

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.05.11

时速 350 km 及以上高铁的牵引和制动系统压力传感器芯片设计优化

郑德智¹, 董晓源^{1,2}, 陈傲北³, 孙颖³, 胡纯¹, 王帅^{4*}

(1.北京理工大学 前沿交叉科学院, 北京 100081; 2.北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081;

3.北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191; 4.北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191)

摘要: 为应对高铁牵引与制动系统中复杂工况对压力传感器在高精度、宽动态范围及快速响应方面的严苛要求, 本研究团队基于压阻效应机理, 开展了高精度压力传感器芯片的制造与优化技术攻关。运用多物理场耦合建模理论, 结合结构参数优化方法, 系统研究了敏感膜片厚度、压敏电阻布局与掺杂浓度对传感器性能的协同影响机制, 提出基于参数化设计方法的膜片刚度-灵敏度协同优化策略。通过开发八层掩膜版光刻工艺与氢氧化钾/异丙醇(Potassium Hydroxide/Isopropyl Alcohol, KOH/IPA)复合湿法刻蚀技术, 实现悬膜厚度亚微米级控制精度。研究结果表明: 优化后的传感器在灵敏度、非线性误差及过载耐受能力方面表现优异, 灵敏度达到 56.987 mV/kPa, 非线性误差为 0.048% FS(Full Scale, 满量程), 并在 300% 过载工况下仍保持结构完整性。本研究为高精度压力芯片的制造与优化提供了理论依据和技术支持, 为保障高铁列车安全运行与核心部件国产化替代提供了关键技术支撑。

关键词: 高铁列车; 牵引系统; 制动系统; 压力传感器; 压阻效应; 芯片设计; 参数化模型; 多物理场耦合仿真

中图分类号: TH701; TP212; TB935 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2025) 05-0108-10

Pressure sensor chip fabrication and optimization for traction and braking systems in high-speed trains with speeds of 350 km/h and above

ZHENG Dezhi¹, DONG Xiaoyuan^{1,2}, CHEN Aobei³, SUN Ying³, HU Chun¹, WANG Shuai^{4*}

(1. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

4. School of Computer Science, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To meet the stringent requirements for high accuracy, wide dynamic range, and rapid response of pressure sensors under the complex operating conditions of high-speed train traction and braking systems, this study presents the design, fabrication, and multiphysics optimization of a high-performance piezoresistive pressure sensor chip. By employing multiphysics coupling modeling theory in combination with a structural parameter optimization approach, this study

收稿日期: 2025-04-01; 修回日期: 2025-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3207700)

引用格式: 郑德智, 董晓源, 陈傲北, 等. 时速 350 km 及以上高铁的牵引和制动系统压力传感器芯片设计优化[J]. 计测技术, 2025, 45(5): 108-117.

Citation: ZHENG D Z, DONG X Y, CHEN A B, et al. Pressure sensor chip fabrication and optimization for traction and braking systems in high-speed trains with speeds of 350 km/h and above[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(5): 108-117.



systematically investigates the synergistic influence of diaphragm thickness, piezoresistor layout, and doping concentration on sensor performance, and proposes a parameterization-based stiffness-sensitivity co-optimization strategy for the diaphragm. Furthermore, by developing an eight-mask photolithography process and a composite wet etching technique based on KOH/IPA, a submicron-level control accuracy of diaphragm thickness was achieved. Finite element simulation results demonstrate a sensitivity of 56.987 mV/kPa, a nonlinearity of 0.048% FS, and structural stability under 300% overpressure. This work addresses a key technological bottleneck in high-accuracy pressure sensor fabrication and lays the foundation for fully localized production of safety-critical sensing components in next-generation traction systems for high-speed train.

Key words: high-speed trains; traction systems; braking systems; chip design; pressure sensor; piezoresistive effect; parameterized model; multiphysics coupled simulation

0 引言

随着我国高速铁路网络向“八纵八横”战略格局纵深发展,运营时速350 km及以上的新一代智能动车组已成为推动区域经济协同、增进民生福祉提升、重构现代交通体系的核心载体^[1]。作为保障列车安全高效运行的核心技术,牵引制动系统通过精确的机电液耦合控制实现百km级制动距离的动态调节,其控制精度直接决定列车准点率与运营安全性^[2-3]。为满足压力监测对高灵敏度与结构可靠性的要求,本文基于压阻效应完成了高精度压力传感器芯片的优化设计与仿真验证。值得注意的是,在紧急制动工况下,制动缸压力瞬变速率超过10 MPa/s,同时气动载荷引发了宽频振动与极端温度交变,给压力传感器的动态响应、环境适应性和长期可靠性带来了严峻挑战^[4-5]。相关技术的突破将为我国高铁装备的国产化替代与长期安全运行提供关键支撑,具有重要战略意义。

尽管压力传感器性能优化对高铁牵引制动系统具有显著工程价值,但其全链路制造过程涉及多学科交叉及多物理场耦合,其技术难点主要源于设计参数与工艺变量间的非线性关联及制造环节的不可控因素。通过构建多物理场耦合有限元模型,采用多维度参数化的全局优化策略,实现敏感元件参数优化设计、微加工工艺制造及传感指标测试的多元素匹配,形成覆盖设计仿真、制造工艺、性能检测的全链路技术体系,能够为高动态工况下传感器性能的稳定输出提供系统性解决方案。

对此,国内科研人员已开展相关研究工作。例如,电子科技大学研制出“梁-膜-三岛膜”结构的压阻式压力传感器,当外界压力为0.5 kPa时,灵敏度可达到17.339 (mV/V)/kPa^[6]。王伟忠等人采用单岛膜结构,研制了一种压阻式新型微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)超薄动态压力传感器,能够实现高灵敏度、高线性度测量^[7]。西南交通大学何洪阳等人提出了基于改进集合经验模态分解(Improved Ensemble Empirical Mode Decomposition, IEEMD)的模拟列车高速状态下的振动干扰模型,为准确提取列车表面压力提供理论指导^[8-9]。MENG X W等人针对压力检测中的高灵敏度、超载抗性需求,设计了一种具有“梁-膜-双岛”新型结构的压阻式压力传感器,经实验验证,该传感器在室温23.15 °C、施加压力为0~500 Pa时,具有高达17.339 ($\mu\text{V}/\text{V}^{-1}$)/Pa的灵敏度以及200倍超压的高过载能力^[10]。这些研究成果虽在特定环节取得进展,但受限于“分段优化、局部迭代”的传统研究范式,尚未形成覆盖全流程的协同优化体系。

针对上述问题,本研究团队提出了一种MEMS压阻式压力传感器的全流程优化方法,通过融合MEMS多维度建模技术、工艺参数敏感度分析及微加工工艺,构建完整的优化体系,为高铁牵引和制动系统压力准确测量提供技术支撑。

1 压阻式压力传感器

MEMS压阻式压力传感器通过压力膜片、压敏电阻、玻璃基底及封装结构的协同作用实现压力

传感,其核心机理在于压阻效应与机械形变的耦合作用^[11]。当外界压力作用于方形单晶硅膜片时,固支边界条件下的膜片产生挠曲变形,引发表面压敏电阻的阻值变化,该变化经惠斯通电桥转换为可测电压信号。传感器性能受灵敏度与非线性度的双重制约,前者要求最大化满量程输出电压,后者则需抑制膜片大挠度导致的应力非线性分布^[12]。针对固支方形膜片的小挠度特性,采用能量法求解均匀载荷下的应力场分布,结果表明:膜片边缘中心区域呈现最大应力梯度。此结果为压敏电阻的拓扑优化提供了理论依据。通过平衡膜片厚度、几何尺寸与压阻条布局参数,可有效协调灵敏度提升与非线性误差抑制的矛盾,进而实现传感器静态特性与动态稳定性的同步优化^[13]。

MEMS压阻式压力传感器整体结构主要包括压力膜片、压敏电阻、玻璃基底、固定基板以及起保护作用的金属外壳等,如图1所示。压力膜片受

压发生形变,压敏电阻因压力膜上的形变应力导致阻值发生相对变化,进而使通过惠斯通电桥输出的电信号变化。通过检测输出电压的变化,可实现对外界压力的测量。

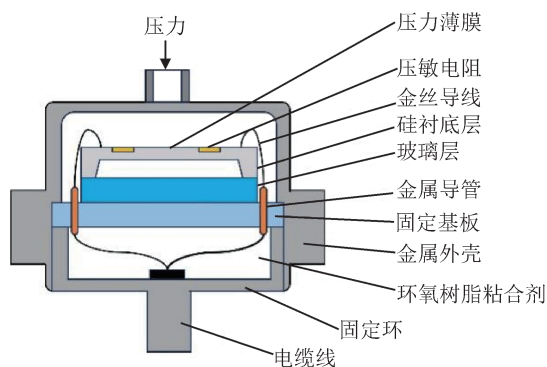
2 传感器有限元参数化模型

利用COMSOL Multiphysics 6.0的多物理场耦合分析与参数优化功能,构建包含膜片厚度、压阻条几何拓扑、掺杂浓度等多维设计变量的多尺度参数化模型。之后利用有限元方法精确表征传感器敏感单元的三维应力应变分布、封装结构的机械耦合效应以及其对压阻特性的非线性影响^[15]。

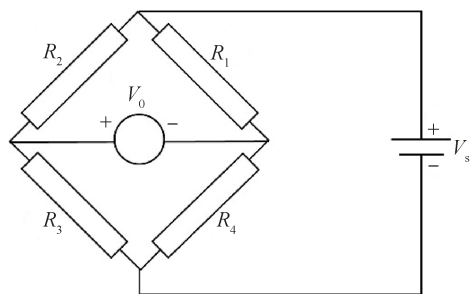
在参数化阶段,基于COMSOL Multiphysics 6.0构建多维参数化扫描模型,包含膜片厚度(t)、压阻条长度(a)、掺杂浓度(N)、施加压力(P)等多维设计变量。通过响应面模型对各变量与输出电压、灵敏度、非线性误差等性能指标进行映射分析,从而实现多变量与传感性能的全局优化。此外,在优化求解过程中,通过多目标优化算法对灵敏度、非线性误差等关键性能指标进行权衡分析,确定最优设计区域,显著提升传感器的动态响应与稳定性。

几何模型构建如图2(a)所示,基于二维平面结构基本原理对模型进行合理简化,只保留了关键的膜片结构、压敏电阻和部分导线。材料本构模型中引入p型硅的各向异性弹性张量与压阻系数的非线性应力依赖特性,基于对灵敏度、非线性误差、抗过载能力的多工况仿真结果,结合实验数据对温度相关的杨氏模量、泊松比等参数进行动态校准,以更精确地反映高铁350 km/h工况下的实际响应特性。针对膜片小挠度理论下的应力分布特性,构建非均匀自适应网格系统,在膜片边缘应力集中区域采用二阶十节点四面体单元进行局部加密,并在压敏电阻与基底界面处设置接触对,模拟微观滑移效应,通过解析界面的非线性行为显著提升仿真精度与可靠性。

如图2(b)所示,模型耦合固体力学、电学与热力学物理场,构建完整的多物理响应链条。在机械场中,高速列车牵引与制动过程中气动冲击、振动耦合以及应力集中等因素会在敏感元件的不



(a) MEMS压阻式压力传感器基本结构
(a) Basic structure of MEMS piezoresistive pressure sensor



注:若 $R_1=R_2=R_3=R_4$,则 $V_0=0\text{ mV}$,惠斯通电桥则处于平衡状态;
若 R_4 发生改变,则 V_0 也会发生变化,输出电压信号。

(b) 惠斯通电桥基本结构
(b) Basic structure of Wheatstone bridge

图1 MEMS压阻式压力传感器整体结构
Fig.1 Overall structure of MEMS piezoresistive pressure sensor

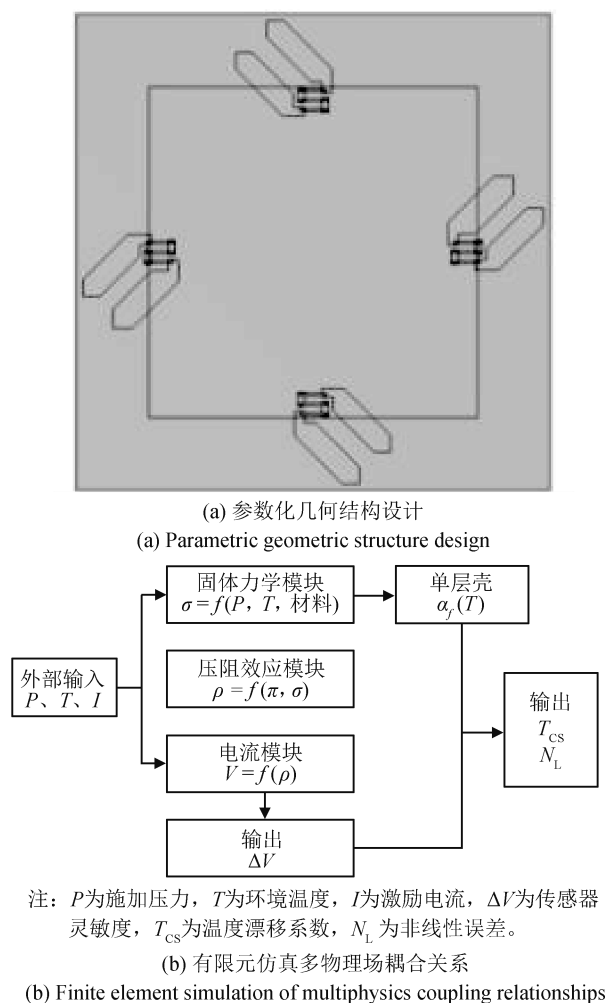


图2 传感器有限元参数化模型

Fig.2 Finite element parametric model of sensor

同区域产生压力梯度,因此在膜片表面施加非均匀压力分布(最大达1.6 MPa)以模拟典型工况,并通过局部细化网格更精确地捕捉应力梯度变化,确保传感器敏感元件微小区域精度;在电学场中,在压阻条两端施加恒流源,求解电流密度分布与输出电压;在热场中,通过 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$ 的温度步进加载,分析输出电信号随温度变化的漂移特性。在膜片表面施加非均匀压力载荷以模拟复杂工况,同时在压敏电阻上加载激励电压并求解电流密度场分布。为提高模型保真度,需考虑制造工艺引入的残余应力场,通过预应变场叠加方法重构晶圆键合过程中产生的界面应力分布。此外,在参数化建模阶段,构建包含膜片厚度、压阻条几何拓扑、掺杂浓度等多维设计变量的响应面模型,以实现多变量与传感性能映射分析。

3 优化设计

本研究通过构建多物理场耦合的高阶有限元模型,系统性地开展了压阻式压力传感器的多维度参数优化与工艺验证工作,针对膜厚与压敏电阻位置的协同优化,需构建多物理场耦合的高维参数化仿真框架,以提升计算复杂度与建模精度。

基于非线性结构力学与压阻-静电耦合理论,建立了三维参数化模型,采用自适应网格加密技术将应力集中区域网格尺寸压缩至 $0.8\ \mu\text{m}$,实现了膜片应变梯度场的纳米级解析。在参数化扫描中,完成了膜厚 $50 \sim 150\ \mu\text{m}$ (初始设计值为 $200\ \mu\text{m}$)的多工况全参数仿真,得到膜厚与灵敏度的非线性映射关系如图3所示。实验结果表明:当膜厚减薄至 $100\ \mu\text{m}$ 时,灵敏度达峰值 $3.5\ \text{mV/kPa}$,相较初始设计值 $2.46\ \text{mV/kPa}$ 提升了42%。

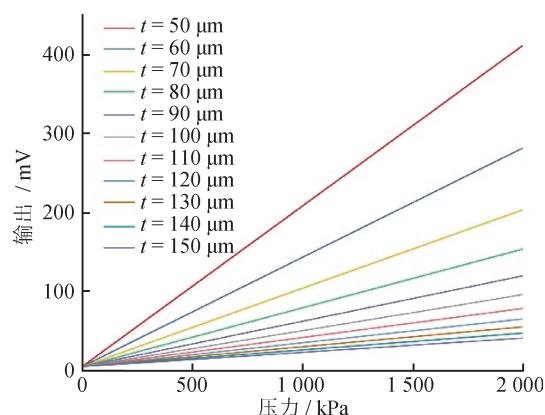


图3 膜片厚度与最大压力关系曲线

Fig.3 Diaphragm thickness vs. maximum pressure

在压敏电阻掺杂工艺中,基于压阻系数与电阻温度系数的耦合关系,建立了 $T_{C\pi}-T_{CR}$ ($T_{C\pi}$ 为压阻系数温度系数, T_{CR} 为电阻温度系数)模型,如图4所示,揭示了恒流供电模式下温度漂移可通过掺杂浓度调控实现自补偿机制。经分析,当掺杂浓度为 $3 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 时, $T_{C\pi}$ 与 T_{CR} 数值相抵,实现 $T_{CS} \approx 0$,同时保持较高灵敏度,确定其为最优浓度。该浓度下,恒流供电时灵敏度温度漂移系数趋近于零。在1000 h的高温高湿环境下,对传感器进行温度和湿度循环测试,其零点温漂系数稳定在 $0.8\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。测试结果表明:在反复的热循环与湿

度变化条件下,零点温漂系数保持稳定,最终验证了该掺杂浓度对温度漂移的抑制效果。

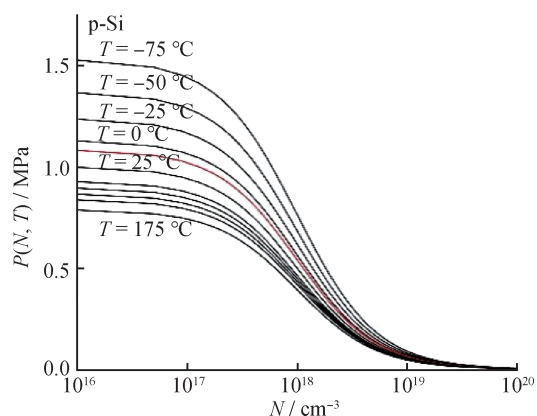


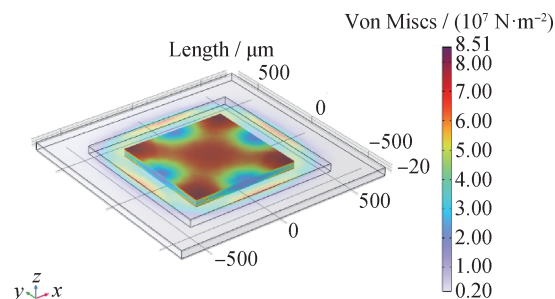
图4 压阻系数与掺杂浓度、温度的关系曲线

Fig.4 Piezoresistive coefficient vs. doping concentration and temperature

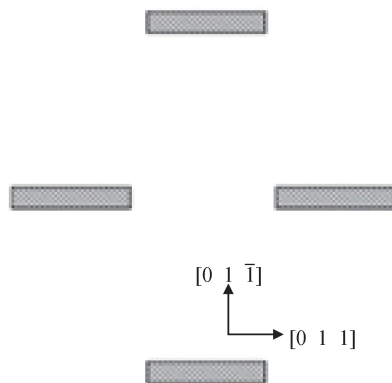
电阻布局采用晶向敏感度优化策略,通过计算<011>晶向最大压阻系数 $\pi_{44} = 72 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$,优选该晶向方向作为电阻主轴方向。为了获得更高的应变响应和灵敏度,对膜片施加1.6 MPa的非均匀压力以模拟高铁牵引系统动态载荷,将环境温度设定为 $-40 \sim 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$,系统研究热应力、封装应力与残余应力的耦合效应,进一步结合膜片应力分布特性分析发现:应力在膜片边缘附近显著集中,尤其是距边缘约12%宽度的区域内应力梯度最大。因此,确定电阻沿膜片边缘12%宽度区域分布,如图5所示。

为提升应变响应的有效捕获率,本文提出并设计了一种“三折式”拓扑结构压阻单元,如图6所示,单元尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$,间距为 $20 \mu\text{m}$ 。该结构在应力集中区引入 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 重掺杂区,并配合金属引线覆盖,有效抑制负压阻效应至7.3%,提升了38%的应变捕获率。

为了获得较高的输出灵敏度,本设计采用了周边排布式电阻布局方案,如图7所示。由于传感器敏感膜采用方形梁膜结构,其应力集中区域位于膜片4条边近边缘处,在边缘梁与中间岛之间产生最大拉压应力差。基于此特性,4个压敏电阻分别布置在应力集中区域,实现对压力变化的转换,垂直膜边电阻延伸至固支区外侧,平行膜边电阻置于内侧,最大程度利用膜片边缘区域的应力响



(a) 典型应力分布云图
(a) Typical stress distribution cloud map



(b) 电阻的周边排布方式及其方向
(b) Peripheral arrangement of the resistor and its direction

图5 电阻布局设计

Fig.5 Layout design of resistance

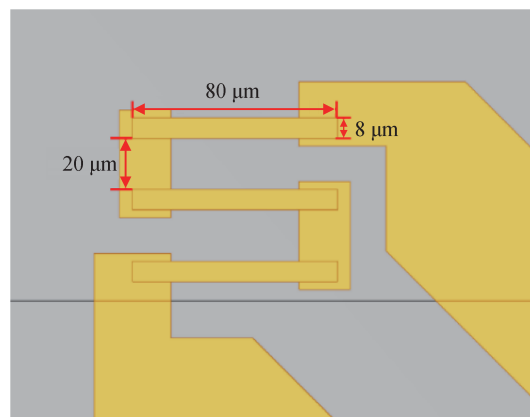


图6 压敏电阻结构设计

Fig.6 Structure design of varistor

应,从而有效增强电桥的差动输出,通过应力差动放大机制使输出灵敏度提升45%。

4 传感器工艺流程设计

压阻式压力传感器的制造工艺严格遵循多物理场耦合优化设计准则,通过微纳加工技术将参数化模型转化为可量产的物理器件。

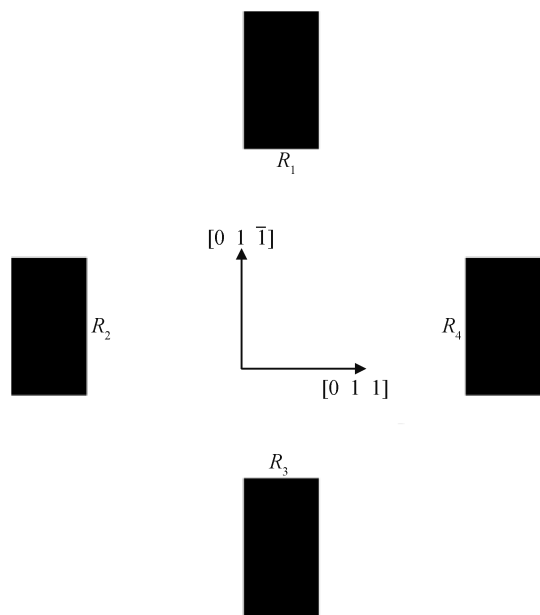


图7 压阻膜片电阻分布

Fig.7 Piezoresistive diaphragm resistance distribution

4.1 传感器版图设计

压阻式压力传感器芯片采用单晶硅膜梁结构,其核心由4个压敏电阻组成,均匀分布于硅膜4条边的中央区域。其中,2个压敏电阻位于固支梁以内,并沿硅膜边缘平行排布,而另外2个压敏电阻则垂直于硅膜边缘,其中一端位于固支梁外部,4个压敏电阻采用惠斯通电桥结构连接,确保器件对称性与工艺可实现的同时提升了压力信号的检测灵敏度与稳定性。

最终形成的压力传感器芯片版图如图8所示,该版图合理布局了敏感元件及信号传输路径,以实现稳定可靠的压力测量功能。

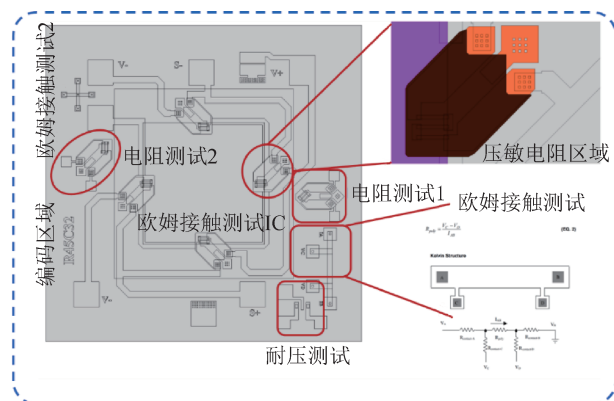


图8 压阻式压力传感器版图设计

Fig.8 Piezoresistive pressure sensor layout design

4.2 掩膜版设计

如图9所示,为了确保压力传感器的精确加工与高效制造,共设计了8张掩膜版,以实现各关键工艺步骤的精确控制与优化。这些掩膜版依次用于标记点的制作、低浓度离子注入、高浓度离子注入、晶圆特定区域的定义与刻蚀、硬掩膜的湿法刻蚀、金属微孔及Ti/Si结构的形成、欧姆接触及电阻特性测试、绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)结构中表面硅层的刻蚀。

4.3 芯片流片工艺

根据传感器掩膜版设计方案,综合运用半导体工艺制造流程,对压力传感器芯片进行了流片工艺,如图10所示。

图10(a)芯片基底采用<011>晶向的单晶硅,通过热氧化工艺生长厚500 nm的SiO₂绝缘层,该层经光刻与反应离子刻蚀形成压敏电阻区域的图形化窗口。

图10(b)采用低压化学气相沉积(Low-Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD)在窗口内制备多晶硅压敏电阻层,随后通过离子注入工艺形成4个应变电阻,以构建惠斯通电桥结构。通过优化离子注入浓度至 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,压敏电阻阻值稳定在5 kΩ,实现了工艺参数与电学特性的精准匹配。

图10(c)金属化工艺采用磁控溅射技术沉积Ti粘附层,膜层厚度控制在30 nm。

图10(d)为抑制温度漂移,采用脉冲直流(Direct Current, DC)磁控溅射方法在膜片表面沉积Al导电层,厚度控制在480~520 nm,优化薄膜残余应力的同时实现电磁屏蔽与热膨胀系数匹配。

图10(e)介质钝化层通过等离子体增强化学气相沉积(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)工艺形成,在器件表面沉积厚度为250 nm的SiN_x钝化膜,以有效抑制环境湿度对电学性能的干扰。

图10(f)互连通孔采用深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)技术开孔后,溅射Au复合层形成低阻欧姆接触。玻璃基底通过阳极键合工艺与硅结构键合。

图10(g)经湿法释放工艺去除器件牺牲层后,通过激光干涉仪检测显示膜片残余应力梯度。

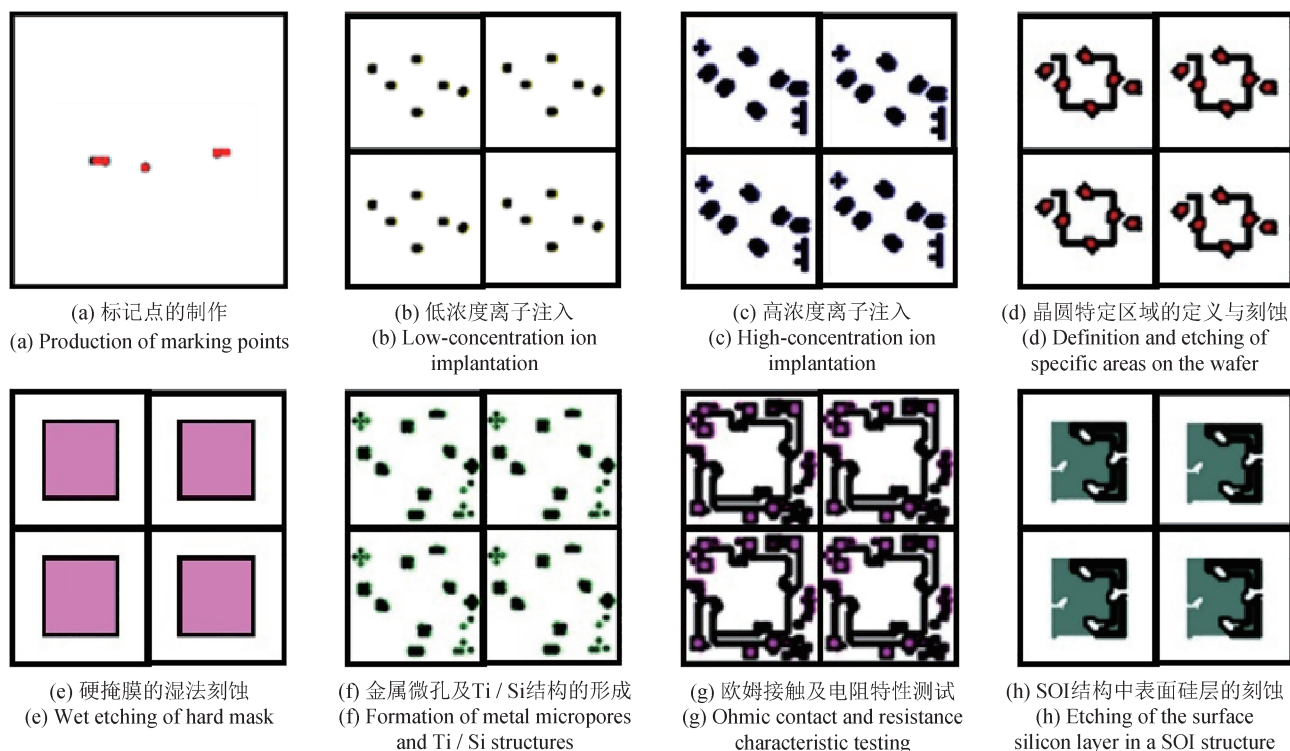


图9 掩模版设计

Fig.9 Mask design

图10(h)通过Au-玻璃键合工艺,使玻璃基底与器件下方的金属Au层可靠连接,实现低阻欧姆接触与气密封装。

本工艺在传统流程的基础上,针对高灵敏压阻应变片布局与温漂控制做出多项优化,特别是

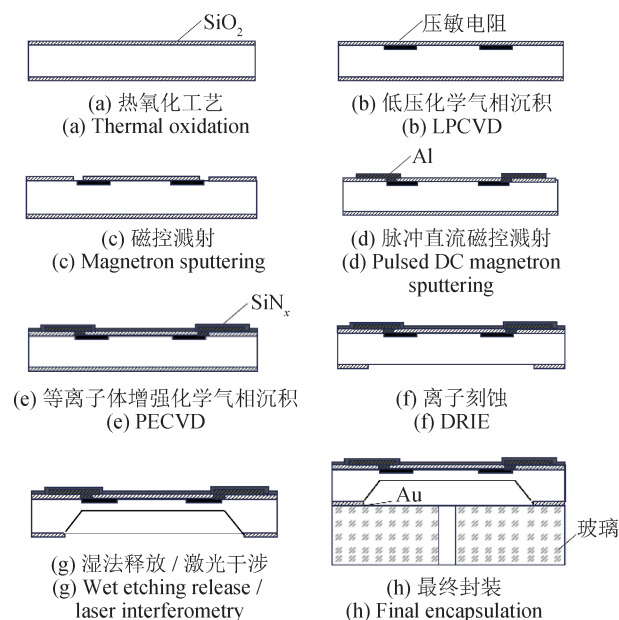


图10 芯片流片工艺

Fig.10 Chip fabrication process

在掺杂控制、电极沉积方式及膜层应力调控方面体现了工艺创新性。在掺杂控制优化中,传统工艺的掺杂浓度控制相对宽松,难以精确控制敏感元件的压阻特性,本工艺通过精确调节硅片的掺杂浓度,优化了应变片的压阻系数,并实现了温度漂移的显著抑制。在电极沉积方式上,相较使用常规物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)的传统技术,本工艺采用了化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)技术,通过优化沉积参数,显著提高了电极与基材的附着强度,减小了电极温漂效应。在膜层应力调控方面,传统工艺中膜层的应力控制通常不够精确,导致传感器性能不稳定;本工艺引入了自适应应力调节技术,通过控制膜层沉积速率及温度,调节膜层应力分布,有效抑制了膜层应力对传感器输出的影响。这些优化措施有效提升了器件的一致性与环境适应性,为后续高可靠性传感器开发提供了支撑。

5 传感器性能仿真测试

基于 COMSOL Multiphysics 6.0 多物理场耦合

仿真平台,本研究构建了包含几何非线性、材料各向异性及压阻-机械强耦合效应的高保真有限元模型,对优化后的压力传感器在350 km/h高速工况下进行系统性能仿真。通过参数化扫描与多工况数值实验,全面评估了器件的静态特性、抗过载能力及非线性误差等核心指标。

5.1 静态特性仿真

为验证压力传感器在高速工况下的灵敏度特性,基于有限元分析软件进行了仿真测量。将模拟量程范围设定为0~1.6 MPa,并进行参数配置,对传感器施加0.1 MPa步长的准静态压力载荷,并叠加高速工况下的脉冲扰动,以更接近实际运行环境下的动态应力与振动冲击。通过压阻-静电耦合求解器计算惠斯通电桥输出电压响应,结果如图11所示。

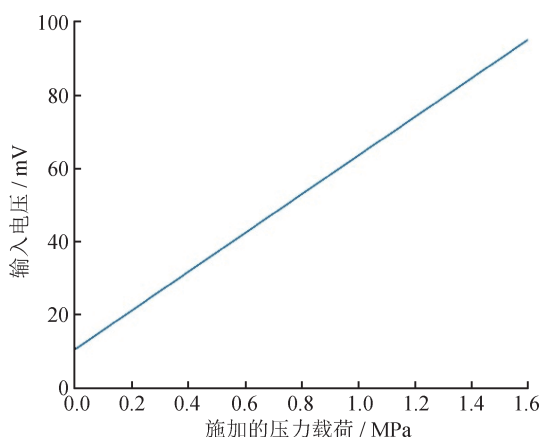


图 11 传感器灵敏度仿真曲线

Fig.11 Sensor sensitivity simulation curves

将该工况下的仿真曲线斜率经最小二乘法拟合,计算确定灵敏度为 $S = 53.094 \text{ mV/MPa}$,结果表明:传感器在350 km/h高速工况下,对惯性载荷引起的应力扰动表现出优异的抗干扰能力,灵敏度基本保持稳定,未出现显著漂移。

5.2 抗过载能力仿真

为评估传感器抗过载能力,在300%满量程压力载荷下进行非线性结构力学仿真。图12展示了过载工况下的应力分布与等效塑性应变场:膜片边缘固支区域呈现显著应力集中现象,最大应力值为990.45 MPa,最大等效塑性应变仅为0.012%,说明器件在极端载荷下仍保持弹性变形主导机制。

通过引入多轴失效准则,计算得到结构安全系数为1.82,证明了优化后的膜片拓扑可有效抑制应力奇异性,具有优异的结构鲁棒性。

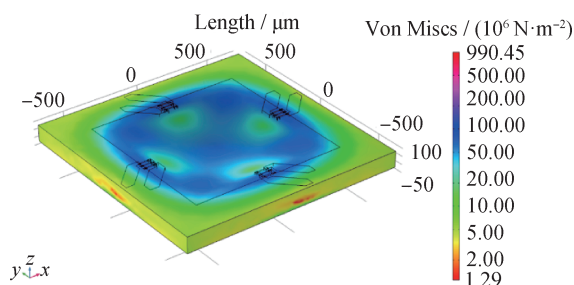


图 12 300% FS过载压力载荷作用下压力 Von Mises 应力图

Fig.12 Strain and stress diagram of pressure diaphragm under 300% FS overload pressure load

5.3 非线性误差仿真

基于量程范围内离散压力点的输出电压数据,采用最小二乘线性回归法建立参考理想曲线,并计算各点非线性偏差。

如图13所示,最大非线性误差发生于0.82 MPa工况点,其绝对值为0.004 62% FS,显著优于传统设计0.02% FS的水平。进一步通过方差分解分析揭示非线性误差源:通过引入压阻系数二阶非线性模型,得到其单独引起的非线性偏差方差为 $\sigma_{\pi}^2 = 1.35 \times 10^{-9}$,约占总误差的63.4%;在控制其他因素不变的情况下,加载不同压力以分析膜片大挠度引起的灵敏度漂移,计算得到误差分量 $\sigma_{\text{geom}}^2 = 5.98 \times 10^{-10}$,约占总误差的28.1%;基于热应力仿真与封装模型提取,残余应力贡献方差

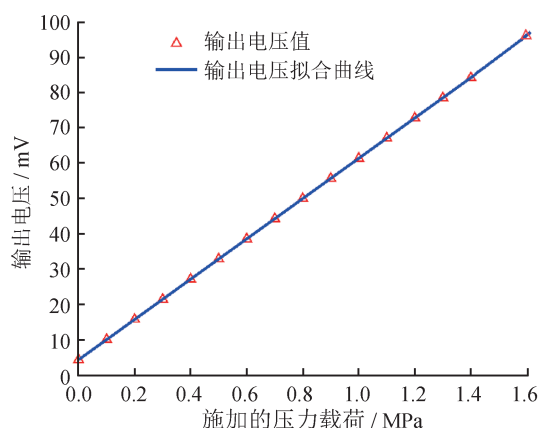


图 13 传感器输出电压非线性误差

Fig.13 Nonlinear error of sensor output voltage

为 $\sigma_{\text{res}}^2 = 1.81 \times 10^{-10}$, 约占总误差的8.5%。

5.4 温度漂移

本研究基于 π_{44} 与 T_{CR} 的耦合作用机理, 当掺杂浓度达到 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 恒流供电模式下, T_{CR} 与 T_{CSi} 呈现符号相反、幅值匹配的特性, 二者叠加后灵敏度温度漂移系数 (T_{CSi}) 趋近于零, 实现温度自补偿效应。为验证该机制, 采用多物理场仿真平台搭建多物理场耦合模型, 通过设置温度边界条件分步加载, 结合材料参数的温度依赖性, 提取在恒定偏置电流下的输出电压变化, 进而计算 T_{CSi} 与零点温漂系数。仿真结果表明: 在温度 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$, 零点温漂系数低至 $0.8 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

5.5 动态响应

为验证压阻式压力传感器在高速工况下的动态特性, 本文采用 COMSOL Multiphysics 6.0 进行有限元仿真分析。在时速 350 km/h 的高速运行条件下, 模拟了压力加载过程, 并采用正弦波激励进行频率响应测试, 频率范围设定为 $1 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$, 以涵盖常见的高铁制动和启动瞬态工况。仿真的初始条件和边界条件与实际工况相匹配, 确保了仿真结果的真实可靠性, 能够为压力传感器在高速应用中的性能评估提供准确依据。

如图 14 所示, 经仿真结果计算, 所设计的压力传感器在 350 km/h 高速工况下的响应时间为 0.3 ms , 远小于实际应用中的压力变化周期, 能够快速捕捉瞬时压力波动, 满足高速列车牵引和制动系统的实时监测需求。

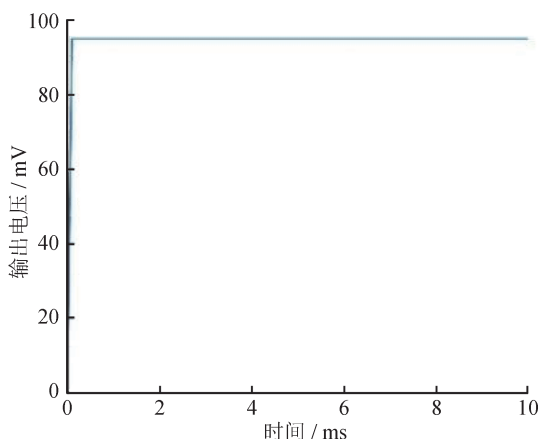


图 14 传感器动态特性仿真曲线

Fig.14 Sensor dynamic characteristics simulation curve

6 结论

研制了一种高精度宽温度范围的压阻式压力传感器芯片, 设计并优化压力敏感结构, 构建压阻式压力传感器的敏感模型, 建立了多物理场耦合变化矩阵, 分析了传感器输入-输出映射关系。结合压阻式压力传感器的敏感原理, 利用有限元仿真软件对传感器在压力 $0 \sim 1.6 \text{ MPa}$ 进行了灵敏度仿真、300% FS 抗过载能力和非线性误差仿真。仿真结果表明: 传感器性能良好, 测量灵敏度为 $56.987 \text{ mV}/\text{MPa}$, 非线性误差为 $0.00462\% \text{ FS}$, 抗过载能力强, 满足传感器安全运行的条件。在后续工作中, 可开展压力传感器实物压力测试的应用研究, 从而进一步验证传感器性能。

参考文献

- [1] 薛岩, 冯江华. 跑出高速列车创新“加速度”[N]. 科技日报, 2025-01-17.
XUE Y, FENG J H. Running out of high-speed train innovation "acceleration"[N]. Science and Technology Daily, 2025-01-17. (in Chinese)
- [2] 赵思哲. 高速列车递阶节能牵引优化运行驾驶策略研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
ZHAO S Z. Study on energy-efficient hierarchical optimization operation strategies of high-speed trains [D]. Changsha: Central South University, 2023. (in Chinese)
- [3] 冯珂. 高速铁路无砟轨道刚度及扣件动刚度在线监测技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.
FENG K. Research on dynamic stiffness on-line monitoring technology of ballastless track and fasteners for high-speed railway [D]. Beijing: Academy of Railway Sciences Group Co., 2023. (in Chinese)
- [4] 邓超. 高速列车表面脉动压力测试传感器多干扰分析及建模[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
DENG C. Multi interference analysis and model establishment of high speed train surface fluctuation pressure test sensor [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [5] 常建英. 列车控制网络中的牵引制动仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
CHANG J Y. The simulation for traction and braking in train control network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [6] 郭威, 李辉, 罗登玲, 等. MEMS 压阻式压力传感器梁-

- 膜-三岛膜结构设计及优化[J]. 电子科技大学学报, 2024, 53(6): 852-861.
- GUO W, LI H, LUO D L, et al. Design and optimization of beam-membrane-three island membrane structure for MEMS piezoresistive pressure sensor[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2024, 53(6): 852-861. (in Chinese)
- [7] 王伟忠, 张建志, 何洪涛, 等. MEMS超薄动态压力传感器[J]. 微纳电子技术, 2016, 53(4): 249-254.
- WANG W Z, ZHANG J Z, HE H T, et al. MEMS ultra-thin dynamic pressure sensor[J]. Micro-nano Electronics Technology, 2016, 53(4): 249-254. (in Chinese)
- [8] 王亚南, 陈春俊, 何洪阳. 高速列车脉动压力的大涡模拟及小波分解[J]. 机械设计与制造, 2015(8): 86-88, 93.
- WANG Y N, CHEN C J, HE H Y. Large eddy simulation and wavelet decomposition of pulsating pressure of high-speed trains [J]. Mechanical Design and Manufacture, 2015(8): 86-88, 93. (in Chinese)
- [9] 何洪阳, 陈春俊, 缪晓郎, 等. 高速列车表面压力测试信号的振动干扰分离研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(19): 71-75, 90.
- HE H Y, CHEN C J, MIAO X L, et al. Research on separation of vibration interference of high-speed train surface pressure test signal [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(19): 71-75, 90. (in Chinese)
- [10] MENG X W, ZHAO Y L. The design and optimization of a highly sensitive and overload-resistant piezoresistive pressure sensor[J]. Sensors, 2016, 16(3): 348-358.
- [11] PEREIRA J D. Pressure sensors: working principles of static and dynamic calibration [J]. Sensors, 2024, 24(2): 14248220.
- [12] ZHANG Z Y. Principle and application of flexible pressure sensors [C]// In SHS Web of Conferences, 2023, 157: 01026.
- [13] BEDDIAF A, KERROUR F, KEMOUCHE S, et al. A numerical model of joule heating in piezoresistive pressure sensors[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2016, 6(3): 1223.
- [14] XU D D, ZHOU P L, YU H B, et al. Bioinspired fabrication of graphene/PDMS composite materials for high-performance flexible pressure sensor[J]. Science China Materials, 2025(4): 1184-1195.
- [15] DILEENA L, BABY SREEJA S D, SREEKALA C O. A

comparative study on piezoelectric and piezoresistive pressure sensor using COMSOL simulation [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 3121-3126.

- [16] 杜成权, 艾军, 许明洋, 等. 高精度MEMS差压传感器芯片的研究[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(12): 28-31.

DU C Q, AI J, XU M Y, et al. Study on high-precision MEMS differential pressure sensor chip [J]. Sensors and Microsystems, 2024, 43(12): 28-31. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 郑德智(1978—), 男, 北京理工大学教授, 博士生导师, 国家万人计划科技创新领军人才, 临近空间环境特性及效应全国重点实验室副主任, 复杂环境智能感测工信部重点实验室主任, 工信部电子信息科技委委员, 科技部“十四五”高性能制造技术与重大装备总体专家组专家。主要研究方向为传感器敏感机理及检测技术、微弱生理信号感知技术、复杂环境网络化协同探测技术。长期围绕国家重大战略需求, 开展“复杂环境网络化协同感知技术”的基础理论、关键技术及应用研究, 成果应用于我国重大战略装备和空管高度层改革重大工程等, 实现了核心技术自主可控。近五年承担国家重点研发计划等项目20余项, 发表论文50余篇, 授权专利20余项。



通信作者: 王帅(1984—), 女, 北京航空航天大学计算机学院、空地一体新航行系统技术全国重点实验室副研究员, 博士生导师。主要从事智能感知、计算机视觉、人工智能等方向的研究工作, 在学术图像不端检测领域取得了重要技术突破。近5年, 在Nature Communications、Cell Patterns、CVPR、ACM MM、UbiComp、TNNLS、TMM、Information Fusion 等高水平期刊与会议上发表论文30余篇, 授权发明专利及软件著作权20余项, 主持和参与国家重大科研仪器研制项目、国家重点研发计划项目、国家自然科学基金等10余项。获国家技术发明二等奖1项(排3)、省部级科技奖励4项。指导学生获“互联网+”大赛北京赛区一等奖、全国“挑战杯”大赛二等奖、首都“挑战杯”竞赛一等奖等。