚度贡献约是 150 nm 的 2.37 倍,整体结构会更加稳定。在优化比例(300:200)基础上,结合实际制备存在的工艺误差,当 SiO_2 和 Si_3N_4 厚度分别在 270~330 nm 与 170~230 nm 区间时,即 $\pm 10\%$ 波动,应力变化 $< 5\%$,该容差范围覆盖标准 PECVD 工艺厚度误差,其均匀性为 $\pm 8\%$ [17]。因此,选择最优工艺参数为钝化层($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$)厚度为 300 nm/200 nm,相当于 300 nm 的 SiO_2 为 200 nm 的 Si_3N_4 提供了 1.5 倍的应变缓冲容量。

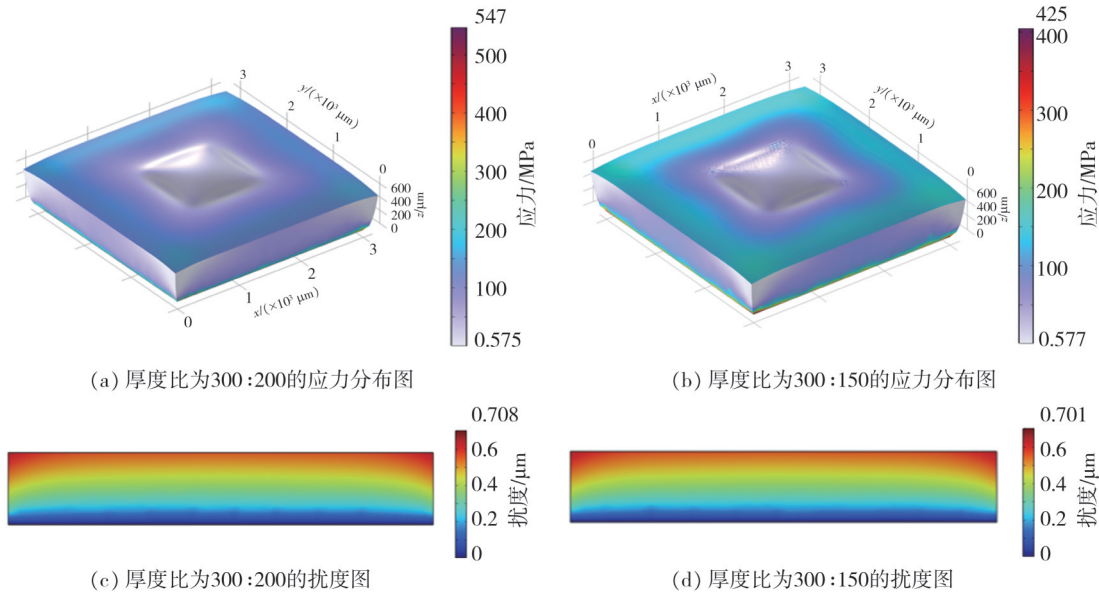


图 8 不同钝化层厚度比的应力分布及扰度图

Fig. 8 Stress distribution and amplitude diagrams for different thickness ratios of passivation layers

2.3 键合仿真

环境温度设置为 200 $^{\circ}\text{C}$, 对 Pyrex7740 玻璃片底部进行固定约束。在不进行外部施压的情况下,对传感器惠斯通电桥施加 5 V 电压进行电学分析,利用参数化扫描玻璃片厚度(300~800 μm),步进设置为 100 μm ,得到玻璃片厚度与传感器芯片零点输出的关系,以及对应 4 条压敏电阻产生的热应力。如图 9(c) 所示,当 Pyrex7740 玻璃厚度为 700 μm 时,

压敏电阻上热应力最小,为 6.387 MPa,并且对应的零位输出最接近理想输出电压 0 mV,为 -1.755 mV;相比于 Pyrex7740 玻璃厚度为 600 μm 时,压敏电阻上热应力为 6.659 MPa,压敏电阻的热应力增加 4.26%,零位输出为 -3.344 mV,变化 1.589 mV,其仿真结果如图 9(a) 和 (b) 所示。因此,选择 Pyrex7740 玻璃厚度为 700 μm ,能更均匀地分散热膨胀应力,减少传递至压敏电阻的局部应力集中。

对整体模型在 -50~200 $^{\circ}\text{C}$ 做进一步仿真,如

图 9(d) 所示, 出现了零点漂移的情况。通过多项式拟合法得到图中表达式, 式中 x 为温度, y 为测量的零点输出电压。在 200 °C 时, 传感器的零点

输出相对于 25 °C 下, 变化了 1.323 mV, 在 -50 °C 下, 零点输出相对于 25 °C 下变化了 0.322 8 mV。高温漂移量达低温漂移量的 4.10 倍。

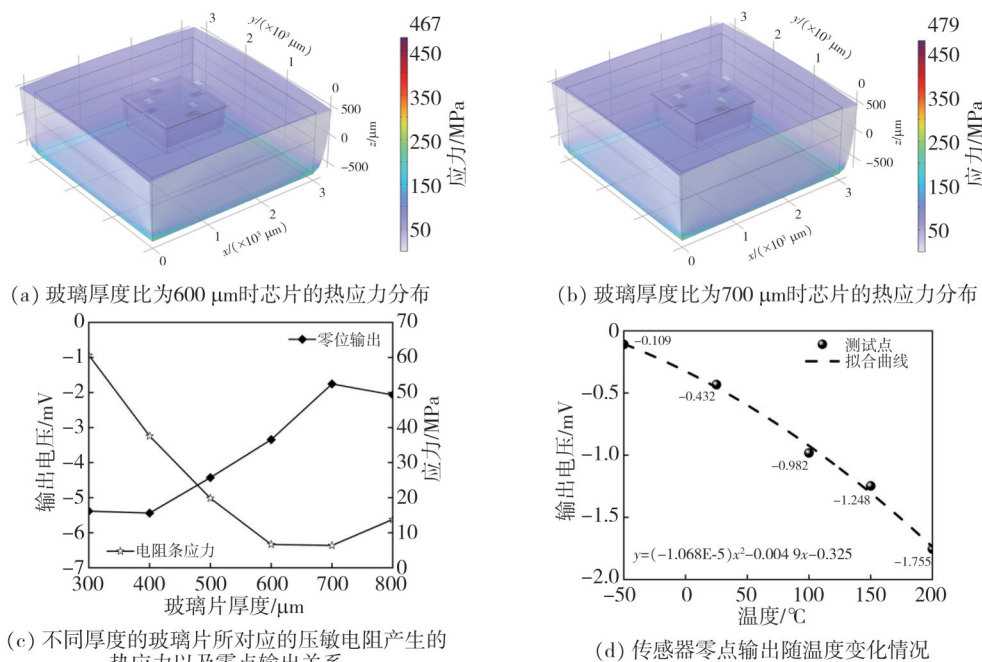


图 9 键合仿真应力分布、电阻热应力与零点输出的关系以及零点输出随温度变化情况

Fig. 9 Bonding simulation stress distribution relationship between resistance thermal and zero-point output and variation of zero-point output with temperature

3 传感器制备与性能测试

3.1 传感器制备

基于上述仿真优化结果, 采用 MEMS 工艺对压力敏感芯体加工, 整个工艺流程如图 10 所示: 1) 通过有机溶液与无机溶液 (浓 $H_2SO_4:H_2O_2=3:1$) 清洗 SOI 晶圆, 对 SOI 器件层进行硼离子注入; 2) 在顶层硅沉积一层 1 μm SiO_2 作为重掺杂掩膜, 用氢氟酸溶液开孔进行掺杂; 3) 对晶圆进行光刻将金属焊盘和引线图形化, 利用丹顿-磁控溅射设备沉积 Ti、Pt、Au; 4) 通过图形化光刻以及刻蚀工艺制备电阻条和电学隔离槽; 5) 利用 ICP-PECVD 在 SiO_2 膜层和 Si_3N_4 膜层低温生长 200 nm 和 300 nm 钝化层; 6) 通过 RIE 刻蚀工艺对焊盘开孔为金引线键合提供电连接点; 7) 利用深硅刻蚀机进行背腔刻蚀制备敏感膜; 8) 利用键合设备 EVG510 将 SOI 晶圆和 Pyrex7740 玻璃阳极键合制备绝压腔。

图 11(a) 为敏感芯体与进行测试的管壳进行 Au 引线键合的制备结果图, 图 11(b) 为封装后的压力传感器。

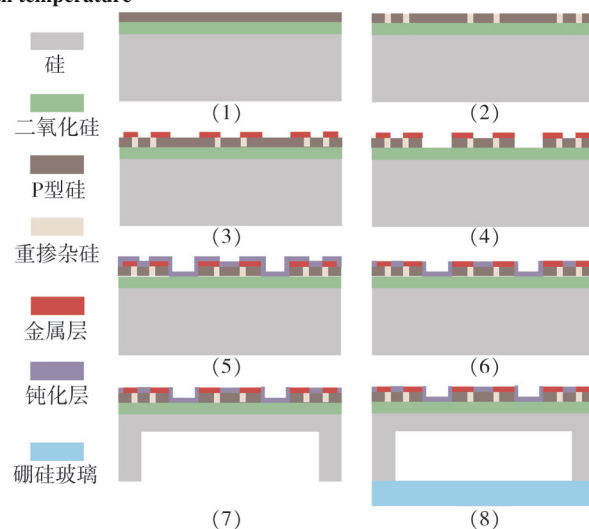


图 10 制备传感器的工艺流程

Fig. 10 Fabrication process flow of sensor

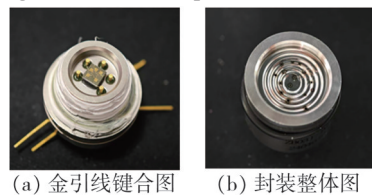


图 11 传感器引线键合及封装图

Fig. 11 Sensor lead bonding and packaging diagram

3.2 结果与讨论

图 12 为搭建的高低温静态标定平台,其中, -50~25℃梯度测试在高低温试验箱内完成, 25~200℃梯度测试在电热烘箱内完成。实验当天环境温度 24.5℃。

在无外界负载压力下进行实验,对-50、25、100、150、200℃这 5 个温度点依次执行梯度,每个温度点保温 2 h 以保证实验的传感器达到热平衡状态,再采集各温度下的零点输出电压。将封装好的传感器置于引压罐,利用高精度数字压力表施加 0~4 MPa 的压力,并利用高精度万用表同步采集输出电压。

常温静态测试数据如表 1 所示,标定数据如图 13

所示,计算得到,常温灵敏度为 29.349 mV/MPa/5 V,线性度约为 0.143%,迟滞为 0.182%,重复性为 0.230%,传感器基本误差为 0.229%。

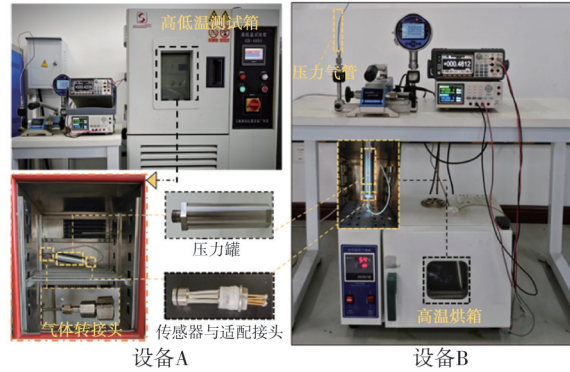


图 12 高低温测试平台

Fig. 12 High-low temperature test platform

表 1 常温静态测试数据

Tab. 1 Static test data at room temperature

压力/MPa	U_0/mV					
	正行程 1	反行程 1	正行程 2	反行程 2	正行程 3	反行程 3
0	-5.796	-5.484	-5.575	-5.427	-5.542	-5.402
0.8	17.437	17.74	17.617	17.798	17.658	17.814
1.6	40.957	41.194	41.137	41.235	41.162	41.276
2.4	64.501	64.616	64.657	64.706	64.689	64.739
3.2	88.086	88.111	88.242	88.242	88.275	88.267
4.0	111.713	111.704	111.844	111.827	111.885	111.868

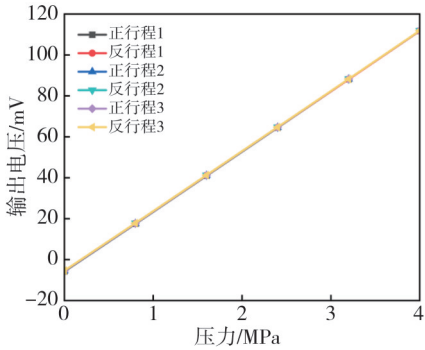


图 13 常温静态压力标定数据图

Fig. 13 Graph of static pressure at normal temperature

零点输出与温度的特性关系如图 14 中的黑线所示,结果表明相比于 25℃下的零点输出, -50℃下零点输出变化 0.549 mV, 200℃下零点输出变化 8.567 mV, 计算得到热零点漂移为 0.039 3%。

对比图 14 红线即图 9(d) 的仿真情况,每个温度点对应的输出值相比于实际值都偏小,呈现系统性正偏差,虽然实际制备存在工艺误差(如光刻对准误差、等离子体刻蚀的侧壁损伤引入额外晶格应力等),但实测数据仍严格保持与仿真一致的漂移趋势,验证了优化三层结构热应力优化的有效性。

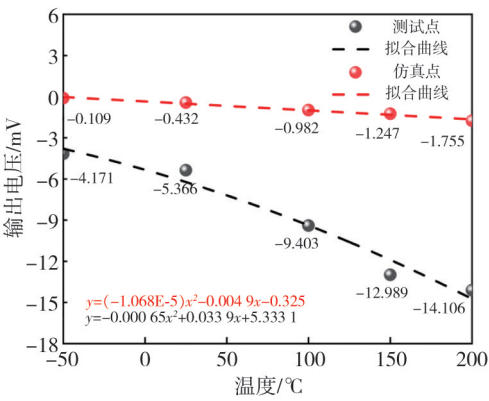


图 14 仿真与实际测试零点输出随温度变化关系

Fig. 14 Relationship between zero-point output of simulation and actual test and its variation with temperature

4 结 论

本文推导了在环境温度下传感器输出电压与压敏电阻应力的关系。通过 COMSOL 多物理场将 Au 层厚度优化为 300 nm, 复合钝化层厚度优化为 300 nm/200 nm, 将键合玻璃层厚度优化至 700 μm 时, 压敏电阻区域热应力降低至 6.38 MPa, 其引起的零点输出同步降至 -1.755 mV。利用 MEMS 制造技术制备了 SOI 压阻式压力传感器, 并在 -50~

200℃温域进行高低温测试。实验结果表明,传感器基本误差约为0.22%,灵敏度为29.349 8 mV/MPa/5 V,整个温域范围内,热零点漂移被有效抑制至0.039 3% FS。本研究为宽温域SOI压力传感器提供了热应力抑制的可靠路径与可行性的制备方案。

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] Zhou Y, Zhao L, Tao W, et al. All-nanofiber network structure for ultrasensitive piezoresistive pressure sensors [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(17): 19949-19957.
- [2] Huang K, Cheng L, Qu S, et al. High-sensitivity silicon carbide optical MEMS accelerometer based on wavelength modulation system [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 14(1): 116-126.
- [3] Zeng X, André N, Masarweh E, et al. Electromechanical measurements and modeling of a high-performance small-area ultra-thin SOI MEMS piezoresistive pressure sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 7507509.
- [4] Xu Z, Yan J, Ji M, et al. An SOI-structured piezoresistive differential pressure sensor with high performance [J]. Micromachines, 2022, 13(12): 2250.
- [5] 罗后明, 雷程, 李锐锐, 等. 封装黏合材料对高温压力传感器性能影响研究 [J]. 测试技术学报, 2025, 39(1): 27-32.
- Luo Houming, Lei Cheng, Li Ruirui, et al. Effect study of encapsulating adhesive materials on the performance of high-temperature pressure sensors [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(1): 27-32. (in Chinese)
- [6] Li C J. Demetallation of organometallic and metal-mediated reactions [J]. The Innovation, 2022, 3(4): 100262.
- [7] Zhou M, Zhou S, Zhou Z, et al. Design, fabrication, and thermal zero drift compensation of a SOI pressure sensor for high temperature applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2025, 382: 116151.
- [8] Wang S, Shi Z, Han X, et al. Low-temperature drift and high-accuracy MEMS pressure sensor with inverted package structure [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 2963(1): 012025.
- [9] Zhang Y, Liu F, Wang X, et al. A diaphragm secondary stress utilization method for increasing the sensitivity of piezoresistive pressure sensors without sacrificing linearity [J]. Measurement, 2025, 242: 116271.
- [10] 郝一鸣, 雷程, 王涛龙, 等. 压敏电阻位置对压阻式压力传感器输出影响研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2025(5): 10-14.
- Hao Yiming, Lei Cheng, Wang Taolong, et al. Study on influence of varistor position on output of piezoresistive pressure sensors [J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(5): 10-14. (in Chinese)
- [11] 杜康乐, 雷程, 梁庭, 等. MEMS 高温压力传感器复合金属层可靠性研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2025(2): 22-27.
- Du Kangle, Lei Cheng, Liang Ting, et al. Study on reliability of composite metal layer of MEMS high temperature pressure sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(2): 22-27. (in Chinese)
- [12] Lauer K, Brokmann G, BaHr M, et al. Determination of piezo-resistive coefficient π_{44} in *p*-type silicon by comparing simulation and measurement of pressure sensors [J]. AIP Advances, 2021, 11(8): 085005.
- [13] Wang J, Chuai R Y. Theoretical relationship between *p*-type polysilicon thin film gauge factor and doping concentration [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(24): 247201.
- [14] Li T, Shang H, Xiao B, et al. Influence of heavily doped connecting layers on the sensitivity of pressure sensors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 338: 113493.
- [15] Nie M, Gao Y. The analytical calibration model of temperature effects on a silicon piezoresistive pressure sensor [J]. AIP Advances, 2017, 7(3): 035120.
- [16] 刘润鹏, 赵妍琛, 刘东, 等. MEMS 正装传感器复合钝化层高温可靠性的研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2024(6): 19-25.
- Liu Runpeng, Zhao Yanchen, Liu Dong, et al. Study on high temperature reliability of composite passivation layer of MEMS forward sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2024(6): 19-25. (in Chinese)
- [17] Preissler N, Amkreutz D, Dulanto J, et al. Passivation of liquid-phase crystallized silicon with PECVD-SiNx and PECVD-SiNx/SiOx [J]. Physica Status Solidi(a), 2018, 215(14): 1800239.