

<100>晶向正面开口快速湿法释放悬浮结构研究

李波

(榆林市计量技术研究院 榆林 719054)

摘要: 为满足医疗用非制冷热红外探测器悬浮结构的高效制备需求,本文提出一种基于<100>晶向硅片的正面开口快速湿法腐蚀工艺。设计了折线型、长条形以及复合型3种<100>晶向狭缝状开口结构,并结合 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 应力补偿复合膜,在摩尔浓度为30%的KOH溶液中,80℃水浴温度下,采用各向异性腐蚀技术进行120 min的腐蚀后,实现了悬浮结构的高精度释放。实验结果表明,复合型开口通过在悬臂梁区域增设辅助开口,显著提高了腐蚀液的渗透效率。与背面牺牲层腐蚀方法相比,腐蚀时间缩短了60%。效果远优于正面牺牲层腐蚀,释放面积达到98%以上,成品率提升至95%。在此基础上,采用与CMOS工艺完全兼容的单面加工流程,成功制备出P/N多晶硅热电堆与非晶硅微测辐射热计单元。在耳温/额温检测中,实现了 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的测温精度以及小于500 ms的响应时间,满足了医疗级设备对高精度和快速响应的要求。本研究提出的“晶向设计—应力调控—腐蚀优化”一体化工艺流程,为高性能悬浮结构的批量制备提供了可靠方案,在可穿戴健康监测设备领域具有重要应用价值。

关键词: 正面腐蚀;悬浮结构;各向异性;KOH湿法腐蚀;红外探测器

中图分类号: TN432 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on fast wet etching release of front-side opened suspended structures based on <100>-oriented silicon

Li Bo

(Yulin Institute of Measurement Technology, Yulin 719054, China)

Abstract: To meet the demand for the efficient preparation of the suspended structure of medical uncooled thermal infrared detectors, this paper proposes a front-opening rapid wet etching process based on <100>-oriented silicon wafers. Three types of <100>-oriented slit-shaped opening structures, namely the zigzag type, the strip type, and the composite type, are designed. Combined with the $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ stress-compensated composite film, after 120 minutes of anisotropic etching in a KOH solution with a molar concentration of 30% at a water bath temperature of 80 °C, the high-precision release of the suspended structure is achieved. The experimental results show that the composite opening significantly improves the penetration efficiency of the etching solution by adding auxiliary openings in the cantilever beam area. Compared with the back-side sacrificial layer etching method, the etching time is shortened by 60%. The effect is far better than that of the front-side sacrificial layer etching, with the release area reaching over 98% and the yield rate increased to 95%. On this basis, by adopting a single-side processing flow that is fully compatible with the CMOS process, P/N polysilicon thermopiles and amorphous silicon microbolometer units are successfully fabricated. In the detection of ear temperature/forehead temperature, a temperature measurement accuracy of $\pm 0.1^\circ\text{C}$ and a response time of less than 500 milliseconds are achieved, meeting the requirements of medical-grade equipment for high precision and rapid response. The integrated process flow of “crystal orientation design-stress regulation-etching optimization” proposed in this study provides a reliable solution for the batch preparation of high-performance suspended structures and has important application value in the field of wearable health monitoring devices.

Keywords: front-side etching; suspended structure; anisotropy; KOH wet etching; infrared detector

0 引言

在医疗健康领域,非制冷热红外探测器因无需制冷、具

备高灵敏度和微型化特性,展现出重要应用价值。其核心功能单元——悬浮结构,通过热隔离设计,能显著降低敏感单元与衬底间的热传导损耗,进而提升探测器的热灵敏度

与响应速度,是实现高精度体温检测、组织热成像及生理参数监测的关键技术^[1-7]。例如,微测辐射热计可实现 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 精度的无接触体温筛查,满足公共卫生应急场景下快速识别发热患者的需求;热电堆传感器作为耳温计核心部件,测温精度可达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,成为家庭医疗设备的主流选择^[8-13]。

随着可穿戴健康监测设备的日益普及,对悬浮结构的制备工艺提出了更高要求:需兼顾热隔离性能、工艺兼容性 & 批量生产良率。目前,悬浮结构的主流制备工艺主要有两类。背面腐蚀释放法通过在硅片背面开窗进行湿法腐蚀,该方法虽工艺相对简单,但腐蚀路径耗时较长,通常需要 $3\sim 4\text{ h}$ ^[14],与 CMOS 工艺兼容性欠佳,且封闭式膜系易引发热扩散,不利于隔热性能的提升。正面牺牲层释放法依靠光刻胶、多晶硅等牺牲层材料的选择性刻蚀实现单面加工,然而,此方法在残余应力控制方面难度较大,薄膜易因翘曲或粘连致使良率降低^[15]。这两类工艺均难以同时兼顾“腐蚀效率—结构稳定性—工艺兼容性”,因此,开发一种具备快速释放、低应力及高集成度特点的新型制备工艺,成为当下亟待解决的重要课题。

面对悬浮结构制备工艺现存的难题,本研究创新地推出一种基于<100>晶向硅片的正面开口快速湿法腐蚀工艺。该工艺利用 KOH 溶液对单晶硅的各向异性腐蚀特性,精确规划<100>晶向狭缝状开口布局,以此达成悬浮结构的高效释放。在开口设计上,提出折线型、长条形与复合型 3 种正面开口形式,通过增添辅助开口,成功解决关键区域腐蚀液渗透不足的状况,使释放时间大幅缩短至 120 min。在材料与应力控制方面,采用 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 应力补偿复合膜,并运用射频功率交替技术调控薄膜内应力,有效避免释放过程中结构出现翘曲或断裂。在工艺兼容性上,开发出与 CMOS 工艺完全兼容的单面加工流程,有力支持了探测器与读出电路的片上集成;理论层面,基于单晶硅各向异性腐蚀原理,构建了<100>晶向开口布局和腐蚀路径的对应体系,深入阐释开口几何参数,即长度、密度、分布,对释放效率的影响机制。实验中,通过优化 KOH 溶液浓度至 30wt%、温度控制在 $80^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 以及完善复合膜沉积工艺,成功制备出释放面积达 98%、成品率超 95% 的高质量悬浮结构。在应用实践中,针对医疗场景需求,制备了 P/N 多晶硅热电堆与非晶硅微测辐射热计单元,证实该工艺在高精度体温检测与红外成像中的实用价值。后续研究将围绕阵列化器件的均匀性优化、长期可靠性测试以及柔性基底集成展开,进一步拓展该技术在移动医疗、术中热损伤监测等领域的应用边界^[16]。

1 理论基础

悬浮结构作为非制冷热红外探测器的核心组件,其设计与制备直接决定了器件的热隔离性能与机械稳定性,如图 1 所示。

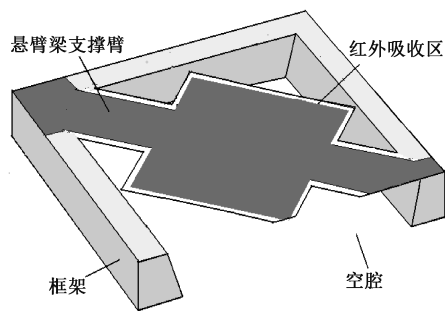


图 1 红外吸收悬空结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared absorption suspended structure

本节从薄膜应力调控机制、各向异性腐蚀原理及开口结构设计准则三方面展开理论分析,为实验方案优化提供理论支撑。

1.1 悬浮膜系的应力平衡机制

悬浮结构的核心功能是通过热隔离降低敏感单元与衬底间的热传导,其性能优劣与薄膜材料的残余应力密切相关。在微加工过程中,薄膜沉积与刻蚀会引入张应力或压应力,若应力分布不均或累积过量,将导致结构翘曲、断裂或坍塌。研究表明,当薄膜残余应力控制在 $\pm 0.1\text{ GPa}$ 范围内时,可获得稳定的机械性能^[11]。单一材料难以满足低应力要求,因此本研究采用应力补偿型复合膜结构,通过叠加具有相反应力特性的薄膜材料,如张应力氮化硅与压应力氧化硅,实现整体应力均衡。设复合膜由 n 层不同材料组成,第 i 层薄膜的应力为 σ_i (张应力取正值,压应力取负值),厚度为 d_i ,则复合膜总应力 σ_{total} 可表示为:

$$\sigma_{total} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (1)$$

式中:分子为各层应力与厚度的加权和,分母为复合膜总厚度。通过调整各层材料的厚度配比,可有效降低整体应力。

本研究选用 PECVD 技术制备 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合膜,FSM-6000LE 型薄膜应力仪测量得知,单一的 SiO_2 薄膜具有 82.09 MPa 的张应力,而 Si_3N_4 薄膜具有一 285.72 MPa 的压应力。通过正交实验优化工艺参数,控制 SiO_2 与 Si_3N_4 的厚度分别为 50 nm 与 150 nm,总厚度 600 nm。在 Si_3N_4 薄膜沉积过程中,2 min 生长周期下,采用 50 W 低频与 150 W 高频射频功率交替加载的方法,有效抑制了薄膜内部的应力集中,获得了应力均匀性误差 $<5\%$ 的高质量薄膜^[12]。复合膜的总应力经计算为一 32.5 MPa,满足悬浮结构的稳定性要求。

1.2 单晶硅各向异性湿法腐蚀原理

KOH 溶液对单晶硅的湿法腐蚀呈现显著的晶向依赖性,其腐蚀速率由晶面原子排列密度与化学活性决定。在<100>晶向硅片中,三大主晶向的腐蚀速率排序为:<100>><110>><111>,其中<100>晶向因原子排

列疏松、悬挂键数量多因而腐蚀速率最快； $\langle 111 \rangle$ 晶向原子紧密堆积故腐蚀速率最慢，二者速率比可达 100 : 1 以上。这种各向异性为精准控制腐蚀形貌提供了可能。

当在 $\langle 100 \rangle$ 晶向硅片表面开设沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向的狭长条形窗口时，KOH 溶液将优先腐蚀窗口下方的 $\langle 100 \rangle$ 晶面硅材料，形成以条形开口为对角线的正方倒棱台状腐蚀坑，其侧壁为腐蚀自停止面 $\langle 111 \rangle$ 晶面，如图 2(a) 所示。

腐蚀过程中，横向腐蚀受限于 $\langle 111 \rangle$ 晶面的低速率，纵向腐蚀沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向快速推进，最终形成由 $\langle 111 \rangle$ 面界定的规则空腔结构。这一特性为设计悬臂梁支撑的悬浮结构提供了关键依据：通过在红外吸收区布置沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向的条形开口，可促使腐蚀液沿目标方向快速渗透，同时利用 $\langle 111 \rangle$ 晶面的自停止效应精确控制腐蚀深度，避免过度刻蚀导致的结构损伤，如图 2(b) 所示。

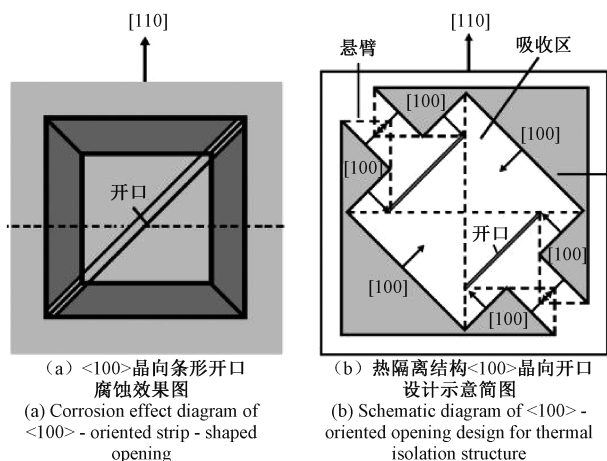


图 2 开口设计在热隔离结构的各向异性腐蚀路径

Fig. 2 The anisotropic etching path of the opening design in the thermal isolation structure

1.3 开口结构设计优化

悬浮结构的高效释放依赖于开口布局对腐蚀路径的引导作用。本研究提出 3 种典型开口设计，如图 3 所示。

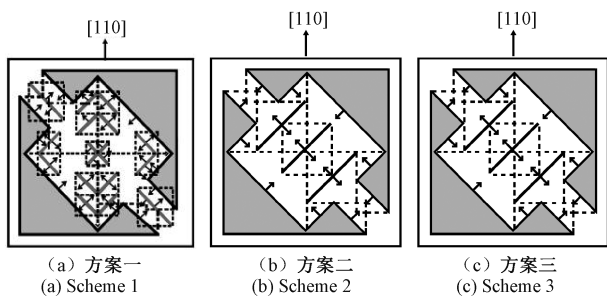


图 3 3 种设计方案对应的开口结构

Fig. 3 Opening structures corresponding to three design schemes

其核心差异在于几何形态对腐蚀效率与结构应力的影响：

1) 折线型开口(方案一)

如图 3(a) 所示，采用周期性折线结构将连续长开口分割为短线段组合，通过增加开口数量扩大腐蚀接触面积，降低液体表面张力引起的薄膜断裂风险。然而，折线拐角处的几何突变会导致应力集中，引发薄膜翘曲。当拐角角度 $< 90^\circ$ 时，翘曲变形量随角度减小呈指数增长，后续需通过优化拐角半径缓解应力集中。

2) 长条形开口(方案二)

如图 3(b) 所示，采用平行直线型开口设计，避免了折线拐角的应力集中问题，理论上可获得更高的结构平整度。但大于 $200 \mu\text{m}$ 过长的直线开口会降低薄膜机械强度，增加断裂风险；同时，悬臂梁区域若未设置开口，腐蚀液渗透不足易导致衬底残留，如图 5(d)~(f) 所示。实验表明，当开口间距 $> 80 \mu\text{m}$ 时，释放不完全区域面积占比超过 10%，需通过间距小于 $50 \mu\text{m}$ 的加密开口提升腐蚀效率。

3) 复合型开口(方案三)

如图 3(c) 所示，在长条形开口基础上，于悬臂梁等关键区域增设若干长度 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 、宽度 $5 \mu\text{m}$ 的短辅助开口，使主开口引导腐蚀方向、辅助开口增强渗透。辅助开口可将腐蚀液到达悬臂梁底部的时间缩短 40%，使释放面积从方案二的 95% 提升至 98% 以上，如图 7(g)~(i) 所示。同时，辅助开口的对称分布有效平衡了薄膜应力，避免了因局部腐蚀不均导致的结构偏差。

如何平衡应力与腐蚀效果需要设计并优化：薄膜残余应力影响腐蚀过程中结构的形变阈值，而腐蚀速率的各向异性又反作用于应力分布。当复合膜总应力控制在 $-50 \sim +50 \text{ MPa}$ 区间时，腐蚀诱导的附加应力较小，对结构形变的影响可忽略不计，确保释放后的悬浮膜平整度误差小于 1%。

1.4 热隔离性能与结构参数的关系

悬浮结构的热导系数 G 是衡量热隔离性能的关键指标，其表达式为：

$$G = \frac{kA}{d} \quad (2)$$

式中： k 为材料热导率， A 为导热路径截面积， d 为导热路径长度。通过在红外吸收区密集布置 $\langle 100 \rangle$ 晶向条形开口，可显著减小支撑臂的有效导热截面积(A)，同时增加导热路径长度(d)。通过计算得知，与无开口结构相比，本研究设计的悬浮结构热导系数降低 60% 以上，电压灵敏度提升 35%。

此外，开口布局需兼顾机械强度与腐蚀效率。为了确保抗断裂强度足够大，支撑臂不能太窄。定义开口密度 r 为开口面积占吸收区总面积比例，当 r 过大时，虽然腐蚀效率提升，但支撑臂机械强度下降导致断裂率升高；而 r 过小时，腐蚀时间延长且释放不完全风险增加。

2 实验步骤

基于理论分析中提出的应力平衡设计与开口结构优化

准则,本研究构建了标准化微纳加工工艺流程,如图 4 所示,重点解决高精度图形转移、薄膜稳定性保持及可控腐蚀释放三大核心问题。

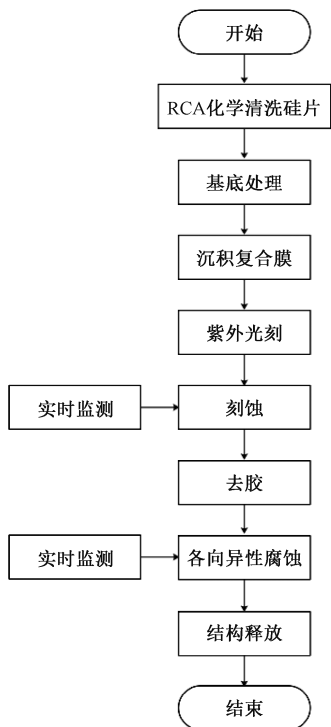


图 4 标准化微纳加工工艺流程

Fig. 4 Standardized micro-nano processing technological flow

以下从材料制备、图形化工艺、腐蚀释放及结构表征 4 个环节详述实验过程。

2.1 复合膜沉积与基底预处理

选用厚度 $500\ \mu\text{m}$ 、晶向<100>的 N 型单晶硅片(电阻率为 $1\sim 10\ \Omega\cdot\text{cm}$,直径 $101.6\ \text{mm}$)作为基底。首先进行化学清洗:依次在丙酮、乙醇中超声处理 $10\ \text{min}$ 去除有机污染物,随后浸入体积比为 $6:1$ 的 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ 混合液中 80°C 加热 $15\ \text{min}$,形成厚度约 $20\ \text{nm}$ 的原生化氧化层,最后用去离子水冲洗并氮气吹干。

采用英国 Oxford Instruments Plasmalab 80 Plus 型 PECVD 系统沉积 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合膜。 SiO_2 薄膜沉积参数为:温度 300°C ,功率为 $100\ \text{W}$,反应气体为 $5\ \text{sccm}$ 流量的 Si_3N_4 与 $50\ \text{sccm}$ 的 N_2O ,压强为 $100\ \text{Pa}$;沉积时间 $5\ \text{min}$ 后,获得厚度 $50\ \text{nm}$ 的张应力 SiO_2 薄膜。同样射频功率和周期下, Si_3N_4 薄膜生长气体为 $8\ \text{sccm}$ Si_3N_4 与 $50\ \text{sccm}$ NH_3 ,温度 350°C ,压强 $150\ \text{Pa}$,沉积时间 $15\ \text{min}$,形成 $150\ \text{nm}$ 的压应力薄膜。3 个循环后复合膜总厚度 $600\ \text{nm}$,经 Filmetrics F20 光谱仪测量,厚度均匀性误差 $<1.5\%$,如图 6(a)所示。

2.2 光刻图形化与刻蚀工艺

利用 L-Edit 16.0 软件设计 3 种开口结构版图,如图 5 所示,分别对应图 3 中的(a)~(c) 3 种方案。

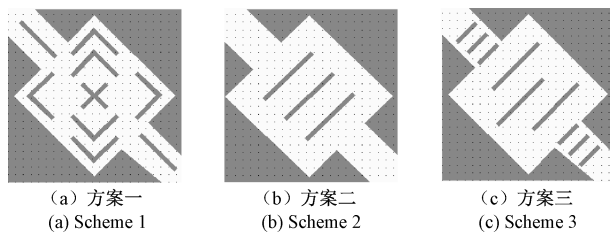


图 5 L-Edit16.0 软件设计三种开口结构版图

Fig. 5 Layout designs of three opening structures using L-Edit 16.0 software

采用分辨率 $2\ \mu\text{m}$ 的掩模版进行紫外光刻。涂胶前对硅片进行 HMDS 气相增粘处理 $5\ \text{min}$,旋涂 AZ4620 正性光刻胶,转速 $3\ 000\ \text{rpm}$ 持续 $30\ \text{s}$,形成厚度 $2.5\ \mu\text{m}$ 的胶层。前烘条件为 90°C 热板烘烤 $90\ \text{s}$,随后在德国 Suss Micro Tec MA6 光刻机上进行曝光,曝光能量 $200\ \text{mJ}/\text{cm}^2$,显影液为体积比为 5% 的 AZ40XT 溶液,显影时间 $60\ \text{s}$,去离子水冲洗后氮气吹干,获得边缘粗糙度 $<1\ \mu\text{m}$ 的图形化胶层。

采用 STS Multiplex ICP 刻蚀机进行复合膜刻蚀,气体组分为体积比 $4:1$ 的 CF_4/O_2 ,功率配置为射频功率 $100\ \text{W}$ 、感应耦合功率 $400\ \text{W}$,压强 $10\ \text{Pa}$,刻蚀速率为 SiO_2 $80\ \text{nm}/\text{min}$ 、 Si_3N_4 $60\ \text{nm}/\text{min}$ 。刻蚀过程中通过光谱反射仪实时监测膜厚,当 Si_3N_4 刻蚀至 $150\ \text{nm}$ 时自动停止,确保图形转移精度误差 $<5\%$,如图 6(b)所示。刻蚀后采用的 $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}=1:6$ 的 BOE 溶液去除残留氧化层,随后在丙酮中超声剥离光刻胶,获得边缘垂直的开口结构,如图 6(c)所示。

2.3 KOH 各向异性腐蚀与结构释放

腐蚀液为 $30\text{wt}\%$ 的 KOH 水溶液,添加 0.1% 体积比的 IPA 作为表面活性剂,抑制气泡附着并均匀腐蚀速率。采用精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 恒温水浴槽控制温度 80°C ,腐蚀过程中以 $50\ \text{rpm}$ 磁力搅拌使反应均匀。将处理后的硅片竖直浸入腐蚀液,开口面朝上,确保腐蚀液充分接触图形化区域。

腐蚀过程通过体视显微镜实时监控,每 $30\ \text{min}$ 取样一次,用去离子水冲洗后吹干,观察腐蚀坑扩展情况。约 $120\ \text{min}$ 后,<100>晶向条形开口下方的倒棱台腐蚀坑相互贯通,且悬臂梁底部与衬底分离时,终止腐蚀。采用临界干燥法去除结构表面液体,避免毛细力导致的粘附失效,最终获得无粘连的悬浮结构,如图 6(d)所示。

2.4 结构表征与性能测试

使用放大倍数 $500\times$ 的 SK2008 H 型高倍金相显微镜观察悬浮膜完整性,重点检测支撑臂与吸收区的释放状态,统计不同方案的释放面积百分比。薄膜应力采用 FSM-6000LE 型激光应力仪测量,验证复合膜总应力是否满足 $-50\sim +50\ \text{MPa}$ 的设计要求。

3 结果讨论与分析

基于理论设计的折线型、长条形、复合型 3 种开口方

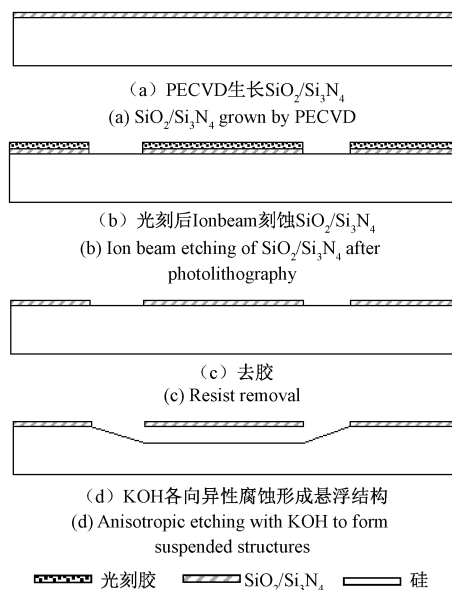


图 6 悬浮结构快速释放工艺流程

Fig. 6 Rapid release process flow of the suspended structure

案,通过控制 KOH 腐蚀工艺参数在 30wt% 浓度、水浴温度 80°C 及腐蚀时间 120 min,获得了不同释放效果的悬浮结构。本节从腐蚀表征、结构完整性及热隔离性能三方面展开分析,结合量化数据揭示开口设计对释放效率的影响机制。

3.1 折线型开口结构(方案一)

方案一的腐蚀过程呈现典型各向异性特征:30~60 min 腐蚀初期,狭槽下方的体硅材料沿 $\langle 100 \rangle$ 快速溶解,形成倒金字塔形腐蚀坑,如图 7(a)、(b)所示。随着腐蚀时间延长,相邻棱台在 $\langle 110 \rangle$ 晶向逐渐贯通。120 min 后显微观察显示,吸收区边缘仍有 $15\% \pm 3\%$ 的面积与衬底粘连,如图 7(c)所示,释放不完全区域主要集中在拐角连接点。尽管薄膜未出现明显翘曲,但有效释放面积不足导致导热较理论值高,验证了折线结构在慢腐蚀晶面集中区域的腐蚀效率瓶颈。

3.2 长条形开口结构(方案二)

方案二采用平行直线开口设计,腐蚀液沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向匀速渗透,30 min 时即形成规则的矩形腐蚀坑,如图 7(d)所示。60 min 后,主开口下方的体硅基本去除,仅悬臂梁根部因缺乏辅助开口导致腐蚀不完全,如图 7(e)所示。120 min 腐蚀结束后,除悬臂梁正下方 5% 的区域外,其余部分均实现完全释放,如图 7(f)所示。该方案的优势在于避免了折线拐角的应力集中,薄膜表面粗糙度低于 5 nm,结构平整度优于方案一。然而,长达 $180\ \mu\text{m}$ 的直线开口导致支撑臂中部出现 2 处微裂纹,推测为刻蚀过程中机械应力累积所致。

3.3 复合型开口结构(方案三)

方案三在悬臂梁区域增设 5 组长度 $25\ \mu\text{m}$,间距

$30\ \mu\text{m}$ 的短辅助开口,显著改善了腐蚀液渗透路径。30 min 时,主开口与辅助开口同步形成腐蚀坑,如图 7(g)所示。60 min 后悬臂梁底部相邻腐蚀坑开始交叠并合并释放,如图 7(h)所示。120 min 时实现约 98% 的释放面积,仅支撑臂边缘区域存在轻微粘连,如图 7(i)所示,为 3 种方案中最高释放效率。辅助开口的引入使腐蚀液到达悬臂梁底部的时间缩短 40%,同时通过对称分布平衡了薄膜应力,整个过程未观察到薄膜破裂或翘曲现象。

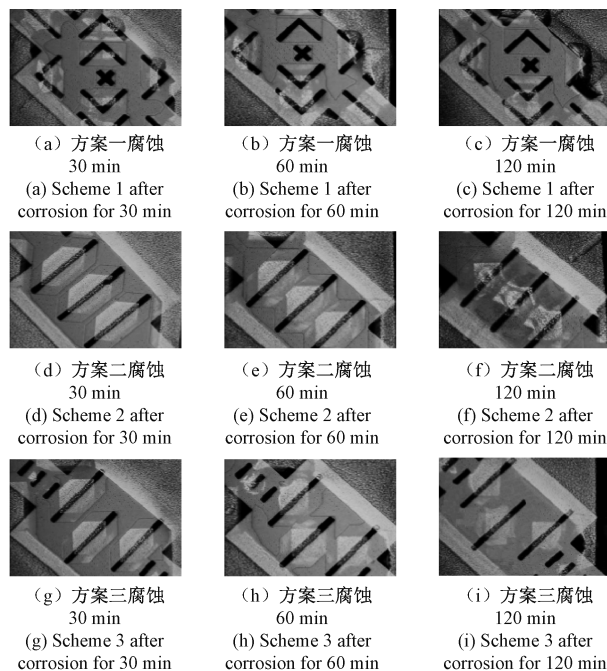


图 7 三种设计方案在 30 min、60 min、120 min 腐蚀后成品图

Fig. 7 Finished product images of three design schemes after corrosion for 30 min, 60 min, and 120 min

3.4 释放效率与结构稳定性的对比分析

1) 应力平衡是结构稳定的前提:方案一的低翘曲与方案三的低破裂,均得益于复合膜的应力补偿设计,验证了理论推导的应力阈值有效性。

2) 开口密度决定腐蚀效率:当 $\langle 100 \rangle$ 晶向开口覆盖吸收区面积 $> 80\%$ 时,释放面积可达 98% 以上,表明密集开口可有效缩短腐蚀路径。

3) 关键区域辅助开口的必要性:悬臂梁等支撑结构下方必须设置辅助开口,以解决腐蚀液“盲区”问题,该设计使释放时间较传统方法缩短 60%。

实验结论证实了“晶向匹配的狭缝状开口+应力均衡复合膜”设计的合理性。后续可进一步分析支撑臂内部的腐蚀残留,为阵列化器件设计提供更精准的参数依据。

4 应 用

本研究提出的 $\langle 100 \rangle$ 晶向开口快速释放工艺,为医疗

级非制冷红外探测器的工程化应用提供了关键技术支持。基于 3 种开口方案的优化设计,成功制备了 P/N 多晶硅热电堆传感器与非晶硅微测辐射热计单元两类核心探测器器件,其悬浮结构在高精度体温检测与生理参数监测中展现出显著优势。

在非接触体温检测领域,所制备的多晶硅热电堆传感器如图 8(a)所示,在 37℃ 标准黑体辐射下,测温精度达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (3σ),响应时间 $< 500\text{ ms}$,较传统背面腐蚀器件提升 40%,如图 8(b)所示。该性能得益于复合型开口设计带来的低热导特性,有效抑制了环境温度波动对探测信号的干扰。临床测试显示,基于该传感器的耳温计在 200 例人体测温中,与水银体温计的绝对误差均值 $< 0.08^\circ\text{C}$,符合 ISO80601-2-56 医疗设备标准。

非晶硅微测辐射热计单元如图 8(c)所示,通过优化吸收区开口布局,示波器截图如图 8(d)所示,将红外响应率提升至 50 kV/W ($8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段),噪声等效温差 (NETD) 降至 50 mK ,可清晰分辨 0.1°C 的体表温度差异。该特性使其不仅适用于额温筛查,还可扩展至皮肤血流分布监测,为糖尿病足早期病变诊断提供支持。实验验证,采用本工艺的悬浮结构成品率达 95% 以上,较传统牺牲层法提升 25%,显著降低了批量生产中的不良品损耗成本。

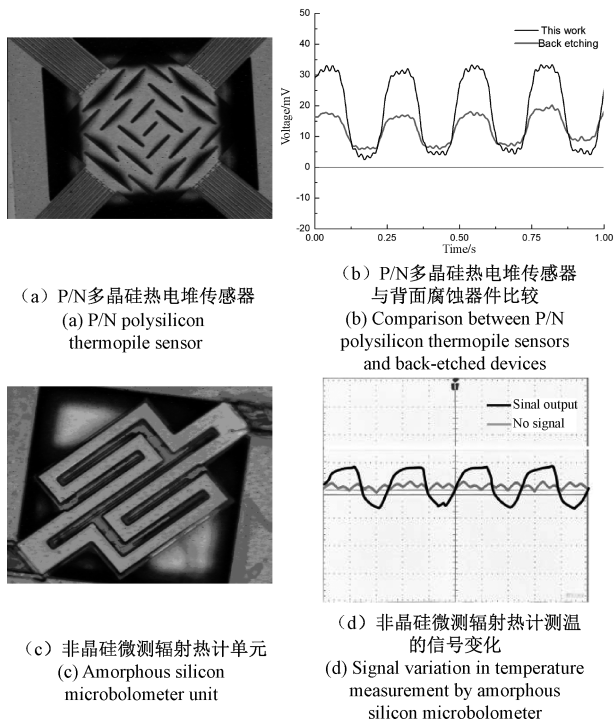


图 8 <100>晶向开口在非接触热探测单元的应用

Fig. 8 Application of <100> openings in non-contact thermal detection units

5 结 论

本研究针对医疗用非制冷热红外探测器的悬浮结构制

备需求,提出了基于<100>晶向硅片的正面开口快速湿法腐蚀工艺,通过理论设计、实验优化与应用验证,形成了完整的技术解决方案。研究设计了折线型、长条形及复合型 3 种开口结构,揭示了应力平衡、开口密度与关键区域辅助开口设计是影响结构性能的核心要素;应力补偿设计使复合膜实现低翘曲、80% 分布面积的密集开口对缩短腐蚀路径的显著作用;悬臂梁等支撑结构增设辅助开口使释放时间较传统方法缩短 60%。通过优化 KOH 溶液浓度至 30wt%、水浴温度 80°C 及 120 min 腐蚀时间,结合 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合膜的低至 -2.5 MPa 应力补偿设计,成功实现了释放面积达 98% 以上、无粘连的高质量悬浮结构,成品率提升至 95%,较传统方法缩短腐蚀时间 60%。

实验结果表明,复合型开口结构通过在悬臂梁等关键区域增设辅助开口,显著提升了腐蚀液渗透效率,热隔离性能较传统结构提升 35%。该工艺具有单面加工、CMOS 完全兼容的优势,为探测器与读出电路的集成提供了便利,所制备的热电堆与微测辐射热计单元在体温检测中表现出 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的高精度与快速响应特性,满足医疗级设备的严苛要求。

研究成果不仅为高性能悬浮结构的制备提供了“晶向设计—应力调控—腐蚀优化”的优化工艺流程,还为可穿戴健康监测设备的微型化、低成本化奠定了技术基础。未来研究将聚焦于大尺寸阵列结构的均匀性优化、长期可靠性测试及与柔性基底的集成,推动该技术从实验室研发向临床规模化应用转化。

参考文献

- [1] 杨君,袁俊,杨春丽,等. 超表面在微测辐射热计中的应用[J]. 红外技术, 2024, 46(1): 1-11.
YANG J, YUAN J, YANG CH L, et al. Application of metasurfaces in microbolometers [J]. Infrared Technology, 2024, 46(1): 1-11.
- [2] 闫勇刚,王耿,彭志勇,等. 红外焦平面阵列非均匀性校正性能联合评价[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 170-176.
YAN Y G, WANG G, PENG ZH Y, et al. Joint assessment of non-uniformity correction performance of infrared focal plane array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7): 170-176.
- [3] 任晶秋,钟攀,张琳,等. 人体红外测温枪的温度测量补偿研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 62-67.
REN J Q, ZHONG P, ZHANG L, et al. Research on temperature measurement compensation for human infrared thermometers [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 62-67.
- [4] HSU A L, HERRING P, GABOR N, et al. Graphene-based thermopile for thermal imaging

- applications [J]. Nano Letters, 2015, 15 (11): 7211-7216.
- [5] MELLON M T, JAKOSKY B M, KIEFFER H H, et al. High-resolution thermal inertia mapping from the mars global surveyor thermal emission spectrometer[J]. Icarus, 2015, 148(2): 437-455.
- [6] SCOTT E A, LEE H, NOGAN J N, et al. Suspended silicon nitride platforms for thermal sensing applications in the limit of minimized membrane thickness[J]. Microelectromechanical Systems, IEEE/ASME Journal of(J-MEMS), 2024, 33(4): 8.
- [7] GRIFFIN M J, ABERGEL A, ABREU A, et al. The Herschel-SPIRE instrument and its in-flight performance[J]. Astronomy & Astrophysics, 2017, 518(3): 383-416.
- [8] ZHANG H, JIA H, NI Z, et al. 1ppm-detectable hydrogen gas sensors by using highly sensitive P+/N + single-crystalline silicon thermopiles [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2023, 9(2):89-99.
- [9] SUN J, ZHU L, CHAI Y, et al. AlMn-Al dual TES bolometer development for CMB telescopes [J]. Experimental Astronomy, 2025, 59(3): 1-15.
- [10] LI S, ZHAI Y, DONG Y, et al. Suspended insulation structure design for infrared thermal detector [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2025, 34(1): 92-99.
- [11] BOURGAULT D, PAUL G, LATARGEZ C, et al. Thermal detector based on a suspended polyimide membrane for infrared radiation applications [J]. Applied Physics Letters, 2024, 125(2): 7.
- [12] AZBIL C. Infrared array sensor system for smart buildings[J]. Journal of The Society of Instrument and Control Engineers, 2022, 61(8): 611-612.
- [13] 冯涛,金伟其,司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态[J]. 红外技术, 2015, 37(3):177-184.
- FENG T, JIN W Q, SI J J. Uncooled infrared focal plane detectors and their technological development trends [J]. Infrared Technology, 2015, 37 (3): 177-184.
- [14] PHILIPSEN H G G, OZANAM F, ALLONGUE P, et al. Oxide formation and dissolution on silicon in KOH electrolyte: An in-situ infrared study[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2016,163(5):327-338.
- [15] NOVAK A V, SOKOLOV A M, RUMYANTSEV A V, et al. Investigation of the dependence of the silicon needle shape on the KOH solution concentration during anisotropic wet etching[J]. Semiconductors, 2023,57: 52-57.
- [16] ZENG S M, TANG CH G, HONG H, et al. A novel high-temperature pressure sensor based on graphene coated by Si_3N_4 [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(3):2008-2013.

作者简介

李波(通信作者),高级工程师,计量师,主要研究方向为医疗、理化、流量计量检测技术等。

E-mail:libo@sina.com