

基于SOI的高抗过载颅内压力传感器设计与制备

李丰超¹, 康振伟¹, 王丙寅², 王志强², 郝一鸣¹, 冀鹏飞¹

(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. 内蒙动力机械研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 颅内压监测在神经外科诊疗中具有重要临床价值, 但现有传感器存在微型化不足、长期稳定性差等问题。提出一种基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)工艺的微型压阻式压敏芯片, 通过敏感膜结构优化设计, 实现了高稳定性、高抗过载性的颅内压监测传感器设计。通过理论建模与有限元仿真, 建立膜厚与边长的协同优化模型, 提升结构线性度。采用绝缘体上硅薄膜(Silicon-On-Insulator, SOI)材料与深硅刻蚀工艺结合刻蚀形成敏感膜, 以制备传感芯片。测试表明: 工作环境下芯片灵敏度达0.34 mV/kPa, 迟滞、重复性及非线性误差分别优于0.13% FS、0.011% FS和0.19% FS。本研究为微型生物医学传感器提供了可拓展的技术路径。

关键词: 压力传感器; 微机电系统; 颅内压; 压阻效应

中图分类号: TN305

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025087

引用格式: 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.

Design and Fabrication of A High Anti-Overload Intracranial Pressure Sensor Based on SOI

LI Fengchao¹, KANG Zhenwei¹, WANG Bingyin², WANG Zhiqiang², HAO Yiming¹, JI Pengfei¹

(1. Key Laboratory of Micro/Nano Devices and Systems, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Inner Mongolia Power Machinery Institute, Huhhot 010010, China)

Abstract: Intracranial pressure monitoring has important clinical value in the diagnosis and treatment of Neurosurgery, but the existing sensors have problems such as a lack of miniaturization and poor long-term stability. In this paper, a micro piezoresistive pressure-sensitive chip based on MEMS technology is proposed. Through the optimal design of the sensitive film structure, the intracranial pressure monitoring sensor with high stability and high overload resistance is realized. Through theoretical modeling and finite element simulation, the collaborative optimization model of film thickness and side length is established to improve the structural linearity. The sensitive film was formed by the combination of SOI material and a deep silicon etching process to prepare the sensor chip. The test results show that the sensitivity of the

收稿日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62304209); 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3209100); 山西省科技重大专项“揭榜挂帅”资助项目(202301030201003); 山西省重点研发计划资助项目(202302030201001); 山西省基础研究计划资助项目(20210302123203)

作者简介: 李丰超(1988-), 男, 讲师, 博士, 主要从事半导体材料与器件研究。E-mail: lifengchao@nuc.edu.cn.

chip is up to 0.34 mV/kPa in the working environment, and the hysteresis, repeatability and nonlinear error are better than 0.13% FS, 0.011% FS and 0.19% FS respectively. This study provides an expandable technical path for micro biomedical sensors.

Key words: pressure sensor; micro-electro-mechanical system(MEMS); intracranial pressure; piezoresistive effect

0 引言

近年来,硅基压力传感器因其体积小、重量轻、灵敏度高特性,被广泛应用于航空、航天、医疗等领域^[1-2]。根据工作原理,压力传感器可以分为压阻式、电容式和谐振式。相比于其他传感器,压阻式传感器因其体积小、测量精度高、加工工艺成熟,以及稳定性好的特性,广泛适用于医疗领域^[3-4]。例如,颅内压(Intracranial Pressure, ICP)^[5]指颅腔内容物对颅腔壁产生的压力,科学合理的ICP监测是预防和治疗干预颅脑疾病的重要手段^[6],在此过程中,因其特殊的工作环境,需要传感器具有很高的灵敏度和线性度来反应微小压力的变化^[7-8]。

目前,国内外市场上的ICP监测仪主要包括:美国强生(Johnson & Johnson)公司开发的Codman系列ICP监测系统^[9],其基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)应变计技术,将微型应变计传感器集成于3Fr(约1 mm直径)柔性尼龙导管顶端,可植入脑实质、脑室或硬膜下空间,兼具ICP和脑灌注压等多种测量功能,感染率和血肿发生率低;法国索菲萨(Sophysa)公司开发的Pressio系统^[10],其基于MEMS加工工艺,采用微传感器技术,可以减少组织损伤地植入脑室或脑实质,兼具ICP和颅内温度(Intracranial Temperature, ICT)测量功能。但上述两种传感器价格十分昂贵,普通消费者难以承受。

2023年,中北大学Ma等^[11]提出了一种新型的微型微压半主动惠斯通电桥压阻压力传感器,其采用深度反应离子蚀刻技术(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)^[12],能够制造出尺寸为 $460\ \mu\text{m}\times 460\ \mu\text{m}$ 、厚度为 $6.5\ \mu\text{m}$ 的压敏膜片。这些膜片的设计满足了ICP检测芯片对于体积小、重量轻和高灵敏度的要求。但是在实际测试中发现,芯片从储藏温度 $4\ ^\circ\text{C}$ 环境拿到常温($25\ ^\circ\text{C}$ 左右)环境下时,膜片发生破裂。推测其原因为膜片边长与厚度比例过大,导致温度骤增下膜片破裂。且若膜片边长与厚度比例过大,也会增加其在使用过程中发生变形损坏的风险,使其

抗过载功能降低^[13-15]。

针对上述问题,本文将通过COMSOL有限元仿真分析方法,对MEMS压阻式压力传感器芯片设计过程中的主要参数,如膜片边长与厚度的比例、压敏电阻摆放位置等进行设计仿真,寻找最佳设计方案,以达到改进压阻式压力传感器芯片设计方法的目的。利用MEMS工艺技术,采用绝缘体上的单晶硅薄膜(Silicon-on-Insulator, SOI)材料与深硅刻蚀工艺结合刻蚀形成敏感膜,制备传感芯片并对其进行测试,以得到传感器的各项静态指标,为微小型压阻式压力传感器的设计提供参考。ICP检测芯片主要设计指标如下:

- 1) 压力类型:密封测量(参考压力为一个大气压);
- 2) 压力量程:0~40 kPa;
- 3) 供电电压:3.5 V;
- 4) 灵敏度: $>0.3\ \text{mV/kPa}$;
- 5) 芯片尺寸: $1\ 100\ \mu\text{m}\times 700\ \mu\text{m}\times 400\ \mu\text{m}$;
- 6) 非线性度: $<1\%\text{FS}$ 。

1 工作原理

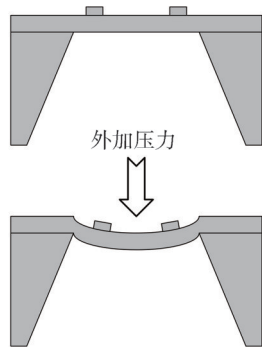
压阻式压力传感器基于硅的压阻效应^[16]原理,采用硅薄膜作为感压元件,当其受到某方向上的应力作用,膜片发生形变(见图1(a))时,分布在其上的压敏电阻会受到挤压或拉伸,惠斯通电桥^[17]失衡,输出电压信号,其中,惠斯通电桥按照掺杂电阻的个数可分为半桥单臂、半桥双臂和全桥。

因为ICP检测芯片体积小、重量轻和高灵敏度的制备要求,故本文采用恒压源供电的半桥双臂电路来进一步使芯片更加轻量化,其电路结构如图1(b)所示。

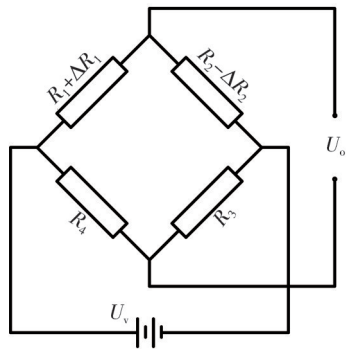
图中,半桥电路的电源为 U_v ,电桥的输出电压为 U_o , R_1 与 R_2 为压敏掺杂电阻, R_3 与 R_4 为外接固定电阻。在外部压力作用下,压敏电阻 R_1 和 R_2 产生的电阻变化量分别为 ΔR_1 和 ΔR_2 。当 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$,且 $\Delta R_1=\Delta R_2=\Delta R$ 时,电桥电路的输出电压 U_o 可依据式(1)进行计算。

$$U_o = \frac{\Delta R}{2R} U_v, \tag{1}$$

式中: R 为固定电阻值。



(a) 压力传感器硅薄膜受力变形示意图



(b) 惠斯通半桥双臂电路原理图

图 1 压力传感器工作示意图

Fig. 1 Operation schematic diagram of pressure sensor

2 器件设计

2.1 敏感膜参数设计

根据进入颅内的封装体尺寸要求,设计芯片尺寸为 $1\ 100\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ 。针对现有敏感膜膜边长与膜厚比过大,敏感膜刚度及稳定性较差,在实验过程中容易出现破损变形的问题,要减小敏感膜片边长与厚度比。同时,也要保证传感器灵敏度和线性度符合设计需求,因此,敏感膜边长与厚度比成为了设计研究的重点。

基于最小挠度变形理论和对传感器输出灵敏度的约束,敏感膜片的最大工作压强 P 、设计厚度 H 以及边长 A 三者之间的关系遵循以下原则:

1) 线性原则^[18]。在器件的工作阶段,要确保输出电压随施加压力的变化成线性关系,器件膜厚所产生的最大挠度 ω_{max} 需小于薄膜厚度的 $1/5$ ^[19]。同时,依据小挠度理论可知,在工作过程中,正方形膜的中心位置所呈现出的挠度值是最大的,如式(2)、式(3)所示。

$$\omega_{\text{max}} = 0.0138 \frac{pa^4}{Eh^3}, \tag{2}$$

$$\omega_{\text{max}} < 0.2h, \tag{3}$$

式中: E 为 Si 的弹性模量, $190\ \text{GPa}$; p 为传感器的最大量程 $40\ \text{kPa}$; a 为敏感膜片的边长, $460\ \mu\text{m}$; h 为敏感膜的厚度。将以上数值代入式(2)和式(3),可求得敏感膜厚度 $h > 5.2\ \mu\text{m}$ 。

2) 可靠性原则^[20]。为保证传感器工作的可靠性,确保其工作时的抗过载能力,一般选取单晶硅最大破坏应力的 $1/5$ 作为敏感膜上的最大应力值 σ_{max} ^[21],如式(4)、式(5)所示。

$$\sigma_{\text{max}} = 0.308 \frac{pa^2}{h^2}, \tag{4}$$

$$\sigma_{\text{max}} < 0.2\sigma, \tag{5}$$

式中: σ 为 Si 的破坏应力, $7\ \text{GPa}$ 。代入式(4)和式(5)计算可得 $h > 0.7\ \mu\text{m}$ 。综上,敏感膜厚度取值范围为 $h > 5.2\ \mu\text{m}$ 。

在实际应用中,传感器元件的灵敏度和抗过载能力与敏感膜厚存在显著相关性。随着敏感膜厚度的增加,其力学稳定性显著提升,对应的传感器抗过载能力越强,但是其灵敏度却越差。反之,当敏感膜厚度减小时,虽然能够获得更高的灵敏度响应值,但材料结构的机械强度会同步降低,导致传感器元件抗过载能力越差。因此,综合考虑传感器灵敏度、可靠性以及加工工艺的复杂情况,最终选择固定膜厚为 $6.5\ \mu\text{m}$ 。以膜边长 $460\ \mu\text{m}$ 为起始值,以 $50\ \mu\text{m}$ 为步进长度逐步递减,到 $310\ \mu\text{m}$ 终止。使用有限元仿真软件进行建模和仿真分析,研究在膜厚为 $6.5\ \mu\text{m}$,膜边长分别为 460 、 410 、 360 、 $310\ \mu\text{m}$ 条件下,施加 $140\ \text{kPa}$ 压力载荷,敏感膜的应力、应变情况,从而选择出最合适的敏感膜参数。

分析不同膜片边长对应的最大应力和最大挠度,结果如图 2 所示。

观察折线趋势可知,最大应力与膜片边长成正相关,当膜片边长为 $460\ \mu\text{m}$ 时,敏感膜片最大应力为 $221\ \text{MPa}$,当膜片边长逐步降低至 $310\ \mu\text{m}$ 时,其对应的最大应力为 $94\ \text{MPa}$,即随膜片边长增加,最大应变也增加。综合上述两个参数考虑,在保证芯片灵敏度的同时,增强芯片的稳定性,因此,膜片边长设计选择 $360\ \mu\text{m}$ 。

选择 $360\ \mu\text{m}$ 作为敏感膜边长,在 $140\ \text{kPa}$ 作用力下,敏感膜上最大应力为 $122\ \text{MPa}$,如图 3(a) 所示,远小于硅的破坏应力;最大应变为 $0.737\ \mu\text{m}$,如图 3(b) 所示,应变符合线性原则。

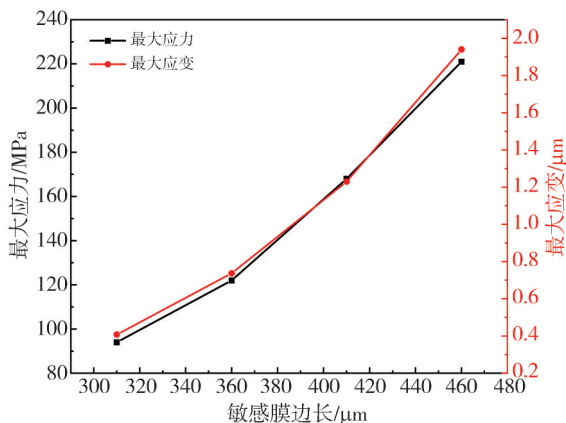
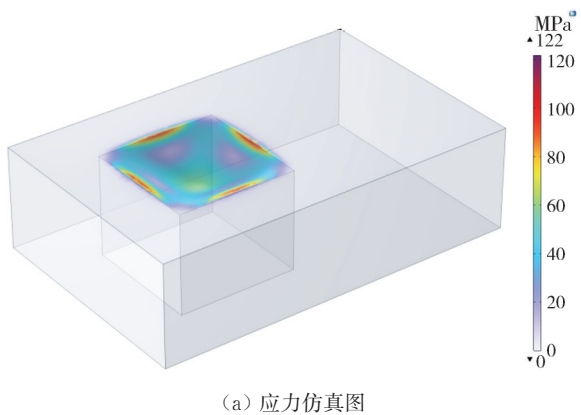
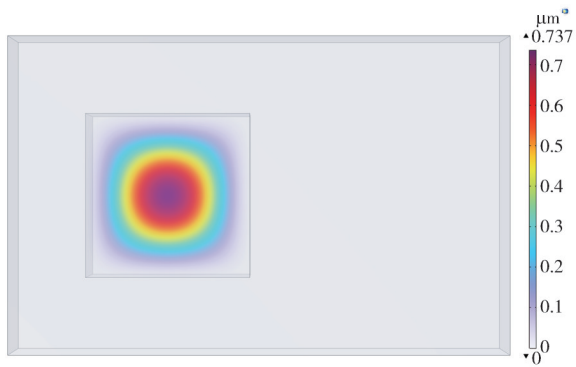


图2 敏感膜长对应的最大应力与最大应变关系图

Fig. 2 Maximum stress and maximum strain corresponding to sensitive membrane length



(a) 应力仿真图



(b) 应变仿真图

图3 应力及应变仿真图

Fig. 3 Stress and strain simulation diagram

2.2 压敏电阻参数设计

本文设计压敏电阻尺寸为 $65\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$ ，在敏感膜表面添加如图4路径，分析该路径上敏感膜所受最大应力以确定压敏电阻放置位置。

敏感膜片边缘的应力分布曲线如图5所示，在敏感膜中心位置 $70\ \mu\text{m}$ 范围内，应力较大，超出此范围后，所受应力逐渐减小。

由图6可看出，敏感膜应力集中区为边长中心，理想状态下可以将压敏电阻布置于此，提高

芯片灵敏度。但在工艺设计和实际应用中，需要考虑工艺误差，预留工艺冗余尺寸，实现正面的压敏电阻与背面的敏感膜片的位置对应。

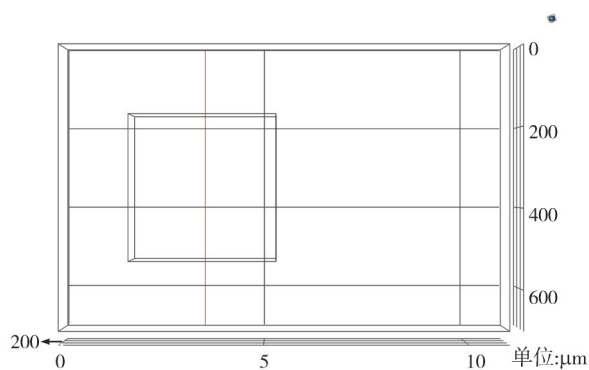


图4 敏感膜表面路径分析

Fig. 4 Path analysis of sensitive film surface

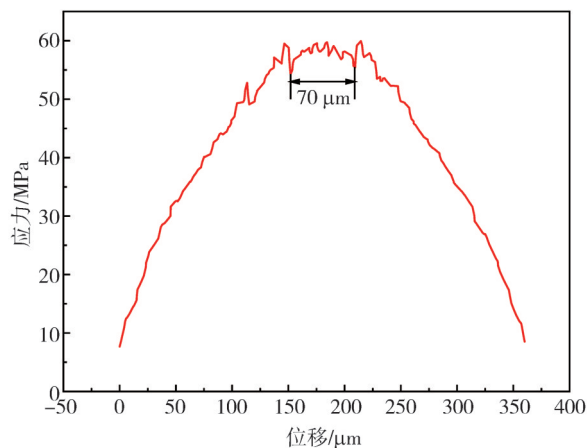


图5 应力集中区分布

Fig. 5 Distribution of stress concentration area

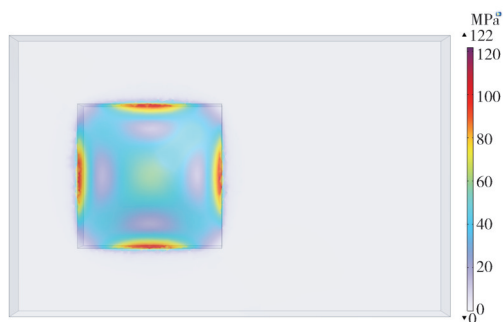


图6 应力敏感区分布图

Fig. 6 Distribution of stress sensitive area

综合考虑工艺设备对准精度和压敏电阻宽度^[22]，将2个压敏电阻布置于膜片边缘中点靠内 $23\ \mu\text{m}$ 处，如图7所示。

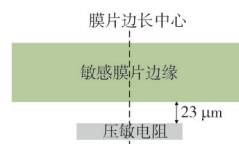


图7 压敏电阻放置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of varistor placement

3 制备工艺

3.1 工艺流程设计

本文研究的 ICP 检测芯片通过 MEMS 加工技术^[23]制造,涉及敏感薄膜、压敏电阻以及金属引线的制作。然而,在实际的加工工艺中,干法刻蚀和湿法腐蚀都很难精确控制刻蚀 $6.5\ \mu\text{m}$ 硅薄膜^[24],刻蚀误差常超过 $1\ \mu\text{m}$,这将直接影响传感器的灵敏度。鉴于此,本研究选择 SOI 作为基底材料以更精确地控制敏感膜厚度^[25]。所设计的传感器采用 PN 结隔离技术,通过降低衬底的掺杂水平^[26],有效提升了 PN 结的击穿电压并减少了漏电流。因此,本研究选用了掺杂浓度较低、电阻率为 $1\sim 20\ \Omega\cdot\text{m}$ 的 N 型硅作为 SOI^[27-29]基底,以实现更优的传感器性能。

本文芯片的制备工艺流程如图 8 所示:

a) 对 SOI 片进行无机清洗,先使用 3 号液 ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2=3:1$) 清洗 15 min,再使用 1 号液 ($\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$) 清洗 5 min,使其表面洁净度达到制备要求。

b) 光刻并刻蚀有源标记和划片标记,使用反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, RIE)浅刻蚀,深度 300 nm。清洗后,使用化学气相沉积(Che-mical Vapor Deposition, CVD)沉积 $2\ \mu\text{m}\ \text{SiO}_2$,作为离子注入的掩蔽层^[30]。

c) 光刻压敏电阻,使用缓冲氧化物刻蚀液(Buffered Oxide Etchant, BOE)腐蚀 SiO_2 30 s。离子注入 B+, 然后 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 退火 20 min,以激活杂质元素。

d) 湿法腐蚀去除 SiO_2 掩膜,清洗后, CVD 沉积 $1\ \mu\text{m}\ \text{SiO}_2$ 。光刻重掺杂区使用 BOE 溶液腐蚀 SiO_2 10 s。选择固态硼源扩散进行重掺以形成欧姆接触区,之后去除残余掩膜,清洗 SOI 片表面。

e) 在顶层硅沉积 200 nm SiO_2 作为阻挡层,避免金属引线与衬底接触。

f) 光刻开孔欧姆接触区, RIE 刻蚀 200 nm SiO_2 ,之后使用 BOE 溶液腐蚀 3 s 以确保开孔区域无残留 SiO_2 。

g) 使用 Lift-off 剥离工艺光刻金属引线,然后溅射 Ti、Pt、Au,剥离制备金属引线和焊盘^[31]。最后,使用真空退火炉其退火^[32]形成欧姆接触。

h) 利用光刻机背对功能实现衬底层的套刻对准并进行光刻,之后使用深反应离子刻蚀(Deep RIE, DRIE)进行敏感膜的制备,利用刻蚀气体对

硅和氧化硅刻蚀比不同的特性,实现刻蚀自停止。

i) 先对 SOI 晶圆和 BF33 进行键合预处理(无机清洗、氧等离子体轰击活化表面),然后,将 SOI 片与 100 nm 的 BF33 进行键合。

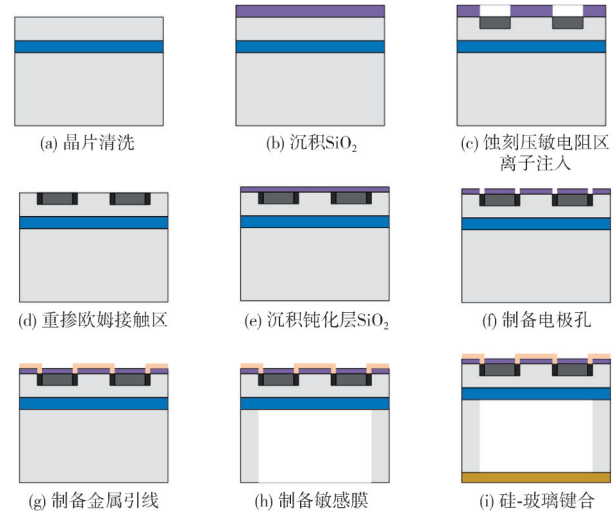


图 8 制备工艺流程图

Fig. 8 Preparation process flow chart

3.2 关键工艺设计

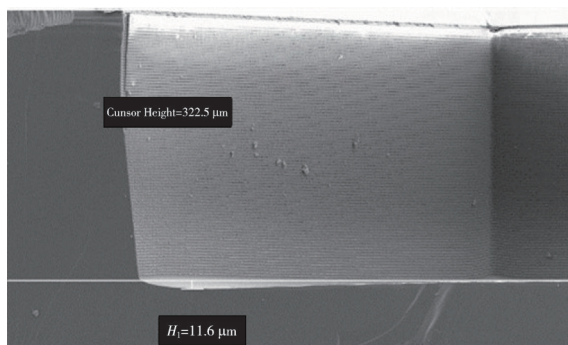
传统的深腔刻蚀工艺有湿法腐蚀和干法刻蚀。湿法腐蚀^[33]形成的腐蚀侧壁平滑,加工成本低,条件简单,但是通常情况下硅的湿法腐蚀工艺会形成 54.7° 的倾角,难以精准控制敏感膜片的尺寸,影响所设计传感器的性能。DRIE 可以提高侧壁的垂直度^[34],使敏感膜片与设计值相符,但是膜片的厚度变化可能对 DRIE 偏差引起的刻蚀不均匀性很敏感,这将影响传感器的非线性度。

结合 DRIE 原理,实验选择顶层硅为 $6\ \mu\text{m}$ 、氧化层为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 SOI 片,以实现超薄膜片刻蚀^[35]。

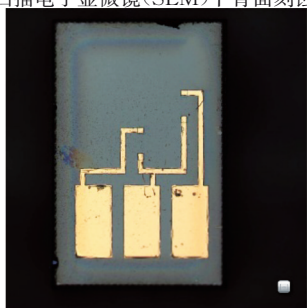
在 Bosch 工艺^[36]中,六氟化硫(SF_6)和八氟环丁烷(C_4F_8)分别用于蚀刻和钝化过程。首先,反应室充满 C_4F_8 气体,该气体在等离子体环境下会生成氟化碳类聚合物,这种聚合物沉积在硅表面能够有效阻止氟离子与硅的反应,形成保护层,从而避免侧向刻蚀的发生。随后, SF_6 气体被引入反应室进行蚀刻, F^- 离子与钝化膜发生反应,生成挥发性气体 CF_2 ,使硅基部件暴露出来,进而进行刻蚀。同时,硅和钝化层也会受到物理轰击,实现物理刻蚀。通过在蚀刻和钝化沉积工艺之间的快速切换可以形成具有垂直侧壁的刻蚀轮廓,如图 9(a) 所示。

因此,采用 SOI 材料与深硅刻蚀工艺结合,基

于二氧化硅刻蚀自停止的原理,当DRIE气体到达氧化硅层时,由于其对硅的刻蚀速率快,对氧化硅刻蚀速率慢的特性,刻蚀比约为1:150,基本不会对二氧化硅产生损失,选择二氧化硅作为刻蚀停止层,不用担心欠刻蚀或过刻蚀的情况^[37]。



(a) 扫描电子显微镜(SEM)下背面刻蚀腔体



(b) 共聚焦显微镜下正面金属引线结构

图9 实验制备芯片结构

Fig. 9 Experimental chip structure

从图9(b)可以看出,本文所制备芯片正面金属引线结构清晰完整,背面所刻蚀的腔体较为平整规范,有利于后续实验和测试的进行。

4 测试

4.1 常温静压测试

对芯片进行性能测试,检验芯片的实际测压能力。依据芯片的设计指标,其满量程压力为40 kPa,故合理划分测试区间,以每10 kPa为间隔进行正反行程压力测试,测试结果如图10所示。结果显示测试所得芯片常温灵敏度为0.339 mV/kPa,迟滞为0.13% FS,重复性误差为0.011% FS,非线性误差为0.19% FS。

将设计的芯片与原芯片进行对比,结果如表1所示。可以看出,本文所研制的ICP检测芯片与原芯片相比,在尺寸相近的条件下,尽管灵敏度相比下降了36.99%,满量程输出降低了37.26%,导致其满量程输出电压较低,迟滞现象也略微增加10.77%,但是芯片的重复性较原芯片降低了

96.57%,表明其在测量过程中具有更高的稳定性和可靠性。

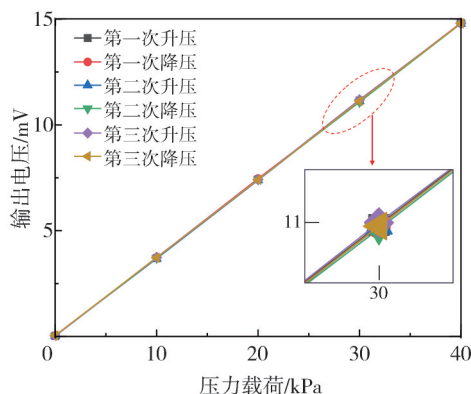


图10 常温静态压力测试数据

Fig. 10 Static stress test data at room temperature

表1 静态性能参数指标

Tab. 1 Static performance parameters

参数指标	原芯片	现芯片
温度 $T/^\circ\text{C}$	25	25
电源电压 U/V	3.5	3.5
零位输出 U_0/mV	0.112	0.030
满量程输出 U_M/mV	21.678	13.630
灵敏度 $k/(\text{mV}\cdot\text{kPa}^{-1})$	0.538	0.339
迟滞 γ_H	0.116	0.130
重复性 γ_R	0.321	0.011

在实际测试中,当芯片从4℃的保存环境转移至常温(约25℃)环境下时,未出现膜片破裂的情况,如图11所示。这一结果表明,改进后的敏感膜边长与厚度比例较为合理,敏感膜的刚度和稳定性得到了显著提升。



图11 4℃到25℃共聚焦显微镜下膜片整体情况

Fig. 11 Overall condition of diaphragm under confocal microscope from 4℃ to 25℃

综上所述,虽然该芯片灵敏度较之前略有下降,但是仍满足ICP测量标准,并且改进后的敏感膜刚度和稳定性得到了显著提升,具有更高的稳

定性和可靠性。该芯片满足设计预期,达到了测量 ICP 的性能标准。

4.2 芯片稳定性测试

为进一步探究所开发 ICP 检测芯片的性能表现,选取 5 个芯片在不同压力下进行测试,测量其输出电压。测试环境保持恒定,温度为 25 °C,相对湿度 45%,以确保实验条件的一致性。共采集 5 个压力值下的电压输出值,图 12 为 5 种芯片在 0~40 kPa 压力范围内的输出信号变化曲线。

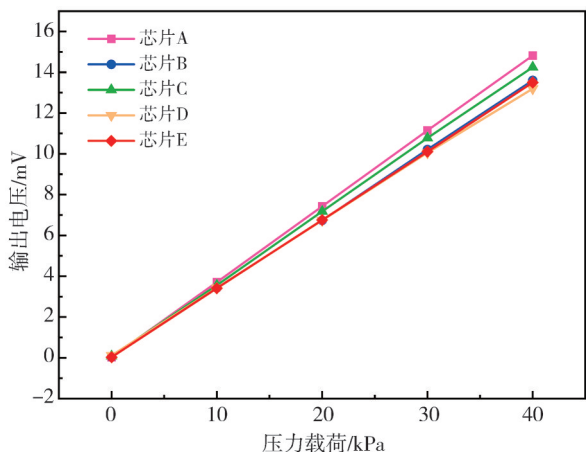


图 12 5 个芯片在不同压力下的输出

Fig. 12 Output of five chips under different pressures

从图 12 可以看出,所有芯片的输出信号均随输入压力的增加呈现线性增长的趋势,这表明芯片在该压力范围内具有良好的线性响应特性。然而,不同芯片之间的输出信号存在明显差异,这主要归因于芯片内部结构和制造工艺的差异。

在微小尺寸芯片上设计高灵敏度芯片很难,所以,高灵敏度是 ICP 测量的关键。通过对测试数据进行线性拟合,计算出 5 个芯片的灵敏度值,结果如表 2 所示。

表 2 不同芯片测得灵敏度

Tab. 2 Sensitivity measured by different chips

芯片编号	灵敏度/(mV·kPa ⁻¹)
芯片 A	0.370
芯片 B	0.339
芯片 C	0.354
芯片 D	0.327
芯片 E	0.337

由表 2 可以看出,尽管不同芯片之间的输出信号存在差异,但其灵敏度值均在 0.327~0.370 mV/kPa 范围内,且随着灵敏度的增加,芯片对压力变化的响应更加敏锐,进一步展示了其对压力变化的高度灵敏响应能力。

综上所述,尽管芯片内部结构和制造工艺的微小差异可能导致输出信号的个体差异,但整体性能仍保持在设计预期范围内,所设计 ICP 检测芯片在不同压力下的性能表现基本一致且稳定,所有芯片均符合设计标准,满足 ICP 检测的使用要求。

5 结 论

本文基于硅的压阻效应,设计了一种可用于人体 ICP 测量的微压传感芯片,并提出了一种基于 SOI 材料与深硅刻蚀工艺结合的深硅刻蚀自停止保护层,芯片采用半惠斯通电桥的小体积封装结构。经过对传感器的性能的详尽测试,传感器的灵敏度高达 0.34 mV/kPa,同时线性度、迟滞效应以及重复性均表现出较小的偏差。这些结果表明,传感器的性能优异,能够满足预定的技术规格。

参考文献:

[1] 李鑫,梁庭,赵丹,等. SOI 高温压阻式压力传感器的设计与制备[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(6): 408-414.

LI Xin, LIANG Ting, ZHAO Dan, et al. Design and preparation of a high temperature SOI piezoresistive pressure sensor[J]. Micronanoelectronic Technology, 2018, 55(6): 408-414. (in Chinese)

[2] PONGSAKORNSATHIEN N, GARDI A, LIM Y, et al. Wearable cardiorespiratory sensors for aerospace applications[J]. Sensors, 2022, 22(13): 4673.

[3] 汪康,何壮,喻研. 柔性压阻式压力传感器的制备与性能优化[J]. 电子元件与材料, 2022, 41(8): 781-793.

WANG Kang, HE Zhuang, YU Yan. Preparation and performance optimization of flexible piezoresistive pressure sensor[J]. Electronic Components and Materials, 2022, 41(8): 781-793. (in Chinese)

[4] 王天靖,梁庭,雷程,等. 压阻式压力传感器硅电阻条浅槽刻蚀的研究[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(4): 199-202.

WANG Tianjing, LIANG Ting, LEI Cheng, et al. Study on etching of silicon resistance strip shallow groove of piezoresistive pressure sensor[J]. Ship Electronic Engineering, 2024, 44(4): 199-202. (in Chinese)

[5] 齐洪武,曾维俊,任胤朋,等. 有创颅内压监测技术的研究进展[J]. 中国微侵袭神经外科杂志, 2020, 25(6): 281-284.

- QI Hongwu, ZENG Weijun, REN Yinpeng, et al. Research progress of invasive intracranial pressure monitoring technology [J]. Chinese Journal of Minimally Invasive Neurosurgery, 2020, 25(6): 281-284. (in Chinese)
- [6] 许高斌, 董娜娜, 高雅, 等. MEMS 颅内压监测传感器的设计与分析[J]. 电子元件与材料, 2023, 42(6): 699-703.
- XU Gaobin, DONG Nana, GAO Ya, et al. Design and analysis of MEMS intracranial pressure monitoring sensor [J]. Electronic Components and Materials, 2023, 42(6): 699-703. (in Chinese)
- [7] 周行健, 雷程, 梁庭, 等. 高频响MEMS压力传感器动态性能研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(4): 167-171.
- ZHOU Xingjian, LEI Cheng, LIANG Ting, et al. Dynamic performance research of high frequency response MEMS pressure sensor[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(4): 167-171. (in Chinese)
- [8] SU R, WEN X, WANG J, et al. Research progress of intelligent wearable flexible pressure sensor[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(8): 98-108.
- [9] CODMAN. Codman ICP brochures[EB/OL]. (2021-06)[2025-06-10]. <https://products.integralife.com/file/general/1571414237.pdf>.
- [10] SOPHYSA. Product brochure pressio 2[EB/OL]. 2023-05 [2025-06-10]. <https://www.sophysa.com/wp-content/uploads/2023/05/Pressio2-Brochure-A4.pdf>.
- [11] MA Y, LEI C, LIANG T, et al. Design and fabrication of a tiny micro-pressure sensor with improved linearity and sensitivity[J]. Physical Review Research, 2023, 98(5): 055018.
- [12] 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)
- [13] ZHANG X, WEBSTER J G, ISKANDAR B J, et al. Chronic intracranial pressure sensor to assist with control of hydrocephalus [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(5): 1969-1978.
- [14] 王宇峰, 赵妍琛, 雷程, 等. 固支结构对压阻式压力传感器的输出影响研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(10): 7-14.
- WANG Yufeng, ZHAO Yanchen, LEI Cheng, et al. Study on influence of fixed support structure on piezoresistive pressure sensor output [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(10): 7-14. (in Chinese)
- [15] 冀鹏飞, 赵妍琛, 雷程, 等. 硅压敏电阻刻蚀形貌对高温压力传感器输出特性影响[J]. 仪表技术与传感器, 2023(12): 10-15.
- JI Pengfei, ZHAO Yanchen, LEI Cheng, et al. Output characteristics influence of silicon piezoresistor etching morphology on high temperature pressure sensors [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(12): 10-15. (in Chinese)
- [16] MEENA K V, SANKAR A R. Biomedical catheters with integrated miniature piezoresistive pressure sensors: a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10241-10290.
- [17] 郝小艺. 高性能MEMS压阻式压力传感器设计、制备与测试[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [18] PENG S, ZHU S. Optimization of sensitivity of MEMS micro-pressure sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(13): 1582-1590.
- [19] SONG P, MA Z, MA J, et al. Recent progress of miniature MEMS pressure sensors [J]. Micromachines, 2020, 11(1): 56.
- [20] 郭威. 高灵敏度MEMS压阻式压力传感器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [21] HE F, FENG Y, DAI J, et al. Design for silicon piezoresistive pressure sensor chips [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2023, 13(7): 920-927.
- [22] 王婧, 雷程, 梁庭, 等. 压敏电阻工艺误差的影响分析[J]. 仪表技术与传感器, 2023(7): 8-11.
- WANG Jing, LEI Cheng, LIANG Ting, et al. Influence analysis of technological error of varistor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(7): 8-11. (in Chinese)
- [23] 梁庭, 薛胜方, 雷程, 等. 高频响MEMS压力传感器设计与制备[J]. 仪表技术与传感器, 2021(6): 6-10.
- LIANG Ting, XUE Shengfang, LEI Cheng, et al. Design and preparation of high frequency MEMS pressure sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(6): 6-10. (in Chinese)
- [24] KANEKAL D, JINDAL S K. Investigation of MEMS piezoresistive pressure sensor with a freely supported rectangular silicon carbide diaphragm as a primary sensing element for altitudinal applications [J]. Silicon, 2023, 15(4): 1947-1959.
- [25] 钟长志, 王凌云, 卜振翔, 等. 基于绝缘体上硅的颅内压力传感器的设计与制作[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2023, 62(4): 517-524.
- ZHONG Changzhi, WANG Lingyun, BU Zhenxiang,

- et al. Design and fabrication of intracranial pressure sensor based on SOI[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2023, 62(4): 517-524. (in Chinese)
- [26] 单存良, 梁庭, 王文涛, 等. 基于 SOI 的 MEMS 高温压阻式压力传感器[J]. *微纳电子技术*, 2021, 58(4): 325-331.
- SHAN Cunliang, LIANG Ting, WANG Wentao, et al. MEMS high temperature piezoresistive pressure sensor based on SOI [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2021, 58(4): 325-331. (in Chinese)
- [27] 许泽斌. 基于 SOI 结构的压阻式压力传感器的制备及性能研究[D]. 上海: 上海大学, 2023.
- [28] 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)
- [29] 李鑫, 梁庭, 赵丹, 等. 基于 SOI 的 E 型结构 MEMS 高温压力传感器的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(5): 1-4.
- LI Xin, LIANG Ting, ZHAO Dan, et al. Design of SOI-MEMS high temperature pressure sensor based on E-type structure [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(5): 1-4. (in Chinese)
- [30] 宫凯勋, 梁庭, 雷程, 等. MEMS 电镀金属掩模工艺研究[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(11): 27-30.
- GONG Kaixun, LIANG Ting, LEI Cheng, et al. Research on MEMS electroplating metal masking process [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(11): 27-30. (in Chinese)
- [31] 刘润鹏, 雷程, 梁庭, 等. MEMS 高温压力传感器耐高温引线结构优化[J]. *压电与声光*, 2024, 46(3): 386-391.
- LIU Runpeng, LEI Cheng, LIANG Ting, et al. Optimization of high-temperature-resistant lead structure for MEMS high-temperature pressure sensors [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2024, 46(3): 386-391. (in Chinese)
- [32] 林立娜, 梁庭, 赵丹, 等. 退火参数对 p-Si 与 Ti/Pt/Au 欧姆接触的影响[J]. *传感技术学报*, 2018, 31(10): 1499-1504.
- LIN Lina, LIANG Ting, ZHAO Dan, et al. Influence of annealing parameters on ohmic contact of p-Si and Ti/Pt/Au [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(10): 1499-1504. (in Chinese)
- [33] MA T, WANG Y, ZHOU J. A Si-based suspended tunnel structure with trapezoidal section by two-step etching [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2022, 32(2): 024003.
- [34] 鲍艳, 许佳琛, 郭茹月, 等. 基于微纳结构的高灵敏度柔性压力传感器[J]. *化学进展*, 2023, 35(5): 709-720.
- BAO Yan, XU Jiachen, GUO Ruyue, et al. High-sensitivity flexible pressure sensor based on micro-nano structure [J]. *Progress in Chemistry*, 2023, 35(5): 709-720. (in Chinese)
- [35] 郝一鸣, 雷程, 王涛龙, 等. 用于 E 型薄膜制备的双掩膜工艺研究[J]. *压电与声光*, 2024, 46(4): 505-510.
- HAO Yiming, LEI Cheng, WANG Taolong, et al. Study on the double mask process for preparation of E-type films [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2024, 46(4): 505-510. (in Chinese)
- [36] PARK J S, KANG D H, KWAK S M, et al. Low-temperature smoothing method of scalloped DRIE trench by post-dry etching process based on SF₆ plasma [J]. *Micro and Nano Systems Letters*, 2020, 8(1): 14.
- [37] JIAO D, NI Z, WANG J, et al. Ultra-small pressure sensors fabricated using a scar-free microhole inter-etch and sealing (MIS) process [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2020, 30(6): 065012.